



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE DE
LOCALIZACIÓN EN TIEMPO REAL (RTL) EN PLATAFORMA
ANDROID QUE PERMITA IDENTIFICAR PIEZAS DE ARTE Y
BRINDAR UNA LOCALIZACIÓN INDOOR EN MUSEOS
UTILIZANDO TECNOLOGÍA BLUETOOTH**

PRESENTADA POR

MARCO ANTONIO NAJARRO QUISPE

WILER GEORGE NEYRA MEDINA

ASESOR

GUILLERMO LEOPOLDO KEMPER VÁSQUEZ

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

LIMA – PERÚ

2018



**Reconocimiento - No comercial – Compartir igual
CC BY-NC-SA**

Los autores permiten transformar (traducir, adaptar o compilar) a partir de esta obra con fines no comerciales, siempre y cuando se reconozca la autoría y las nuevas creaciones estén bajo una licencia con los mismos términos.

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



USMP
UNIVERSIDAD DE
SAN MARTÍN DE PORRES

FACULTAD DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE DE
LOCALIZACIÓN EN TIEMPO REAL (RTL) EN PLATAFORMA
ANDROID QUE PERMITA IDENTIFICAR PIEZAS DE ARTE Y
BRINDAR UNA LOCALIZACIÓN INDOOR EN MUSEOS
UTILIZANDO TECNOLOGÍA BLUETOOTH**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

PRESENTADO POR

NAJARRO QUISPE, MARCO ANTONIO

NEYRA MEDINA, WILER GEORGE

LIMA-PERÚ

2018

Dedicada a Dios por haberme dado fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida. A mis queridos padres Wiler y Olga que me apoyaron incondicionalmente para lograr mis metas. A mi querida hermana Sharon por su compañía que me brindo día a día de mi carrera universitaria. A mi familia por su apoyo permanente, con espíritu alentador.

Wiler George Neyra Medina

El presente proyecto lo dedico, en primer lugar, a Dios por darme la fortaleza en los momentos más complicados y por ser fuente de inspiración en todos los proyectos que me propongo. A mis padres por su sacrificio, amor, tolerancia, paciencia y por confiar en mí, es por ellos que he podido cumplir todas mis metas. A mis hermanos por su apoyo constante y amistad incondicional.

Marco Antonio Najarro Quispe

Agradecemos a nuestra querida Universidad de San Martín de Porres por brindarnos todos los conocimientos necesarios para culminar con éxito la presente Tesis y a la vez por ofrecernos las herramientas necesarias para continuar con futuras investigaciones relacionadas a nuestra carrera. A nuestros profesores por ser fuente de inspiración para ser profesionales altamente capacitados y poder aportar al desarrollo del Perú.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Situación problemática	1
1.2 Definición del problema	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Justificación	4
1.5 Viabilidad	5
1.6 Estado del arte	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	42
2.1 Materiales	42
2.2 Métodos	44
CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL PROYECTO	56
3.1 Especificaciones de diseño	56
3.2 Método de diseño	57
CAPÍTULO IV: PRUEBAS, RESULTADOS E INFORME ECONÓMICO	79
4.1 Datos de pruebas y resultados	80
4.2 Cuadro Económico de Presupuesto	95
CONCLUSIONES	96
RECOMENDACIONES	97
FUENTES DE INFORMACIÓN	98

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Visitantes nacionales a museos por año en el Perú.	2
Tabla 2 Visitantes nacionales a museos en el Perú.	5
Tabla 3 Comparación entre BLE y bluetooth clásico.	11
Tabla 4 Comparación de tecnologías inalámbricas.	15
Tabla 5 Comparación de métodos de pre procesamiento.	21
Tabla 6 Características de BLE Estimote.	43
Tabla 7 Valores típicos de “n”.	49
Tabla 8 Tabla de parámetros del método.	55
Tabla 9 Parámetros de la etapa de pre procesamiento.	60
Tabla 10 Parámetros de la etapa de procesamiento.	65
Tabla 11 Mediciones en las coordenadas (x, y = 120, 50).	81
Tabla 12 Mediciones en las coordenadas (x, y = 44, 150).	82
Tabla 13 Mediciones en las coordenadas (x, y = 196, 150).	83
Tabla 14 Parámetros de mediciones en las coordenadas (120, 50).	85
Tabla 15 Parámetros de mediciones en las coordenadas (44, 150).	86
Tabla 16 Parámetros de mediciones en las coordenadas (196, 150).	87
Tabla 17 Parámetros de mediciones en las coordenadas (120, 50).	89
Tabla 18 Parámetros de mediciones en las coordenadas (44, 150).	90
Tabla 19 Parámetros de mediciones en las coordenadas (196, 150).	91
Tabla 20 Mediciones en las coordenadas (x, y = 120, 50).	93
Tabla 21 Resultados del método de proximidad.	94
Tabla 22 Cuadro económico de presupuesto del proyecto.	95

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Distribución de canales en BLE.	12
Figura 2 Valores de potencia emitidos por el beacon BLE.	16
Figura 3 Módulo de respuesta en frecuencia del filtro.	20
Figura 4 Principio de la localización por trilateración.	24
Figura 5 Diagrama del sistema de detección con beacons.	26
Figura 6 Ilustración de método de localización por trilateración.	27
Figura 7 Diagrama de bloques para el posicionamiento.	28
Figura 8 Esquema del filtro ponderado.	29
Figura 9 Gráficas de modelos de atenuación.	31
Figura 10 Comparación de error del sistema.	31
Figura 11 Esquema del lugar de medición.	32
Figura 12 Resultados utilizando diferentes parámetros.	34
Figura 13 Gráfica de la ubicación por trilateración.	36
Figura 14 Adecuación de datos de la curva exponencial.	37
Figura 15 Comparación entre los métodos LIL y HIL.	38
Figura 16 Interfaz gráfica de la aplicación del MALI.	39
Figura 17 Interfaz gráfica de la aplicación TUPUY.	40
Figura 18 Visitante del museo Botero usando el audio guía.	41
Figura 19 Diagrama de bloques del proyecto.	44
Figura 20 Módulo de respuesta en frecuencia del filtro.	47
Figura 21 Principio de la localización por trilateración.	49
Figura 22 Diagrama del área de monitoreo.	53

Figura 23 RSSI a 1 metro de distancia de una baliza BLE.	58
Figura 24 RSSI a un 1.5 metros de distancia de una baliza BLE.	58
Figura 25 Señales medidas a 1 metro y a 1.5 metros traslapadas.	59
Figura 26 Señales de entrada y de salida del filtro para "M=20".	61
Figura 27 Matriz de distribución de balizas BLE.	63
Figura 28 Aplicación para el censado de beacons.	66
Figura 29 Demostración de la aplicación.	67
Figura 30 Diagrama de flujo de la aplicación final.	68
Figura 31 Primera etapa del diagrama de flujo.	69
Figura 32 Segunda etapa del diagrama de flujo.	70
Figura 33 Tercera etapa del diagrama de flujo.	71
Figura 34 Cuarta etapa del diagrama de flujo.	72
Figura 35 Interacción Aplicación-Servidor.	73
Figura 36 Clases de Mensajes.	74
Figura 37 Interfaz web de la base de datos.	75
Figura 38 Panel de control de la base de datos.	75
Figura 39 Archivos almacenados en la base de datos.	76
Figura 40 Ícono de la aplicación	76
Figura 41 Pantalla de inicio de la aplicación.	77
Figura 42 Diseño de la presentación final de la aplicación.	78
Figura 43 Escenario y enumeración de balizas BLE.	80
Figura 44 Variaciones de la posición estimada calculada.	84
Figura 45 Histograma de mediciones en las coordenadas (120, 50).	85
Figura 46 Histograma de mediciones en las coordenadas (44, 150).	86
Figura 47 Histograma de mediciones en las coordenadas (196, 150).	87
Figura 48 Distribución del escenario con obstáculos.	88
Figura 49 Histograma de mediciones en las coordenadas (120, 50).	89
Figura 50 Histograma de mediciones en las coordenadas (44, 150).	90
Figura 51 Histograma de mediciones en las coordenadas (196, 150).	91
Figura 52 División del escenario en áreas numeradas.	92
Figura 53 Áreas calculadas por el método de proximidad.	94

RESUMEN

En esta investigación se analiza la problemática que genera el sistema de guiado convencional en los distintos museos del Perú y se propone, mediante el uso de nuevas tecnologías de transmisión inalámbrica (*bluetooth*) dar una solución, así como mejorar el procedimiento de guiado comúnmente utilizado de manera más interactiva y eficaz.

El trabajo se desarrolló aplicando la reciente tecnología inalámbrica estándar en dispositivos móviles denominada *Bluetooth Low Energy*, mediante el desarrollo de una aplicación en lenguaje de programación Android para Smartphone, se permitió realizar un guiado personalizado y automatizado; además se proporcionó una localización en tiempo real en ambientes interiores.

Se logró así implementar el proyecto de manera satisfactoria en un ambiente real, además de cumplir con todos los parámetros fijados en los objetivos para un correcto funcionamiento.

Palabras clave: tecnologías de transmisión inalámbrica, *Bluetooth Low Energy*, localización en tiempo real.

ABSTRACT

This research analyzes the problems generated by the conventional guidance system in the different museums of Peru, and it is proposed, through the use of new wireless transmission technologies, to solve the problem, as well as improving the commonly used procedure in a more interactive and effective way.

The project was developed applying the current standard wireless technology in mobile devices called Bluetooth Low Energy, and through the development of an application in the Android programming language for Smartphone, personalized and automatic guidance was allowed and a real-time location in indoor environments was provided.

The project was implemented successfully in a real environment, furthermore to complying all the parameters set in the objectives for the proper operation.

Keywords: Wireless transmission technologies, Bluetooth Low Energy, Smartphone, real-time location.

INTRODUCCIÓN

La presente tesis pretende desarrollar un sistema de guía automático que tenga la capacidad de poder ser implementado en la mayor cantidad de museos existentes en el Perú, para que las personas puedan realizar un recorrido de manera independiente que les permita organizar y estructurar sus propias visitas, con el fin de mejorar los sistemas convencionales, ampliar la participación del público y promover la difusión de la cultura en el Perú.

Frecuentemente los museos que cuentan con sistemas de guiado automático, suelen brindar un equipo que contiene la información de un recorrido ya establecido que no permite dar una completa libertad a los usuarios para hacer los recorridos guiados dentro de las galerías, considerando además que normalmente dichos equipos solo detallan la información de las piezas de arte mediante audio.

El presente proyecto tendrá la capacidad de brindar la información de las piezas de arte en museos mediante audio y video, para lograr ello se requiere del desarrollo de modelamientos matemáticos y algoritmos de localización los cuales tienen base en diversos artículos e investigaciones previas. Antes de iniciar con el desarrollo del proyecto se determinan las especificaciones y parámetros de diseño. Considerando lo descrito anteriormente, se procede a programar en un *smartphone* todos los algoritmos desarrollados. El proyecto finalmente brindará un servicio completo de guiado con audio y video a los usuarios.

Se puede indicar que los museos en el Perú carecen de sistemas de guiado modernos que permitan una mayor atracción de los visitantes, actualmente estos museos tienen un sistema de guía en el que, uno o más profesionales encargados, brindan información de manera tradicional a un grupo de visitantes que se limitan a seguir un recorrido ya establecido a lo largo de la galería. Dichos recorridos suelen ser bastante monótonos y largos que muchas veces se traducen en el cansancio y baja atención de los visitantes. Esto conlleva a que el público en general no se sienta atraído por este tipo de galerías.

Finalmente, en el capítulo 1 se podrá apreciar el planteamiento del problema, los objetivos, las dificultades y limitaciones que se han encontrado en el desarrollo del proyecto, así como la descripción de las tecnologías y métodos que se utilizan en los sistemas de localización. En el capítulo 2 se muestra el marco teórico, los modelamientos matemáticos de filtros y de los mecanismos de trilateración utilizados. En el capítulo 3 se describen las especificaciones, métodos y parámetros de diseño, también se muestra el proceso para el desarrollo de la aplicación para dispositivos móviles. En el capítulo 4 se detallan las pruebas y resultados finales de los algoritmos empleados en el proyecto con la ayuda de tablas e histogramas, los cuales muestran que el proyecto cumple con las especificaciones de diseño establecidas. Finalizado el capítulo 4 se mencionan las recomendaciones y conclusiones de la presente Tesis.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

El Perú cuenta con más de 200 museos y dichas galerías reciben una cantidad considerable de visitantes al año, como se muestra en la Tabla 1, estos centros culturales no han innovado en el tema de guiado y aún cuentan con el sistema tradicional, el cual no es personalizado e interactivo utilizando a una persona para la orientación. Esto implica que los recorridos guiados sean siempre en grupos, en los que normalmente se brindan descripciones largas y poco claras debido al murmullo de las personas. Esto conlleva a que muchas veces los visitantes no puedan entender o escuchar al guía, presentando mucha incomodidad y pérdida de atención a las explicaciones y comentarios de las piezas en exposición. Estas piezas también cuentan con reseñas que describen sus características principales, muchas de las cuales son muy extensas y no muy visibles para algunas personas.

Tabla 1 Visitantes nacionales a museos por año en el Perú.

Departamento	2012	2013	2014
Total (número de personas)	1 759 877	1 863 390	1 830 468
Amazonas	26 299	32 436	37 362
Áncash	102 330	152 841	154 361
Apurímac	3 620	5 576	3 535
Arequipa	2 382	1 378	1 047
Ayacucho	48 451	50 629	67 403
Cajamarca	98 063	121 189	232 808
Cusco	228 179	224 491	127 484
Huancavelica	3 657	5 512	4 605
Huánuco	55 604	59 626	57 336
Ica	39 044	52 330	55 232
Junín	12 960	17 047	18 744
La Libertad	262 672	261 229	270 545
Lambayeque	322 051	325 343	289 128
Lima	432 059	411 958	373 588
Loreto	5 307	4 319	9 148
Moquegua	1 491	2 140	2 231
Pasco	2 519	10 872	194
Piura	21 208	28 454	27 152
Puno	29 698	35 261	35 386
San Martín	4 018	4 476	2 068
Tacna	1 914	3 976	2 942
Tumbes	2 465	2 275	3 394
Proyecto CARAL (PEZAC) 3/	53 886	50 032	54 775

Fuente: (Congreso de la República, 2017)

El Museo de la Inquisición y del Congreso es el museo más visitado del Perú, según la página web del Congreso dicho museo recibe en promedio más de 200,000 visitantes por año (Congreso de la República, 2017). De acuerdo a un ensayo realizado sobre este museo, se observa que los comentarios más comunes de los visitantes son (Museo De La Inquisición, 2013):

- Es atractivo cuando se realizan muestras de arte gratuitas.
- Falta de entrega por parte del guía.
- Poca explicación de lo expuesto.
- Existen espacios del establecimiento que no son usados
- Los recorridos tienden a ser incompletos, ya que no a todos se les hace el recorrido hasta la biblioteca.

Existen otros problemas comunes que encuentran los visitantes en los museos (Yaringaño, 2012).

- La necesidad de un pago adicional por el guía.
- Los recorridos guiados son en grupos muy grandes de personas.
- Descripciones largas de las piezas las cuales no son muy visibles.
- Los ambientes de los museos del Perú no son atractivos.

Según una encuesta, realizada por la Dirección Regional de Comercio Exterior y Turismo de San Martín acerca de la satisfacción del visitante en esta región, indica que sólo 4% de los encuestados visitó algún museo. De dicha información se puede indicar que un factor que influye en esta cifra, es que no hay un sistema atractivo para que las personas visiten estas galerías. Un panorama distinto se encuentra en Cusco, ya que solo El Museo Histórico de la región, recibe en promedio más de 5000 visitantes por mes (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2016).

1.2 Definición del problema

El principal inconveniente con los museos en el Perú es que su sistema de brindar información y principalmente de guiado, es muy antiguo, poco interactivo y nada personalizado, ofreciendo información por cada exposición de manera muy objetiva y omitiendo datos relevantes, además de no proporcionar una ubicación panorámica del ambiente en tiempo real que permita realizar un recorrido de manera eficiente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un software de localización en tiempo real para la identificación de piezas de arte en museos utilizando tecnología bluetooth.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Analizar y comparar la tecnología Bluetooth con las demás tecnologías inalámbricas para la adquisición de datos con un dispositivo móvil y justificar su elección.

- Establecer y diseñar un filtro digital para el procesamiento de datos en tiempo real obtenidos de la tecnología bluetooth.

- Modelar los algoritmos de localización en tiempo real para la ubicación utilizando tecnología bluetooth con menos de 2 metros de tolerancia de error.

- Diseñar e implementar un algoritmo de localización en tiempo real para tecnología bluetooth a ser embebido en plataforma Android.

- Desarrollar una interfaz para que el dispositivo móvil brinde información de manera interactiva al usuario.

1.4 Justificación

El sistema que se pretende desarrollar es un producto novedoso en el mercado nacional, ya que actualmente los museos en el Perú carecen de equipos portátiles que brinden una completa independencia al visitante de poder ir por los ambientes que le parezcan más interesantes dentro de un museo o galería.

Contar con un equipo innovador de guía automático favorece a que el visitante pueda diseñar su propio recorrido sin ninguna limitación de tiempo y

a su vez pueda retener la mayor cantidad de información útil, sin que haya la necesidad de contar con un guía profesional. Al utilizar dicho equipo, la información obtenida puede volver a ser reproducida por el visitante las veces que desee, ya que la descripción de cada una de las piezas de arte estará almacenada en la memoria del dispositivo.

Es un producto con un gran mercado potencial, debido a la cantidad de visitantes nacionales que reciben los museos al año en el Perú, como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2 Visitantes nacionales a museos en el Perú.

Año	2010	2011	2012	2013	2014
Número de visitantes	1735522	1529031	1759877	1863390	1830468

Fuente: Elaboración propia

1.5 Viabilidad

1.5.1. Viabilidad técnica

Los componentes a utilizar en el proyecto son fáciles de encontrar en el mercado, dispositivos como smartphones y balizas de bluetooth de baja energía (en adelante BLE por sus siglas en inglés).

Se tiene los conocimientos necesarios para la implementación del proyecto.

1.5.2. Viabilidad económica

Frecuentemente las personas cuentan con celulares con sistema operativo Android, por ello contar con este equipo para el proyecto no genera un costo adicional. Las balizas BLE tienen precios variables en el mercado, las cuales son fáciles de adquirir y sus precios son mucho menores si es que se compra una cantidad considerable.

1.5.3. Viabilidad social

El proyecto contribuye de manera directa en el conocimiento y en la difusión de la cultura. Permitiría que las personas realicen visitas a los museos de una manera más frecuente.

1.5.4. Viabilidad operativa

El proyecto está destinado a un mercado desatendido por las empresas y por el estado. El Perú es un país con abundante riqueza cultural, es un mercado consolidado con muchas oportunidades para la aceptación del proyecto.

1.6 Estado del arte

El sistema a diseñar debe funcionar en cualquier dispositivo que use como sistema operativo Android. En la actualidad la gran mayoría de personas utiliza smartphones para comunicarse, por ello, con el software que se desarrolla no se necesitará hardware adicional. Adicionalmente a ello, cabe indicar que la aplicación debe tener un alto grado de manejabilidad, es decir, esta aplicación tiene que ser fácil de usar por diversos usuarios.

Teniendo en cuenta estas características del proyecto, se ha realizado un análisis de los sistemas y tecnologías que se han desarrollado para la localización en interiores.

1.6.1. Tecnologías usadas para la localización:

a) GPS:

El sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) cubre toda la superficie terrestre y brinda una precisión en promedio de 10 metros. Para realizar el cálculo de la posición deseada, el dispositivo a localizar deberá tener visible al menos tres satélites los cuales envían señales periódicas junto con una señal de tiempo. Estas señales son recibidas por el dispositivo GPS y de acuerdo al retraso entre el tiempo de emisión de la señal

y el tiempo de recepción se logra calcular la distancia entre el punto a localizar con respecto a los 3 satélites.

Una vez conocidas las distancias, el GPS utiliza el método de trilateración para determinar la posición deseada. Como se indica, el GPS necesita tener línea de vista con los satélites, por ello se dificulta usar esta tecnología para una localización en interiores. Para el posicionamiento en exteriores se logra un buen resultado teniendo en cuenta el área de la superficie terrestre, ya que presenta una media de error de precisión de unos 5 ó 10 metros, sin embargo, para situaciones en el interior de edificios, esta media de error no sería de mucha ayuda ya que puede brindar una información errónea de la ubicación que se desea obtener. Entonces, teniendo en cuenta estas características, el uso del GPS no sería el más adecuado para el presente proyecto.

b) ZIG BEE:

Tecnología de redes inalámbricas de área personal (Nombrado ZIG BEE al conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica). Los sistemas basados en zigbee son útiles cuando no se dispone de ninguna infraestructura de red 802.11 ya desplegada debido al bajo costo de esta tecnología. Esto permite que una red con dispositivos zigbee sea más factible de implementar, esta red puede tener distintas topologías como “estrella”, “árbol”, “malla”, entre otros.

Está diseñado para diversas aplicaciones cuyos requisitos de consumo y costo no son muy elevados. Frecuentemente es utilizado para aplicaciones de domótica, aunque también esta tecnología es aplicada a sistemas de localización, para lo cual se analiza a la potencia con la que un dispositivo emite las señales comparándola con la potencia recibida por los dispositivos receptores, con ello se puede determinar la distancia entre emisor y receptor. Teóricamente y en condiciones ideales se podrían alcanzar precisiones en promedio de 2,6 metros de error. En un escenario real el uso de esta tecnología puede brindar una precisión en promedio a 5 metros de error, lo que puede ser de ayuda en algunas aplicaciones que no se requiera

de una gran precisión al momento de realizar la localización (Kaemarungsi, Ranron, & Pongsoon, 2013).

De acuerdo a lo indicado, un sistema zigbee requiere de implementación de hardware tanto para los dispositivos emisores como para los equipos receptores. Teniendo como referencia el presente proyecto a desarrollar, cabe indicar que esta tecnología no es compatible con smartphones, por lo que se requeriría desarrollar un nuevo equipo y brindarle a cada usuario. Adicionalmente se puede indicar que el dispositivo a desarrollar no brindaría una interacción dinámica al usuario si se compara con lo que puede obtener si el equipo a usar fuera un Smartphone.

c) RFID

Un sistema de identificación por radiofrecuencia (en adelante RFID por sus siglas en inglés) utiliza principalmente 2 dispositivos para la comunicación por radiofrecuencia los cuales son los lectores y las etiquetas (*Tag*). Al igual que otras tecnologías inalámbricas, la tecnología RFID también es utilizada en sistemas de localización. El lector RFID envía las señales de radio las cuales son recepcionadas por las tarjetas y estas a su vez brindan como respuesta señales con el identificador correspondiente (*id*) correspondiente a cada *tag*, cada una de estas identificaciones es única y la posición de las etiquetas debe ser conocida, con ello se puede determinar con exactitud de donde proviene la señal de respuesta reflejada.

RFID es una tecnología relativamente barata por lo que es ampliamente utilizada para diversas aplicaciones, además por sus características puede brindar una gran precisión al momento de realizar los métodos de localización.

Un sistema de localización en tiempo real (en adelante RTLS por sus siglas en inglés) puede utilizar RFID a través de Wi-Fi para rastrear la ubicación exacta y el movimiento de objetos o personas. Los puntos de acceso se comunican con las etiquetas RFID y otros dispositivos inalámbricos que utilizan la tecnología estándar 802.11. Todo el entorno se gestiona de manera

integral y es monitoreado mediante un controlador RTLS. Al utilizar este sistema se busca utilizar una serie de etiquetas RFID para calcular de forma rápida y sencilla la posición deseada, teniendo en cuenta que la posición de las etiquetas es conocida, se puede proceder a generar un mapa del escenario. Un gran número de etiquetas RFID puede ayudar a transmitir datos simultáneamente a través de Wi-Fi no sólo para identificar y rastrear activos, sino también para crear mapas de búsqueda, informes y alertas basadas en eventos, todo ello en tiempo real.

Si se desea utilizar esta tecnología para el presente proyecto se tendría que diseñar e implementar un nuevo equipo que contenga por lo menos un lector RFID, ya que actualmente la gran mayoría de dispositivos móviles no es compatible con esta tecnología. Desarrollar este hardware adicional implicaría un considerable costo extra, además este equipo no brindaría una interacción dinámica al usuario si se compara con la que obtendría si usara un smartphone o una tablet, equipos con los cuales está más familiarizado y los cuales brindan audio de calidad, imágenes, videos entre otros.

d) Estándar IEEE 802.11

El estándar IEEE 802.11 que especifica el funcionamiento de redes inalámbricas, frecuentemente llamado Wifi, sigue un modelo centralizado, esto quiere decir que la red consta de uno o varios puntos de acceso y varios clientes que están conectados a cada uno de estos puntos, los cuales emiten periódicamente una señal de identificación a los usuarios, con ello los dispositivos móviles pueden diferenciar a cada uno de los puntos de acceso y también medir la potencia que reciben de cada uno de ellos. Actualmente existen una gran cantidad de dispositivos con conectividad Wifi, lo que supone una clara facilidad de implementar sistemas de localización basados en esta tecnología ya que en la mayoría de escenarios hay una infraestructura de red wifi existente.

Para aplicar los métodos de localización en interiores frecuentemente se utiliza el parámetro de potencia de recepción de la señal (en adelante RSSI por sus siglas en inglés).

Tomando como referencia el proyecto actual que está orientado a la localización e identificación de piezas de arte en museos, la tecnología 802.11 no sería la más adecuada ya que la precisión que brinda complicaría la identificación y diferenciación, por ejemplo, de 2 piezas de arte separadas un metro y medio de distancia una de otra. Para lograr ello se tendría que usar un gran número de *access point*, lo cual supone un costo mucho mayor si es que se compara con el costo que implicaría si se utiliza a la tecnología bluetooth (Ruiz, 2009).

e) Bluetooth de bajo consumo

El estándar de comunicaciones inalámbricas denominado Bluetooth en su versión 4.0 ha sido desarrollado por Bluetooth *Special Interest Group* (en adelante SIG por sus siglas en inglés), el cual incluye al bluetooth clásico, bluetooth de alta velocidad y al bluetooth de bajo consumo (en adelante BLE por sus siglas en inglés), esta última como se indica es un subconjunto de bluetooth 4.0 y ha sido diseñado para transmitir poca información en tiempos de transmisión pequeños, debido a esto el consumo de energía es considerablemente muy bajo comparado con el bluetooth clásico. BLE no está desarrollado para mantener una conexión prolongada con otros dispositivos ni transmitir una gran cantidad de datos a alta velocidad, es por ello que está dirigido a aplicaciones de muy baja potencia, debido a esto el dispositivo BLE puede ser alimentado tan solo con una pila de botón.

A continuación, se nombrarán las principales características de la tecnología BLE:

- **Arquitectura de BLE**
 - **Capa física**

Esta capa se relaciona directamente con la manera en la que los dispositivos BLE transmiten y reciben datos.

Al igual que el bluetooth clásico, la tecnología BLE usa la banda de 2.4 GHz para la transmisión de las señales, de igual manera usa la modulación GFSK a 1 Mbps, aunque con índices de modulación diferentes. BLE tiene 40 canales y la separación entre estos canales es de 2 MHz mientras que el bluetooth clásico tiene 79 canales separados 1 Mhz uno de otro. Estas características hacen que ambas tecnologías sean incompatibles entre sí, por lo que no puede haber transferencia de datos entre ellas. Sin embargo, hay dispositivos que soportan ambas tecnologías, estos dispositivos son denominados Modo Dual. En la tabla 3 se puede observar la comparación entre estas 2 tecnologías.

Tabla 3 Comparación entre BLE y bluetooth clásico.

	BLE	Bluetooth clásico
Modulación	GFSK 0.45 to 0.55	GFSK 0.28 to 0.35
Tasa Mbit/S	1Mbit/s	1Mbit/s
Nº de canales	40	79
Separación	2 MHz	1 MHz

Fuente: Elaboración propia.

La transmisión se realiza en la banda de 2.4 GHz, en donde los 40 canales de transmisión usados en BLE están distribuidos desde 2402 MHz hasta 2480 Mhz y están numerados de 0 a 39. Los canales 37, 38 y 39 son usados solo para el envío de paquetes Anuncio, mientras que los demás canales son usados para el envío y recepción de datos durante la conexión. Los 3 canales de Anuncio están situados de tal manera que se eviten interferencias causadas por otras tecnologías que trabajan en la misma banda de frecuencia que, por ejemplo, IEE802 y ZigBee (Akyahad, 2016). En la figura 1 se muestra la distribución de canales.

Figura 1 Distribución de canales en BLE.



Fuente: (Akyahad, 2016)

- **Capa de enlace**

El funcionamiento de BLE se puede detallar en la capa de enlace de datos, esta capa gestiona las conexiones, controla el envío y la recepción de paquetes, entre otras funciones. Los estados en los que puede estar un dispositivo BLE son los siguientes:

- **En espera:**

Este estado se considera como un sistema dormido para ahorrar energía, ya que el dispositivo no está transmitiendo ni recibiendo datos.

- **Anuncio**

El dispositivo con el rol de periférico que está en este estado, envía paquetes de Anuncio en los canales 37, 38 o 39 dependiendo de la disponibilidad del canal. En este estado también escuchará las respuestas a los paquetes desde un dispositivo central. Se debe tener en cuenta que el intervalo de anuncio afecta directamente al consumo de energía.

- **Escaneado**

Este modo se usa para explorar dispositivos, implica escuchar a los paquetes de Anuncio que se envían a través de los canales respectivos.

- **Iniciación**

El dispositivo central pasa a este estado antes de pasar a estado de conexión. Este dispositivo central recibe los anuncios de los periféricos y va a empezar a transmitir los datos correctos cuando reciba el Anuncio del periférico deseado.

Para el dispositivo esclavo, el estado de Anuncio es el estado inicial en el cual se encuentra antes del estado de conexión. El estado conexión es el estado final en el que el dispositivo periférico (Slave) y el dispositivo central (Master) pueden intercambiar datos. El Anunciante es el dispositivo BLE que utiliza los canales de envío de advertencias para emitir datos, anunciar que es detectable y conectable, de la misma forma a un dispositivo en estado de escaneo se le denomina Escaneador y cuando se inicia una conexión es conocido como Iniciador.

Debido a la gran precisión para localización en interiores que brinda BLE, en la actualidad se está utilizando esta tecnología para enviar Anuncio personalizada a los usuarios dentro de un centro comercial o galería. La fácil implementación y el bajo consumo de energía de estos sistemas hace que esta tecnología sea la más adecuada para el presente proyecto, adicionalmente a ello, cabe mencionar que BLE es compatible con smartphones lo que supone una gran ventaja frente a otras tecnologías anteriormente mencionadas.

1.6.2. Conclusiones del análisis de las tecnologías usadas para localización:

a) GPS

Dentro del museo, el equipo GPS no tendría línea de vista con los satélites. Además, brinda poca precisión para localización en interiores y para el proyecto a desarrollar no permitiría la identificación de las piezas de arte.

b) Zigbee

Esta tecnología no es compatible con smartphones. Debido a las características de ZigBee se requeriría desarrollar un nuevo equipo y brindarle a cada usuario para que lo pueda usar dentro del museo. No daría la interacción adecuada dentro del museo. Existen otras tecnologías más precisas para interiores, como el bluetooth. El consumo de corriente es mucho mayor si se compara con el uso de BLE.

c) RFID

Se requiere desarrollar un nuevo equipo y no daría una interacción dinámica al usuario dentro del museo como si lo haría un smartphone o tablet.

d) Wi fi

No brinda la precisión necesaria para lo que se requiere en el proyecto, tampoco brindaría la identificación de la pieza de arte. Tiene un alto consumo de energía.

e) Bluetooth de baja energía

Es compatible con el sistema operativo libre Android, no requiere hardware adicional, son dispositivos pequeños y fáciles de instalar. Brinda una

gran precisión en interiores con los algoritmos adecuados, poco consumo de energía. Dependiendo del tipo de dispositivo bluetooth que emite las señales, se puede llegar a cubrir grandes áreas.

En la tabla 4 se detalla el resumen de la comparación entre las tecnologías inalámbricas descritas.

Tabla 4 Comparación de tecnologías inalámbricas.

Tecnología	Buen desempeño en interiores	Bajo consumo de energía.	Compatible con smartphones	Requiere hardware adicional
GPS	NO	NO	SI	NO
ZIGBEE	SI	SI	NO	SI
RFID	SI	SI	NO	SI
WI FI	SI	NO	SI	NO
BLE	SI	SI	SI	NO

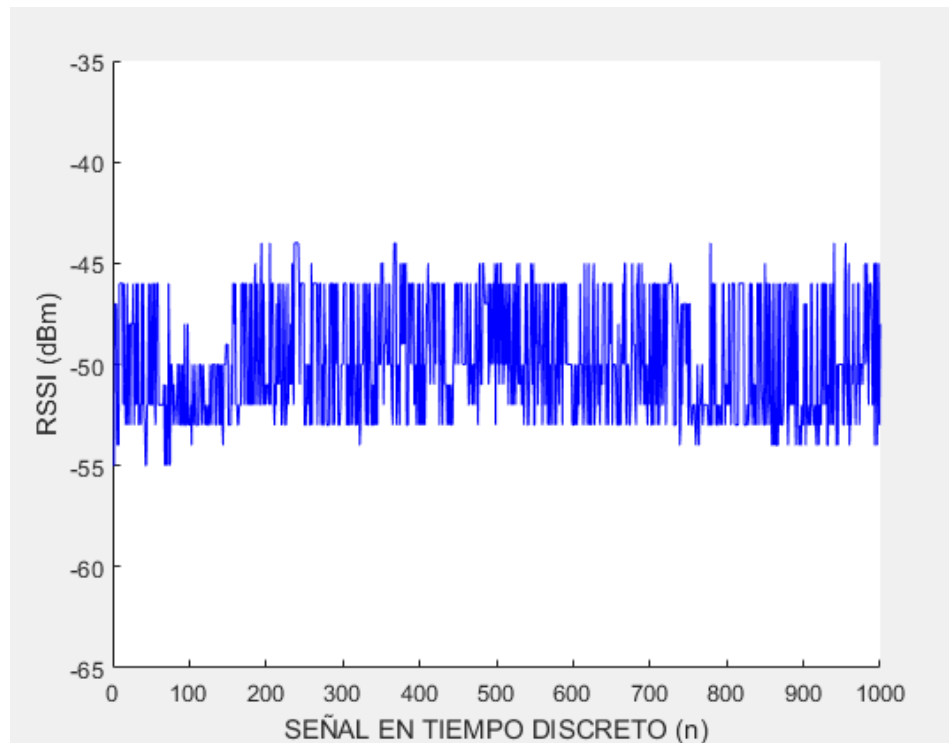
Fuente: Elaboración propia

1.6.3. Filtros digitales para la etapa de pre procesamiento

La lectura de los valores de RSSI enviados por cada uno de los *beacon*, presenta variaciones a pesar de que las medidas se realizan en un punto fijo y no se realizan movimientos. Esto se debe a que las señales pueden sufrir atenuaciones, reflexiones, difracciones, dispersiones, entre otros cambios. Sin embargo, a pesar de que existen estas variaciones, se puede verificar que las señales tienen una tendencia que se puede estimar en el tiempo, para lo cual se requiere que las señales de RSSI sean filtradas antes de aplicar los métodos de localización. En la figura 1.2 se puede observar el comportamiento de las señales de RSSI que han sido obtenidos en una posición estática a un metro de distancia del dispositivo BLE. El objetivo del filtro es de suavizar los cambios bruscos en las señales y reducir el ruido adherido a las señales. Es importante tener en cuenta que en un escenario

real los cambios de potencia recibida por el dispositivo móvil no van a variar en gran medida en lapsos de tiempo cortos.

Figura 2 Valores de potencia emitidos por el beacon BLE.



Fuente: Elaboración propia

a) Filtro de suavizamiento exponencial simple

Esta técnica toma valores medidos en una serie de tiempo y obtiene el promedio de estos dando un mayor peso a los datos más recientes y menor peso a los valores más antiguos. Para utilizar este método se debe elegir un coeficiente de suavizamiento que va en el rango de 0 a 1, el cual depende de los tipos de datos que se están analizando. La expresión matemática de este método está expresada en la ecuación 1.

$$Y_{(n+1)} = \alpha X_{(n)} + (\alpha - 1)Y_{(n)} \quad (1)$$

Donde:

$X(n)$: Es el valor discreto en la posición “n” a la entrada del filtro.

$Y(n+1)$: Valor pronosticado en la posición “n+1”.

$Y(n)$: Valor pronosticado en la posición “n”.

α : Factor de suavizamiento ($0 < \alpha < 1$)

Con este método se observa que se hace énfasis en el valor actual de la serie de muestras dándole un mayor peso. En un escenario donde existe una gran cantidad de muestras aleatorias cuyos valores no dependen ni guardan relación entre ellos, el uso de este filtro puede inducir a dar valores esperados que no mantengan una estimación real de la señal en el tiempo.

b) Transformada Wavelet

Este método es una herramienta matemática con la que se logra obtener una reducción del ruido en las señales. Aplicar la transformada wavelet en el proceso de filtrado del ruido, comprende tres partes, los cuales son el cálculo de los coeficientes wavelet, la umbralización y la reconstrucción de la señal a partir de los coeficientes umbralizados.

- Cálculo de los coeficientes wavelet

En esta etapa se aplica la transformada wavelet discreta (DWT) en distintos niveles de descomposición. DWT filtra la señal utilizando un filtro pasa bajos, utiliza un filtro pasa altos de descomposición y submuestra las subseñales de salida del filtro pasa bajos. Luego de repetir varias veces este proceso, se obtienen los coeficientes los cuales son los valores a las salidas de los filtros pasa bajos y pasa altos.

- Umbralización:

Luego de calcular los coeficientes de la señal, se realiza el proceso de umbralización, el cual consiste en seleccionar solo a los coeficientes que superen un umbral determinado para que sean considerados en la reconstrucción de la señal.

- **Reconstrucción de la señal:**

Este es un proceso inverso a la descomposición de la señal, el cual se divide en sobre muestreo y filtrado de los coeficientes utilizando filtros pasa bajos y pasa altos de reconstrucción. La reconstrucción de la señal se realiza con todos los coeficientes de los niveles de descomposición de salida de los filtros pasa altos y los coeficientes del último nivel de salida del filtro pasa bajos.

c) Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo que se basa en una serie de ecuaciones matemáticas que modelan el espacio de estados de un sistema para poder estimar el estado futuro del proceso que está desarrollando. Debido a que toma en cuenta la aleatoriedad del ruido, las ecuaciones utilizadas incluyen probabilidades estadísticas que son capaces de calcular la distribución de probabilidad a posteriori en tiempo real sobre la posición del terminal móvil en función de las acciones almacenadas. El filtro de Kalman es ampliamente usado en el procesamiento de señales y tiene numerosas aplicaciones en tecnología, en sistemas de control, en navegación, en control de naves espaciales, entre muchas más aplicaciones.

El principal inconveniente que presenta este filtro para el presente proyecto es la alta carga computacional que implica.

d) Filtro de media móvil

El filtro de media móvil frecuentemente se utiliza para la reducción del ruido aleatorio de una señal utilizando un algoritmo de baja carga computacional. Este método parte de la idea que cada valor de la serie de entrada es similar a sus adyacentes y que en la secuencia no hay cambios de forma inesperada o repentina. Este tipo de filtro brinda valores de salida que se obtienen luego de realizar el promedio de cierta cantidad de datos más recientes de una serie de tiempo. Al ejecutar la media se atenúan las variaciones bruscas de la señal, con esto se logra que la forma de la señal de

entrada se mantenga mientras se reduce significativamente el ruido aleatorio (Romero, 2015).

- **Análisis del filtro de media móvil en el dominio del tiempo**

De acuerdo a lo descrito, para un filtro de media móvil de largo M , el valor de salida actual es el promedio de las últimas M muestras de la entrada. La ecuación de este filtro digital se describe en la ecuación 2.

$$Y(n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X(n-k) \quad (2)$$

Donde:

M : Es el tamaño de la ventana para la toma de muestras.

$Y(n)$: Es el valor discreto en la posición “n” a la salida del filtro.

$X(n)$: Es el valor discreto en la posición “n” a la entrada del filtro.

Se verifica que con este método no se emplean cálculos ni algoritmos complejos, debido a ello la implementación de este filtro no va a requerir mucha carga computacional, por lo que el procesamiento y filtrado de las señales se va a realizar en poco tiempo, una característica muy importante para el presente proyecto ya que lo que se busca es brindar una localización en tiempo real.

- **Análisis del filtro de media móvil en el dominio de la frecuencia**

Al analizar la función matemática que describe al filtro de media móvil se puede entender que este método tiene un efecto de filtro pasa bajos ya que el suavizado de la señal de entrada se obtiene al promediar los valores discretos de dicha serie de datos. Es con este proceso que se atenúan las

variaciones bruscas de la señal. La ecuación 3 define la función matemática del módulo de respuesta en frecuencia de la función de transferencia del filtro de media móvil.

$$|H(e^{j\theta})| = \frac{\sin\left(\frac{\theta M}{2}\right)}{M \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3)$$

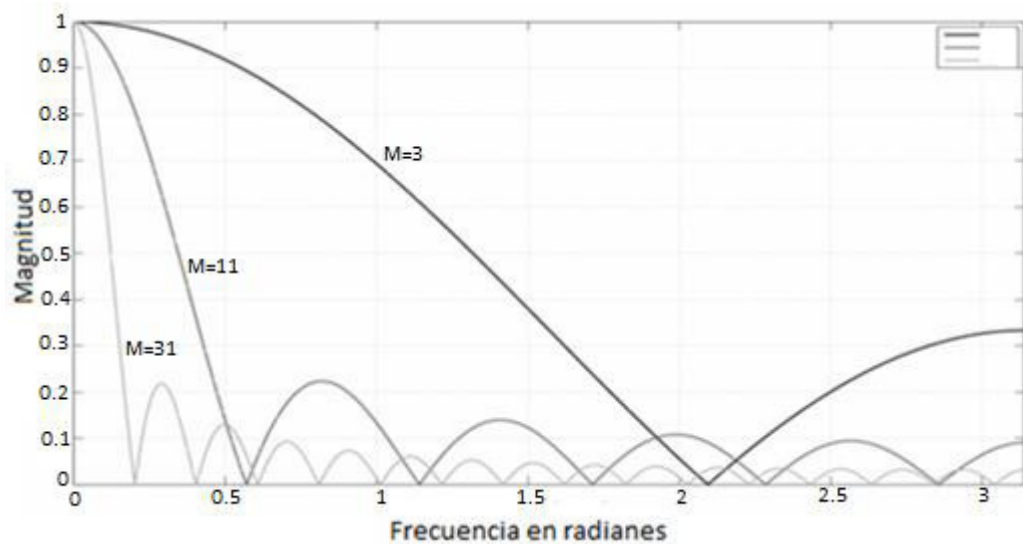
Donde:

M : Es el tamaño de la ventana para la toma de muestras.

θ : Es el valor de la fase en radianes.

Se verifica que la función de transferencia en la frecuencia se puede describir matemáticamente como la transformada de Fourier de un pulso rectangular. En la figura 3 se puede verificar el comportamiento del filtro para distintas cantidades de valores que se utilizan para el promedio.

Figura 3 Módulo de respuesta en frecuencia del filtro.



Fuente: (Lin, y otros, 2015).

En la figura 3 se puede verificar que este filtro es de tipo pasa bajos, pero no es recomendado para separar bandas de frecuencia debido a que tiene un roll off muy lento y la atenuación en la banda de rechazo no la más adecuada. Sin embargo, si se analiza en el dominio del tiempo se puede verificar que este filtro es capaz de suavizar a la señal de entrada manteniendo su forma original. A continuación, se presentan las principales características del filtro de media móvil:

- Conlleva poco tiempo en la ejecución del algoritmo.
- Reduce el ruido aleatorio manteniendo la forma de la señal de entrada.
- Poca carga computacional.
- Tiene características de filtro pasa bajos.
- Pobre capacidad para separar bandas de frecuencia.

En la tabla 5 se observa la comparación de los métodos de pre procesamiento analizados.

Tabla 5 Comparación de métodos de pre procesamiento.

Método de pre procesamiento	Alta carga computacional	Reduce el ruido aleatorio	Evita la influencia de valores atípicos	Algoritmo sencillo	Estima valores futuros
Filtro de suavizamiento exponencial simple	NO	SI	NO	SI	NO
Transformada Wavelet	SI	SI	SI	NO	NO
Filtro de Kalman	SI	SI	SI	NO	SI
Filtro de media móvil	NO	SI	NO	SI	NO

Fuente: Elaboración propia.

1.6.4. Métodos de localización

En esta sección se describe a las técnicas de posicionamiento utilizando a los valores obtenidos en las mediciones de RSSI, debido a que la localización basada en BLE con las lecturas de la potencia de la señal recibida es factible dentro de todas las condiciones y características que supone el presente proyecto.

a) Fingerprinting

La técnica de reconocimiento de patrones normalmente conocido como *fingerprinting*, es un método de posicionamiento que usa el valor de RSSI con el fin de estimar la posición de un dispositivo. Este método consiste en dividir el escenario en pequeñas áreas las cuales tienen sus respectivas coordenadas (X, Y), luego en cada una de estas áreas se realizan las mediciones de RSSI. Con estos valores medidos se genera una base de datos que contiene la información de los niveles de RSSI que le corresponden a cada una de las posiciones identificadas con sus respectivas coordenadas. Los cálculos que permiten la estimación de la localización utilizando *fingerprinting* son sencillos y cambian de acuerdo al método a emplear. En general, esta técnica de localización consiste en analizar a un vector de potencias que se recibe en una posición determinada y compararla con los vectores de potencias almacenados en la base de datos obtenida previamente. Al encontrar al vector cuyos valores de potencia son los más parecidos a los buscados, se obtiene la posición estimada dentro del escenario discretizado. Una de las ventajas de este método es que los cálculos son reducidos y de poca carga computacional, sin embargo, tomaría mucho tiempo obtener una base de datos adecuada que contenga las posiciones en el espacio y sus correspondientes valores de RSSI en el caso de que el área a discretizar sea de un tamaño considerable. Adicionalmente a ello cabe mencionar que los valores de potencia leídos varían en el tiempo debido a que las señales en un ambiente real presentan atenuaciones, reflexiones, difracciones, dispersiones, entre otros, los cuales varían dependiendo del número de personas en el área, las estructuras, la temperatura del aire, los objetos en el ambiente, entre otros factores (Díaz-Ambrona Tabernilla & Pérez Costoya, 2008).

b) Método basado en la proximidad

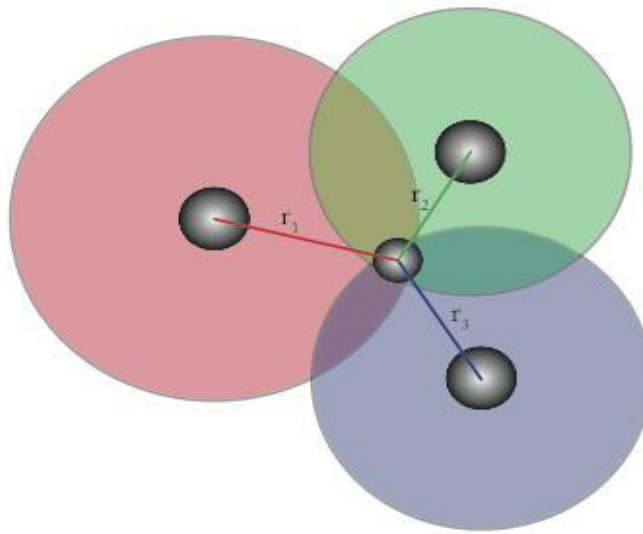
El método basado en la proximidad consiste en la localización de un dispositivo en función de su distancia a otro dispositivo o baliza. Esta técnica consiste en comparar los niveles de RSSI leídos y determinar al dispositivo más cercano analizando el nivel de potencia más alto. Las soluciones comerciales como Estimote o PayPal utilizan esta técnica para determinar la proximidad de un usuario y de acuerdo a ello enviar notificaciones con el fin de ofrecer información y orientar al cliente a realizar alguna compra.

Para el presente proyecto no es aplicable usar solo este método, ya que lo que se plantea es determinar una posición estimada del usuario dentro del museo y no solo brindar la proximidad a un punto determinado.

c) Trilateración

La trilateración es una técnica de localización que utiliza la geometría de triángulos para estimar posiciones determinadas en un escenario. La localización por este método se basa en que la radiación generada por las antenas es aproximadamente circular y se superponen unas con otras, logrando que existan puntos de intersección. Cada una de estas circunferencias tiene un radio estimado en base a la potencia recibida por el terminal a localizar, con ello se pueden obtener funciones matemáticas que se aproximen al comportamiento del patrón de radiación existente, basado en esto se busca intersectar estas ecuaciones para con ello obtener la estimación de la localización, este principio se puede observar en la figura 4 Las funciones matemáticas de las 3 esferas en un caso general se definen en las ecuaciones 5, 6 y 7.

Figura 4 Principio de la localización por trilateración.



Fuente: Elaboración propia.

$$r_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \quad (5)$$

$$r_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \quad (6)$$

$$r_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 \quad (7)$$

Donde:

r_1, r_2, r_3 : Son los radios correspondientes de las esferas.

x_1, y_1, z_1 : Son las coordenadas del centro de la esfera de radio " r_1 ".

x_2, y_2, z_2 : Son las coordenadas del centro de la esfera de radio " r_2 ".

x_3, y_3, z_3 : Son las coordenadas del centro de la esfera de radio " r_3 ".

Este método se puede aplicar en la mayoría de escenarios y, a diferencia del método de fingerprinting, en la triangulación no se necesita discretizar el área para realizar las mediciones correspondientes ni contar con

una base de datos con una gran cantidad de valores de las mediciones realizadas en cada área.

1.6.5. Artículos científicos del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE)

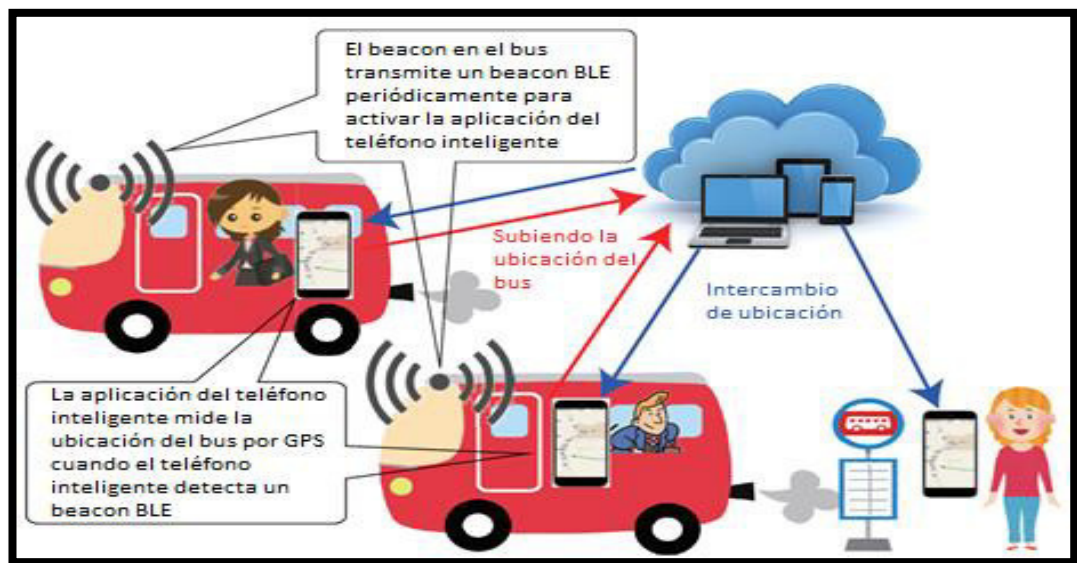
Actualmente las redes inalámbricas han ido evolucionando constantemente y captando la atención del público con dispositivos compatibles con WiFi, Bluetooth y la futura LiFi (*Light Fidelity*), conllevando de esta manera a desarrolladores e investigadores a plantear diferentes casos de uso. Uno de dichos casos es el posicionamiento en interiores utilizando bluetooth, del cual se realizará una exhaustiva investigación.

El estado del arte global, en lo que se refiere a posicionamiento en interiores utilizando bluetooth, en especial una de las últimas tecnologías denominada BLE (Bluetooth de baja energía), se basan en las técnicas utilizadas en tecnologías como GPS o Wifi, tales como son, trilateración, angularización, fingerprinting, etc. Aunque con ciertas derivadas especiales para el caso. A continuación, se mencionarán los principales trabajos realizados relacionados al tema de investigación.

a) Implementación de un Sistema Inconsciente de Detección de la Ubicación de Buses con dispositivos Smartphone y Beacon.

El proyecto publicado en la IEEE Conferencia Anual de Redes y Comunicaciones de Consumidores (CCNC por sus siglas en inglés), describe un método en el cual una aplicación en un dispositivo móvil (Tablet o celular) censa información de un dispositivo bluetooth asociado a un bus específico obteniendo la información de ubicación para luego ser cargada a un servidor y posteriormente ser compartida como se puede apreciar en la figura 5.

Figura 5 Diagrama del sistema de detección con beacons.



Fuente: (Tanaka & Naito, 2016)

El Proyecto presenta las siguientes etapas:

Los dispositivos BLE son ubicados en los diferentes buses de una organización, los dispositivos contienen un identificador de parámetros configurable denominado UUID (Identificador único universal), los cuales servirán de identificador para cada bus.

La aplicación móvil será instalada con el consentimiento de cada usuario, dicha aplicación se ejecutará en segundo plano y comenzará a censar la posición actual utilizando GPS y algún dispositivo BLE cercano y asociado a su base de datos.

En el momento que la aplicación censa una UUID conocida, Empezará a comunicarse con el servidor asociado, enviándole información de su ubicación actual.

Por último, los datos serán presentados a los usuarios finales en sus dispositivos móviles.

Si bien este método ofrece una solución eficiente con BLE, la utilización de GPS no sería apto para la implementación en interiores, al tener un error en metros muy amplio.

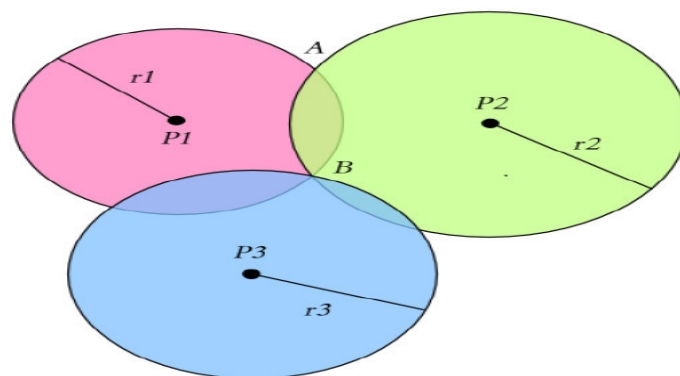
b) Posicionamiento en interiores en redes Bluetooth utilizando la aproximación por Fingerprinting y Trilateración.

Los autores Fazli Subhan, Azat Rozyyev, Halabi Hasbullah, Sheikh Tahir Bakhsh, en dicho proyecto, proponen un sistema de posicionamiento utilizando diferentes técnicas para obtener una aproximación más exacta de la posición espacial y minimizar los errores.

El método muestra la utilización de un Filtro de gradiente para remover la inconsistencia ocasionada por las condiciones del medio, luego del filtrado de datos se indica que experimentalmente se obtiene un error de **2.67 m**.

Para la localización por trilateración utiliza un mínimo de tres nodos con sus respectivas coordenadas y radios. En la figura 6 se muestra la posición de los nodos y el punto B a localizar.

Figura 6 Ilustración de método de localización por trilateración.



Fuente: (Subhan, Rozyyev, Hasbullah, & Tahir Bakhsh, 2011)

Es un tipo de localización que se basa en la técnica denominada Fingerprinting la cual consiste en dos fases una Off-line y otra On-line.

La primera fase consiste en elaborar una tabla con valores de RSSI medidos en puntos específicos del área que se quiere posicionar.

La segunda fase, la de monitoreo, obtiene y compara los valores de RSSI que el usuario está recibiendo en su posición actual y lo compara con los valores previamente medidos en su base de datos. El valor de K nos dice la cantidad de posiciones que se acercan a la posición real.

c) Posicionamiento en interiores basado en la potencia de BLE

En el trabajo publicado por la Universidad de Correos y Telecomunicaciones de Beijing, junto con el Instituto de Telecomunicaciones Samsung y el Instituto de tecnología informática de Beijing, se formula un procedimiento para el posicionamiento en interiores basados en la tecnología bluetooth de baja energía como se puede apreciar en la figura 7.

Figura 7 Diagrama de bloques para el posicionamiento.

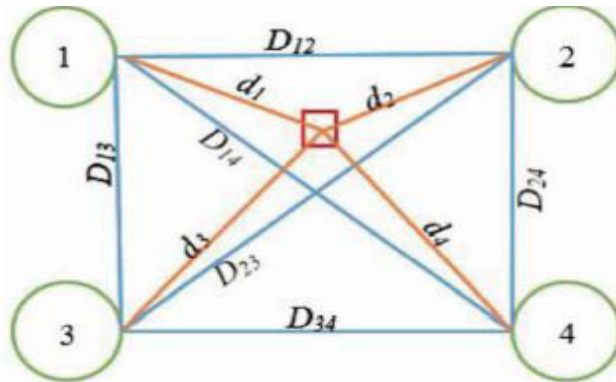


Fuente: (Zhujianyong, haiyong, zili, & zhaohui, 2014)

Como se puede apreciar en la figura 7, el método consiste en varias etapas, siendo la primera la de Recolección de datos, en la cual se analiza la relación entre el RSSI y el rango utilizando en el modelo de atenuación logarítmica

Dado a que la relación entre la distancia y la potencia no son lineales debido a las fluctuaciones en la transmisión del dispositivo, se propone utilizar un Filtro Gaussiano para el entrenamiento de la información recolectada. Luego para el posicionamiento y a fin de que se reduzca aún más el error de la toma de los datos, se utiliza el método de filtro ponderado basado en el teorema de trilateración, cuyo esquema se muestra en la figura 8.

Figura 8 Esquema del filtro ponderado.



Fuente: (Zhujianyong, haiyong, zili, & zhaohui, 2014)

En dicho filtro puede diferenciar los valores de distancia que se desvían del valor real, esto se obtiene con una etapa de entrenamiento de las distancias entre nodos \mathbf{D} ($D_{12}, D_{13}, D_{14}, D_{23}, D_{24}, D_{34}$), las distancias hacia el punto a ubicar \mathbf{d} (d_1, d_2, d_3, d_4) y un vector de pesos \mathbf{W} cuyo valor inicial será 0 y el que irá variando mientras se efectúe el proceso de entrenamiento.

Por último, se propone la utilización de los métodos denominados “Posicionamiento colaborativo basado en la expansión de la serie Taylor” y “Posicionamiento optimizado basado en la expansión de la serie Taylor”. Con el primero se obtiene la ubicación del objetivo utilizando las distancias “ \mathbf{d} ” procesadas anteriormente, Y con el segundo se optimiza dicha posición utilizando la expansión de Taylor de primer orden.

d) Diseño de un Sistema de Localización utilizando la RSSI para Entorno de Invernadero

En el trabajo publicado por la corporación Hindawi Publishing, el autor Lihong Xu propone una solución eficaz que consiste el filtrado de los datos para así obtener un posicionamiento más exacto.

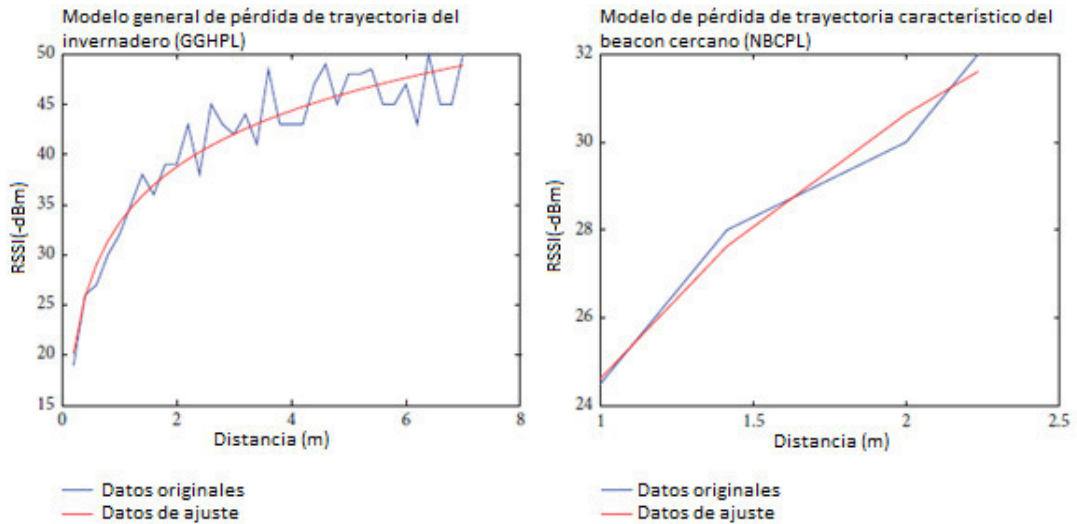
El proyecto con el objetivo de monitorizar cada uno de los cultivos de un invernadero, se propone el despliegue de una serie de sensores fijos y móviles que se encargarán de enviar información de los diferentes indicadores necesarios para la preservación de los cultivos. Los encargados de enviar dicha información serán los nodos móviles que constarán de los sensores necesarios para el requerimiento. Una vez desplegado el sistema, la posición de los nodos móviles será esencial para el monitoreo; sin embargo, existen diversos obstáculos que impiden el posicionamiento exacto tales como la estructura del ambiente, el efecto de multitrayecto de las señales, etc.

Dado que al haber diferentes nodos transmitiendo el principal inconveniente sería la interferencia de la señal por multitrayecto. Para el estudio de la señal se utiliza el modelo denominado “Modelo de pérdida de trayecto”, el cual es usado para ambientes cerrados.

Debido a las interferencias antes mencionadas, el autor propone la utilización de la técnica denominada “Filtro de mínimos cuadrados”, el cual calcula los parámetros de error. Experimentos comprueban su alta efectividad.

Para el posicionamiento se emplea el método “Ubicación del centroide del triángulo” el cual calcula la el área central de la posición de tres nodos modelando su área de transmisión como una circunferencia. Posteriormente para aumentar la efectividad, el área del invernadero es segmentada en regiones de acuerdo a la intensidad de potencias separadas por umbrales, para así poder localizar más fácilmente. En la figura 9 y 10, se muestran las gráficas del modelo de atenuación y los resultados obtenidos.

Figura 9 Gráficas de modelos de atenuación.



Fuente: (Xu , 2015)

Figura 10 Comparación de error del sistema.

Error (m)	Región 1	Región 2	Cerca del pilar
Sistema de posicionamiento original			
Error máximo	2.42	3.1	2.33
Error mínimo	2.02	1.65	2.02
Error promedio	2.21	2.45	2.19
Error del sistema		2.34	
Sistema de posicionamiento mejorado			
Error máximo	1.96	3.08	1.96
Error mínimo	1.47	1.88	1.47
Error promedio	1.75	2.33	1.68
Error del sistema		2.04	

Fuente: (Xu , 2015)

e) Sistema móvil de posicionamiento en interiores basado en la tecnología iBeacon

El instituto de Biomedicina Electrónica y Bioinformática junto con el Departamento de Ingeniería de Ciencias de la computación e informática Nacional de Taiwán; el Departamento de Medicina de Emergencia, y la Universidad Nacional de Hospital de Taiwán, Desarrollaron un método de posicionamiento utilizando iBeacons, analizando el área de transmisión de cada dispositivo.

El método plantea una solución al problema de ubicación de los pacientes de un hospital para así aumentar la eficiencia en una situación de emergencia. Dicha solución formula el desarrollo de una aplicación de celular para que por medio de esta y en conjunto con los dispositivos iBeacon desplegados, se pueda ubicar las posiciones de los pacientes de acuerdo al área en donde ellos se encuentren.

El sistema comienza con la calibración de los dispositivos iBeacon, posteriormente con la aplicación instalada y el usuario registrado, se procede al rastreo de todas las señales de diferentes iBeacons, el siguiente paso es la selección del dispositivo más cercano para luego ser cargada al servidor donde se encuentra la tabla información de las posiciones previamente cargada. Luego dicha información es transferida vía web hacia los dispositivos de monitoreo que serán utilizados por el personal médico.

La principal característica de este trabajo es la utilización de dos filtros para obtener el iBeacon más cercano empleando en primer lugar el filtro denominado “filtro promediador” que se refiere a las potencias medidas y promediadas en un tiempo determinado, y por último se utiliza un segundo filtro que escoge el iBeacon más cercano durante un intervalo.

Figura 11 Esquema del lugar de medición.



Fuente: (Lin, y otros, 2015)

Los resultados de las posiciones correctas medidas en porcentaje se pueden ver en figura 11, llegando la mayoría al 100%. Si bien es cierto que el error de localización obtenida según los datos es de 3 a 5 metros, es aceptable para dar solución al problema planteado.

f) Sistema de Posicionamiento de Interiores basado en Beacon Utilizando el Método de Localización denominado “aproximación de la localización por el centroide ponderado”.

EL artículo publicado este año por la universidad de Chosun de Korea, nos sugiere un método para la localización en interiores utilizando BLE.

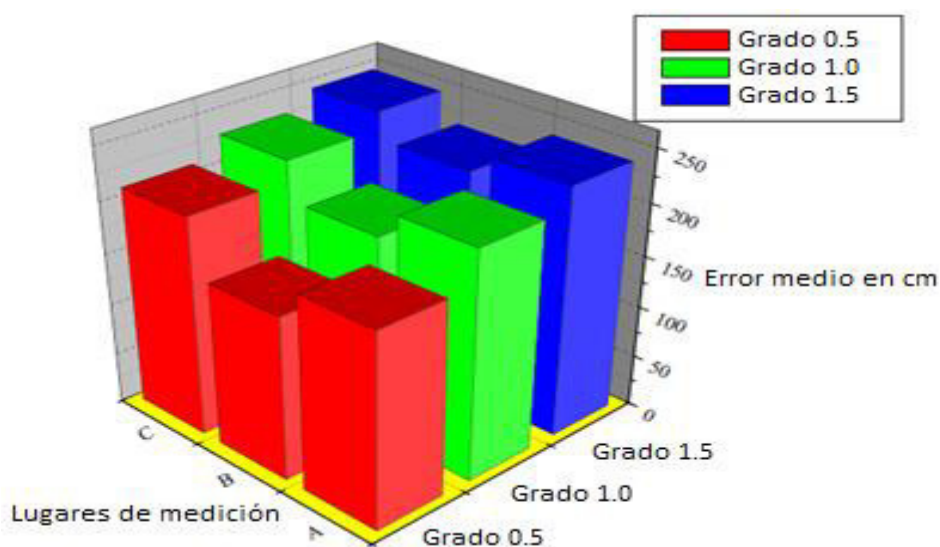
Como ya ha sido indicado la señal recibida varía constantemente, por lo que el artículo utiliza el filtro de Kalman en la etapa de pre procesamiento para tratar la intensidad de señal recibida y adecuándola de esta manera para que así prosiga con la siguiente etapa de conversión a distancia. En la etapa de conversión se emplea el modelo de atenuación logarítmica ideal para ambientes cerrados.

La principal variante de este método es la aplicación del método “aproximación de la localización por el centroide ponderado”, este método asigna un peso (W_i) a cada beacon escaneado en relación a la distancia. El algoritmo estima la posición del dispositivo utilizando el beacon más cercano el cual será el que tenga el mayor peso.

En este proyecto se utilizaron dispositivos BLE Estimote, los mismos que se utilizarán para el desarrollo de esta Tesis.

En la figura 12 se puede apreciar el error utilizando diferentes parámetros.

Figura 12 Resultados utilizando diferentes parámetros.



Fuente: (Subedi, Kwon, Shin, Hwang, & Pyun, 2016)

g) Localización por el método de fingerprinting utilizando Bluetooth de baja energía.

Los autores Ramsey Faragher and Robert Harle en su publicación, utilizan el método de fingerprinting para el posicionamiento utilizando dispositivos BLE, enfocándose principalmente en el radio-posicionamiento y haciendo una comparación con la tecnología WIFI.

El trabajo muestra un estudio de la intensidad de la potencia recibida en tiempo y distancia, haciendo comparaciones y mostrando los principales factores que lo afectan, tales como la interferencia por multitrayecto y desvanecimiento rápido (fast fades).

Para la construcción del Fingerprinting de las RSSI, se toman las mediciones de los dispositivos BLE en una ventana de tiempo cuya medida se toma de acuerdo a tres factores; La tasa de movimiento, la presencia de desvanecimientos rápidos, y la velocidad de anuncio de los beacons; todas estas medidas serán filtradas antes de ingresar a la base de datos del Fingerprinting para así tener las medidas más adecuadas. Los filtros que se propuestos son, filtro de media, mediana y máxima.

Como principal conclusión presentada afirma que el error de posicionamiento es inversamente proporcional al número de Beacons desplegado, esto nos dice que, si queremos tener una mejor posición, debemos desplegar la mayor cantidad de beacons posibles.

h) Modelo de predicción de pérdida de trayectoria mejorado para posicionamiento en interiores de corto alcance mediante bluetooth baja energía.

Subha Voswamatja y Sreedevi Srinivasan, en su trabajo desarrollado en Cisco Systems Pvt Ltd (Voswamatja & Srinivasan, 2015), nos hablan de un factor muy importante en el análisis y estimación de los factores que influyen en la localización denominado Path Loss.

Para modelar el sistema de localización en interiores utilizando dispositivos BLE, se utiliza la medida de potencia de dichos dispositivos cuyos parámetros están sujetas a diferentes cambios ocasionados principalmente por la interferencia con otras señales, el desvanecimiento de las mismas, las condiciones del medio y los diferentes obstáculos que se encuentran en cada ambiente interior. Por estudios anteriores realizados se sabe que existe una relación inversa entre la potencia y la distancia en ondas electromagnéticas. Sabiendo eso, con la diferencia entre la potencia de transmisión y la recibida, se puede hallar una relación para la distancia. Esta estimación es llamada Path Loss y el cual varía en cada ambiente. A continuación, la publicación nos menciona las principales ecuaciones utilizadas.

i) Localización en interiores basada en la intensidad de la señal bluetooth.

El trabajo realizado por la universidad de Tongji en China, nos muestra un sistema de posicionamiento basado en la intensidad de la señal de un dispositivo BLE utilizando la técnica de trilateración.

Para la aplicación del método se sugiere una separación entre Beacons de 6 metros y una trilateración censando los tres Beacons con máxima RSSI en tiempo real. El procedimiento propuesto se divide en dos

partes, el primero es la toma de datos (RSSI) y luego el procesamiento de los mismos.

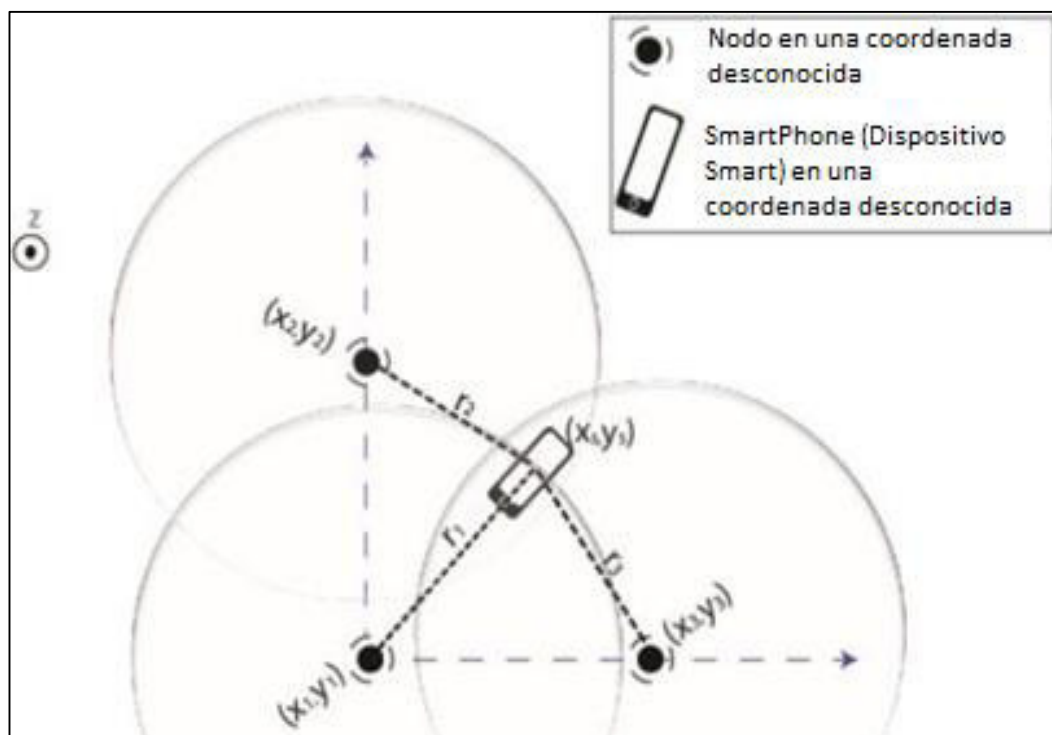
- **Medición de RSSI:**

Con la característica ya mencionada en trabajos anteriores en la cual nos presentaba que el decaimiento exponencial de la potencia estaba inversamente relacionado con la distancia, el autor utiliza el mismo modelo de atenuación.

- **Técnica de trilateración para estimar la posición:**

La técnica utiliza tres puntos (beacons) para localizar la posición deseada como se muestra en la figura 13.

Figura 13 Gráfica de la ubicación por trilateración.

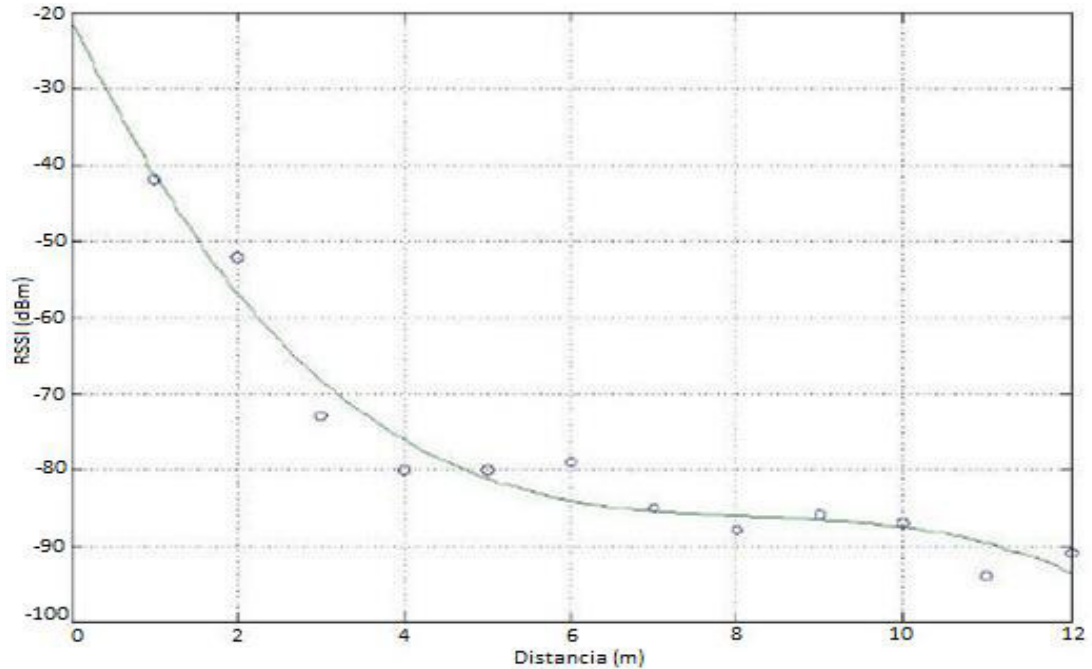


Fuente: (Er Rida, Liu, Jadi, Abdullah Algawhari, & Askourih, 2015)

Posteriormente en la etapa experimental se realiza una serie de mediciones de potencia y distancia de todos los puntos para luego ser adecuado mediante software. Para cada potencia de transmisión y distancia se saca el promedio de la RSSI en el receptor, luego utilizando Matlab se

identifica una curva exponencial que se ajusta a los datos. Los datos obtenidos y la curva estimada se muestran en la figura 14.

Figura 14 Adecuación de datos de la curva exponencial.

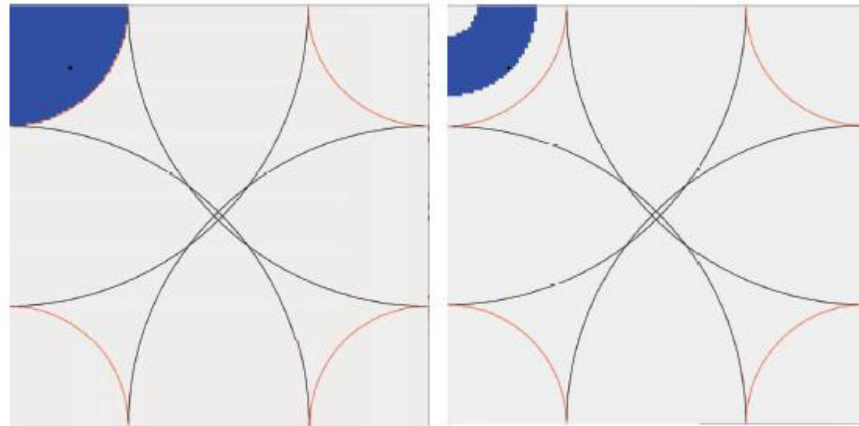


Fuente: (Er Rida, Liu, Jadi, Abdullah Algawhari, & Askourih, 2015)

j) Localización bluetooth en interiores basado en RSSI.

En este artículo se muestra 2 métodos de localización en interiores con tecnología bluetooth, LIL (Localización de interior de baja precisión) y HIL (Localización de interiores de alta precisión). Ambos métodos utilizan las medidas de RSSI para generar una pequeña región donde se garantiza que el usuario está ubicado. Se puede implementar los 2 métodos, ya que, si el HIL falla, el método LIL permitirá brindar una posición aproximada ya que tiene la ventaja de que las variaciones de RSSI no afectan al resultado final. Los resultados experimentales confirman que HIL es más precisa en la mayoría de escenarios debido a la mayor cantidad de datos que utiliza, brindando como resultado una precisión de 0 a 1 metro y usando el método LIL y una precisión de 0 a 2 metros. La figura 15 ilustra las regiones resultantes de ambos métodos en un escenario de ejemplo donde el resultado de la ubicación esta sombreada.

Figura 15 Comparación entre los métodos LIL y HIL.



Fuente: (Wang, Ye, Cheng, & Wang, 2015)

En general, los resultados presentados en los artículos presentados, muestran un intervalo de error entre 0 y 2.5 metros.

1.6.6. Soluciones existentes

a) Audioguía del Museo de Arte de Lima

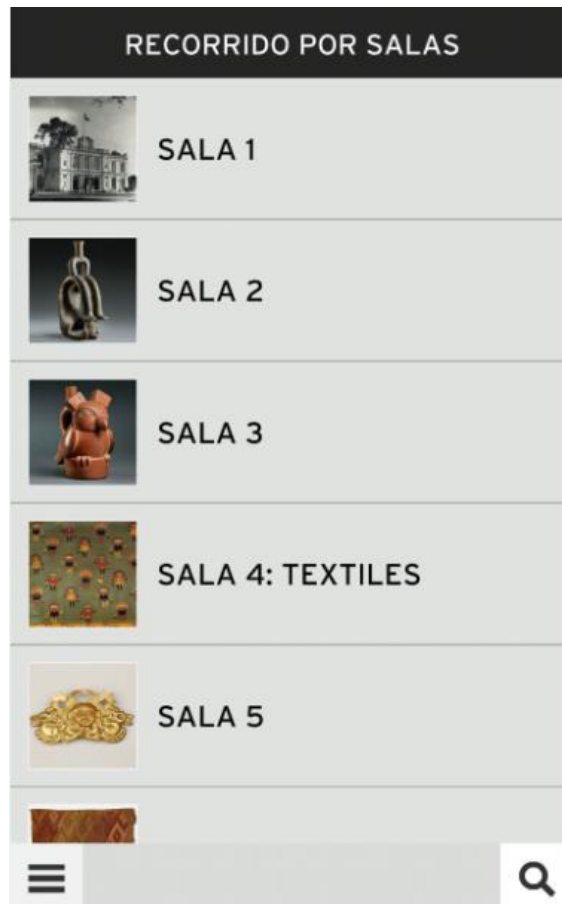
- Ventajas:

- Cuenta con audios exclusivos de los artistas comentando sus propias obras.
- La aplicación ha sido desarrollada para funcionar en sistemas operativos como iOS y Android.
- Cuenta con una interfaz gráfica dinámica y de fácil uso para los visitantes.

- Desventajas:

- Tiene la información separada por salas y se necesita elegir el audio o el video para poder oír las descripciones.
- El servicio no brinda información de todas las piezas de arte dentro del museo.
- No brinda la facilidad al usuario de obtener la información de alguna pieza de arte sin tener que buscar previamente la descripción en su dispositivo móvil.

Figura 16 Interfaz gráfica de la aplicación del MALI.



Fuente: (ARAKAKI, 2016)

b) Aplicación TUPUY

- Ventajas:

- Disponible para sistemas operativos iOS y Android.
- Es de fácil uso para los visitantes.
- Cuenta con audios que brindan información de los monumentos, museos y tours de ciudades más relevantes del mundo.

• Desventajas:

- No presenta videos y se tiene que elegir el audio dependiendo del área donde se encuentre el visitante.
- Se eligen las pistas de audio de manera manual.

Figura 17 Interfaz gráfica de la aplicación TUPUY.



Fuente: (Tupuy, 2016)

c) Audioguía del museo Botero – Colombia

- Ventajas

- Similar a un reproductor de música portátil.
- Cuenta con una pantalla donde se muestra la imagen y el nombre de la pieza de arte.
- Es de fácil uso para los visitantes.
- Desventajas:

- Se tienen que alquilar en el módulo ubicado en la entrada del museo.
- Se tienen que elegir los audios dependiendo del área donde se encuentre el visitante.

Figura 18 Visitante del museo Botero usando el audio guía.



Fuente: (Estereofonica , 2013)

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Introducción al capítulo II:

En el presente capítulo se determina y analiza el método a utilizar en el desarrollo del proyecto. También se describen los modelamientos matemáticos de los filtros de pre procesamiento y de procesamiento, por último, se detalla el método para obtener la localización requerida.

2.1. Materiales

Los materiales necesarios para la implementación y funcionamiento del proyecto de tesis se indican a continuación:

2.1.1. Seis (06) dispositivos BLE

Para el presente proyecto se utilizaron dispositivos de la marca Estimote, cuyas principales características se muestran a en la tabla 6.

Tabla 6 Características de BLE Estimote.

Número de modelo	<i>Estimote model REV.F2.3 Radio Beacon.</i>
Rango de frecuencia	2400 MHz to 2483.5 MHz
Nº de canales preestablecidos conmutables	40
Número de canales de voz / datos / TV	40 canales de información (Incluye tres canales de anuncio)
Canal de separación Tx-Rx	2 MHz
Separación de canal adyacente	2 MHz
Ancho de banda de emisión	500 KHz
Tipo de modulación requerida	GFSK
Potencia de salida	4 dBm
Sensibilidad	-93 dBm
Memoria Flash	256 kB

Fuente: Catalogo Estimote Inc.

2.1.2. Un (01) dispositivo smart móvil,

Que integre principalmente con bluetooth 4.0 y sistema operativo Android 4.3 Jelly Bean.

2.1.3. SOFTWARE MATLAB

Versión R2009a o posterior.

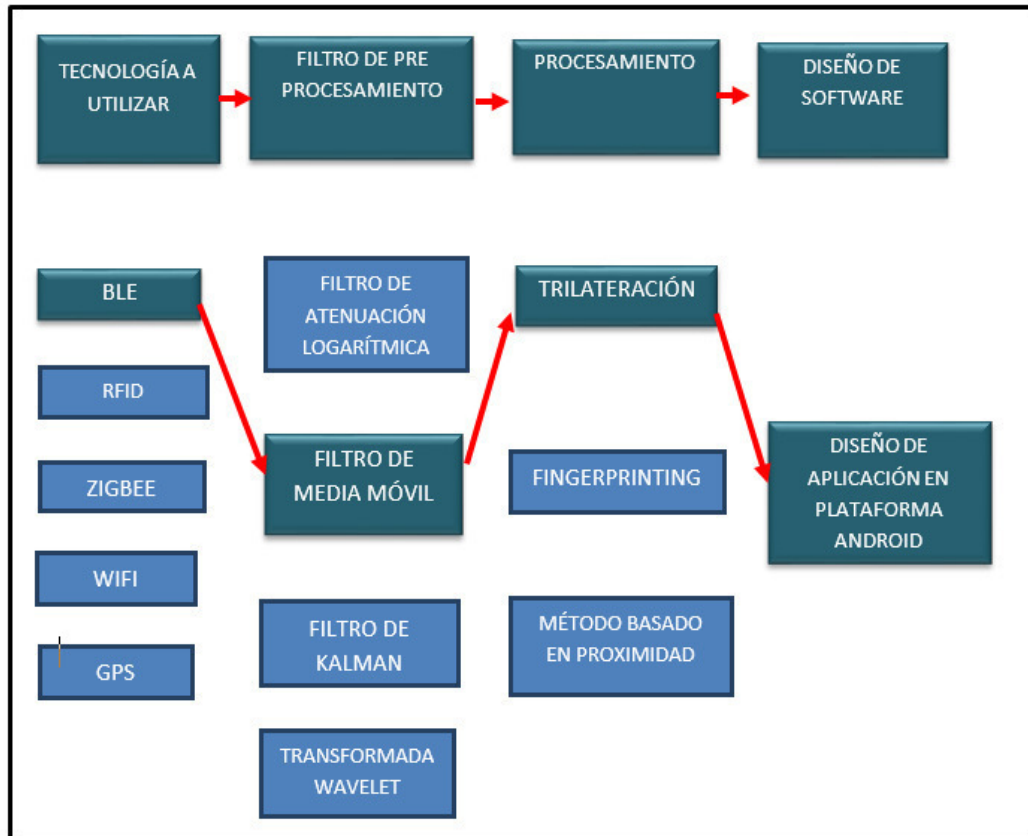
2.1.4. Software android studio

Versión 2.2.0.12.

2.2. Métodos

En la figura 19 se puede observar el diagrama de bloques que se ha seguido en el desarrollo del proyecto.

Figura 19 Diagrama de bloques del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.1. Modelamiento matemático del filtro de pre procesamiento

d) Filtro de media móvil

El filtro de media móvil promedia valores discretos de la señal de entrada y con ello reduce el ruido aleatorio manteniendo la forma original de la señal.

- **Análisis del filtro de media móvil en el dominio del tiempo**

De acuerdo a lo descrito anteriormente, para un filtro de media móvil de largo M , el valor de salida actual es el promedio de las últimas M

muestras de la entrada. Las funciones matemáticas que definen a este filtro están descritas en las ecuaciones 8, 9 y 10.

Función matemática del filtro de media móvil:

$$Y_{(n)} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X_{(n-k)} \quad (8)$$

Donde:

M: Es el tamaño de la ventana para la toma de muestras.

Y(n): Es el valor discreto en la posición "n" a la salida del filtro.

X(n): Es el valor discreto en la posición "n" a la entrada del filtro.

Función matemática de la respuesta al impulso $h_{(n)}$:

$$(h * X)_{(n)} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h_{(k)} X_{(n-k)} \quad (9)$$

Ecuación 2.2. Convolución de la señal de entrada con la respuesta al impulso del filtro.

Donde:

$h_{(k)}$: Es la respuesta impulsiva del filtro.

Para el filtro de media móvil se puede verificar que la respuesta al impulso se puede definir de acuerdo a la ecuación 2.3.

$$h_{ma}[n] = \begin{cases} \frac{1}{M}, & \text{si } n = 0 \dots M - 1 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (10)$$

- **Análisis del filtro de media móvil en el dominio de la frecuencia**

Para obtener la respuesta en frecuencia, se aplica la transformada discreta de Fourier:

$$H(e^{j\theta}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h[n]e^{-j\theta n} = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} e^{-j\theta n} \quad (11)$$

Donde:

$h(n)$: Es la respuesta impulsiva del filtro.

θ : Es el valor de la fase en radianes.

M : Es el tamaño de la ventana para la toma de muestras.

Considerando que la suma de los primeros M términos de una serie geométrica es:

$$\sum_{n=0}^{M-1} r^n = \frac{1 - r^M}{1 - r} \quad (12)$$

La transformada discreta de Fourier brinda:

$$H(e^{j\theta}) = \frac{1}{M} \frac{1 - e^{-j\theta M}}{1 - e^{-j\theta}} = \frac{1}{M} \frac{e^{-j\theta M/2} e^{j\theta M/2} - e^{-j\theta M/2}}{e^{-j\theta/2} e^{j\theta/2} - e^{-j\theta/2}} \quad (13)$$

La respuesta en frecuencia del filtro de media móvil:

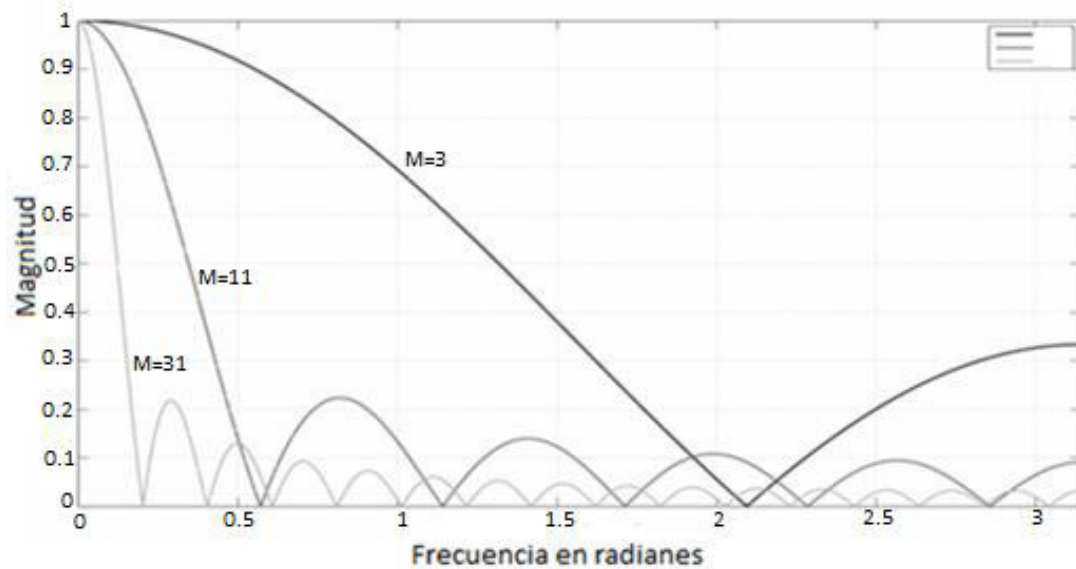
$$H(e^{j\theta}) = e^{-j\theta(M-1)/2} \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{\theta M}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (14)$$

Respuesta en amplitud del filtro de media móvil:

$$|H(e^{j\theta})| = \frac{\sin(\theta M/2)}{M \sin(\theta/2)} \quad (15)$$

Se verifica que la función de transferencia en la frecuencia se puede describir matemáticamente como la transformada de Fourier de un pulso rectangular. En la figura 20 se puede verificar el comportamiento del filtro para distintas cantidades de valores que se utilizan para el promedio.

Figura 20 Módulo de respuesta en frecuencia del filtro.



Fuente: (Lin, y otros, 2015).

En la figura 19 se puede verificar que este filtro es de tipo pasa bajos, pero no es recomendado para separar bandas de frecuencia debido a que tiene un roll off muy lento y la atenuación en la banda de rechazo no la más adecuada. Sin embargo, si se analiza en el dominio del tiempo se puede verificar que este filtro es capaz de suavizar a la señal de entrada manteniendo su forma original.

Conclusiones del análisis del filtro de media móvil:

- Conlleva poco tiempo en la ejecución del algoritmo.
- Reduce el ruido aleatorio manteniendo la forma de la señal de entrada.
- Poca carga computacional.

- Tiene características de filtro pasa bajos.
- Pobre capacidad para separar bandas de frecuencia.
- La amplitud del ruido se reduce en proporción aproximada a la raíz cuadrada de “M”.

2.2.2. Modelamiento matemático de la transformación de potencia en distancia.

Los valores de RSSI leídos de cada una de las balizas BLE, presenta variaciones a pesar de que las mediciones se realizan en un punto fijo y no se realizan movimientos. Esto se debe a que las señales pueden sufrir atenuaciones, reflexiones, difracciones, dispersiones, entre otros cambios. Es por ello que para obtener una relación de potencia a distancia adecuado se utiliza el modelo log-normal el cual se adapta a la propagación en interiores debido a que cuenta con 2 parámetros que dependen del escenario, los cuales son “n” que modelan los problemas de multitrayecto y atenuación el cual es una variable aleatoria “Xg”. La función matemática que define este método está descrita en la ecuación 16 en la que se despeja el valor de la distancia “d” para finalmente obtener la ecuación 17.

$$RSSI = RSSI_0 + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_g \quad (16)$$

$$d = d_0 \cdot 10^{\left(\frac{RSSI_0 - RSSI - X_g}{10 \cdot n} \right)} \quad (17)$$

Donde:

RSSI: Es el valor de RSSI medido a la distancia d.

d: Es la distancia variable desde donde se realiza las mediciones de RSSI.

RSSI₀: Es el valor de RSSI medido a la distancia d₀.

d_0 : Es la distancia conocida desde donde se realiza las mediciones de RSSI.

n : Parámetro de pérdida por multitrayecto.

X_g : Es la desviación estándar.

Como se ha indicado, el parámetro “ n ” depende del escenario, en la tabla 7 se muestran los valores típicos aproximados de “ n ” en distintos ambientes.

Tabla 7 Valores típicos de “ n ”.

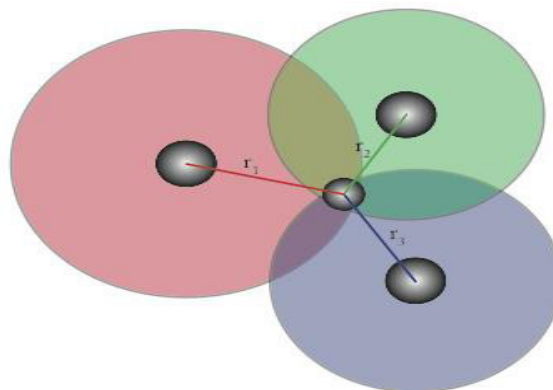
Ambiente en interiores	n
Espacio libre	2
Área urbana	2.7 a 3.5
Estructura con obstrucciones	4 a 6
Oficina	2 a 3

Fuente: Elaboración propia.

2.2.3. Modelamiento matemático de la localización en tiempo real

La trilateración es una técnica de localización que estima la posición deseada intersectando las ecuaciones de 3 esferas, como se puede observar en la figura 20.

Figura 21 Principio de la localización por trilateración.



Fuente: Elaboración propia.

-Para el análisis del presente proyecto, se determina que todas las esferas están ubicadas a la misma altura donde el plano Z es cero, por lo que el desarrollo del modelamiento matemático se va a realizar en un plano bidimensional. Las funciones matemáticas de las 3 circunferencias a nivel general se definen en las ecuaciones 18, 19 y 20.

$$r_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \quad (18)$$

$$r_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \quad (19)$$

$$r_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \quad (20)$$

Donde:

r_1, r_2, r_3 : Son los radios correspondientes de las circunferencias.

x_1, y_1 : Son las coordenadas del centro de la circunferencia de radio " r_1 ".

x_2, y_2 : Son las coordenadas del centro de la circunferencia de radio " r_2 ".

x_3, y_3 : Son las coordenadas del centro de la circunferencia de radio " r_3 ".

Para hallar el punto donde se intersectan las 3 circunferencias, se procede a desarrollar las 3 funciones matemáticas de las circunferencias, obteniendo las ecuaciones 21, 22 y 23.

$$r_1^2 = x^2 - 2xx_1 + x_1^2 + y^2 - 2yy_1 + y_1^2 \quad (21)$$

$$r_2^2 = x^2 - 2xx_2 + x_2^2 + y^2 - 2yy_2 + y_2^2 \quad (22)$$

$$r_3^2 = x^2 - 2xx_3 + x_3^2 + y^2 - 2yy_3 + y_3^2 \quad (23)$$

Se procede a restar la ecuación 21 con la ecuación 22. Obteniendo la ecuación 24.

$$r_1^2 - r_2^2 = 2x(x_2 - x_1) + x_1^2 - x_2^2 + 2y(y_2 - y_1) + y_1^2 - y_2^2 \quad (24)$$

Se despeja el valor de "X" como se verifica en la ecuación 25.

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2}{2(x_2 - x_1)} - \frac{2y(y_2 - y_1)}{2(x_2 - x_1)} \quad (25)$$

Se verifica que la variable "X" aún depende de la variable "Y", por lo que se requiere otra función matemática en donde se despeje "X". Se procede a restar las ecuaciones de la circunferencia 1 con la circunferencia 3, de manera análoga al primer caso se logra despejar a la variable "X", como se puede observar en la ecuación 26.

$$x = \frac{r_1^2 - r_3^2 - x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2}{2(x_3 - x_1)} - \frac{2y(y_3 - y_1)}{2(x_3 - x_1)} \quad (26)$$

Se puede observar que al despejar la variable "X" en ambos casos, la variable "Y" aún está presente, para proceder a despejar dicha variable se igualan las ecuaciones 25 y 26, el resultado se observa en la ecuación 27.

$$y = \frac{\left[\left(\frac{r_1^2 - r_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2}{2(x_2 - x_1)} \right) - \left(\frac{r_1^2 - r_3^2 - x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2}{2(x_3 - x_1)} \right) \right]}{\left[\frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} - \frac{(y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)} \right]} \quad (27)$$

Reemplazando el valor de “Y” en la ecuación 25. Se obtiene que el valor de “X” se puede definir de acuerdo a la ecuación 28, donde el valor de “Y” ya ha sido calculado y ahora es un valor constante.

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2}{2(x_2 - x_1)} - \frac{2y(y_2 - y_1)}{2(x_2 - x_1)} \quad (28)$$

2.2.4. Método de selección del beacon

El método basado en la selección del Beacon, es una técnica desarrollada para la localización en interiores utilizando una aplicación móvil junto a dispositivos beacon con la tecnología BLE. La técnica utiliza la intensidad de la señal recibida (RSSI) de un despliegue de beacon para determinar el área de ubicación actual del dispositivo móvil.

El método se divide en tres partes principales:

- **Despliegue de Beacons.**

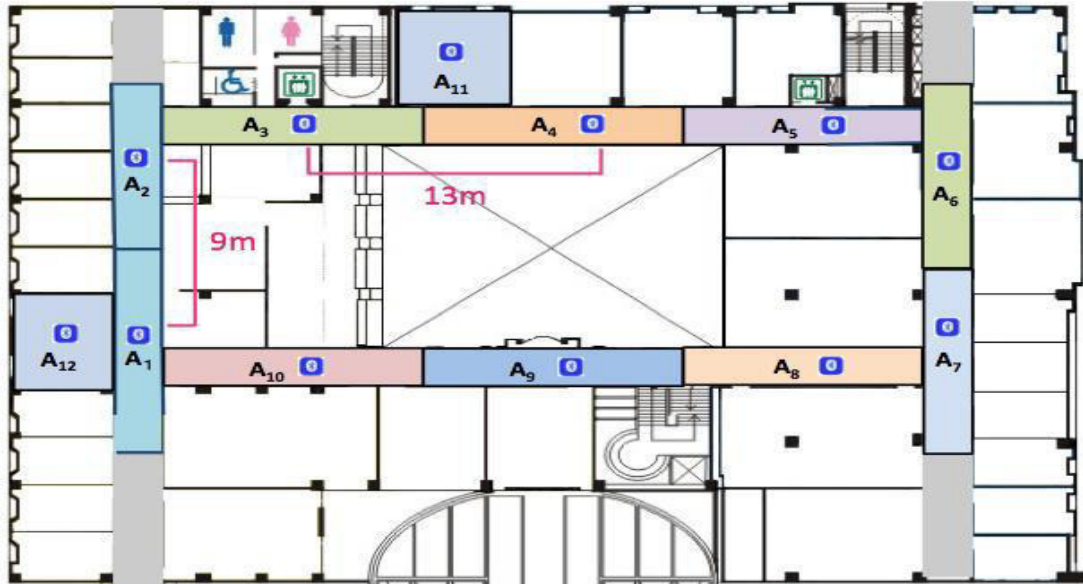
Esta parte es la de mayor importancia a la hora de la implementación ya que con la ubicación de los dispositivos en los lugares elegidos, nos mapea las ubicaciones de las áreas de interés a monitorizar.

En primer lugar, se sugiere tener un diagrama del área de monitoreo, teniendo ubicado claramente las sub-zonas (A_i) de interés donde serán desplegados los Beacons. Dado que será un posicionamiento en dos dimensiones (2D) el método recomienda tener una vista superior (TOP) del área total para así poder dar una presentación adecuada en la aplicación final.

En la parte de despliegue, los beacon son ubicados en cada sub-área donde se requiere obtener la posición. Cada beacon deberá estar ubicado en la parte central de la sub-área, para tener una separación máxima entre nodos (Beacons) dado que el rango de transmisión de las señales es

relativamente grande para interiores. En la figura 22 se muestra el diagrama del área de monitoreo con sus respectivas sub-áreas

Figura 22 Diagrama del área de monitoreo.



Fuente: (Lin, y otros, 2015)

- **Procesamiento.**

En esta parte, para el funcionamiento del sistema, el método de procesamiento nos provee el beacon más cercano al dispositivo de censado. El método mencionado sigue los pasos descritos a continuación.

- **Recopilación de datos:**

Los datos recolectados son las intensidades de potencias (RSSI) censadas en tiempo real de todos los Beacon como se puede ver en la ecuación 29.

$$RSSI = \{B1, B2, \dots, Bn\} \quad (29)$$

n: Total de beacons.

- **Selección del beacon más cercano.**

Para la selección del beacon más cercano, se utilizan dos filtros siendo el primero el denominado Filtro Promediador, el cual es utilizado para suavizar las amplias variaciones de la señal recibida en cada intervalo de censado de los beacon. En la ecuación 30 se muestra el filtro donde $rssi_{Bi}^t$ es la potencia recibida, n el número de beacons censados y $RSSI_{Bi}^t$ la salida del filtro procesado en un intervalo de tiempo $t - 4$. Por último, la ecuación 31 muestra el segundo filtro que escoge la máxima potencia censada haciendo referencia al más cercano (N^t).

$$\frac{\sum_{t-4}^t rssi_{Bi}^t}{n} = RSSI_{Bi}^t \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \max(RSSI_{B1}^t, RSSI_{B2}^t, \dots, RSSI_{Bn}^t) \\ = N^t \end{aligned} \quad (31)$$

Con el fin de mejorar la correcta selección del beacon más cercano, se utiliza una ventana de tiempo m en donde se tendrá un arreglo de potencias seleccionadas como máximas con el filtrado anterior, y de esta manera volverlas a filtrar para obtener una potencia máxima final E_{Bi}^t tal como se muestra en la ecuación 32.

$$\max(N^t, N^{t+1}, \dots, N^{t+m}) = E_{Bi} \quad (32)$$

- **Posicionamiento**

La muestra de la posición del beacon seleccionado se realiza mediante la búsqueda y comparación del identificador del beacon (MAC) y una base de datos del mapa con la distribución de los nodos (Beacons) por cada sub-área.

- **Tabla de parámetros del método de ubicación por selección del beacon más cercano.**

Tabla 8 Tabla de parámetros del método.

Nombre	Parámetro	Definición
Nodo Beacon	B_i	Beacon ubicado en el centro de una sub área A_i
Sub área	A_i	Sub-área del área de monito
Rssi	Potencia recibida del beacon B_i	$rssi_{B_i}^t$
Rssi filtrada	$RSSI_{B_i}^t$	Potencia suavizada a la salida del filtro promediador.
Beacon más cercano	N^t	Beacon con máxima potencia
Beacon más cercano estimado	E_{B_i}	Beacon con máxima potencia en una ventana de tiempo

Fuente: Elaboración propia.

Comentarios finales del capítulo II:

En el capítulo II se describieron los modelos matemáticos usados en la metodología del proyecto. Con el desarrollo de las ecuaciones utilizadas para la trilateración se verifica que las coordenadas para obtener la localización se pueden obtener con el valor de las radios de 3 circunferencias, dichos radios se obtienen con las potencias emitidas por cada uno de los beacon.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

Introducción al capítulo III:

En el presente capítulo se detallan las especificaciones, métodos y parámetros de diseño. Se realizan simulaciones en Matlab para observar y analizar los valores de potencia RSSI emitidos por los beacon y los valores obtenidos después del procesamiento. Finalizadas las pruebas correspondientes en el simulador, se procede con el diseño de la aplicación para dispositivos móviles.

3.1. Especificaciones de diseño

El sistema ha sido desarrollado para reconocer y diferenciar a las piezas de arte en un museo y reproducir la información correspondiente a cada una de ellas, además el software embebido debe brindar un posicionamiento aproximado del área en donde se encuentra el usuario dentro de la galería.

Para elegir los parámetros del filtro se tiene en cuenta las siguientes características:

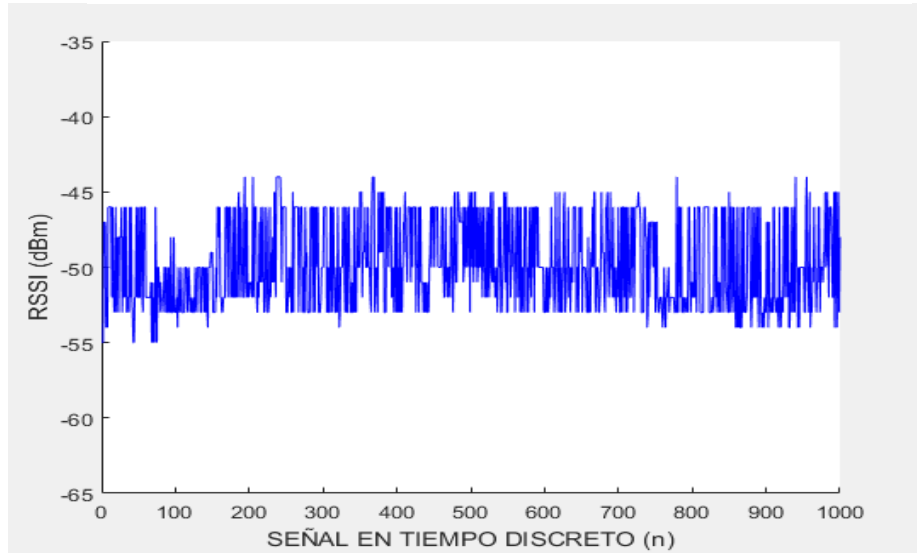
- El equipo deberá diferenciar cada pieza de arte que está separada por lo menos a un metro y medio una de otra.
- La aplicación deberá brindar un posicionamiento estimado en tiempo real.
- El software deberá detectar y diferenciar cada pieza de arte de manera correcta.
- La aplicación deberá reconocer a la pieza de arte correspondiente en menos de 10 segundos una vez que el usuario se encuentra relativamente cerca de la pieza de arte en mención.
- El software deberá reproducir automáticamente la información correspondiente a la pieza de arte determinada.
- El usuario deberá contar con un smartphone con sistema operativo Android.
- El usuario deberá contar con un dispositivo móvil con bluetooth de versión 4.0 o superior.
- Las piezas de arte deberán estar por lo menos a 1.5 metros (metro y medio) separadas una de otra.

3.2. Método de diseño

3.2.1. Diseño de la etapa de pre procesamiento

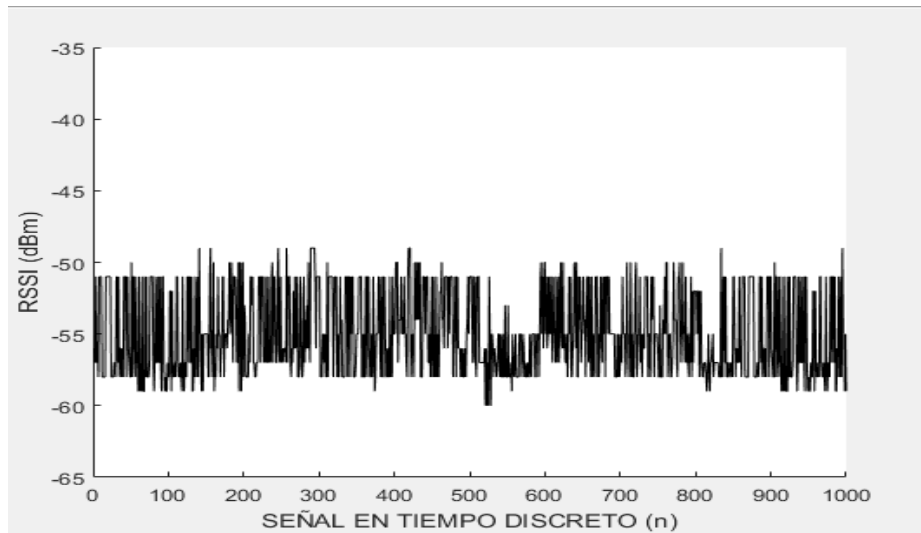
De acuerdo a lo verificado en el capítulo 2, analizar al filtro en la frecuencia resulta complicado ya que tiene un comportamiento del tipo pasa bajos, pero con pobre respuesta en la banda de rechazo y con un roll off lento. Es por esta razón que el análisis del filtro se va a realizar principalmente en el dominio del tiempo. Las señales de RSSI medidas tienen fluctuaciones considerables. Debido a ello dos señales medidas a 1 metro y a 1.5 metros se traslapan entre sí, esto se puede verificar en las figuras 23, 24 y 25.

Figura 23 RSSI a 1 metro de distancia de una baliza BLE.



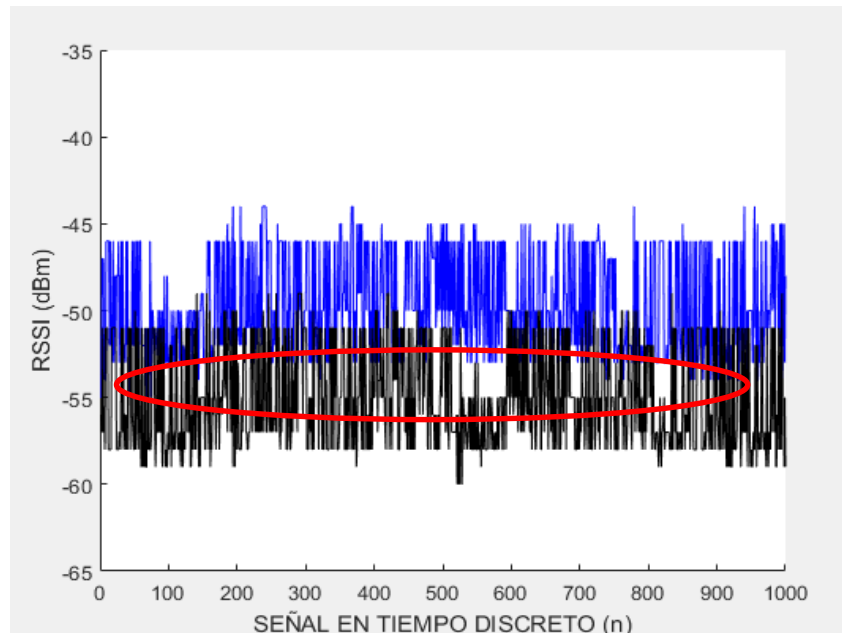
Fuente: Elaboración propia.

Figura 24 RSSI a un 1.5 metros de distancia de una baliza BLE.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 25 Señales medidas a 1 metro y a 1.5 metros traslapadas.



Fuente: Elaboración propia.

Lo que se busca en el proyecto es diferenciar a 2 piezas de arte separadas por lo menos 1.5 metros una de otra y con lo mostrado en las figuras se verifica que se requiere atenuar las amplitudes de las señales para que no se traslapen entre sí.

En las figuras 22 y 23 se puede verificar que el ruido tiene una amplitud máxima de aproximadamente 5 dBm para ambos casos. Entonces para lograr diferenciar una señal de la otra se debe atenuar las amplitudes de ambas señales aproximadamente a 1.2 dBm para evitar interferencias.

De acuerdo a lo verificado (Investigación nacional Tomsk, 2016), utilizando el filtro de media móvil, la amplitud del ruido se atenúa en un factor aproximado a la raíz cuadrada del número de muestras utilizadas para calcular el promedio (M). El factor de atenuación del ruido se detalla en la ecuación 33.

$$A_t = \frac{A_M}{\sqrt{M}} \rightarrow M = \left(\frac{A_M}{A_t}\right)^2 \quad (33)$$

Donde:

A_M : Es la amplitud máxima del ruido.

M : Es el número de muestras que se toman para realizar el promedio.

A_t : Es la amplitud atenuada del ruido.

Se busca atenuar la amplitud máxima de ambas señales aproximadamente a 1.2 dBm, para lo cual se reemplazan los valores obtenidos como se observa en la ecuación 34.

$$1.2 = \frac{5}{\sqrt{M}} \rightarrow M = \left(\frac{5}{1.2}\right)^2 = 17.36 \quad (34)$$

Con el análisis realizado, se opta por utilizar un valor de “M” igual a 20, teniendo en cuenta que si se elige un valor muy alto de “M” va a existir mayor latencia en la detección de las piezas de arte y un mayor tiempo de procesamiento.

A continuación, se muestra la Tabla 9 de parámetros en la etapa de pre procesamiento:

Tabla 9 Parámetros de la etapa de pre procesamiento.

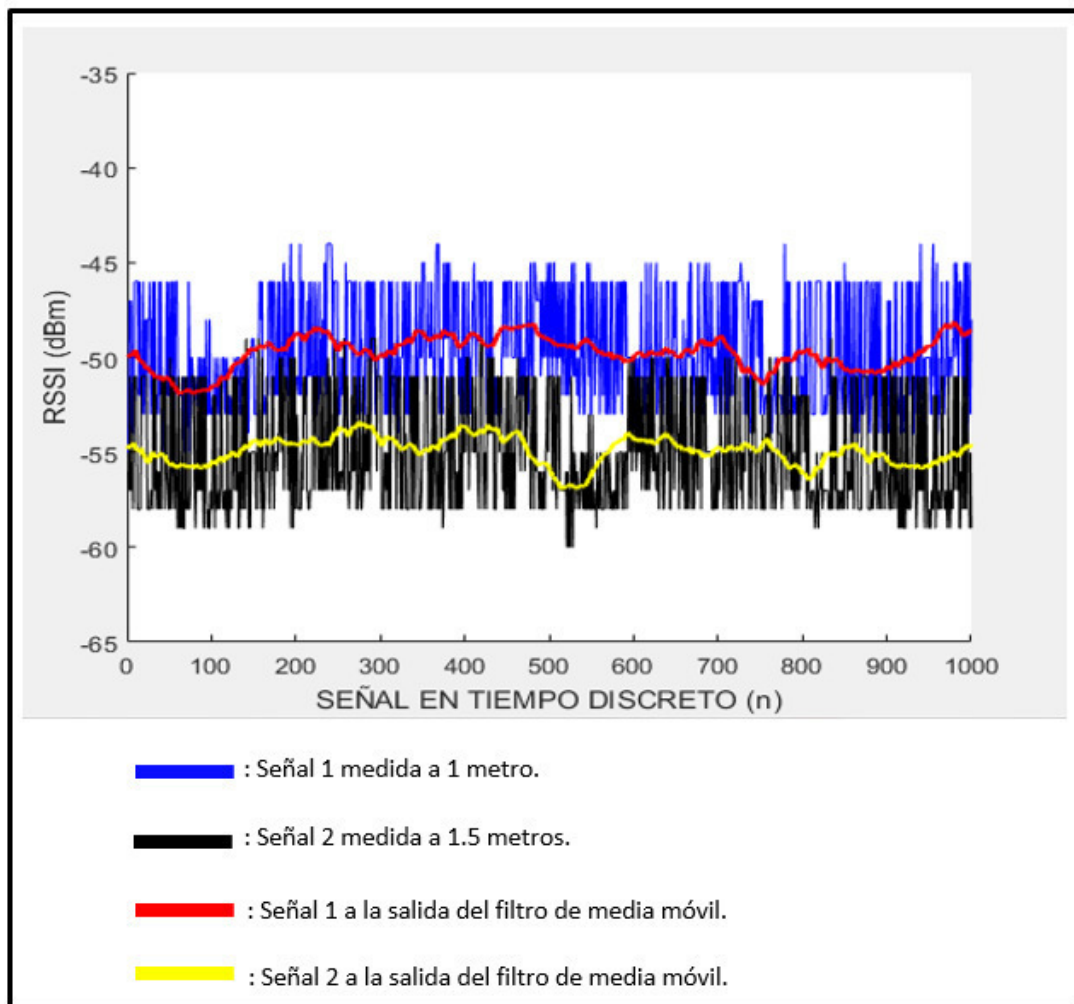
Parámetros	Unidades
Potencia recibida (RSSI)	dBm
Distancia	Metros
Latencia	Segundos
Tiempo de procesamiento	Segundos

Fuente: Elaboración propia.

a) Simulación en Matlab de la etapa de pre procesamiento

Una vez obtenido el parámetro "M" se procede a realizar la simulación en Matlab para verificar que los cálculos obtenidos brindan el resultado esperado. Para mediciones realizadas a 1 metro y a 1.5 metros de distancia de una baliza BLE, se toman 20 valores para realizar el promedio. En la figura 26 se observa a las señales originales y a las señales obtenidas a la salida del filtro.

Figura 26 Señales de entrada y de salida del filtro para "M=20".



Fuente: Elaboración propia.

Se verifica que efectivamente el filtro de media móvil reduce la amplitud del ruido y mantiene la forma original de la señal de entrada. Para un valor de "M" igual a 20, ya es posible diferenciar a las señales que provienen de balizas BLE separadas por lo menos a un metro y medio una de otra.

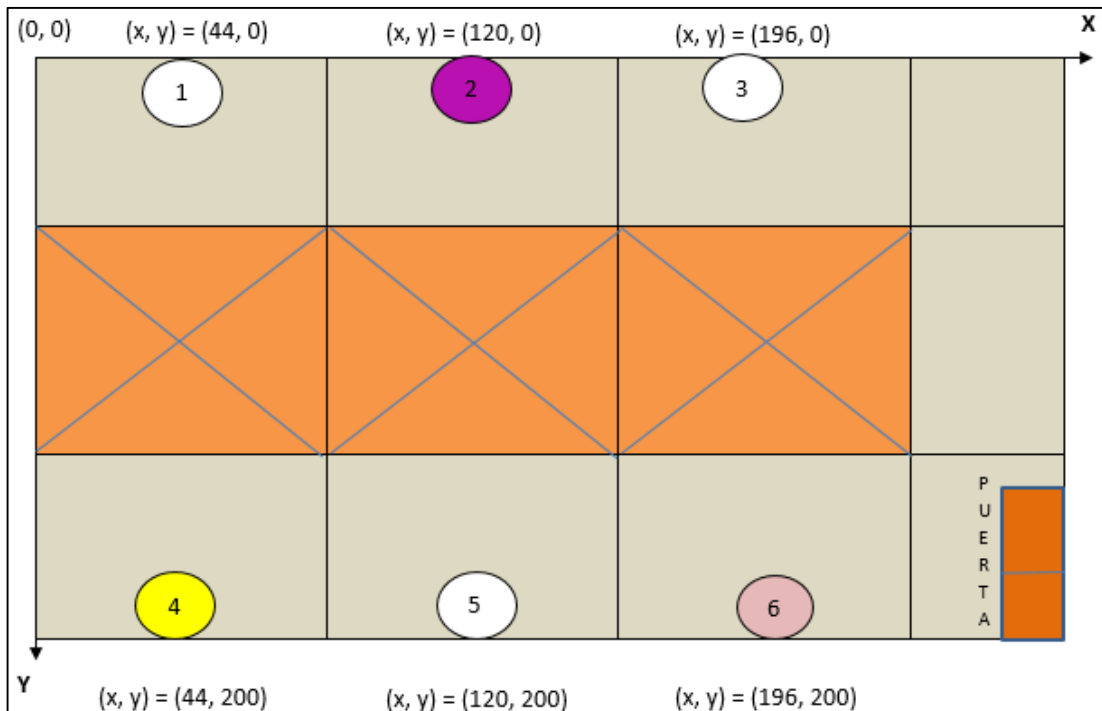
3.2.2. Diseño de la etapa de procesamiento

Para el presente proyecto se han realizado las medidas del laboratorio (8 metros x 5 metros) y se ha hecho una réplica a escala en el smartphone (320 x 200 pixeles). De acuerdo al orden de los pixeles en el lienzo de programación, se han definido las coordenadas de los centros de las circunferencias que se van a usar para la trilateración los cuales son:

- Coordenadas del centro de la circunferencia 2: $(x_2, y_2) = (120, 0)$
- Coordenadas del centro de la circunferencia 4: $(x_4, y_4) = (44, 200)$
- Coordenadas del centro de la circunferencia 6: $(x_6, y_6) = (196, 200)$

Los ejes determinados en la pantalla del móvil y las posiciones de los dispositivos BLE se pueden observar en la figura 27.

Figura 27 Matriz de distribución de balizas BLE.



Fuente: Elaboración propia.

Las funciones matemáticas de los patrones de radiación aproximados a circunferencias generados por las balizas 2, 4 y 6 se describen en las ecuaciones 35, 36 y 37 respectivamente.

$$r_2^2 = (x - 120)^2 + y^2 \quad (35)$$

$$r_4^2 = (x - 44)^2 + (y - 200)^2 \quad (36)$$

$$r_6^2 = (x - 196)^2 + (y - 200)^2 \quad (37)$$

Desarrollando las ecuaciones 36 y 37 se obtienen las ecuaciones 38 y 39, las cuales se proceden a restar para obtener la ecuación 40. Con este procedimiento se obtiene la ecuación 41 para calcular a la coordenada "X".

$$r_4^2 = x^2 - 88x + 1936 + y^2 - 400y + 40000 \quad (38)$$

$$r_6^2 = x^2 - 392x + 38416 + y^2 - 400y + 40000 \quad (39)$$

$$r_4^2 - r_6^2 = 304x - 36480 \quad (40)$$

$$x = \frac{36480 + r_4^2 - r_6^2}{304} \quad (41)$$

Para obtener a la coordenada “Y” se desarrolla la ecuación 35 y se obtiene la ecuación 42, a la cual se le resta la ecuación 38 de manera similar al proceso anteriormente descrito y con ello se obtiene la función matemática que brinda a la coordenada “Y” la cual se muestra en la ecuación 43.

$$r_2^2 = x^2 - 240x + 14400 + y^2 \quad (42)$$

$$y = \frac{27536 + 152x + r_2^2 - r_4^2}{400} \quad (43)$$

Con estos cálculos se obtienen las coordenadas en pixeles de la posición estimada del usuario en tiempo real, ya que, al desplazarse por los ambientes del museo, los valores de RSSI obtenidos por el dispositivo móvil van a variar, lo que se traduce en el cambio automático de los radios de las circunferencias modeladas y con ello la actualización de las coordenadas.

a) Tabla de parámetros en la etapa de procesamiento:

Tabla 10 Parámetros de la etapa de procesamiento.

Parámetros	Unidades
Potencia recibida (RSSI)	dBm
Distancia	Metros
Latencia	Segundos
Tiempo de procesamiento	Segundos
Error de localización	Metros

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Diseño de la aplicación para dispositivos móviles

Para el desarrollo del proyecto se programaron aplicaciones para el censado de los datos hasta llegar a la aplicación final. Las características y el diseño se detallarán a continuación.

a) Aplicación para la toma de datos

Para la toma de datos se desarrolló una aplicación en Android la cual consistía en el escaneo de los Beacons como se muestra en la figura 28.

- El primer botón (Leer RSSI) escanea los Beacons y empieza a mostrar las potencias recibidas asociadas a su dirección MAC, al mismo tiempo se muestra un reloj controlando el tiempo de censado. Los datos de las potencias se irán almacenando en un vector para su posterior exportación. Los datos de potencia se almacenan a una tasa configurable de muestras por minuto.

- El segundo botón (Detener Lectura), detiene la toma de datos.
- El tercer botón (Grabar datos) concatena los vectores de datos y los transforma en un archivo en formato CSV llamado “Datos.csv”
- El cuarto botón (Enviar) abre el correo con el archivo anexo para ser enviado a cualquier destinatario.

Figura 28 Aplicación para el censo de beacons.



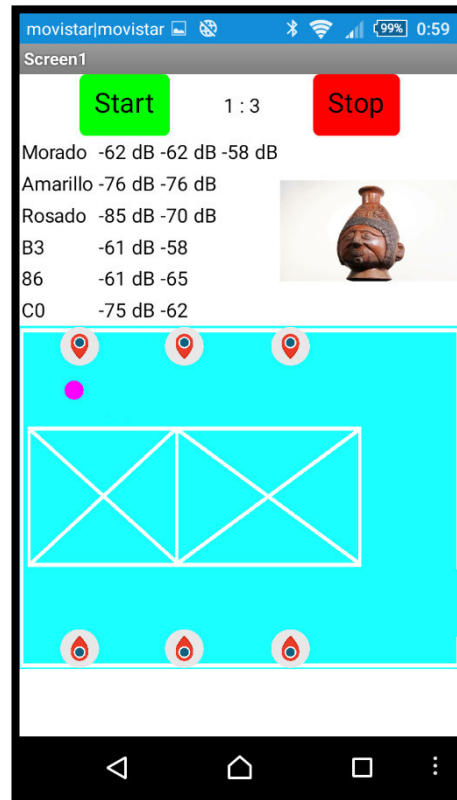
Fuente: Elaboración propia.

b) Diseño de prototipo

La figura 29 muestra la presentación prototipo cuyo funcionamiento será la base para la aplicación final. La aplicación cuenta con dos botones para iniciar y detener el funcionamiento, además de mostrar las imágenes, el audio y la posición dentro del área, muestra en tiempo real los datos (RSSI en dB) obtenidos de cada Beacon.

Para iniciar la aplicación se debe presionar el botón Start, luego empezará a contar 20 muestras necesarias para el filtrado y la reproducción de la información.

Figura 29 Demostración de la aplicación.



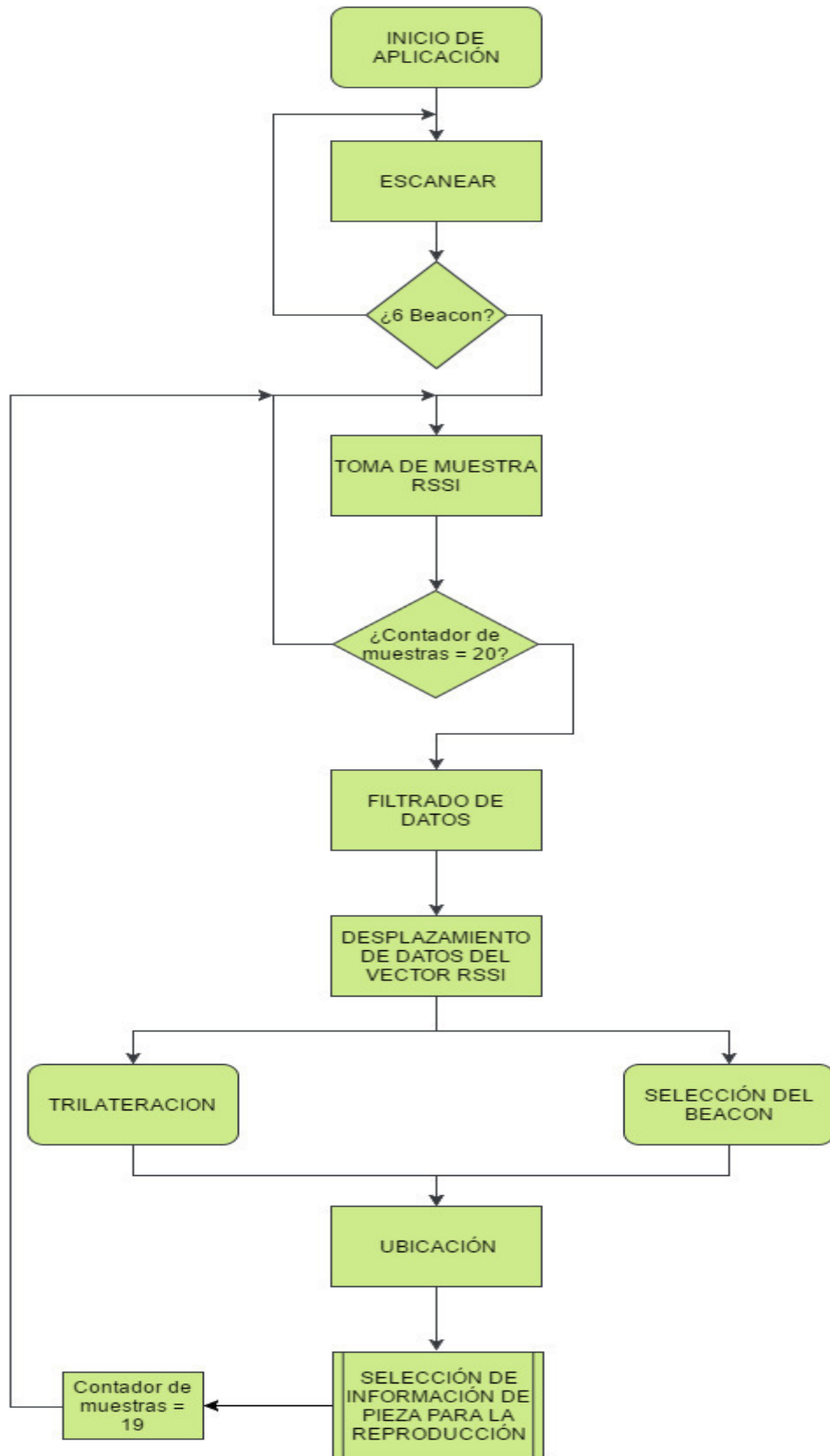
Fuente: Elaboración propia.

La aplicación cuenta con un temporizador para medir el tiempo de funcionamiento. En el área de posicionamiento se muestra una imagen esférica de color púrpura, la cual hace referencia a la ubicación actual del dispositivo móvil, además los símbolos de color rojo indican la ubicación de cada Beacon.

c) Aplicación final

Para la aplicación final se desarrolló un programa siguiendo el diagrama de flujo que se presenta en la figura 30:

Figura 30 Diagrama de flujo de la aplicación final.



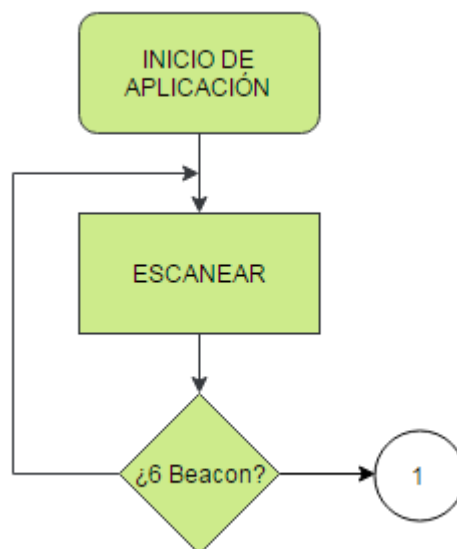
Fuente: Elaboración propia.

- **Descripción del diagrama de flujo:**

- **Escaneo de Beacons:**

En esta primera etapa como se muestra en la figura 31 se realiza el escaneo y validación de los Beacon desplegados en el ambiente. El programa desarrollado permite descubrir todos los dispositivos bluetooth que están emitiendo señal en el momento, luego del escaneo se realiza la validación comparando las direcciones MAC de los dispositivos escaneados y una base de datos conteniendo las direcciones de los Beacon. Si se logra descubrir los Beacon, pasará a la siguiente etapa, en caso contrario seguirá escaneando.

Figura 31 Primera etapa del diagrama de flujo.



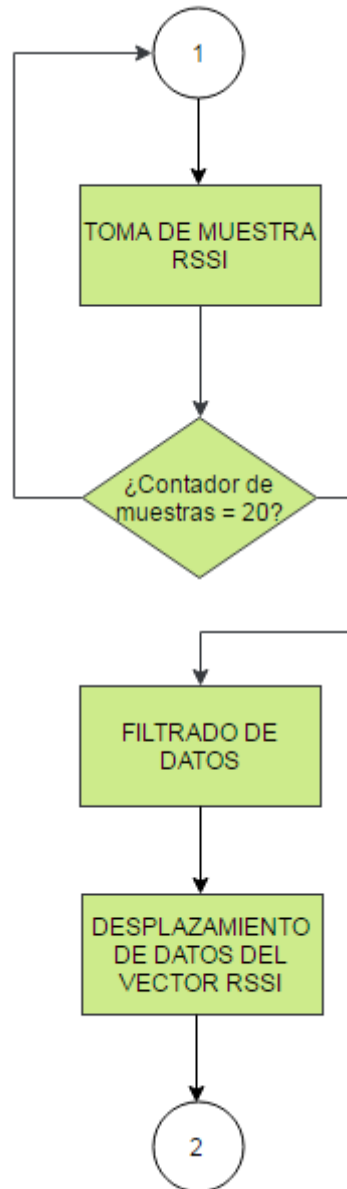
Fuente: Elaboración propia.

- **Muestreo y filtrado de datos.**

La segunda etapa consta de la toma de datos correspondientes a los valores de RSSI de los Beacon, medidos en forma simultánea. Utilizando un contador se validará la toma de 20 muestras de RSSI antes de ingresar a la etapa de filtrado, la cantidad de muestras mencionadas se utilizó siguiendo los parámetros de diseño previamente analizados. Una vez validada la

cantidad de muestras se procederá a realizar el filtrado. En el último bloque se realiza un desplazamiento del vector que almacena los valores de RSSI para permitir el ingreso de un nuevo valor en la siguiente toma de muestra. En la figura 32 se muestra el diagrama de la etapa.

Figura 32 Segunda etapa del diagrama de flujo.

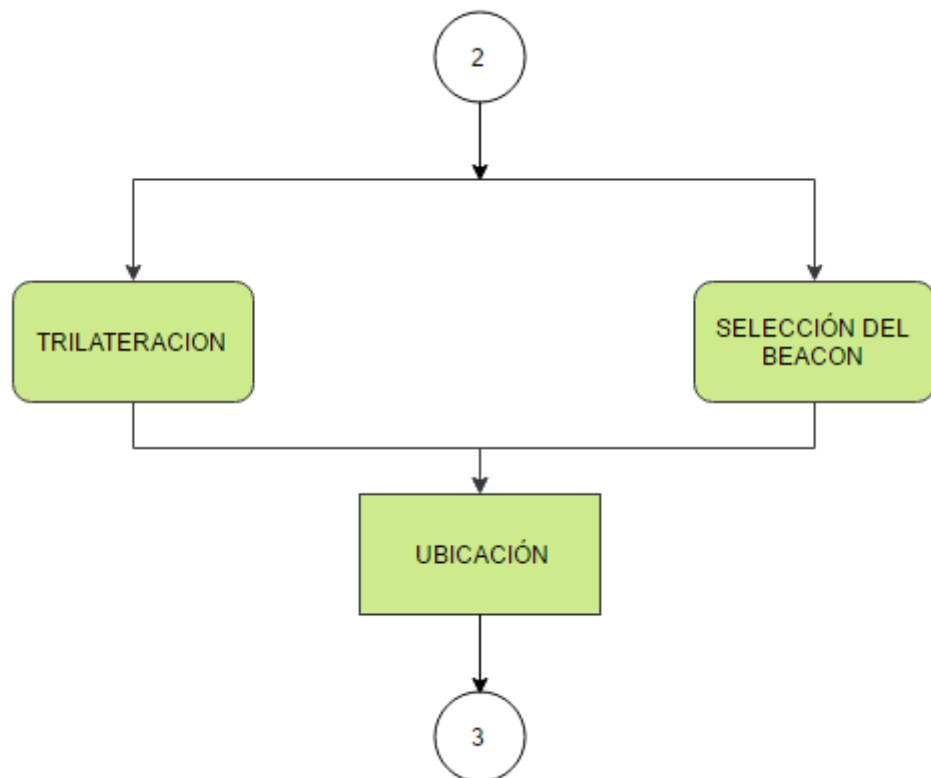


Fuente: Elaboración propia.

- **Posicionamiento y selección de reproducción.**

Luego de tener los datos filtrados se realiza la etapa de posicionamiento y la reproducción de información. Para el posicionamiento se utilizan dos métodos (Trilateración y Selección del Beacon) como se puede ver en la figura 33. El resultado brinda la Sub-Área de ubicación del dispositivo móvil que está censando.

Figura 33 Tercera etapa del diagrama de flujo.

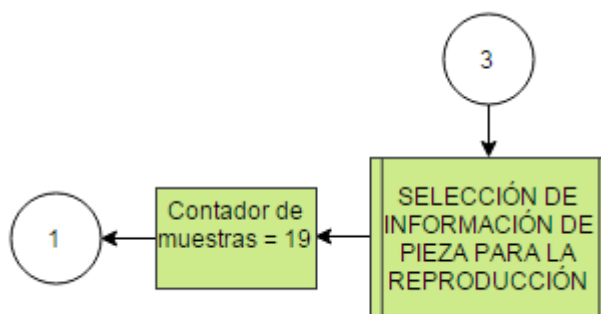


Fuente: Elaboración propia.

- **Selección de la reproducción de la Información**

En la etapa final mostrada en la figura 34 se procede a realizar la búsqueda del archivo de audio con información correspondiente a la pieza de arte ubicada en la sub-área censada para su respectiva reproducción. En el bloque final se realiza una actualización del contador de muestras, se disminuye en uno para que al sumarse con la siguiente muestra suma en total la cantidad fijada inicialmente.

Figura 34 Cuarta etapa del diagrama de flujo.



Fuente: Elaboración propia.

d) Base de datos de la información de reproducción

Debido a la gran cantidad de archivos de reproducción (audio y video) que se requiere, y con el fin de reducir al máximo el tamaño (Megabytes) de la aplicación, se optó por implementar una base de datos que contenga dicha información y que será accedido por cada usuario mediante la aplicación.

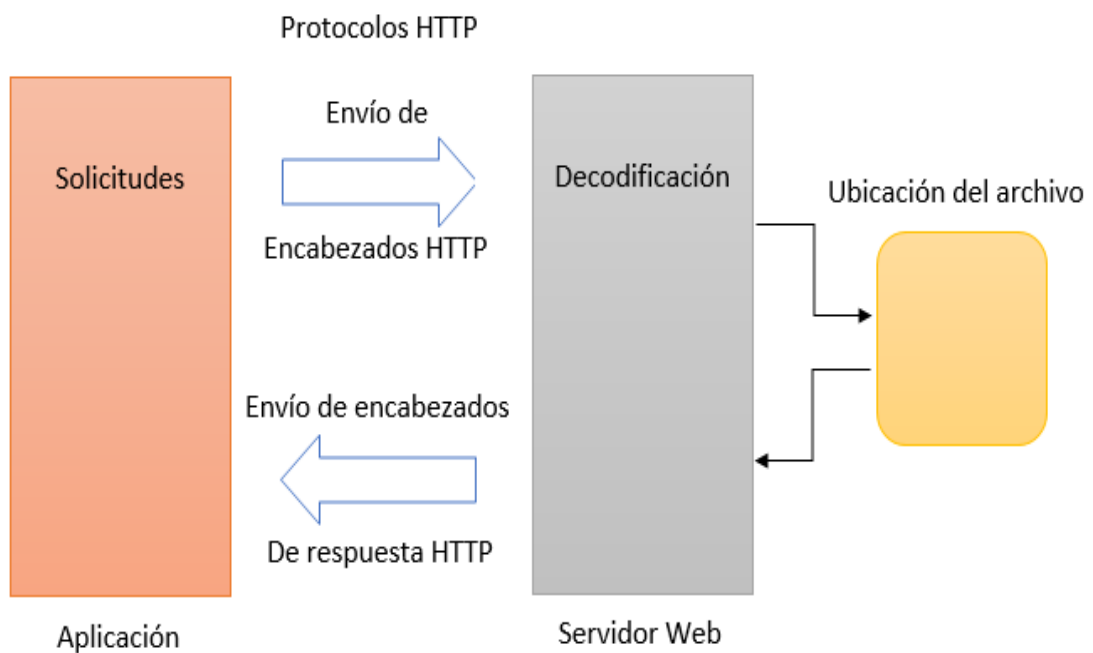
La implementación de la base de datos se hizo utilizando el servicio de google denominado *Google App Engine* (en adelante GAE por sus siglas en inglés), el cual nos permite desarrollar aplicaciones en línea sin la necesidad de preocuparnos por la infraestructura o el dominio. GAE nos facilita diseñar, mantener y escalar nuestra aplicación el cual integra un balanceador de carga y escalamiento automático.

- Protocolo de conexión entre el servidor y la aplicación

Para la comunicación del servidor y la aplicación se utiliza el protocolo denominado HTTPS (Protocolo de Transferencia de Hipertexto Seguro). Perteneciente a la capa de aplicación del modelo OSI (Interconexión del sistema abierto), HTTPS es un protocolo de comunicación que utiliza un sistema mediante el cual se permite la transferencia de información entre diferentes servicios y clientes en la *World Wide Web* (Red Informática

Mundial). Utilizando dicho protocolo, la aplicación integrará la dirección URL (Localizador Uniforme de Recursos) del servidor “https://guiavirtualdatabase.appspot.com”, el cual contiene el protocolo más el nombre de dominio, para que de esta manera se pueda interactuar y hacer la petición de los archivos correspondientes. En la figura 35 se muestra la interacción entre el servidor y la aplicación utilizando las tramas de dicho protocolo.

Figura 35 Interacción Aplicación-Servidor.



Fuente: Elaboración propia.

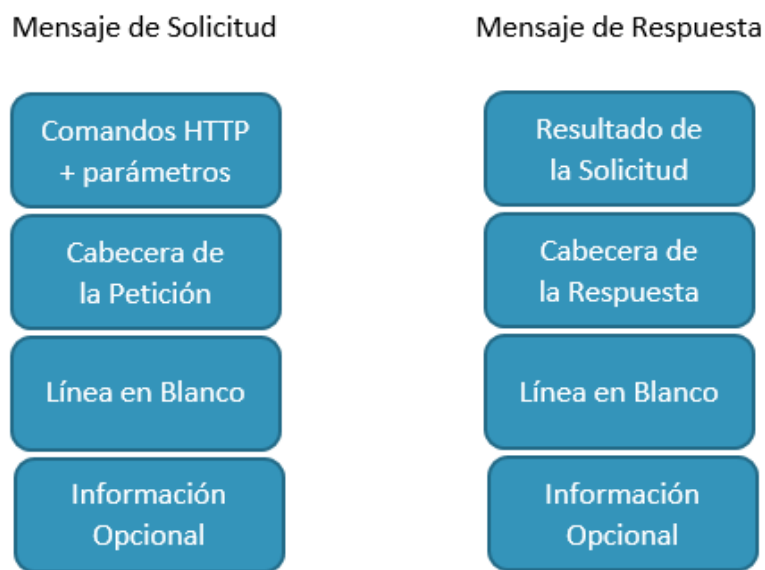
Cuando un usuario realiza la petición del archivo mediante la aplicación, se realizan los siguientes pasos:

- Se accede a la dirección URL determinada.
- Se decodifica la URL para saber el protocolo de acceso, las direcciones de dominio o IP del servidor, el puerto y el archivo requerido del servidor.
- Se establece una conexión TCP/IP entre la aplicación y el servidor.

- Se ejecutan los comandos de petición.
- Se obtiene una respuesta del servidor, la cual contiene un código de estado, el tipo de dato MIME y la información requerida.
- La conexión TCP se cierra.

En la figura 36 se presenta los tipos de mensajes utilizados en el protocolo

Figura 36 Clases de Mensajes.

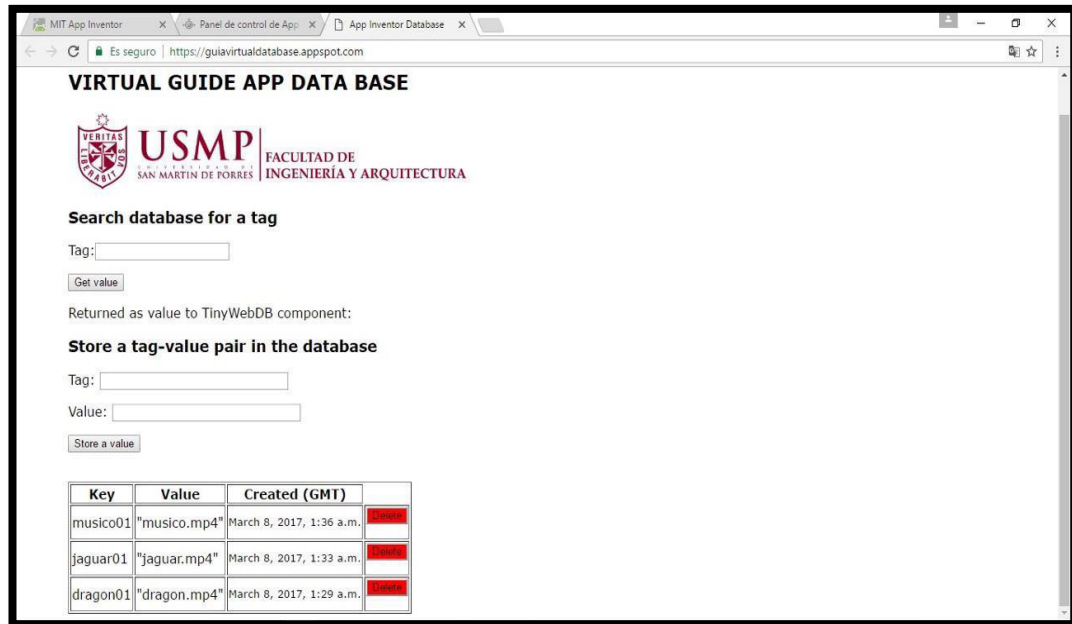


Fuente: Elaboración propia.

La interacción entre la aplicación y el servidor web se realiza mediante líneas de texto, las cuales contienen los comandos del protocolo. Existen dos tipos de mensaje, el primero para realizar peticiones y el otro para la respectiva respuesta. En la Figura se muestran la estructura general de los mensajes.

En la figura 37 se puede observar el diseño de la interfaz del servidor web, el cual contiene la URL y herramientas para la búsqueda y adición de pistas de audio o video, además de mostrarnos una tabla con los archivos previamente cargados.

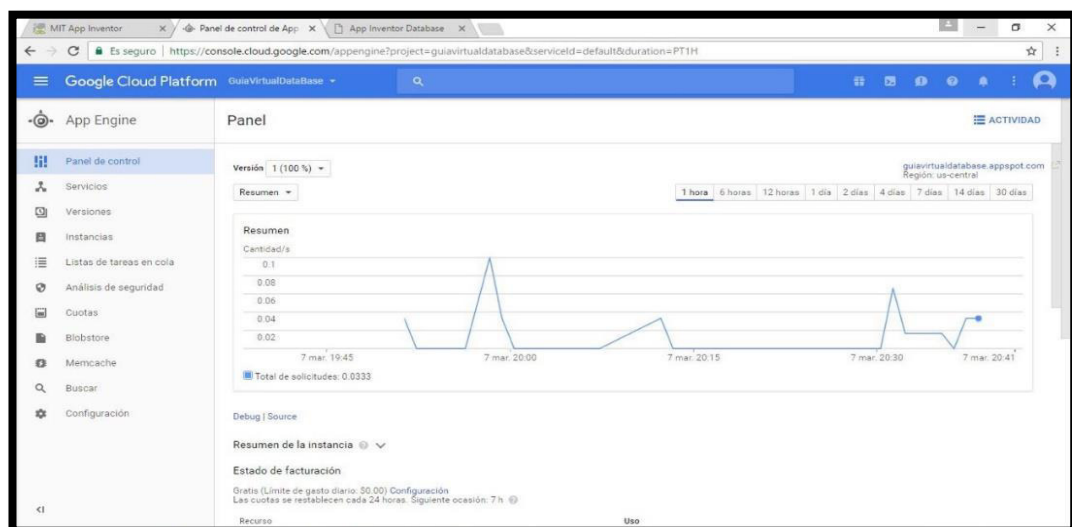
Figura 37 Interfaz web de la base de datos.



Fuente: Elaboración propia.

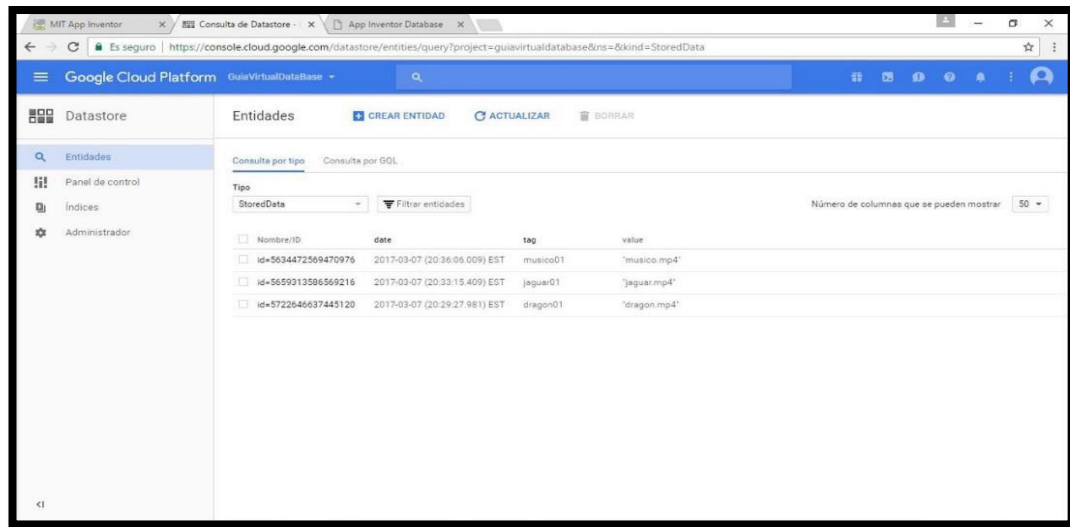
La interfaz web se conecta directamente con *Google Cloud Platform* el cual nos permite ver en tiempo real las solicitudes hechas por los usuarios, así como también los archivos almacenados. En la figura 38 y 39, se muestra el panel de monitoreo con una gráfica de las solicitudes realizadas y los archivos almacenados respectivamente.

Figura 38 Panel de control de la base de datos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 39 Archivos almacenados en la base de datos.



Fuente: Elaboración propia.

e) Presentación

La primera parte de la presentación consta de la búsqueda de un ícono alusivo a una imagen cultural nacional en forma caricaturesca, para ello se eligió la utilización de una cabeza clava con los colores nacionales como se puede apreciar en la figura 40 y cuyo nombre de aplicación será Guía Virtual.

Figura 40 Ícono de la aplicación



GuíaVirtual

Fuente: Elaboración propia.

Al iniciar la aplicación se mostrará una pantalla de inicio mostrando el nombre de la aplicación y el escudo de la Universidad, en la figura 41 se aprecia dicho diseño.

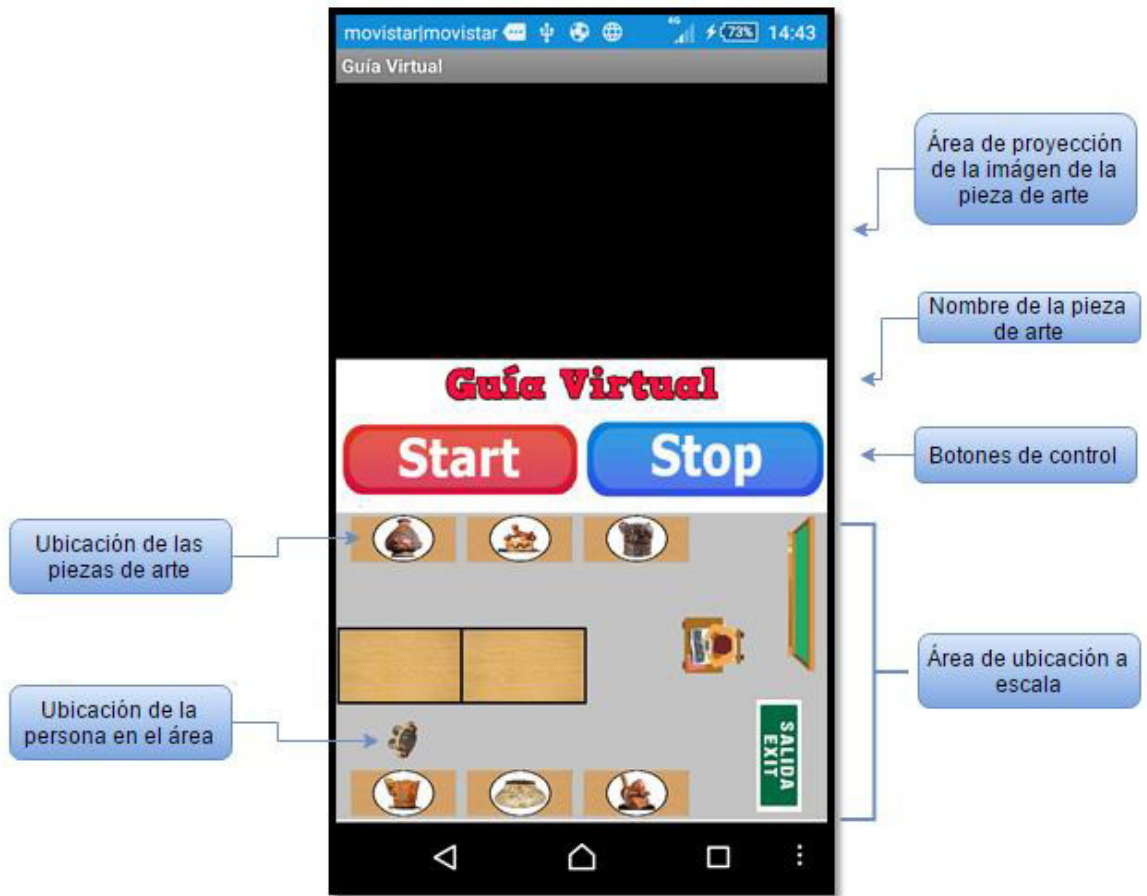
Figura 41 Pantalla de inicio de la aplicación.



Fuente: Elaboración propia.

En la segunda y última pantalla se mostrará la presentación final, la cual contiene un diagrama del área de demostración (Laboratorio FIA-USMP), un fondo negro en donde se mostrará una imagen de la pieza de arte que se detecte junto con su nombre y dos botones de control de la aplicación (Start y Stop). Para una presentación más didáctica se programó la animación de una imagen de una persona en movimiento (Caminando) con la función de orientación geográfica. A continuación, se muestra la figura 42 con el diseño completo.

Figura 42 Diseño de la presentación final de la aplicación.



Fuente: Elaboración propia.

Comentarios finales del capítulo III:

En el capítulo III se especificaron los requerimientos y parámetros de diseño. Con las simulaciones en Matlab se obtuvieron los valores a la salida de los filtros de procesamiento y se verificó que el diseño cumple con lo especificado previamente. Para el diseño de la aplicación en dispositivos móviles se utilizaron los algoritmos verificados en la simulación, en esta etapa era necesario diseñar una interfaz de usuario de fácil manipulación.

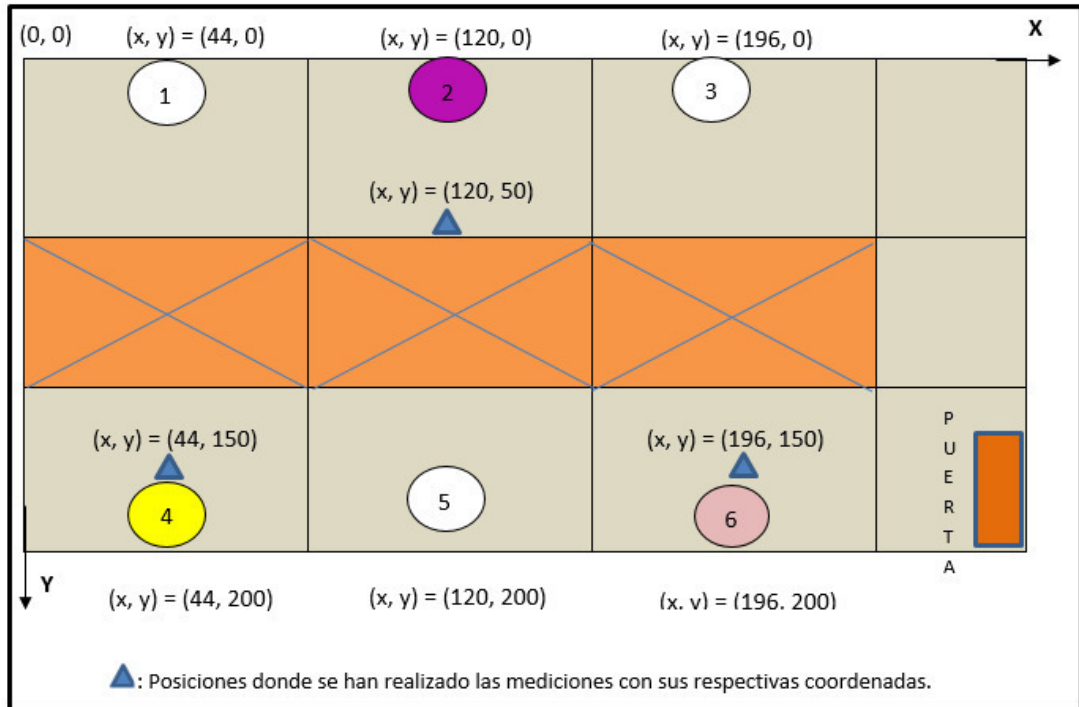
CAPÍTULO IV

PRUEBAS, RESULTADOS E INFORME ECONÓMICO

Introducción al capítulo IV:

En el presente capítulo se realizaron las mediciones de RSSI para obtener la posición estimada del terminal móvil, para ello se han ordenado y enumerado a las 6 balizas utilizadas de forma consecutiva para una mejor identificación. Como se había indicado anteriormente el escenario donde se realizaron las pruebas tiene un área aproximada de 8 x 5 metros, lo cual fue llevado a escala y su equivalente en pixeles es de 320 x 200 pixeles, de acuerdo a ello se puede indicar que 1 metro de diferencia equivale a 40 pixeles, dicho escenario se ha distribuido de manera que haya 6 piezas de arte para la demostración correspondiente, como se puede apreciar en la figura 43.

Figura 43 Escenario y enumeración de balizas BLE.



Fuente: Elaboración propia.

4.1. Datos de pruebas y resultados

Al realizar las pruebas se obtuvieron los valores de potencia emitidos por las 3 balizas BLE utilizadas para la trilateración, de donde se registraron los valores de RSSI de la baliza 2 (RSSI 2), de la baliza 4 (RSSI 4) y de la baliza 6 (RSSI 6). Con estas mediciones se obtuvieron las posiciones estimadas para cada punto en donde se realizaron las pruebas, las cuales fueron realizadas en las coordenadas (120, 50); (44, 150) y (196, 150), estos valores están registrados en las tablas 11, 12 y 13 respectivamente. El error en la localización viene dado por la distancia entre las coordenadas estimadas y las coordenadas en donde se ha ubicado el dispositivo de forma estática para las pruebas realizadas. De acuerdo a la división del escenario realizada, el error en número de píxeles es multiplicado por 40 para obtener el error en metros.

Tabla 11 Mediciones en las coordenadas (x, y = 120, 50).

(X, Y) Real (píxeles)	RSSI 2 (120,0) (dBm)	RSSI 4 (44,200) (dBm)	RSSI 6 (196, 200) (dBm)	(X, Y) estimado (píxeles)	Error de localización (píxeles)	Error de localización (metros)
(120,50)	-53	-71	-72	(105, 55)	15.81	0.40
(120,50)	-54	-72	-71	(135, 55)	15.81	0.40
(120,50)	-55	-71	-70	(133, 67)	21.40	0.54
(120,50)	-55	-72	-69	(159, 65)	41.79	1.04
(120,50)	-55	-71	-69	(143, 71)	31.14	0.78
(120,50)	-56	-72	-72	(120, 51)	1	0.03
(120,50)	-55	-71	-73	(86, 49)	34.01	0.85
(120,50)	-56	-70	-74	(51, 46)	69.12	1.73
(120,50)	-56	-74	-73	(143, 28)	31.83	0.80
(120,50)	-55	-74	-72	(161, 34)	44.01	1.10

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11, se observa que el máximo error de localización es de 1.73 metros, mientras que el mínimo es de 0.03 metros.

Tabla 12 Mediciones en las coordenadas (x, y = 44, 150).

(X, Y) Real (píxeles)	RSSI 2 (120,0) (dBm)	RSSI 4 (44,200) (dBm)	RSSI 6 (196, 200) (dBm)	(X, Y) estimado (píxeles)	Error de localización (píxeles)	Error de localización (metros)
(44,150)	-74	-51	-73	(15, 172)	36.40	0.91
(44,150)	-73	-51	-73	(15, 154)	29.27	0.73
(44,150)	-70	-53	-71	(50, 132)	18.97	0.47
(44,150)	-71	-53	-70	(62, 146)	18.44	0.46
(44,150)	-71	-53	-68	(81, 153)	37.12	0.93
(44,150)	-69	-53	-69	(73, 132)	34.13	0.85
(44,150)	-68	-63	-67	(102, 127)	62.39	1.56
(44,150)	-69	-59	-69	(78, 131)	38.95	0.97
(44,150)	-70	-58	-69	(76, 139)	33.84	0.85
(44,150)	-72	-55	-70	(63, 157)	20.25	0.51

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 12 se observa que el máximo error de localización es de 1.56 metros, mientras que el mínimo es de 0.46 metros. En las mediciones realizadas en las coordenadas (196, 150) se observa que el error máximo es de 1.12 metros y el mínimo es de 0.45 metros, como se puede apreciar en la tabla 13.

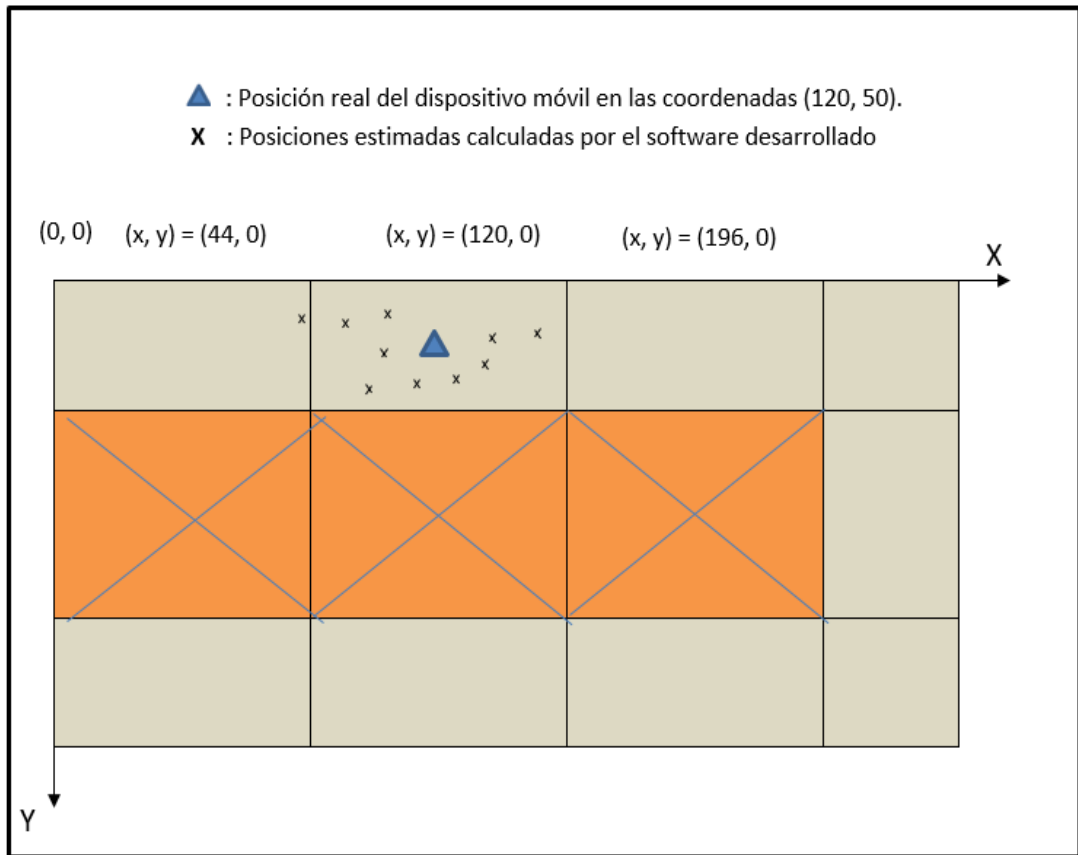
Tabla 13 Mediciones en las coordenadas (x, y = 196, 150).

(X, Y) Real (píxeles)	RSSI 2 (120,0) (dBm)	RSSI 4 (44,200) (dBm)	RSSI 6 (196, 200) (dBm)	(X, Y) estimado (píxeles)	Error de localizació n (píxeles)	Error de localizació n (metros)
(196,150)	-74	-73	-61	(216, 168)	26.91	0.67
(196,150)	-73	-73	-62	(214, 150)	18	0.45
(196,150)	-72	-70	-59	(173, 156)	23.77	0.59
(196,150)	-73	-70	-60	(171, 169)	31.40	0.79
(196,150)	-74	-70	-59	(172, 187)	44.10	1.10
(196,150)	-74	-71	-58	(187, 183)	34.21	0.86
(196,150)	-72	-73	-57	(222, 139)	28.23	0.71
(196,150)	-73	-73	-58	(221, 153)	25.18	0.63
(196,150)	-73	-70	-62	(167, 168)	34.13	0.85
(196,150)	-73	-69	-62	(157, 172)	44.78	1.12

Fuente: Elaboración propia.

Debido a las variaciones de los valores de RSSI obtenidos, las posiciones determinadas para el terminal móvil también son variantes en un rango. Tomando como referencia la tabla 4.1 con las mediciones realizadas en las coordenadas (120, 50) se puede verificar que las posiciones estimadas calculadas por el software varían alrededor del punto en donde se realizaron las pruebas como se puede apreciar en la figura 44.

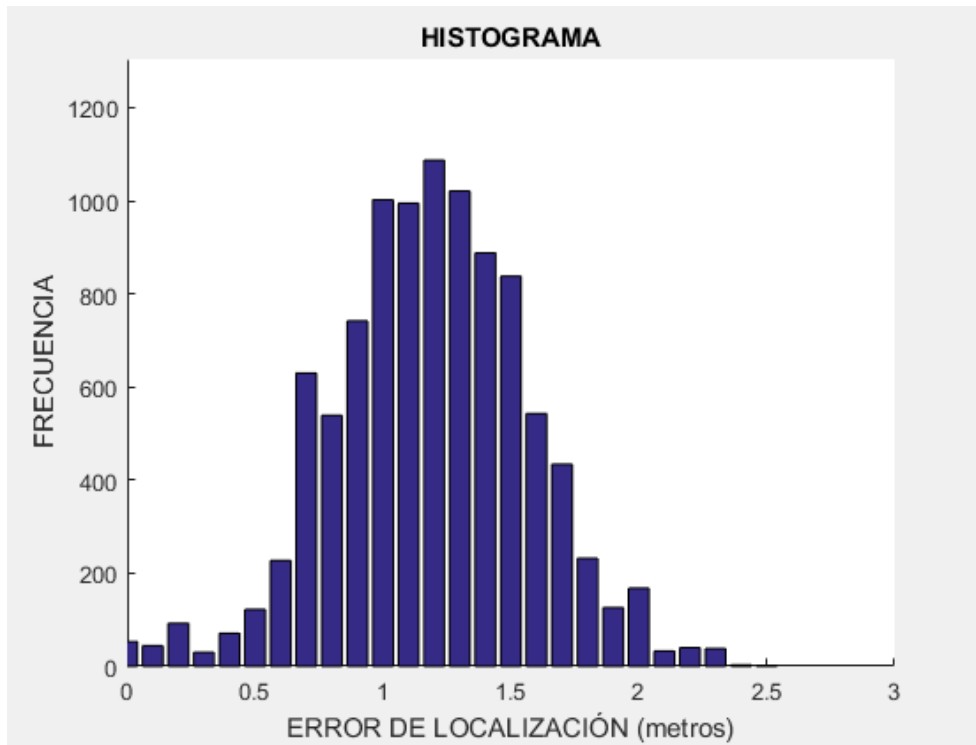
Figura 44 Variaciones de la posición estimada calculada.



Fuente: Elaboración propia.

En un escenario sin obstáculos, se realizaron pruebas en las coordenadas (120, 50); (44, 150) y en (196, 150) en las cuales se registraron 10000 valores de posiciones estimadas en cada una de ellas. Con estas mediciones se ha calculado el error de la localización para cada una de los valores obtenidos, con la ayuda de estos datos se han graficado histogramas que se pueden observar en las figuras 45, 46 y 47 con sus respectivos valores de media y varianza las cuales se indican en las tablas 14, 15 y 16.

Figura 45 Histograma de mediciones en las coordenadas (120, 50).



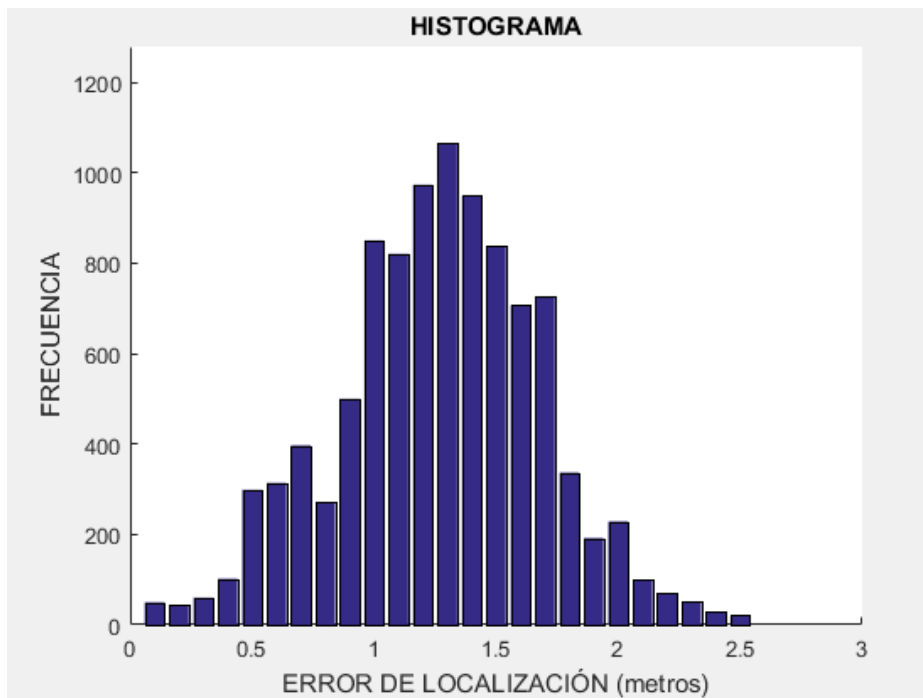
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14 Parámetros de mediciones en las coordenadas (120, 50).

Parámetro	Valor
Media	1.1880 metros
Varianza	0.3849 metros

Fuente: Elaboración propia.

Figura 46 Histograma de mediciones en las coordenadas (44, 150).



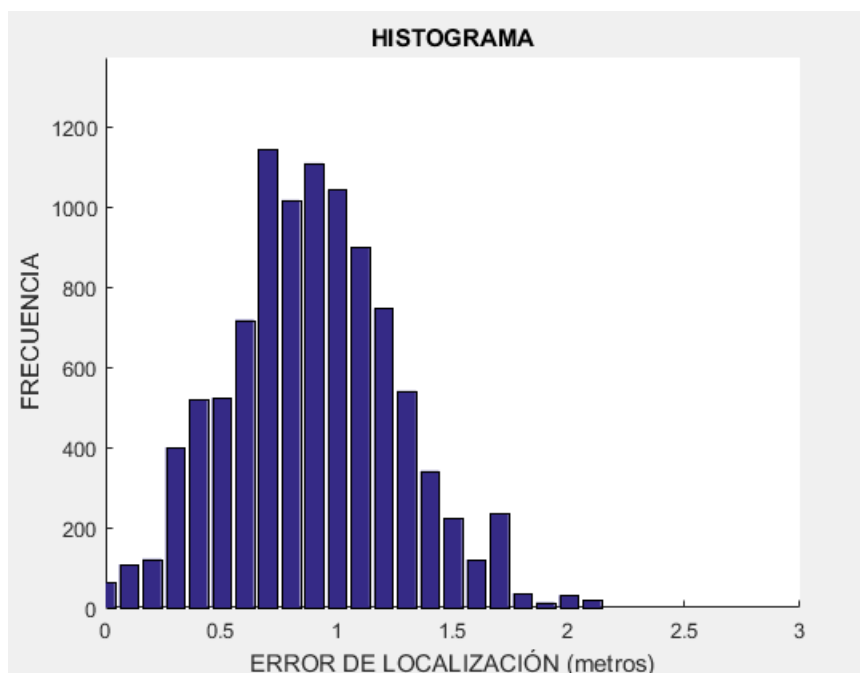
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15 Parámetros de mediciones en las coordenadas (44, 150).

Parámetro	Valor
Media	1.2651 metros
Varianza	0.4166 metros

Fuente: Elaboración propia.

Figura 47 Histograma de mediciones en las coordenadas (196, 150).



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16 Parámetros de mediciones en las coordenadas (196, 150).

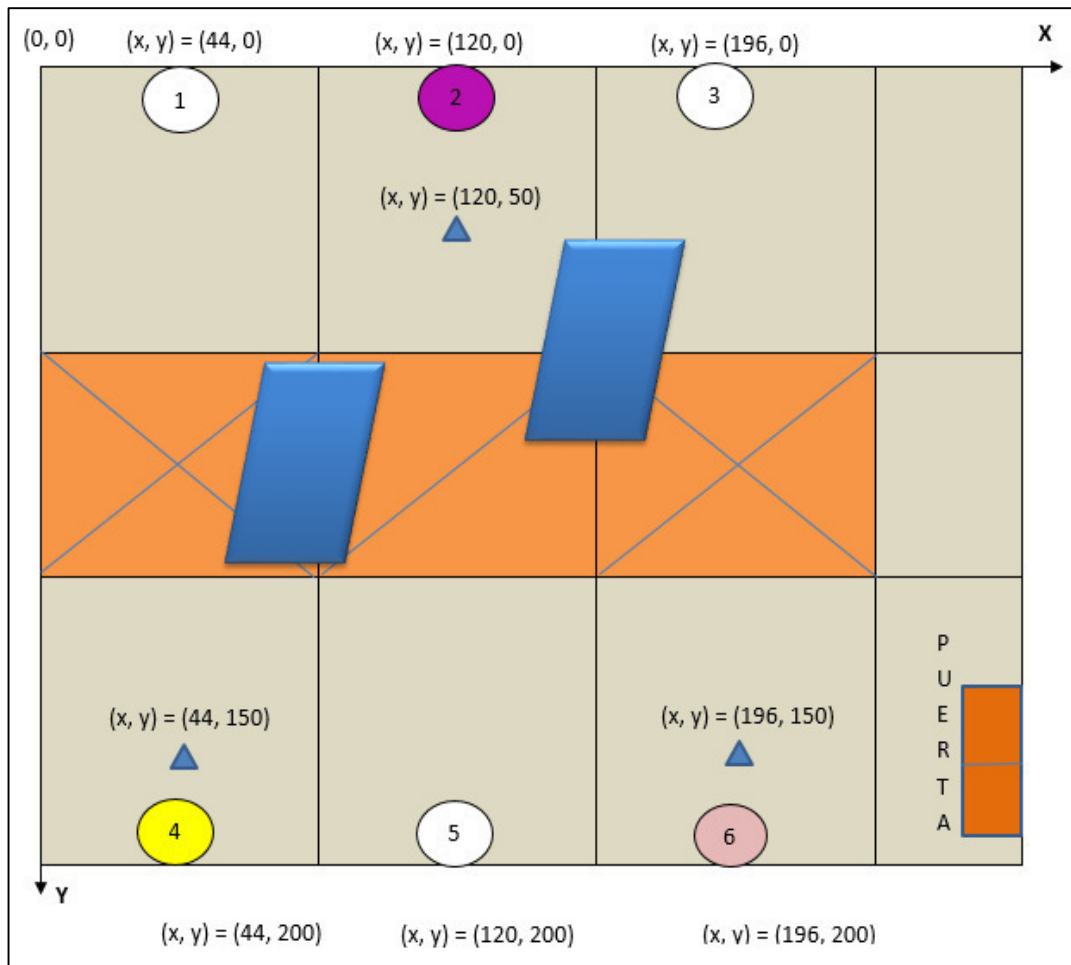
Parámetro	Valor
Media	0.8897 metros
Varianza	0.3697 metros

Fuente: Elaboración propia.

Para simular un escenario más real, se colocaron obstáculos en medio del aula de forma que simulen a los muebles que puede haber dentro de un museo como se puede apreciar en la figura 48. Nuevamente se realizaron pruebas en las coordenadas (120, 50); (44, 150) y en (196, 150) en las cuales se registraron 10000 valores de posiciones estimadas en cada una de ellas.

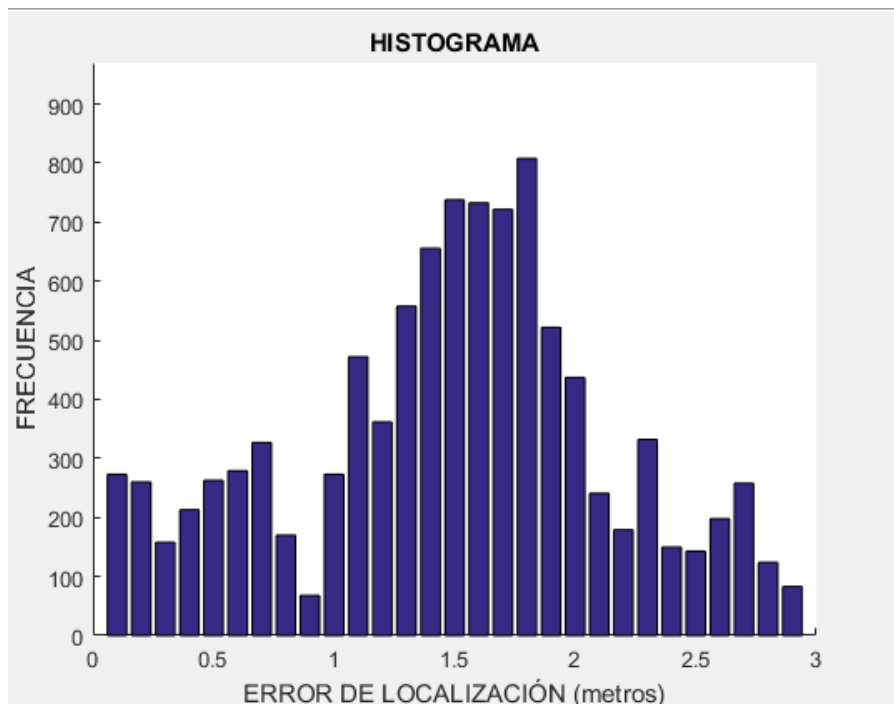
Con estas mediciones se ha calculado el error de la localización para cada una de los valores obtenidos, con la ayuda de estos datos se han graficado histogramas que se pueden observar en las figuras 49, 50 y 51 con sus respectivos valores de media y varianza las cuales se indican en las tablas 17, 18 y 19.

Figura 48 Distribución del escenario con obstáculos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 49 Histograma de mediciones en las coordenadas (120, 50).



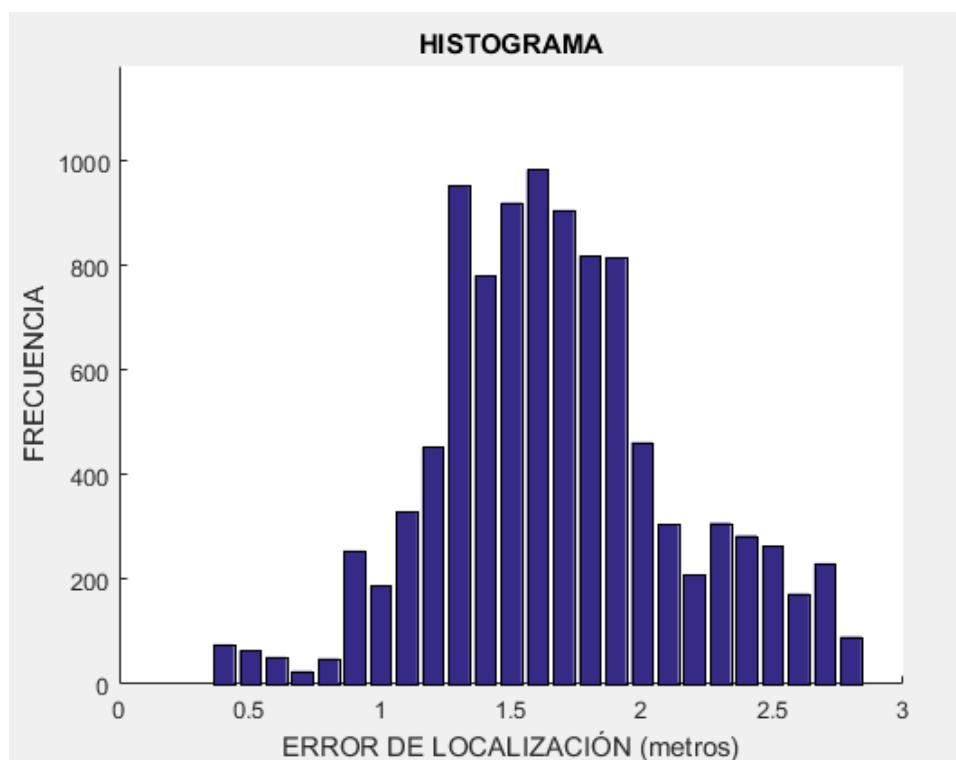
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17 Parámetros de mediciones en las coordenadas (120, 50).

Parámetro	Valor
Media	1.4815 metros
Varianza	0.6637 metros

Fuente: Elaboración propia.

Figura 50 Histograma de mediciones en las coordenadas (44, 150).



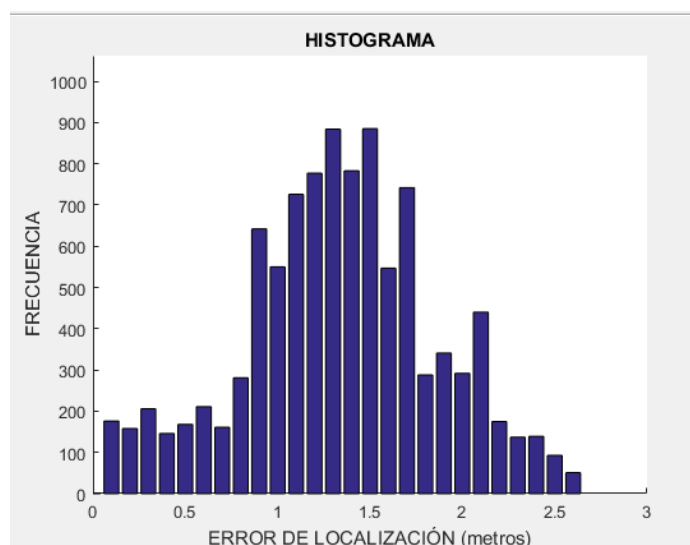
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18 Parámetros de mediciones en las coordenadas (44, 150).

Parámetro	Valor
Media	1.6732 metros
Varianza	0.4673 metros

Fuente: Elaboración propia.

Figura 51 Histograma de mediciones en las coordenadas (196, 150).



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19 Parámetros de mediciones en las coordenadas (196, 150).

Parámetro	Valor
Media	1.3359 metros
Varianza	0.5276 metros

Fuente: Elaboración propia.

Luego de obtener las coordenadas estimadas por el método de trilateración, se procede a comparar y determinar de qué baliza provienen las señales con los valores de RSSI más altos, con ello se determinará al beacon más cercano y se logrará identificar a la pieza de arte más cercana.

Para las pruebas siguientes, se ha dividido el laboratorio en 6 secciones en donde están colocadas las 6 piezas de arte. Se han enumerado las áreas y a las balizas BLE correspondientes de manera ordenada y consecutiva como

Tabla 20 Mediciones en las coordenadas (x, y = 120, 50).

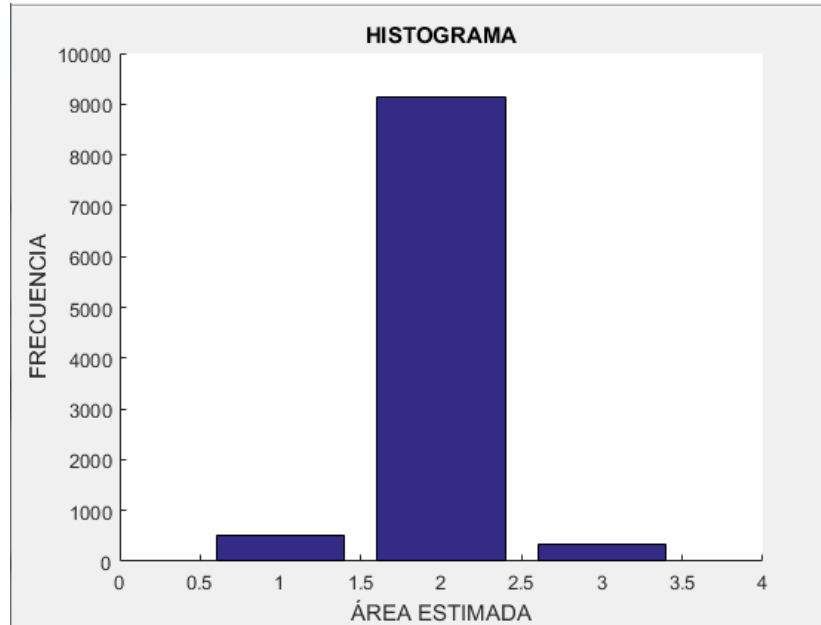
(X, Y) Real (píxeles)	Área Real	(X, Y) Estimad o (píxeles)	Número de baliza del cual se leen los RSSI más elevados	Valor de RSSI más alto (dBm)	Área estima da	Error en la reproducción de la información
(120,50)	2	(105, 55)	2	-53	2	NO
(120,50)	2	(135, 55)	2	-54	2	NO
(120,50)	2	(133, 67)	2	-55	2	NO
(120,50)	2	(159, 65)	2	-55	2	NO
(120,50)	2	(143, 71)	2	-55	2	NO
(120,50)	2	(120, 51)	2	-56	2	NO
(120,50)	2	(86, 49)	2	-55	2	NO
(120,50)	2	(51, 46)	1	-53	1	SI
(120,50)	2	(143, 28)	2	-56	2	NO
(120,50)	2	(161, 34)	2	-55	2	NO

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 20, se puede apreciar que solo hay un caso en donde la medición se realizó en el área 2 y el software determinó un área diferente, en este caso el área 1. Para todas las demás mediciones la información reproducida si corresponde a la pieza de arte correcta.

Nuevamente en la coordenada (120, 50) se realizaron 10000 mediciones, de las cuales 9127 mediciones indicaron la posición del área correcta y 873 fueron erróneas. Esta información se puede observar en la figura 53 y resumida en la tabla 21.

Figura 53 Áreas calculadas por el método de proximidad.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21 Resultados del método de proximidad.

Áreas calculadas	Número de resultados	Porcentaje
Correctas	9127	91.27%
Erróneas	873	8.73%
Total	10000	100%

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Cuadro Económico de Presupuesto

En la tabla 22 se describe el cuadro económico del presente proyecto, teniendo en cuenta que se ha realizado la simulación de un museo desplegando 6 beacons como se verifica en los capítulos anteriores.

Tabla 22 Cuadro económico de presupuesto del proyecto.

Equipo	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)
Beacon Estimote	3	107	321
Rad Beacon Dot	3	45	135
Costo de importación	1	94	94
Smartphone	1	215	215
Software Android Studio	1	0	0
Papers IEEE	5	80.75	403.75
Asesoría Profesores FIA	2	2500	5000
Total			6168.75

Fuente: Elaboración propia.

Comentarios finales del capítulo IV:

Se realizaron pruebas y mediciones en distintas áreas del laboratorio, para los cuales se obtuvieron histogramas que muestran los resultados y valores estimados del error de localización en metros, se verifica que dichos resultados muestran que el proyecto cumple con las especificaciones de diseño el cual solicita diferenciar piezas de arte separadas por lo menos 1.5 metros una de otra. Para el caso de las 10000 mediciones realizadas en una misma área, el proyecto brindó una localización en 873 áreas erróneas lo que representa el 8.73%, si bien el porcentaje de error es bajo, se debe considerar una optimización en el proyecto utilizando los valores de potencia RSSI obtenidos previamente y analizar el comportamiento de dichas señales antes de brindar la localización al usuario a través del aplicativo móvil.

CONCLUSIONES

1. Se realizó la demostración del funcionamiento del proyecto en el museo “Arturo Jiménez Borja”, donde se logró detectar y reproducir la información de las piezas de arte separadas aproximadamente en 1.5 metros una de otra, lo cual era lo solicitado por los encargados de dicha galería.
2. Se logró diseñar e implementar un filtro de media móvil el cual cumple con las características requeridas para que el software desarrollado pueda estimar la localización en tiempo real y pueda reproducir la información correcta que corresponde a cada pieza de arte.
3. Se modeló matemáticamente el principio de trilateración en 2 dimensiones, para ello se utilizó el método algebraico, el cual brinda una precisión de error menor a 2 metros.
4. Se desarrolló una aplicación en plataforma android que permite leer valores de RSSI los cuales son procesados en tiempo real.
5. Se logró embeber en un smartphone los algoritmos de filtrado de datos, comparación de potencias recibidas y localización usando el método de trilateración y de proximidad.

RECOMENDACIONES

1. Contactar a las distintas administraciones de los museos en Perú con el fin de mostrar y difundir el potencial del presente proyecto y los posibles impactos que puede tener para aumentar la participación y asistencia del público a dichas galerías.
2. Analizar la arquitectura de los museos donde se puede implementar el presente proyecto con el objetivo de optimizar procedimientos y lograr mejores resultados de identificación de piezas de arte y localización en interiores.
3. Realizar demostraciones del funcionamiento del proyecto en distintos escenarios reales para determinar si se requieren realizar cambios significativos en el proyecto para cada escenario.
4. Realizar pruebas del aplicativo en personas de distintas edades con el objetivo de analizar y diseñar una interfaz de usuario que permita una mayor facilidad de uso a las personas.
5. Examinar el área de trabajo y los obstáculos presentes para determinar si se requieren más *beacons* o si se requiere utilizar algoritmos más adecuados para obtener una mayor precisión de localización.

FUENTES DE INFORMACIÓN

Bibliográficas

- Akyahad, Y. (2016). Bluetooth 4.0 Low Energy: Análisis de las prestaciones y aplicaciones para la automoción. Cataluña.
- Díaz-Ambrona Tabernilla, L., & Pérez Costoya, F. (2008). Sistema de localización en interiores.
- Er Rida, M., Liu, F., Jadi, Y., Abdullah Algawhari, A. A., & Askourih, A. (2015). Localización en interiores basada en la intensidad de la señal bluetooth. IEEE.
- Faragher, R., & Harle, R. (2015). Localización por el método de fingerprinting utilizando Bluetooth de baja energía. IEEE.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2016). Estadística, Tecnología de Información y Comunicaciones. Obtenido de [//www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/cultura](http://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/cultura)
- Investigación nacional Tomsk. (2016). Análisis de calidad ruidosa de restauración de señal con filtro de media móvil exponencial. Universidad Politécnica.
- Kaemarungsi, K., Ranron, R., & Pongsoon, P. (2013). Study of Received Signal Strength Indication in ZigBee Location Cluster for Indoor Localization.
- Lin, X.-Y., Ho, T.-W., Fang, C.-C., Yen, Z.-S., Yang, B.-J., & Lai, F. (2015). Sistema móvil de posicionamiento en interiores basado en la tecnología iBeacon. IEEE.

- Romero, J. L. (2015). Análisis de señales electrocardiográficas usando técnicas de procesamiento digital. Catalunya: Universitat Oberta de Catalunya.
- Ruiz, A. J. (2009). Sistemas de localización geográfica en entornos de interior basados en tecnologías de comunicación inalámbricas. España.
- Subedi, S., Kwon, G.-R., Shin, S., Hwang, S.-s., & Pyun, a.-Y. (2016). Sistema de Posicionamiento de Interior basado en Beacon Usando el Método de Aproximación de la Localización por el Centroides Ponderado. IEEE.
- Subhan, F., Rozyyev, A., Hasbullah, H., & Tahir Bakhsh, S. (2011). Posicionamiento en interiores en redes Bluetooth utilizando la aproximación por Fingerprinting y Trilateración. Departamento de Informática y Ciencias de la Información. IEEE.
- Tanaka, K., & Naito, K. (2016). Implementación de un sistema inconsciente de detección de localización de buses con dispositivos smartphone y beacon. 13ª Conferencia Anual de Redes y Comunicaciones de Consumidores del IEEE. Facultad de Ciencias de la Información. 2016 13th IEEE CCNC.
- Tupuy. (2016). Google Play. Obtenido de https://play.google.com/store/apps/details?id=com.mwluis.tupuy&hl=es_PE
- Voswamatja, S., & Srinivasan, S. (2015). Modelo de predicción de pérdida de trayectoria mejorado para posicionamiento en interiores de corto alcance mediante bluetooth de baja energía. IEEE.
- Wang, Y., Ye, Q., Cheng, J., & Wang, L. (2015). Localización bluetooth en interiores basado en RSSI. IEEE.
- Xu, L. (2015). Diseño de un Sistema de Localización utilizando la RSSI para Entorno de Invernadero. IEEE.
- Yaringaño, G. S. (2012). Diseño de un sistema guía de recorridos en el museo de arte y tradiciones populares. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Zhujianyong, haiyong, L., zili, C., & zhaohui, L. (2014). Posicionamiento en interiores basado en la potencia de BLE. IEEE.

Electrónicas

ARAKAKI, C. (2016). Google Play. Obtenido de <https://play.google.com/store/apps/details?id=air.com.mali.audioguias>

Congreso de la República. (2017). Estadísticas de visitantes de los museos y sitios arqueológicos del Perú. Obtenido de [//congreso.gob.pe/museo/estadisticas.html](http://congreso.gob.pe/museo/estadisticas.html)

Estereofonica . (2013). Obtenido de <https://www.estereofonica.com/trendy/recorrer-el-museo-a-ritmo-propio/>

Museo De La Inquisición. (2013). Obtenido de [//clubensayos.com/Temas-Variados/Museo-De-La-Inquisicion/999512.html](http://clubensayos.com/Temas-Variados/Museo-De-La-Inquisicion/999512.html)