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

---

Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Computación

Cómputo vestible para asistir a personas con discapacidad visual

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Pablo Alberto Balboa Trigo

Ensenada, Baja California, México

2020

Tesis defendida por

Pablo Alberto Balboa Trigo

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. José Antonio García Macías

Director de tesis

Dr. Irvin Hussein López Nava

Dr. Jaime Sánchez García

Dr. Ana Isabel Martínez García

M. C. Christian Paul García Martínez

Dr. Israel Marck Martínez Pérez

Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Computación

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

Pablo Alberto Balboa Trigo © 2020

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

Resumen de la tesis que presenta Pablo Alberto Balboa Trigo como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Computación.

Cómputo vestible para asistir a personas con discapacidad visual

Resumen aprobado por:

Dr. José Antonio García Macías
Director de tesis

Las personas con discapacidad visual enfrentan desafíos únicos en su vida diaria mientras se desplazan, ya sea en lugares públicos o en sus hogares. El uso de un bastón y los perros guías son las herramientas tradicionales usadas por estas personas como asistencia en su movilidad. Sin embargo, con el bastón los usuarios solo pueden identificar los obstáculos que pueden tocar con el mismo, y no los que están por encima de la altura de su cintura; los perros guías necesitan de mucho tiempo para entrenarlos junto con el usuario discapacitado. Los sistemas de ayudas electrónicos de viaje utilizan tecnología de sensores para ayudar y mejorar la movilidad de los usuarios discapacitados visualmente, en términos de seguridad. En este contexto, se implementó un sistema modular, adaptable y escalable, cuyo objetivo es brindar a los usuarios discapacitados visualmente la capacidad de moverse en un entorno, ya sea en interiores o exteriores, de manera independiente. El sistema detecta los obstáculos mediante módulos vestibles basados en sensores ultrasónicos, conectados a un hub central para el procesamiento de la información a través de una aplicación móvil, formando una WBAN. Además, permite consultar servicios en la nube propios para obtener información relevante del usuario, o de terceros para obtener información de localización.

Palabras clave: discapacidad visual, módulos vestibles, sensores ultrasónicos, sistema de ayuda electrónico de viajes, WBAN

Abstract of the thesis presented by Pablo Alberto Balboa Trigo as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Computer Science.

Wearable computing to assist visually impaired people

Abstract approved by:

Dr. José Antonio García Macías
Thesis Director

People with visual impairments face unique challenges in their daily lives while on the move, whether in public places or at home. The use of a cane and guide dogs are the traditional tools used to assist these people in their mobility. However, using the cane, users can only identify obstacles that they can touch with it and not those that are above the waist level; guide dogs take a long time to train together with the disabled user. Electronic travel aid systems use sensor technology to assist and improve mobility for visually impaired users in terms of safety. In this context, a modular, adaptable and scalable system was implemented, the aim of which is to provide visually impaired users the ability to move around in an environment, whether indoors or outdoors, independently. The system detects obstacles through modules based on ultrasonic sensors, connected to a central hub for information processing through a mobile application, forming a WBAN. Also, it allows consulting its cloud services to obtain relevant user information or from third parties to get location information.

Keywords: visually impaired, wearable modules, ultrasonic sensors, electronic travel aid system, WBAN

Dedicatoria

A...

Mis padres, que son mi fuente de inspiración y apoyo, por hacer de mí el hombre que soy. Gracias por todo el apoyo y amor incondicional que siempre me han brindado.

Dios por la fuerza, por trazar este camino tan maravilloso para mí, y poner a personas tan maravillosas en él, que sin duda alguna dejarán su huella para toda la vida.

Mis compañeros de generación, por ser tan diversos y tan únicos, por enseñarme tanto y aceptarme como uno más.

Mis amigos de siempre, los que siempre han estado pendientes de mí y hacen mis logros, suyos.

Todas las personas que hacen posible la investigación en este hermoso país, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) que me permitió obtener una beca para la realización de este trabajo de investigación.

Agradecimientos

A mi director de tesis, el Dr. José Antonio García Macías por su constante orientación, su apoyo incondicional y su confianza en mí.

A los miembros del comité de tesis, el Dr. Irvin Hussein López Nava, la Dra. Ana Isabel Martínez García, el Dr. Jaime Sanchez García y el M.C Christian García por su generosa orientación, su paciencia y palabras alentadoras, sus comentarios constructivos, correcciones de tesis y su retroalimentación sobre el trabajo de investigación.

A mi amigo M.C Rewer Miguel Canosa Reyes, que fue el impulsor de esta etapa de mi vida, por sus consejos, apoyo y guía para lograr este sueño.

Al M.C Alberto Gabriel Ramos Salvio por siempre apoyarme en los trabajos más difíciles para mí, durante todo el proceso de investigación.

A todos los estudiantes y personal de CICESE, en especial a los miembros del departamento de ciencias de la computación por su apoyo y amistad.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, que me acogió para realizar mis estudios de posgrado y proporcionar las instalaciones y los medios necesarios para realizar mi investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría/doctorado. No. de becario: 18264288

Tabla de contenido

Página

Resumen en español ii

Resumen en inglés iii

Dedicatoria iv

Agradecimientos v

Lista de figuras viii

Lista de tablas x

Capítulo 1. Introducción

1.1. Discapacidad Visual 1
1.2. Asistentes tradicionales para personas con discapacidad visual 3
1.3. Asistentes por medios electrónicos 4
1.4. Definición del problema 5
1.5. Objetivos 7
1.5.1. Objetivo general 7
1.5.2. Objetivos específicos 7
1.6. Metodología de la investigación 7
1.7. Estructuración del documento 8

Capítulo 2. Trabajo Relacionado

2.1. Sistemas de redes sensoriales y cómputo vestible 11
2.1.1. Sistema de ayuda electrónica de viajes 12
2.1.1.1. Asistentes basados en sensores 14
2.1.1.2. Asistentes basados en visión por computadora 15
2.1.1.3. Asistentes basados en sensores y en visión por computadora 16
2.2. Limitaciones de los sistemas analizados 16
2.3. Conclusiones 18

Capítulo 3. Diseño del sistema

3.1. Metodología de desarrollo 19
3.2. Escenario de la situación problémica 21
3.3. Características del sistema propuesto 24
3.4. Diseño de la propuesta de solución 25
3.4.1. Tecnología inalámbrica para la intraconexión en la red WBAN: Bluetooth Low Energy 28
3.4.2. Aceptación de las tecnologías por parte de las personas débiles visuales 29
3.4.3. Principios de diseño empleados en la aplicación móvil 32
3.5. Conclusiones 34

Tabla de contenido (continuación)

Capítulo 4. Implementación del sistema
4.1. Arquitectura general del sistema . . . 35
4.2. Funcionalidad de detección de obstáculos . . . 37
4.2.1. Placa Arduino UNO . . . 37
4.2.2. Sensor ultrasónico HC-SR04 . . . 38
4.2.3. Sensor de Temperatura DHT11 . . . 40
4.2.4. Cálculo de la distancia hacia el obstáculo . . . 41
4.2.5. Dispositivo BLE utilizado: HM10 . . . 42
4.2.6. Librería “NewPing” para la implementación del funcionamiento del sensor en el Arduino Board . . . 46
4.2.7. Funcionamiento del módulo de forma independiente . . . 47
4.3. Conformación de la red WBAN . . . 48
4.4. Implementación de la aplicación móvil. . . . 54
4.5. Implementación de una API REST en la nube . . . 60
4.6. Base de datos en la plataforma MongoDB Atlas en la nube . . . 61
4.7. Conclusiones . . . 62

Capítulo 5. Experimentos y Resultados
5.1. Etapa de detección de obstáculos . . . 63
5.2. Etapa de creación de una WBAN y una aplicación móvil para la administración de los periféricos. . . . 66
5.3. Etapa de consumo de servicios web API REST . . . 68

Capítulo 6. Conclusiones
6.1. Aportes a la investigación . . . 73
6.2. Limitaciones del trabajo realizado . . . 74
6.3. Propuesta de mejoras para trabajos futuros . . . 75

Literatura citada . . . 77

Anexo . . . 81
.1. Especificaciones técnicas de la placa Arduino UNO: . . . 81
.2. Especificaciones técnicas del sensor HCSR04 . . . 81
.3. Características técnicas del sensor de temperatura DHT11 . . . 82
.4. Características técnicas del dispositivo BLE HM10 . . . 82
.5. Eventos Bluetooth Low Energy . . . 83
.6. Transmisión de datos dentro de Bluetooth Low Energy . . . 84
.7. Unidades de Datos de Protocolos . . . 85
.8. Seguridad y confiabilidad en la transmisión de la información dentro de Bluetooth Low Energy . . . 86
.9. Interferencia en la tecnología Bluetooth Low Energy . . . 88
.10. Modelo de datos de la base de datos en MongoDb . . . 89
.11. Sistema Postman para ejecutar las pruebas a la API REST . . . 90

Lista de figuras

Figura Página

1. Taxonomía para el análisis de las ETAs. 14
2. Metodología de desarrollo utilizada en este trabajo 19
3. Raúl caminando en la sala auxiliándose de su bastón, y su hija lo asiste. . 23
4. Raúl caminando por la ciudad con su bastón 24
5. Raúl caminando en la sala sin el bastón, ayudado por el sistema propuesto. 26
6. Raúl caminando por la ciudad auxiliándose del sistema 27
7. Diseño del sistema que se propone 28
8. Diseño de la arquitectura del sistema que se propone 36
9. Placa base Arduino Uno 38
10. Sensor ultrasónico HC-SR04 39
11. Interfaz de microcontrolador 40
12. Sensor de Temperatura DHT11 40
13. Dispositivo Bluetooth Low Energy 4.0 HM-10 43
14. Interfaz de serie UART HM-10 43
15. Perfil genérico del dispositivo HM-10 45
16. Prototipo de módulo sensorial 47
17. Evento de conexión entre periférico y central 50
18. Estructura de la información enviada del periférico al central 52
19. Estructura de la información enviada del central al periférico 52
20. Algoritmo criptográfico ECDH 53
21. Registrar un usuario nuevo 56
22. Acceder a la aplicación móvil 57
23. Funcionalidad de localización de la aplicación móvil 58
24. Configuración del usuario en la aplicación móvil 59
25. Configuración de los módulos desde la aplicación móvil. 60
26. Escenario de comprobación de las mediciones obtenidas por los módulos sensoriales. 64
27. Evento de anuncios 84
28. Perfil GATT 84
29. Estructura el PDU que transmite BLE 86
30. Clave de sesión única para la conexión BLE 87

Lista de figuras (continuación)

Figura Página

31. Modelo de Datos implementado en MongoDb 89
32. Ejecutando petición GET de un usuario en específico 90
33. Ejecutando petición GET de todos los usuarios del sistema 90

Lista de tablas

Tabla Página

1. Discapacidad visual a distancia 1
2. Discapacidad visual cercana 2
3. Porcentaje de la población con limitación en la actividad por entidad federativa, y las causas (nacimiento, enfermedad, edad avanzada, accidente y otra causa) 3
4. Comparación entre diferentes ETAs 13
5. Descripción de la API creada para el sistema 61
6. Cálculo de precisión y exactitud del módulo sensorial a 30cm de distancia de un obstáculo. 65
7. Cálculo de precisión y exactitud del módulo sensorial a 50cm de distancia de un obstáculo. 66

Capítulo 1. Introducción

En este primer capítulo se hará una introducción al problema que se quiere abordar en este trabajo. Se empezará explicando el problema de la discapacidad visual y se mostrarán valores que reflejan dicha situación en México. Se explicará cómo se ha resuelto dicho problema tradicionalmente, y cómo la tecnología ha tomado parte en mejorar las soluciones existentes. Este análisis permitirá definir los objetivos de este trabajo, y se terminará esta sección reflejando cómo estará estructurado este documento.

1.1. Discapacidad Visual

La visión, el más dominante de nuestros sentidos, juega un papel crítico en cada etapa de nuestras vidas, ya que por sí solo proporciona tanta información al cerebro como todos los demás sentidos combinados (World Health Organization and others, 2019). Sin ella, luchamos por aprender a caminar, leer, participar en la escuela y trabajar. La discapacidad visual se produce cuando una afección ocular afecta el sistema visual, y una o más de sus funciones visuales, lo cual trae consigo serias consecuencias para el individuo a lo largo del curso de la vida.

La Clasificación Internacional de Enfermedades (ICD - por sus siglas en inglés International Classification of Diseases) del 2018, caracteriza la discapacidad visual dividiéndola en 2 grupos principales: discapacidad visual a distancia y discapacidad visual cercana, como reflejan las tablas 1 y 2, respectivamente (World Health Organization and others, 2019).

Tabla 1. Discapacidad visual a distancia

Categoría	**Agudeza visual en el mejor ojo.**	
	Peor que:	Igual o mejor que:
Discapacidad visual leve	6/12	6/18
Discapacidad visual moderada	6/18	6/60
Discapacidad visual severa	6/60	3/60
Ceguera	3/60	

Tabla 2. Discapacidad visual cercana

Categoría	**Agudeza visual en el mejor ojo.**	
	Peor que:	Igual o mejor que:
Deterioro de la visión de cerca	N6 o N8 a 40cm de distancia	

La notación N6 o N8, mostrada en la tabla 2, significa que la impresión ‘N’ usa Times New Roman para las letras que se usan en la tabla; y, 6 y 8 es el tamaño de las letras (en puntos), el cual se considera normal.

Las personas con discapacidad visual, con frecuencia tienen peor salud y enfrentan barreras en la educación y el empleo (World Health Organization and others, 2019). Las consecuencias de la pérdida de visión también se pueden sentir dentro de una familia. Por ejemplo, las responsabilidades de cuidado pueden reducir las oportunidades de otros miembros de la familia para prosperar, aumentando con esto el riesgo de inducir a la pobreza si no hay otros miembros de la familia que se hagan cargo de la parte económica. El impacto también se experimenta a nivel nacional, donde tener una gran cantidad de personas con pérdida de la visión implica mayores costos, directos e indirectos, para el sector de la salud. El número de discapacitados visuales se está convirtiendo en un motivo de preocupación porque está aumentando en 2 millones por década. Una estimación ha demostrado que la cantidad de personas ciegas puede duplicarse en el 2020 (Velázquez, 2010).

México no se encuentra exento de esta situación. Según la base de datos del censo de población y vivienda del año 2010 [1], la relación de las personas con discapacidad visual estaba distribuida según la tabla 3:

[1] Recuperado el 21/05/2020 de https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/

Tabla 3. Porcentaje de la población con limitación en la actividad por entidad federativa, y las causas (nacimiento, enfermedad, edad avanzada, accidente y otra causa)

Entidad Federativa	Nacimiento	Enfermedad	Edad avanzada	Accidente	Otra causa
Estados Unidos Mexicanos	10.95	42.06	25.94	7.12	12.22
Aguascalientes	10.76	48.15	19.77	6.54	12.65
Baja California	14.01	43.08	18.57	7.27	13.34
Baja California Sur	9.25	39.04	20	11.12	15.83
Campeche	11.37	33.68	31.47	5.36	16.68
Coahuila de Zaragoza	9.9	37.8	24.79	8.39	17.87
Colima	9.25	41.92	23.37	10.22	14.35
Chiapas	7.11	42.49	29.23	7.31	12.88
Chihuahua	12.68	37.33	27.52	6.79	13.52
Ciudad de México	11.79	42.76	24.61	7.86	10.8
Durango	13.14	39.34	23.39	7.43	14.87
Guanajuato	11.45	41.26	26.94	6.63	12.57
Guerrero	7.41	38.67	34.97	6.54	11.44
Hidalgo	9.58	41.02	29.79	7.7	10.67
Jalisco	14.87	39.84	26.06	6.75	10.68
México	14.02	42.78	21.69	7.37	11.22
Michoacán de Ocampo	10.6	42.8	27.26	6.62	11.4
Morelos	8.78	46.24	26.44	5.56	12.03
Nayarit	13.74	31.89	34.2	7.17	11.69
Nuevo León	11.31	45.72	22.42	6.18	11.92
Oaxaca	7.75	35.93	35.88	7.52	12.06
Puebla	10.86	39.7	29.96	8.33	10.21
Querétaro	13.56	40.52	26.02	5.51	11.49
Quintana Roo	13.2	35.63	24.63	8.89	14.94
San Luis Potosí	10.82	42.18	27.58	6.29	11.48
Sinaloa	10.06	44.29	22.1	7.42	14.21
Sonora	7.23	64.58	15.22	4.75	6.85
Tabasco	8.99	47.25	21.48	6.92	14.51
Tamaulipas	9.88	40.97	22.56	7.47	16.4
Tlaxcala	13.66	39.74	26.11	7.25	11.94
Veracruz de Ignacio de la Llave	8.71	42	27.11	6.85	14.49
Yucatán	7.99	43	29.61	7.59	10.99
Zacatecas	11.37	42.81	27.94	6.96	8.29

La información anterior está referida al 12 de junio de 2010. Estos datos incluyen a las personas que aún con anteojos tenían dificultad para ver. Cabe destacar que, en todas las entidades federativas, los porcientos de la población afectada por esta discapacidad a causa de enfermedad, son los mayores comparados con los porcientos del resto de las causas.

1.2. Asistentes tradicionales para personas con discapacidad visual

Para lograr ayudar a las personas con discapacidad visual a valerse por si mismas, se han creado asistentes que les permitan un mejor entendimiento del ambiente que los rodea. Dentro de los asistentes tradicionales, se destacan el bastón y el perro guía, los cuales son usados como apoyo a la movilidad. El bastón se ha utilizado durante siglos. Su característica básica es que permite a los usuarios extender sus brazos

para alcanzar el suelo y los objetos frente a ellos, permitiendo informar características del entorno tales como la ubicación de los objetos, la textura y la dureza del suelo, la detección de cruces de calles y la dirección de los bordillos. Esto permite a las personas poder prevenir golpes y posibles caídas cuando se encuentran dirigiéndose hacia algún lugar en particular (Hersh y Johnson, 2008).

Al igual que el bastón, los perros guías se han utilizado desde hace miles de años, sin embargo el uso sistemático y generalizado de estos perros comenzó solo después de la Primera Guerra Mundial. Para lograr un apoyo adecuado de un perro guía, un requisito previo importante para el éxito es que se le capacite con las tareas correspondientes. El cachorro es cuidadosamente seleccionado y entrenado en escuelas especiales, y el usuario del perro guía también debe ser entrenado. Estos perros pueden ser útiles para la movilidad en el espacio cercano, pero no para la orientación en un entorno más amplio (Hersh y Johnson, 2008).

1.3. Asistentes por medios electrónicos

Por otro lado, con la evolución de la tecnología, se han aprovechado las ventajas de la misma para el desarrollo de asistentes por medios electrónicos. Desde que se introdujeron las primeras ayudas electrónicas de viajes (ETA- por sus siglas en inglés Electronic Travel Aid), el trabajo de los investigadores se ha concentrado en el diseño de mejores ayudas (Roentgen *et al.*, 2008). Sin embargo, el desarrollo de dichos sistemas de tecnología de asistencia, que permitirán a todas las personas ciegas o débiles visuales viajar con la misma confianza que las personas videntes, es un problema complejo de múltiples factores.

Las ETA generalmente se dividen en dos categorías: las ayudas primarias y las secundarias. Las ayudas primarias permiten el movimiento autónomo de los individuos, ya que proporcionan toda la información requerida para su funcionamiento de forma independiente. Las ayudas secundarias solo mejoran la movilidad y deben usarse junto con otras ayudas (por ejemplo, ayudas primarias). Además, las ETA se pueden clasificar como ayudas de movilidad y navegación, donde la primera ayuda al usuario a detectar y evitar obstáculos en su camino, y la segunda le permite al usuario encontrar el camino desde un punto de partida hasta su destino (Di Mattia *et al.*, 2016).

Existen muchos proyectos de investigación que buscan formas de acceso a la información de movilidad y orientación para personas con discapacidad visual. Estos involucran tecnologías y aplicaciones diversas como sistemas ultrasónicos, sistemas infrarrojos, tecnología GPS, sistemas de sustitución de visión, tecnologías de mejora de la visión, telefonía celular y tecnologías de redes de computadoras.

Hoy en día, los avances en el procesamiento de señales, las tecnologías de información y comunicación, la tecnología ultrasónica y la miniaturización de dispositivos, hacen que el desarrollo de un sistema de tecnología de asistencia multipropósito, de tamaño pequeño, sea una posibilidad realista. Un sistema con la capacidad de evitar obstáculos, de proveer orientación, y que incorpore interfaces al entorno construido, modificado para eliminar las barreras de la movilidad. Gracias a dichos avances, se puede lograr además, una integración y comunicación entre varios dispositivos, formando pequeñas redes usando tecnologías inalámbricas.

Los sistemas de redes de sensores corporales vestibles e implantables (WBAN- por sus siglas en inglés Wireless Body Area Network) son una aplicación destacada en la integración de tecnologías de sensores y electrónica de consumo, que permiten monitorear a las personas durante todas sus actividades diarias. Además, constituyen un campo activo de investigación y desarrollo, en el contexto de la salud ubicua, como una tecnología que promete aumentos en la eficiencia, precisión y disponibilidad de tratamiento médico. Lo anterior gracias a los recientes avances en comunicación inalámbrica y en electrónica, mediante sensores pequeños e inteligentes capaces de ser utilizados sobre el cuerpo o implantados en el mismo. Estos sensores se comunican con un nodo coordinador especial, que generalmente dispone de más energía y tiene más capacidad de procesamiento (Negra *et al.*, 2016).

En el próximo capítulo se abordará con mayor detalle el tema de las ETA, haciendo comparativas y señalando los alcances y las limitaciones que presentan.

1.4. Definición del problema

Como se mostró anteriormente, el número de personas afectadas por algún tipo de discapacidad visual va en crecimiento cada año. La movilidad independiente –dígase desplazarse de un lugar a otro, ya sea en interiores como exteriores-, como actividad

primordial para cualquier ser humano, en especial para las personas que sufren de este tipo de discapacidad, es un tema multifacético y se ha investigado desde diferentes perspectivas disciplinarias. De manera tradicional se ha apoyado a las personas con discapacidad visual mediante mecanismos como el bastón y los perros guías. El bastón es la ayuda de navegación más simple, barata y popular para las personas con discapacidad visual, que permite detectar obstáculos estáticos a través de la retroalimentación de fuerza táctil. Sin embargo, no proporciona toda la información requerida, como por ejemplo, la velocidad de un objeto, el volumen y las distancias para los obstáculos, datos que normalmente son recogidos por los ojos y son necesarios para la percepción del espacio y el control de la movilidad. Los perros guía son capaces de detectar y analizar situaciones complejas como pasos de peatones, escaleras, peligro potencial, pero requieren tiempo para su adiestramiento, se incurren en gastos en la salud del perro, etc. (Dobelle, 1994).

Desde el punto de vista tecnológico, se han desarrollado diversos sistemas para ayudar a las personas con discapacidad visual, pero una parte considerable de los mismos, poseen un alcance limitado (Islam *et al.*, 2019). Sin embargo, los distintos ETAs desarrollados no pueden satisfacer la demanda de los usuarios, algunos de ellos tardan mucho tiempo en realizar un experimento en un entorno de tiempo real; otros son muy caros y por ende inaccesible para muchos usuarios; algunos sistemas proporcionan cobertura interior, mientras que otros proporcionan cobertura exterior, sin embargo, se necesitan sistemas que cumplan con ambos requerimientos; su rendimiento está limitado por la rapidez, la operabilidad, la cobertura y la capacidad, que generalmente son accesibles para las personas que pueden valerse de sus ojos para la navegación (Islam *et al.*, 2019).

Debido a las razones explicadas anteriormente, en este trabajo se dio a la tarea de desarrollar un sistema ETA, de fácil adquisición económica y bajo consumo de energía, ligero, que sea útil en ambientes interiores y exteriores, que provea retroalimentación táctil y auditiva según sea de conveniencia para el usuario invidente, basado en sensores para poder monitorear la detección de obstáculos en tiempo real, y la ubicación del usuario para ayudarlo a determinar su ubicación o llegar a su destino. Resulta de gran necesidad para los usuarios con discapacidad visual, un sistema basado en tecnología que les permita poder anticipar posibles colisiones con obstáculos en su andar, ya sea

en interiores como en exteriores, y permita poder identificar dónde se encuentran, y lugares de interés a su alrededor. Esto haría la vida de los discapacitados visuales mucho más fácil.

1.5. Objetivos

En esta sección enunciamos tanto el objetivo general, como los objetivos particulares de este trabajo de tesis. En el capítulo 3 se abordará con detalle el análisis que condujo al establecimiento de dichos objetivos.

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar la base de una plataforma que permita asistir a personas discapacitadas visualmente en la detección de obstáculos, y en su movilidad por ambientes interiores y exteriores.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Analizar el estado del arte de los sistemas de ayuda electrónica de viajes, para determinar las aportaciones y limitantes de los trabajos más relevantes, mediante el estudio de artículos, libros y sitios de tecnología.
2. Diseñar e implementar un sistema modular, escalable y adaptable, para la asistencia de discapacitados visuales, a través de módulos sensoriales, una aplicación móvil y servicios en la nube.
3. Analizar cualitativamente y cuantitativamente la evaluación del sistema desarrollado, para revisar el cumplimiento de las funcionalidades requeridas, mediante equipos tecnológicos y la realización de pruebas funcionales.

1.6. Metodología de la investigación

Para el proceso de investigación de este trabajo, se estableció una metodología de investigación caracterizada por las siguientes etapas:

- Análisis de la literatura actualizada.
- Metodología de desarrollo caracterizada por 3 etapas:
  - Detección de obstáculos.
  - WBAN y aplicación móvil.
  - Servicios en la nube.
- Conclusiones del trabajo.

A su vez, cada etapa dentro de la metodología de desarrollo mencionada, se caracterizó por las siguientes actividades metodológicas:

- Análisis de los requerimientos.
- Diseño del sistema.
- Implementación del sistema.
- Realización de experimentos.
- Evaluación de los resultados.

El análisis de la literatura actualizada permitió obtener los antecedentes del problema en cuestión, se revisaron los dispositivos que se explican en cada uno de los sistemas que se proponen, y se pudo concluir las limitantes de cada uno de ellos. Luego se pasó a realizar una metodología de desarrollo a la que se le dedicará una sección completa en el capítulo 3, para una explicación a mayor detalle. Como desenlace del proceso investigativo, se presentan las conclusiones relacionadas con los resultados obtenidos, y se proponen sugerencias de trabajo futuro para mejorar el trabajo que se logró a lo largo de la investigación.

1.7. Estructuración del documento

En esta sección se detalla cómo se estructura el presente trabajo de tesis, describiendo brevemente los aspectos que se abordan en cada uno de los capítulos.

En el capítulo 2 se presenta el estado del arte sobre los sistemas ETA. Se detallan los fundamentos de esta investigación, se analizan trabajos relacionados a partir de los cuales se establece una clasificación de los sistemas ETA, y se reflejan las limitantes evidenciadas en estos trabajos.

El Capítulo 3 describe la metodología de desarrollo usada. Se plantea la motivación que propició la realización de este trabajo a través de un escenario que plantea el problema, y seguidamente las características que se proponen para el sistema a desarrollar. Luego se explica el diseño de la propuesta de solución y su concepción general.

El capítulo 4 detalla la implementación del sistema dividida en 3 etapas:

1. La funcionalidad de detección de obstáculos: dividida en el diseño e implementación de un prototipo modular sensorial.
2. La creación de una WBAN con los distintos módulos integrados, y la implementación de una aplicación móvil: cómo se realiza la transmisión de los datos, la seguridad y confiabilidad de los mismos, la creación de un modelo de datos diseñado para la información que se desea transmitir dentro de la WBAN, y cómo se aborda el problema de la interferencia en la tecnología inalámbrica seleccionada. Relacionado con la aplicación móvil, las consideraciones para su diseño, cómo realizar la administración de los módulos, la implementación de las distintas funcionalidades, etc.
3. La creación y consumo de servicios en la nube y de terceros: diseño de una API REST como servicio en la nube a consultar por la aplicación; creación de un modelo de datos diseñado para la información que se desea almacenar del sistema, y consumo de servicios de terceros por la aplicación como Google Maps y Google Routes.

El capítulo 5 está conformado por los experimentos y los resultados obtenidos en cada etapa de la implementación del sistema.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo de tesis, las contribuciones al conocimiento y las limitaciones. Finalmente, se comenta el trabajo futuro que

se propone asociado a la investigación.

Capítulo 2. Trabajo Relacionado

En este capítulo se refleja un estudio de la literatura actual referente al tema que se aborda en este trabajo. Se establece una comparativa entre varios artículos relevantes, y luego se explican las limitantes que presentan muchos de estos sistemas.

2.1. Sistemas de redes sensoriales y cómputo vestible

Con el notable avance en los últimos años de las tecnologías de la información y las comunicaciones, el auge de internet, el abaratamiento de los recursos de cómputo y la necesidad creciente de disponer de manera ubicua de hardware potente, se han desarrollado nuevas formas de brindar y acceder a recursos de cómputo. Los avances tecnológicos en sistemas micro-electromecánicos (MEMS - por sus siglas en inglés Microelectro-Mechanic Systems) y la integración a gran escala (LSI - por sus siglas en inglés Large Scale Integration) hacen que el campo de investigación de aplicación de sensores sea cada vez más relevante. Esta tendencia ha permitido la creación de tecnologías de red de sensores inalámbricos (WSN – por sus siglas en inglés Wireless Sensor Network), las cuales tienen el potencial de cambiar nuestro estilo de vida con diferentes aplicaciones en campos como la atención médica, el entretenimiento, los viajes, el comercio minorista, la industria, el cuidado de dependientes y administración de emergencias, entre otras áreas (Cook *et al.*, 2009). La combinación de sensores inalámbricos y redes de sensores, con la investigación en computación e inteligencia artificial, ha creado un concepto interdisciplinario de inteligencia ambiental para superar los desafíos que enfrentamos en la vida cotidiana.

La miniaturización y la reducción de costos de la electrónica moderna ha facilitado el ensamblaje de dispositivos portátiles pequeños y asequibles, denominados sensores, para sistemas de monitoreo de datos personales en tiempo real. En la actualidad ha habido un aumento en la demanda de tales dispositivos, en parte debido a la necesidad de servicios relacionados con la salud altamente centrados en la persona y basados en la prevención (Jacobsen *et al.*, 2011).

2.1.1. Sistema de ayuda electrónica de viajes

En 1971, Foulke definió la **movilidad** como "la capacidad de viajar de forma segura, cómoda, elegante e independiente a través del medio ambiente"(Dunai *et al.*, 2014). Con el avance del mundo tecnológico, muchos investigadores se han dado a la tarea de crear marcos de trabajo y herramientas de navegación para asistir a las personas ciegas o débiles visuales. Las ETAs han sido desarrolladas con el enfoque del cuidado de los problemas diarios asociados con la navegación y las ayudas a la ubicación, los cuales a su vez, están relacionadas con el soporte de movilidad desde la década de 1960. Dichos asistentes ayudan a las personas con discapacidad visual mediante la detección y localización de los obstáculos que los rodean, utilizando los sensores que dan sentido a la situación exterior (Hersh y Johnson, 2008) .

Los sistemas ETA permiten a los usuarios ciegos o débiles visuales, evitar los obstáculos advirtiéndoles sobre la presencia de los mismos en la parte frontal de la vista. Determinan la dirección, el rango, el ancho, la altura y otras particularidades del objeto. Dichos sistemas constituyen una esperanza para la comunidad discapacitada visualmente, permitiendo a los usuarios viajar con más confianza y seguridad, con menos tensión y estrés (Dunai *et al.*, 2014).

De la literatura revisada, se realizó una lectura detallada de las publicaciones de la tabla 4, analizando a detalle la propuesta hecha por cada uno de los autores en sus trabajos. En dicha tabla, se ofrece una comparativa entre todos los sistemas en cuanto a:

1. Dispositivos de Captura.
    - Sensores.
    - Cámara.
    - Ambos.
2. Retroalimentación.
    - Audio.
    - Vibración.
    - Ambos.

3. Espacio de Aplicación.
    - Exterior.
    - Interior.
    - Ambos.
4. Peso.
    - Pesado.
    - Ligero.
5. Costo.
    - Caro.
    - Barato.

En la tabla (Tabla 4) se presenta el análisis del rendimiento de los asistentes presentados en este trabajo.

Tabla 4. Comparación entre diferentes ETAs

	Dispositivos de Captura			**Retroalimentación**			**Espacio de Aplicación**			**Peso**		**Costo**	
Artículo	Sensores	Cámara	Ambos	Audio	Vibración	Ambos	Exterior	Interior	Ambos	Pesado	Ligero	Caro	Barato
(Diamantatos y Kavallieratou, 2014))		X				X	-	-	-		X	X	
(Basso *et al.*, 2015)	X					X		X			X		X
(Cecílio *et al.*, 2015)	X			X					X		X	X	
(Khenkar *et al.*, 2016)		X		X					X		X		X
(Galioto *et al.*, 2018)		X			X			X			X	X	
(Simoes *et al.*, 2018)			X			X		X			X	X	
(Yang y Ganz, 2019)	X			X				X			X		X
(Mehmood *et al.*, 2018)	X					X			X		X	Depende del sensor	
(Wang *et al.*, 2018)		X		X			X			X		X	
(Islam *et al.*, 2018)	X			X				X			X		X
(Yeboah *et al.*, 2018)	X			X			X			X		X	
(Dutta *et al.*, 2018)	X					X	X				X		X
(Cardillo *et al.*, 2018)	X				X				X		X		X
(Patil *et al.*, 2018)	X					X			X		X		X
(Rizvi *et al.*, 2017)	X					X			X		X		X
(Rocha *et al.*, 2016)			X	X					X		X		X
(Tsirmpas *et al.*, 2015)	X			X				X			X		X

Del análisis anterior, podemos concluir que cada sistema ofrece algo único sobre el resto, pero no puede abarcar todas las características, ya que un sistema perfecto debería tenerlas todas y numerosas funcionalidades. La conclusión más significativa es que ningún sistema puede ayudar completamente a las personas con discapacidad visual. Varios de ellos no pueden satisfacer la demanda de los usuarios perfectamente, porque se encuentran en su etapa inicial o en fase de investigación; algunos tardan mucho tiempo en realizar un experimento en un entorno de tiempo real; varios de ellos son pesados y costosos; algunos sistemas proporcionan cobertura interior, mientras que otros proporcionan cobertura exterior, sin embargo, la demanda del usuario es interior y exterior. Otro factor limitativo importante en la mayoría de los sistemas referenciados, es que no ofrecen al usuario poder disponer de sus manos libres para realizar otro tipo de tarea.

De la comparativa mostrada en la tabla 4, se definió una taxonomía temática que plantea 3 categorías de los sistemas que se exponen en cada uno de los artículos, enfocada sobre la base de la prioridad del método usado, es decir, qué método es el principal en el sistema que se explica, como se muestra en la figura 1:

Figura 1. Taxonomía para el análisis de las ETAs.

A continuación se explicarán las características de cada una de las categorías definidas en dicha taxonomía.

2.1.1.1. Asistentes basados en sensores

La mayoría de las ETAs están basados en sensores y proveen retroalimentación a través de señales auditivas, de vibración o ambas. Estas dependen de la información recopilada por los sensores para reconocer un obstáculo y evitarlo, calculando la distancia entre estos y los usuarios. De los sensores más usados, infrarrojos, radio frecuencia, ultrasónicos, de láser, radar, sonar, etc, los ultrasónicos son los más po-

pulares en la investigación y son los más aceptados por personas con discapacidad visual debido a su precisión, bajo costo, bajo consumo de energía y facilidad de uso (Hakim y Fadhil, 2019).

Según el tipo de información de medición que dan como salida, los sensores se pueden clasificar en propioceptivos (medir un atributo con respecto a su propio estado) y exteroceptivos (medir un atributo de un objeto externo presente en la escena). Los sensores propioceptivos (acelerómetros, sensores de inclinación, sensores de posición, etc.) monitorean el movimiento midiendo la cantidad cinética como la aceleración y la velocidad. Los sensores exteroceptivos (cámaras, sonares, escáneres láser y radares de microondas, etc.) se usan para proporcionar una representación del entorno (Discant *et al.*, 2007).

2.1.1.2. Asistentes basados en visión por computadora

Los sensores de visión funcionan de manera similar a los ojos de los seres humanos. Esto es por medio de un procesamiento de datos utilizando el espectro electromagnético (en el espectro general visible o infrarrojo) para producir una imagen. En el contexto de detección y clasificación de obstáculos, se utilizan para reconocer y clasificar objetos mediante el uso de cámaras CCD (dispositivo de carga acoplada) como sensores de visión. (Discant *et al.*, 2007)

Los sistemas desarrollados para realizar la tarea de detección de obstáculos basados en la visión, se pueden dividir en dos categorías: una basada en la información de profundidad de los objetos (extraída con imágenes estéreo) y otra basada en la información de movimiento de los objetos (extraída con imágenes de video en diferentes momentos). Usando una traducción de perspectiva en el espacio respectivo en el tiempo, la información de profundidad o movimiento resultante puede usarse para distinguir los obstáculos del suelo mediante la segmentación de profundidad, la detección de bordes o el crecimiento del área.(Discant *et al.*, 2007)

2.1.1.3. Asistentes basados en sensores y en visión por computadora

Una idea muy utilizada es combinar las entradas de sensores diferentes. De esa manera, la ventaja de una tecnología se puede utilizar para compensar la limitación de otra. El proceso de combinación se denomina "fusión de sensores". Un proceso de fusión de sensores tiene lugar en diferentes niveles: bajo o alto nivel. Un nivel bajo (nivel de datos) significa que la fusión se realiza en la información de datos y combina los resultados antes de tomar una decisión difícil. La de alto nivel significa que la fusión se establece en una lista de objetos, y combina los resultados de diferentes módulos después de tomar algunas decisiones sobre el tamaño y la posición del obstáculo. (Discant *et al.*, 2007)

Muchas veces, el uso de un solo sensor no es muy útil para un sistema de detección de obstáculos, porque no existe un sensor tan perfecto que pueda proporcionar información rica sobre el entorno en cualquier condición climática y en cualquier situación de iluminación. Usando diferentes tecnologías de sensores juntas, el rendimiento del sistema se puede mejorar significativamente. Así, uno o más sensores de diferentes tecnologías se juntan para lograr una mejor funcionalidad.

2.2. Limitaciones de los sistemas analizados

El primer factor y el más importante, el cual es común para las 3 categorías y al que muy pocos trabajos hacen referencia, es el usuario final. Es primordial la aceptación del sistema que se proponga por el discapacitado visual, para que esté dispuesto a usarlo. Algunos de los trabajos analizados anteriormente no hacen mucho énfasis en este aspecto, otros ni siquiera hacen alusión, lo cual implica que no se tomaron en cuenta las características del usuario final en el desarrollo del sistema, ni en la aceptación del mismo. En nuestro trabajo, sí se toma en cuenta la opinión del usuario a través de estudios de artículos basados en entrevistas, y experiencias de compañías que diseñan aplicaciones para ser usadas por discapacitados visualmente.

Además de la limitante anterior, otra que resalta es el hecho que los sistemas propuestos son concebidos con un diseño y estructura fija, por lo cual una modificación al mismo resultaría en un proceso de rediseño y reestructuración. Esto trae consigo que su funcionalidad está restringida producto de las condiciones anteriores. En otras

palabras, son sistemas estáticos y están concebidos para realizar el objetivo para el que fueron construidos únicamente. Lo anterior resulta una limitante si se quiere continuar con el trabajo que proponen en sus artículos, o mejorarlo añadiéndole nuevas funcionalidades.

Analizando los tipos de trabajos de manera particular, además de las limitaciones expuestas hasta este momento, podemos destacar otras de acuerdo a las categorías que definimos previamente:

Limitaciones de sistemas basados en sensores:

- Las condiciones climáticas influyen de manera directa en todos los sensores, por lo tanto, es un factor de riesgo a considerar a la hora de conformar el módulo sensorial.
- El fenómeno de interferencia está presente en cada uno de los sistemas y se tiene que tratar con suma importancia, puesto que las soluciones que se presentan no son 100 % efectivas.

Limitaciones de sistemas basados en visión por computadora:

- Los problemas principales de los sensores de visión infrarrojos es que son sensibles a las condiciones climáticas (lluvia, niebla, nieve, etc.).
- Debido a que los sensores de espectro visible son pasivos (se requiere una fuente de energía natural), tienen limitaciones debido a las condiciones de iluminación y posibles sombras. El problema principal es que no son adecuados para condiciones oscuras.

Limitaciones de sistemas basados en sensores y en visión por computadora:

- Son más complejos de implementar porque requieren de más tecnología, los algoritmos tienen que ser más complejos y robustos, con lo cual incrementa el margen de error a considerar en las pruebas.
- Al requerir más tecnología, se hacen más costosos y por ende más difíciles de reproducir y que puedan ser adquiridos por los usuarios finales.

2.3. Conclusiones

En este capítulo se presentó el trabajo relacionado sobre los sistemas ETA y un análisis de las limitaciones que presentan muchos de ellos. Se mostraron los sistemas de ayuda electrónicos de viajes que más resaltaron del análisis de la literatura relacionada, desglosándolos en subcategorías. En el próximo capítulo, se presenta la motivación que nos llevó a desarrollar este trabajo, a partir del cual definiremos nuestra propuesta de solución y la metodología de desarrollo que se siguió.

Capítulo 3. Diseño del sistema

En este capítulo se comienza explicando la metodología de desarrollo que se siguió durante el proceso de diseño del sistema. Luego se resalta un escenario donde se muestra la situación problémica que llevó a la realización de este trabajo, y seguidamente las características que se proponen para el sistema que se quiere implementar. Lo anterior trae como resultado el diseño de la propuesta de solución, donde se muestra la concepción del sistema propuesto.

3.1. Metodología de desarrollo

Para llevar a cabo el estudio del problema en cuestión, se implementó una metodología de desarrollo en cascada, caracterizada por 3 etapas, las cuales se presentan a continuación en la figura 2

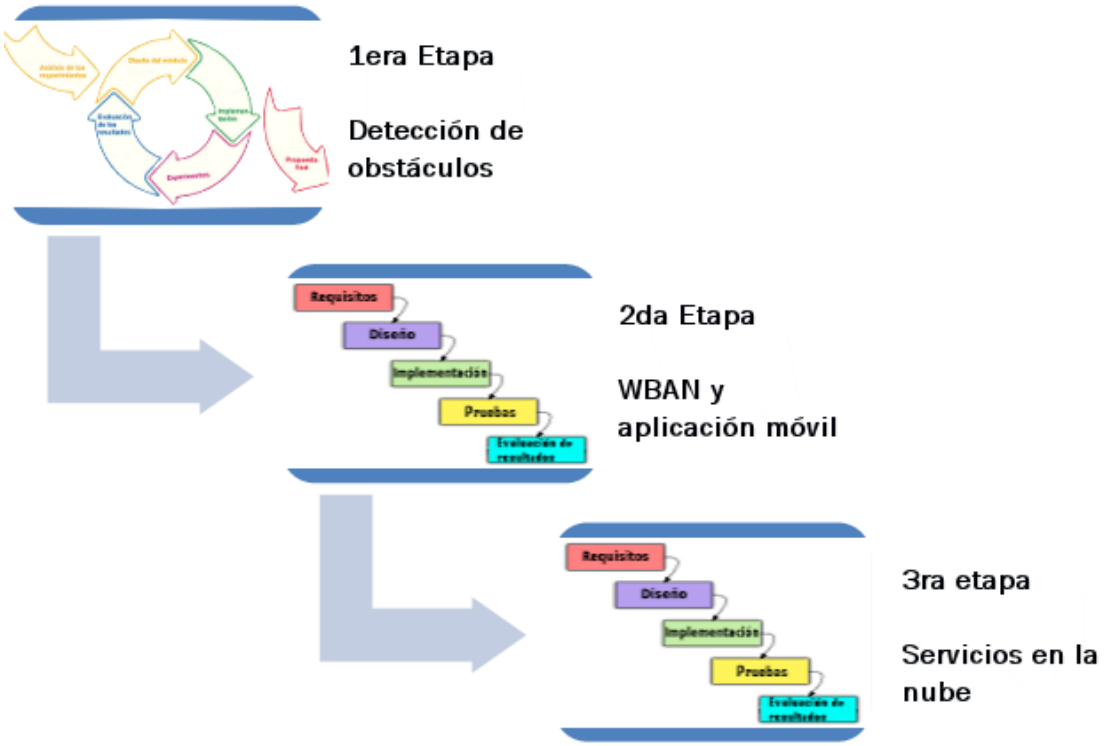

Figura 2. Metodología de desarrollo utilizada en este trabajo

La primera etapa, como se puede observar, está relacionada con la funcionalidad de detección de obstáculos. Aquí se comenzó por un análisis de los requerimientos a partir del estudio del estado del arte, para la confección de un módulo sensorial. Después, se implementó una metodología iterativa, compuesta primeramente por el diseño del módulo, revisando cada dispositivo sensorial posible a usar, su funcionalidad y disponibilidad en el mercado; y su implementación utilizando las herramientas y librerías necesarias para ello. En la etapa de experimentación se realizaron pruebas donde el módulo sensorial implementado pudiera detectar los obstáculos en frente de él, y proveer retroalimentación vibratoria. También se realizaron mediciones para determinar el rango, la precisión y la exactitud del módulo sensorial. Los resultados obtenidos fueron evaluados a través de una comparativa entre los valores de distancia hacia los obstáculos, obtenidos de 2 prototipos de módulo sensorial implementados, para determinar que ambos funcionen de la misma manera. Esto permitió que se obtuvieran ideas que llevaron a mejoras en el diseño. Este ciclo se realizó hasta obtener el módulo sensorial que se usó en este trabajo. Una vez culminado, se dio fin a la primera etapa de este proceso investigativo.

La segunda etapa estuvo encaminada hacia la creación de una red WBAN y una aplicación móvil, para conectar todos los módulos sensoriales creados en la primera etapa, a un hub central, que en este caso es el propio móvil de los usuarios discapacitados visualmente. De igual manera que la etapa anterior, se comenzó por un análisis de los requerimientos para la conformación de la red WBAN en cuanto a estructura, tipo de conexión, protocolos a usar, etc.; y de la aplicación móvil, teniendo en cuenta la revisión de recomendaciones realizadas en estudios anteriores, opiniones de las personas discapacitadas visualmente sobre el uso de la tecnología y su aceptación. Luego se realizó el diseño de la WBAN, definiendo su topología, protocolos a usar, y paquetes de transmisión de datos; y el de la aplicación móvil, concentrado en la interfaz de usuario, donde se presentan las consideraciones que se tuvieron en dicho diseño para que el usuario discapacitado pueda interactuar con el sistema. Posteriormente se realizó la implementación de ambos recursos mediante el uso de lenguajes de programación y herramientas tecnológicas. Una vez culminada la implementación, se realizaron pruebas para comprobar la funcionalidad de ambos recursos, mediante la conexión de varios módulos sensoriales formando una red WBAN con el hub central, y poder obtener los valores de distancia que transmiten los módulos sensoriales, a

través de la aplicación; revisar que se obtenga retroalimentación auditiva al usuario; realizar configuraciones de parámetros del módulo sensorial como activar/desactivar la retroalimentación vibratoria, definir el umbral de distancia en el que se notifica la presencia de un obstáculo, etc. La evaluación de los resultados obtenidos de las pruebas anteriores, permitió arribar a conclusiones que se detallan en la última etapa de este proceso de investigación.

Entrando en la última funcionalidad desarrollada en este trabajo, la tercera etapa estuvo relacionada con los servicios en la nube. De igual manera, se comenzó con un análisis de los requerimientos a partir del estudio del estado del arte, para determinar cuales serían las necesidades de los usuarios finales que pudiéramos cubrir, qué protocolo usar para la transferencia de información, que tecnologías serían las más apropiadas para la creación de este servicio web, etc. Una vez definidos los requerimientos, se pasó al diseño de una API REST para la consulta y almacenamiento de la información concerniente a los usuarios discapacitados visualmente. La implementación del diseño se realizó mediante el uso de lenguajes de programación, librerías y el uso de plataformas en la nube. Una vez desarrollada la API REST, se realizaron pruebas para comprobar su funcionalidad mediante la ejecución de llamadas a los métodos de las APIs y verificar que devuelven los valores esperados, verificar que el formato de las respuestas sea el que se espera, y que los encabezados del protocolo HTTPS de la respuesta obtenida sean válidos. Los resultados obtenidos fueron evaluados teniendo en cuenta el estado del sistema, el formato de las respuestas, la estructura de la URL, los códigos de estado HTTP y el manejo de errores. Dichos resultados permitieron obtener una seria de conclusiones que se plasman en la última etapa de la investigación.

Una vez explicada la metodología de desarrollo implementada en este trabajo, se explicará un escenario que demuestre la situación problémica que se busca resolver con el desarrollo de esta investigación.

3.2. Escenario de la situación problémica

Un escenario es una “descripción narrativa informal” (Carroll, 2000). La técnica de escenarios describe las actividades o tareas humanas en una historia que permite la exploración y discusión de contextos, necesidades y requisitos. No describe necesaria-

mente el uso de software u otro soporte tecnológico utilizado para lograr un objetivo. El uso del vocabulario y la redacción de los usuarios significa que las partes interesadas pueden comprender los escenarios y pueden participar plenamente en el desarrollo (Sharp *et al.*, 2019).

En la etapa de análisis de los requerimientos, los escenarios enfatizan el contexto, los objetivos de usabilidad, experiencia del usuario y las actividades en las que participa. Los escenarios a menudo se generan durante talleres, entrevistas o sesiones de lluvia de ideas para ayudar a explicar o discutir algún aspecto de los objetivos del usuario. Capturan solo una perspectiva, tal vez un solo uso del producto, o un ejemplo de cómo se puede lograr un objetivo (Sharp *et al.*, 2019). A continuación se define el siguiente escenario, donde se describe con más detalle el problema que se abordará en este trabajo de tesis.

Raúl es un hombre de 59 años que no siempre fue discapacitado visualmente. Su discapacidad comienza a partir de la adolescencia. Parte de su juventud la pasó con problemas de visión, aunque todavía era independiente. Ya después de los 20 años empezó a ser dependiente porque se vió mas afectada su visión. A sus 40, deja de ver siluetas y se considera como persona que no ve; solamente puede distinguir la luz del sol o luces muy intensas. Él convive con su hija, su yerno y sus 2 nietos. Para ayudarse a mover, actualmente usa un bastón para ciegos, porque hace algunos años falleció su perro guía que estuvo con él por más de 10 años.

Durante sus actividades diarias, Raúl se encuentra con escenarios como los que se detallan a continuación. La figura 3 muestra una tarde en la que Raúl se quiere sentar a conversar con su familia en la sala. En todo momento se auxilia de su bastón para no tener que tropezar con algún mueble, o con uno de sus nietos que andan jugando. No obstante, algún otro miembro de la familia siempre acude a ayudarlo cuando hay situación en la que pueda haber riesgo de caerse. Esto muchas veces hace sentir un poco mal a Raúl porque siempre tiene que estar dependiendo de alguien más. Por otra parte, el resto de la familia tiene que tener cuidado porque Raúl anda con el bastón y pueden chocar con él.

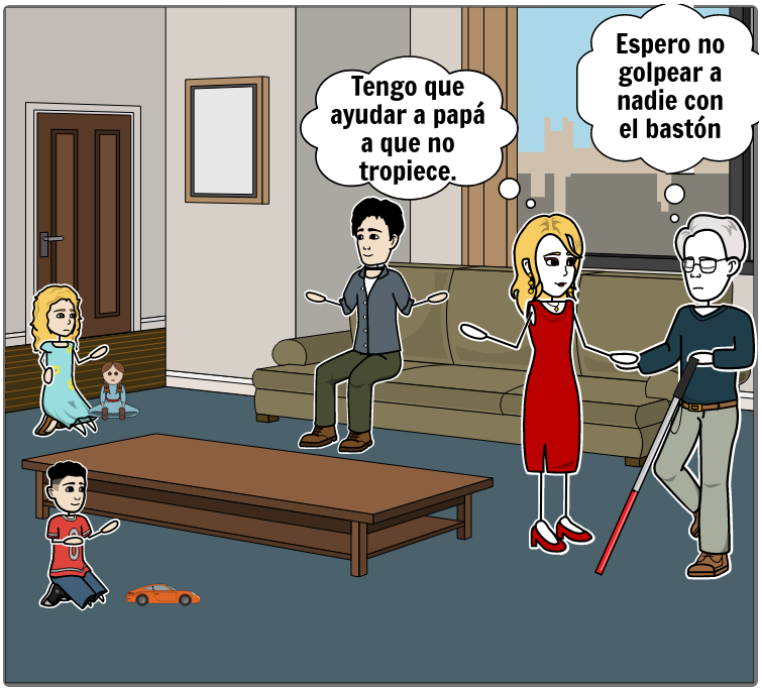

Figura 3. Raúl caminando en la sala auxiliándose de su bastón, y su hija lo asiste.

En la Figura 4 se ve cuando Raúl sale a hacer algún pendiente o simplemente porque siente la necesidad de salir a pasear. Si pasa por debajo de un árbol y hay alguna rama a nivel del pecho o la cabeza, él no se da cuenta y se puede golpear. En su andar, encuentra otros tipos de obstáculos (e.g. bancos, farolas, etc.) de los cuales también necesita cuidarse. Por otra parte, mientras pasea, no sabe a ciencia cierta de los lugares que hay a su alrededor que pudieran ser de su interés, por lo cual tiene que auxiliarse de personas que lo ayuden a ubicarse por donde va, para saber cuánto le falta para llegar o cómo seguir, hacia su destino.

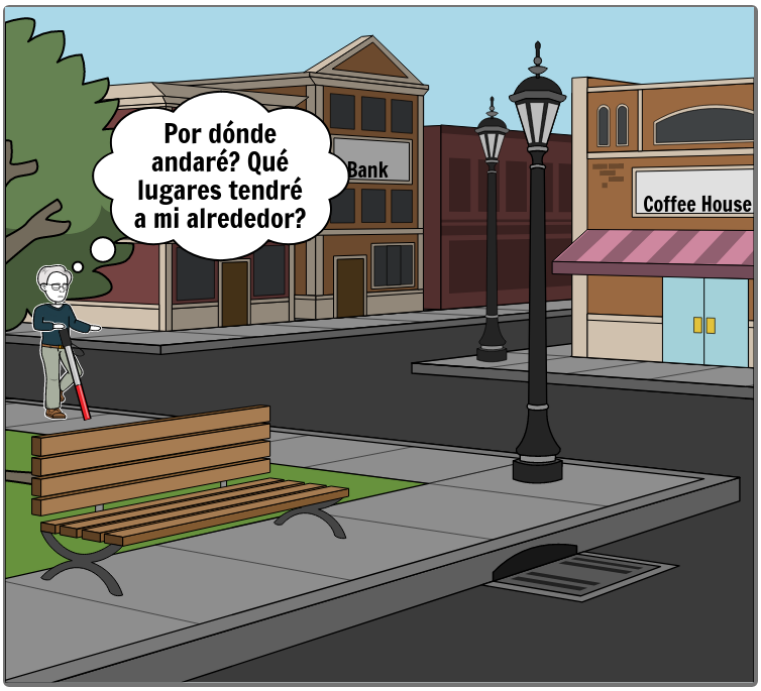

Figura 4. Raúl caminando por la ciudad con su bastón

A partir de la situación de Raúl, se pueden observar las limitantes a las que se enfrentan la mayoría de las personas discapacitadas visualmente. Basados en estos posibles escenarios, así como en la revisión de la literatura, enseguida se presentan las características que tendrá el sistema que se propone en este trabajo, como apoyo a la movilidad de personas invidentes o con problemas de discapacidad visual.

3.3. Características del sistema propuesto

El sistema de apoyo a la movilidad para personas discapacitadas visualmente que se propone, contará de 3 partes fundamentales:

1. Un módulo sensorial, basado en sensores ultrasónicos, que podrá ser ubicado en distintas partes del cuerpo. Podrá haber tantos como el usuario necesite, para la detección de obstáculos.
2. Una aplicación móvil que permitirá controlar los distintos dispositivos creados, formando una WBAN. Además, se conectará a un servicio en la nube para obtener datos de importancia para el usuario. Dicha aplicación móvil estará desarrollada para que pueda ser instalada en sistemas IOS y Android.

3. Un mecanismo de acceso a servicios en la nube, tanto propios como de terceros, para consultar información relacionada con los usuarios, y de importancia para los mismos.

Además, cumplirá con tres factores fundamentales: escalabilidad, modularidad y adaptabilidad, tal como se describen a continuación.

1. **Modular**: Cada dispositivo será un módulo independiente que podrá funcionar aún si no se encuentra conectado a una red WBAN. El usuario podrá añadir cuantos módulos él necesite.
2. **Escalable**: El sistema tendrá la capacidad de crecer desde un simple módulo funcionando independientemente, hasta un conjunto de módulos integrados como parte de un sistema personal WBAN, y un poco más allá, poder ser integrado en entornos inteligentes en interiores, y utilizar servicios en la nube para obtener información de interés de los usuarios del sistema.
3. **Adaptable**: Es un sistema que podrá ser usado tanto en ambientes interiores como exteriores, y podrá ser configurable por los usuarios para satisfacer sus necesidades a partir de sus experiencias.

Además, se pretende que sea un sistema de bajo costo, que use tecnología de bajo consumo de energía, y que les permita a los usuarios disponer libremente de sus manos para ejecutar otra tarea que así lo requiera. Enseguida se explican los escenarios descritos anteriormente, pero ya mostrando como el sistema que se propone, apoyaría en cada una de las situaciones.

3.4. Diseño de la propuesta de solución

Para dar cumplimiento a las características descritas anteriormente para el sistema, se decidió crear unos módulos sensoriales, compuestos por un sensor ultrasónico, un sensor de humedad y temperatura, un motor vibrador, un dispositivo de conexión inalámbrica de baja energía y una placa madre, a la que se conectarán todos los dispositivos anteriores. Dichos módulos podrán detectar obstáculos en frente de ellos,

emitiendo una señal vibratoria de retroalimentación al usuario para alertarlo de la presencia de los mismos.

Si el usuario discapacitado desea adquirir más de un módulo, puede obtener una funcionalidad mayor. Todos los módulos pueden conectarse a un dispositivo central, al cual llamaremos hub central, mediante tecnología inalámbrica, creando una WBAN con topología de estrella. Una vez conformada la red WBAN, todos los módulos, en lo adelante periféricos, enviarán los datos obtenidos de sus lecturas hacia el hub central, donde se realizará un procesamiento de dichos datos, y se enviará una señal auditiva de precaución al usuario en caso de detectar alguna presencia de obstáculo por alguno de sus módulos.

Enseguida se ilustra el escenario anteriormente descrito, cuando el usuario Raúl se encuentra en su casa, moviéndose por la sala. La figura 5 muestra como Raúl ya no necesita de la asistencia del resto de la familia cuando se dirige a la sala donde se encuentran, ya que uno de los periféricos detecta que tiene un obstáculo en frente de él, emite una vibración, y el hub central emite una alerta en forma de mensaje auditivo al usuario. Como vemos, en interiores ya el bastón no constituye un impedimento para cuando Raúl se quiere desplazar dentro de la casa.

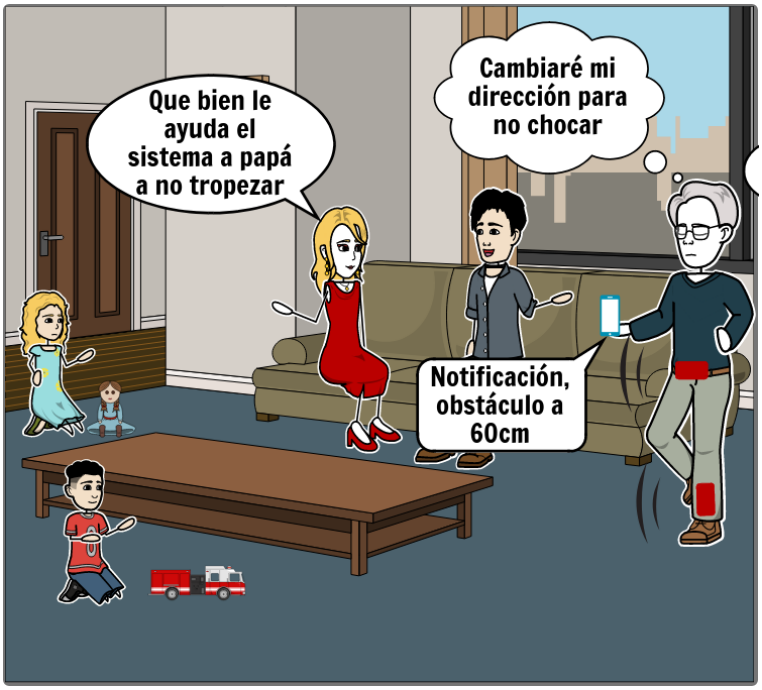

Figura 5. Raúl caminando en la sala sin el bastón, ayudado por el sistema propuesto.

En el caso cuando Raúl haya salido de la casa, como se muestra en la figura 6, con la ayuda del sistema ya Raúl puede saber los lugares de interés por donde esté transitando, e incluso saber dónde se encuentra, sin necesidad de preguntarle a ninguna persona. Solamente usando su móvil donde tiene la aplicación del sistema, accede a la funcionalidad de localización, y selecciona la opción que desee, ya sea obtener su ubicación o saber que lugares existen cerca de donde se encuentra, etc.

Figura 6. Raúl caminando por la ciudad auxiliándose del sistema

También podrá detectar obstáculos que se encuentren a una altura superior de la cintura hasta la cabeza, colocando uno de los módulos sensoriales a ese nivel que requiere verificación de obstáculos. A medida que va usando el sistema lo puede ir configurando a partir de las experiencias que va obteniendo.

Además de realizar el procesamiento de la información que se recibe de los periféricos, el hub central puede consultar información de APIs en la nube, propias como la que definimos en este trabajo, o de terceros (*e.g.* Google Maps), para ayudar a los usuarios a ubicar donde se encuentran, y además para identificar lugares de interés a su alrededor, de manera que los puedan compartir con amigos, si así lo prefieren. La información que consultará la API del sistema estará almacenada en una base de datos diseñada en este trabajo y dispuesta en la nube también.

Toda la funcionalidad del hub central explicada anteriormente, será a través de una aplicación móvil en un teléfono inteligente, conectado a internet a través una red WIFI, o simplemente haciendo uso de los datos móviles del plan de la compañía que tienen contratado. Hay que destacar que los teléfonos inteligentes modernos, tienen una capacidad de procesamiento suficiente para ejecutar la lógica implementada en la aplicación móvil.

A continuación, en la figura 7, se muestra la concepción del sistema que explicamos anteriormente:

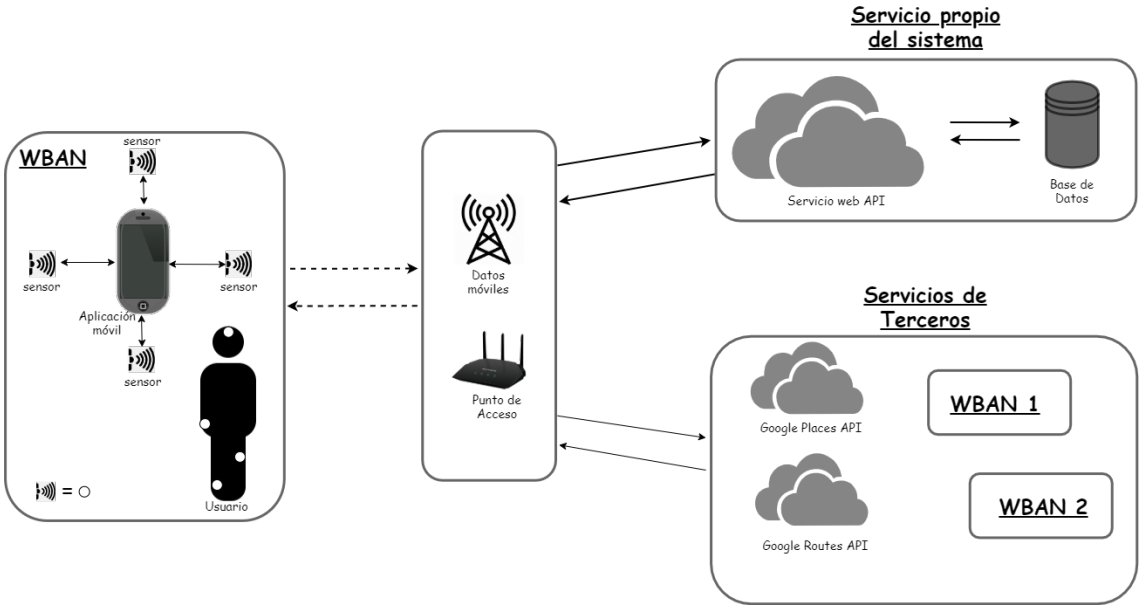

Figura 7. Diseño del sistema que se propone

3.4.1. Tecnología inalámbrica para la intraconexión en la red WBAN: Bluetooth Low Energy

Para el diseño de la WBAN se investigó entre las tecnologías inalámbricas que existen y de las más usadas, cuál podría ser la más adecuada para el sistema que se quiere lograr, teniendo en cuenta los requerimientos de bajo costo, bajo consumo de energía, buena sincronización entre los equipos, baja latencia, capacidad de coexistencia y velocidad de los datos.

Mediante el análisis de la literatura, se encontraron tecnologías como Bluetooth, Bluetooth Low Energy, Zigbee, Ultra Wideband, ANT y WIFI. Después de un análisis de los beneficios y las deficiencias de cada una, se decidió que la tecnología que me-

jor se aplica para el sistema que queremos desarrollar es Bluetooth Low Energy, en lo adelante BLE, porque además de cumplir con los requerimientos que mencionados anteriormente, es una tecnolofía que se encuentra implementada en los teléfonos inteligentes, desde su versión 4.0 en dispositivos Apple a partir del Iphone5, y en dispositivos Android a partir de la versión 4.3. BLE está ampliamente integrado con dispositivos de entrenamiento y dispositivos médicos (por ejemplo, relojes inteligentes, medidores de glucosa, oxímetros de pulso, etc.), así como dispositivos de hogares inteligentes (por ejemplo, cerraduras de puertas) [1].

BLE se introdujo en 2011, como una característica distintiva de Bluetooth v4.0. Es ideal para aplicaciones que requieren transferencia episódica o periódica de pequeñas cantidades de datos. Por lo tanto, BLE es especialmente adecuado para sensores, actuadores y otros dispositivos pequeños que requieren un consumo de energía extremadamente bajo. Muchas características del Bluetooth clásico se heredan en BLE, incluido el salto de frecuencia adaptable (AFH- por sus siglas en inglés Adaptative Hpping Frecuency). Estas características heredadas facilitan la configuración de BLE y lo hacen robusto y confiable en entornos difíciles Andersson (2014). Opera en la banda de frecuencia de aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM- por sus siglas en inglés Industrial Scientific and Medical), a nivel mundial, la cual abarca las frecuencias entre los 2.4 GHz y los 2.5 GHz. Es compatible con varias topologías de red tales como punto a punto, estrella y malla, siendo una de las pocas tecnologías de baja potencia que cuenta con esta característica. La última versión estable de BLE es la 5.2, de mayo de 2020, la cual cuenta con garantía de compatibilidad con dispositivos que ejecuten la primera versión de BLE, la 4.0 [2].

3.4.2. Aceptación de las tecnologías por parte de las personas débiles visuales

En los sistemas basados en teléfonos inteligentes, un aspecto importante de análisis a la hora de desarrollar aplicaciones para los usuarios con discapacidades, es su aceptación de las tecnologías. Por sorprendente que parezca, es poca o ninguna la investigación que se ha realizado sobre las circunstancias particulares inherentes a

[1] Recuperado el 30/05/2020 de https://behrtech.com/blog/6-leading-types-of-iot-wireless-tech-and-their-best-use-cases/

[2] Recuperado el 06/06/2020 de https://www.bluetooth.com/

la adopción de la tecnología por parte de las personas con discapacidad visual. Estos incluyen problemas de usabilidad, donde los dispositivos o aplicaciones no están diseñados o no se han adaptado para personas que tienen necesidades particulares, la extensión y el tipo de soporte ofrecido (posiblemente de mayor relevancia para personas con discapacidades de aprendizaje) y sus diferentes necesidades (Theodorou y Meliones, 2019).

Cuando se diseña y configura adecuadamente, la tecnología puede ser poderosa, mejora significativamente el acceso a la información a través de varios canales, proporciona acceso a la cultura, y permite independencia en la vida social y profesional. El diseño accesible es un buen diseño: una interfaz de usuario (UI- por sus siglas en inglés User Interface) accesible, abre experiencias a una gama más amplia de usuarios y mejora las experiencias para los usuarios existentes. Al diseñar para discapacitados, se están resolviendo problemas para unos pocos, pero extendiéndose a muchos. Tomemos, por ejemplo, la navegación con teclado: los usuarios con movilidad limitada usan el teclado para navegar por las pantallas, pero muchos otros usuarios también usan teclados para navegar rápidamente por las páginas. Claramente, todos los usuarios pueden beneficiarse de características más accesibles, y el diseño de la interfaz de usuario accesible no es diferente [3].

El modelo de aceptación de la tecnología (TAM- por sus siglas en inhlés Tecnology Acceptance Model) fue introducido por Fred Davis (1989), basado en la teoría de la justificación, y tiene como objetivo explicar el por qué y cómo las personas escogen usar un tipo de tecnología sobre otro. Un estudio realizado por Theodorou y Meliones (2019), propone una serie de mejoras que debieran aplicarse al modelo de aceptación de la tecnología para usuarios con discapacidades.

El estudio se basó en el análisis cualitativo de entrevistas realizadas a una muestra de personas ciegas y débiles visuales altamente informada y articulada de tres expertos:

- El Jefe del famoso instituto griego ’Faro de los ciegos’, que es ciego.
- Un maestro, también ciego, del sistema Braille para leer y escribir, que también

[3]Recuperado el 11/06/2020 de https://medium.com/microsoft-design/an-accessibility-checklist-for-designers-and-developers-a53a7d2d2c97

enseña a las personas ciegas cómo usar las nuevas tecnologías, como los teléfonos inteligentes.

- Una guía de museo para mujeres con discapacidad visual.

Las preguntas de las entrevistas estuvieron enfocadas en:

- Experiencia personal en el proceso de la pérdida de visión.
- Conocimiento o experiencia con tecnologías de ayuda a discapacitados visuales.
- Familiaridad con aplicaciones y software preexistentes (por ejemplo, mapas de Google para la navegación con indicaciones de voz) y si son fáciles de usar.
- Uso de hardware / dispositivos particulares.
- Tipo y uso de auriculares (una preferencia por Bluetooth o cable), y experiencias sobre cómo se reproducen los sonidos ambientales.
- Vivencias con otros usuarios discapacitados visualmente.

Las preguntas relacionadas con el desarrollo de la aplicación incluyeron:

- Cómo se debe configurar un teclado.
- Cómo se deben usar los sonidos para indicar obstáculos (por ejemplo, sonido continuo que aumenta la frecuencia y sonido interrumpido).
- Opciones de menú de navegación óptimas.
- Preferencias con respecto a la sincronización de la aplicación con los semáforos (los desarrolladores recomiendan que se centralice a través del sistema de gestión del tráfico, por lo que no requiere cada tráfico luz para estar equipado con una señal de audio).

Los resultados obtenidos identificaron los siguientes problemas principales con respecto a la facilidad de uso y usabilidad de las aplicaciones por parte de personas ciegas y con discapacidad visual, clasificadas en:

- Requisitos de aplicación (detección de obstáculos, navegación, adaptabilidad y posibilidades de cambio, notificación a una persona de confianza sobre la posición de las BVI(por sus siglas en inglés Blind and Visually Impaired)),
- Requisitos de funcionalidad de aplicaciones y dispositivos (mantener estímulos externos por separado, interacción de voz y sonido completa e ininterrumpida entre las BVI y la aplicación, precisión de posicionamiento mejorada),
- Requisitos de usabilidad (características de aplicación y dispositivo fáciles de usar, manejo simple y función de voz),
- Requisitos relacionados con el proceso de aprendizaje (estos son muchos y variados, e incluyen los entornos físicos, lugares donde todos los aspectos de las aplicaciones pueden ser probados y de forma segura, y también métodos y materiales con respecto a la enseñanza y promoción de la aplicación)
- Requisitos de compatibilidad y operación paralela de las aplicaciones del proyecto con otras aplicaciones y lectores de pantalla.

Mediante los resultados obtenidos, se puede concluir que las personas con discapacidad sensorial son más exigentes con respecto al diseño de las aplicaciones de asistencia. Resalta además, la importancia de comprender las necesidades y requisitos especiales de las personas con discapacidad sensorial. Factores como la interacción de la aplicación con el entorno y la ubicación donde se utilizará la aplicación, pueden aumentar la dificultad de aceptación de la tecnología correspondiente por parte de sus usuarios potenciales. Los detalles sobre las características específicas de las interfaces de usuario son mucho más importantes para las personas con discapacidad sensorial (Theodorou y Meliones, 2019).

3.4.3. Principios de diseño empleados en la aplicación móvil

Teniendo en cuenta las conclusiones arrojadas en el estudio anterior y apoyándonos en el artículo de Serena Zheng (2018), gerente de proyecto de Microsoft, se establecen los siguientes principios de diseño para la aplicación móvil que se desarrolló como parte del sistema propuesto:

1. Opción del lector de pantalla activado para probar cómo lo pudiera usar un usuario débil visual.
2. Establecer jerarquía y orden.
    - *Habilitar los lectores de pantalla para escanear la interfaz de usuario de la aplicación.* Los lectores de pantalla siguen el orden visual de la interfaz de usuario, anunciando encabezados, puntos de referencia e hipervínculos en el camino.
    - *Establecer un orden lógico y predecible para la navegación, usando el teclado.* Los usuarios con visión y movilidad limitadas dependen del enfoque del teclado para navegar por las páginas.
3. La aplicación móvil debe presentar un diseño escalable.
    - *Acomodar el diseño de la aplicación para que pueda admitir el enfoque.* Si los usuarios eligen opciones de fuente más grandes, hacen enfoque o usan otra tecnología de asistencia, su interfaz de usuario debe ajustarse adecuadamente.
4. Usar imágenes y etiquetas significativas, títulos de enlaces y descripciones.
    - *Establecer etiquetas apropiadas para los elementos de la interfaz de usuario.* Las etiquetas de texto aclaran el propósito de los elementos de la interfaz de usuario, proporcionan instrucciones a los usuarios y ayudan a los lectores de pantalla a narrar el contexto de los elementos de la interfaz de usuario.
    - *Establecer texto alternativo para todo el contenido que no es de texto (multimedia, figuras, tablas).* Los lectores de pantalla anuncian automáticamente una imagen / video, pero al especificar texto y subtítulos alternativos se proporciona una descripción.
    - *Etiquetar, con nombres accesibles, los elementos de la interfaz de usuario para lectores de pantalla?* Un nombre accesible es una cadena de texto breve y descriptiva que utiliza un lector de pantalla para anunciar un elemento de la interfaz de usuario, y son especialmente necesarios para elementos interactivos sin texto, como cuadros de texto o botones con íconos.
5. Que el flujo de la aplicación sea sencillo y los usuarios puedan acceder a las opciones de manera fácil.

6. Retroalimentación significativa acerca de las opciones y el contexto de los elementos de la pantalla.
    - *Proporcionar retroalimentación para las interacciones del usuario.* La retroalimentación comunica los resultados de las interacciones, lo que permite a los usuarios comprender lo que han hecho y lo que pueden hacer a continuación.
7. Se pueda deslizar fácilmente en y entre las listas.
8. Realizar pruebas con usuarios reales en dispositivos reales.

Como complemento de estos principios de diseño está unido la configuración de los gestos de los lectores de pantallas (TalkBack para Android, y Voice-Over para IOS) que viene por defecto instalada en los sistemas operativos.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se analizó la metodología de desarrollo que se llevó a cabo en este trabajo; y se planteó un escenario ilustrado a través de imágenes, dónde se visualizara una situación real. Se definieron las características del sistema que se propone, destacando 3 aportes principales: escalabilidad, modularidad y adaptabilidad. Además, la solución integra ventajas que se han implementado en otros trabajos, como el uso de tecnología de bajo consumo de energía, de bajo costo y fácil adquisición, para hacer el prototipo de módulo sensorial reproducible. También se planteó el diseño del sistema, haciendo énfasis en la selección de la tecnología inalámbrica para la conformación de la WBAN, y el estudio de la aceptación de las tecnologías por parte de las personas discapacitadas visualmente, para aplicarlo en los principios de diseño definidos posteriormente.

En el próximo capítulo, se detallarán las particularidades de la implementación del sistema, desglosando las 3 etapas principales: implementación del módulo sensorial, implementación de la aplicación móvil y de la red WBAN, y la implementación de una API REST como servicio en la nube.

Capítulo 4. Implementación del sistema

En este capítulo estaremos explicando el proceso de implementación del sistema, comenzando por explicar su arquitectura general. Luego se detallarán los componentes usados para la creación de los módulos sensoriales ultrasónicos y su funcionamiento, como parte de la funcionalidad de detección de obstáculos. Después se explicarán las características de la WBAN configurada, la implementación de la aplicación móvil, e implementación de una API REST como servicio en la nube, para el acceso a datos de los usuarios del sistema.

4.1. Arquitectura general del sistema

Para poder realizar una implementación eficiente, primero se tiene que definir la arquitectura del sistema, con el objetivo de visualizar lo que se quiere lograr y cómo se quiere lograr. A continuación, en la figura 8, se muestra la arquitectura del sistema definida para este trabajo:

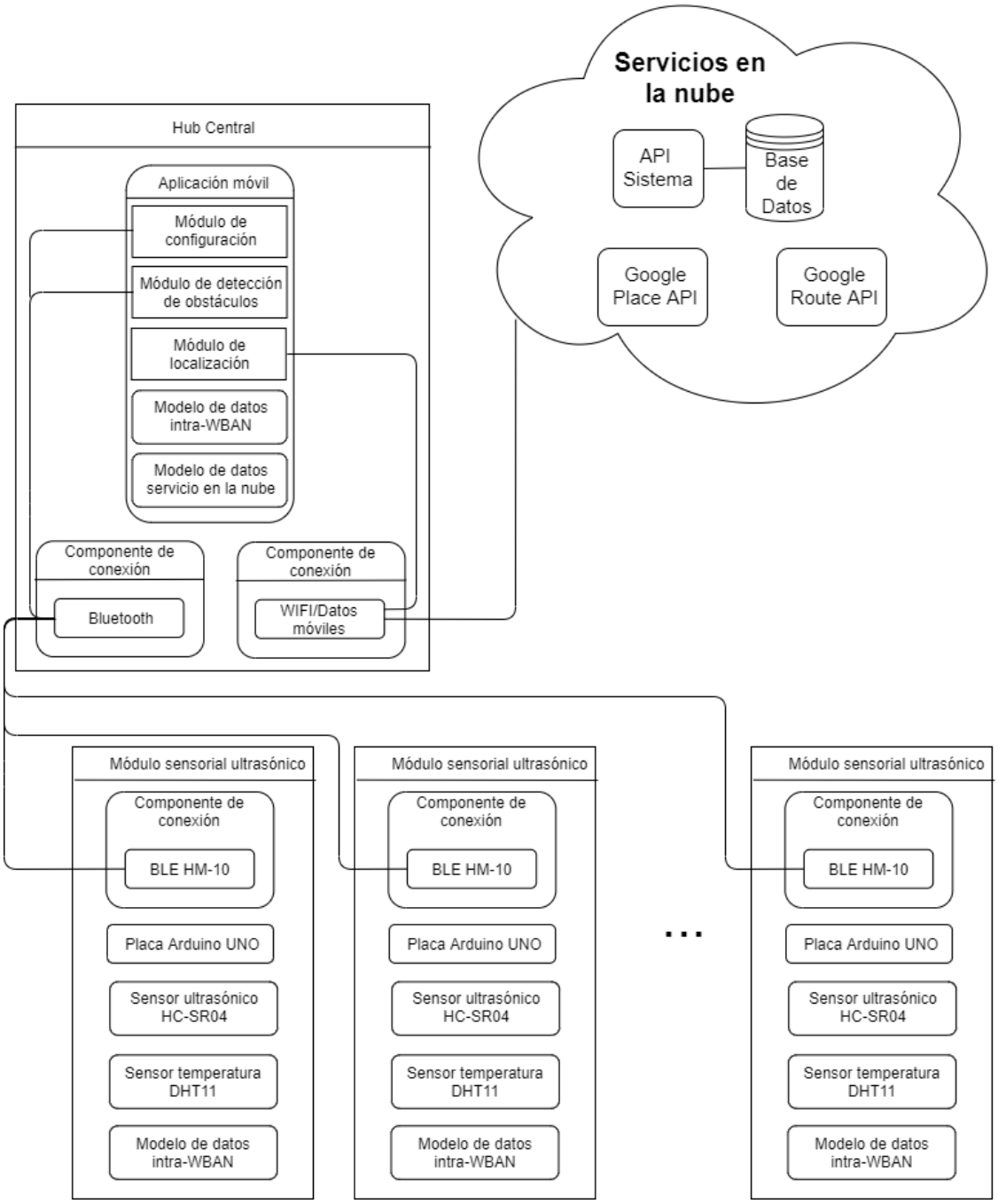

Figura 8. Diseño de la arquitectura del sistema que se propone

El sistema está compuesto por un hub central que estará corriendo una aplicación móvil, la cual estará dividida en 3 módulos funcionales: configuración, detección de obstáculos y localización. El módulo de configuración va dirigido hacia la configuración de la aplicación móvil y los parámetros configurables de los módulos sensoriales ultrasónicos, mediante el componente de conexión de tipo Bluetooth. El módulo de detección de obstáculos también estará vinculado con el componente de conexión tipo

Bluetooth, mediante el cual realizará la conexión con uno o varios módulos sensoriales ultrasónicos, en dependencia de las necesidades del usuario. Por último, el módulo de localización se vincula con el componente de conexión de tipo WIFI o datos móviles, para establecer la comunicación con los servicios que se consultan en la nube, haciendo uso del modelo de datos especificado para ello. Ambos componentes de conexión son parte física del hub central, ya que este es un dispositivo móvil.

Los módulos sensoriales ultrasónicos que se conectan al módulo de detección de obstáculos de la aplicación móvil, están compuestos por un sensor ultrasónico, un sensor para obtener la temperatura en tiempo real, una placa base Arduino UNO donde se ejecuta la lógica implementada, y un componente de conexión de tipo Bluetooth de baja energía, mediante el cual puede realizar la comunicación intra-WBAN, y transmisión de datos que siguen el modelo que se especifica.

Como última parte de esta arquitectura están los servicios en la nube, los cuales están formados por una API REST propia para el sistema, con su base de datos para la consulta y almacenamiento de información, y los servicios de terceros de google como Places y Routes. Todos estos servicios son accedidos a través de la aplicación móvil, mediante los módulos funcionales implementados en la misma. Esta interacción será abordada con mayor detalle en las siguientes secciones de este capítulo.

4.2. Funcionalidad de detección de obstáculos

En esta etapa analizaremos cada una de las partes que utilizamos para crear el módulo sensorial ultrasónico, su funcionalidad, el modelo de datos usado en la transmisión de la información, y luego explicaremos el funcionamiento del módulo de manera independiente.

4.2.1. Placa Arduino UNO

El Arduino UNO es una buena placa para comenzar con la electrónica y la codificación, y es la placa más utilizada y documentada de toda la familia Arduino. Esta es una placa de microcontrolador basada en el microcontrolador ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada / salida digital, 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz

(CSTCE16M0V53-R0), una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio [1] (ver Figura 9). Las especificaciones técnicas se pueden encontrar en el anexo .1.

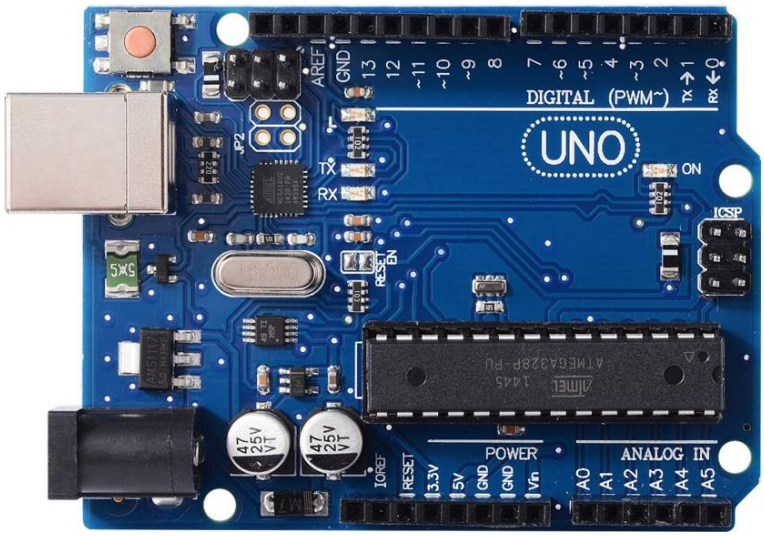

Figura 9. Placa base Arduino Uno

Hoy en día, en el mercado es la más fácil y asequible en cuanto a precios, que se puede encontrar, tanto en sitios de comercio electrónico, como en tiendas físicas especializadas incluso a nivel local. En el epígrafe 4.2.7 se explica cómo están conectados todos los dispositivos de nuestro prototipo de módulo sensorial a la placa Arduino UNO.

4.2.2. Sensor ultrasónico HC-SR04

Para la creación del dispositivo, se decidió por el uso de sensores ultrasónicos debido a que son muy populares en la investigación y bien aceptados por personas con discapacidad visual, en sistemas de detección de obstáculos debido a su precisión, bajo costo, bajo consumo de energía y facilidad de uso (Hakim y Fadhil, 2019). En este caso particular, usaremos el sensor HC-SR04. Las especificaciones técnicas se presentan en el anexo .2.

Los sensores ultrasónicos usan el sonido para determinar la distancia entre el sensor y el objeto más cercano en su camino. ¿Cómo hacen esto los sensores ultrasónicos? Dichos sensores son esencialmente sensores de sonido, pero funcionan a una frecuen-

[1] https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3

cia superior a la audición humana (ver Figura 10).

Figura 10. Sensor ultrasónico HC-SR04

El funcionamiento del sensor HC-SR04 sigue las siguientes etapas:

1. El microcontrolador envía un pulso de activación a la unidad para iniciar una medición. Dentro de la unidad:
   a) Se envía una ráfaga de pulsos de 8 x 40 kHz a través del emisor ultrasónico.
   b) Se establece una señal de salida de eco ALTA.
   c) En el mundo real, la onda de sonido se envía y se refleja en los objetos y el primer reflejo (eco) se considera el objeto más cercano (después de esto se observan más oscilaciones del sensor Rx y posiblemente Tx, pero se ignoran).
   d) Se espera que las oscilaciones de eco al final del octavo ciclo hagan que la unidad establezca la señal de salida de eco BAJA.
2. El microcontrolador tiene que medir el tiempo que la señal de eco de la unidad fue alta para determinar el tiempo del eco.
3. El microcontrolador puede convertir el tiempo de eco a distancia, sabiendo cual fue el momento del objeto más cercano y viceversa (ida y vuelta).

Este viaje de ida y vuelta o eco, también se conoce como PING de los sensores (Module, n.d.). Dicho proceso se explica mejor a través de la figura 11.

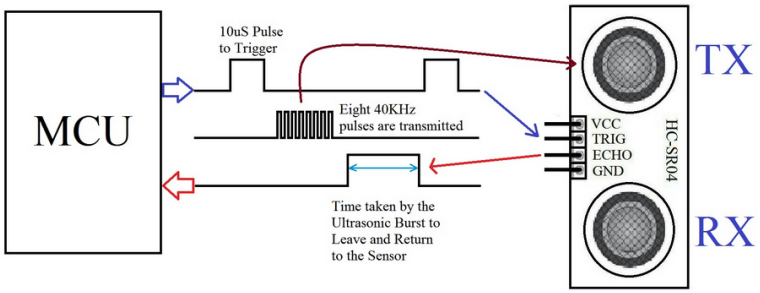

Figura 11. Interfaz de microcontrolador

En el epígrafe 4.2.7 se explica cómo está conectado este dispositivo en nuestro prototipo de modulo sensorial.

4.2.3. Sensor de Temperatura DHT11

El sensor DHT11 es de los más básicos y uno de los más utilizados para implementar con Arduino (ver figura 12). Se compone de dos partes, un sensor de humedad capacitivo y un termistor. También cuenta con un circuito integrado básico en el interior, que hace la conversión de analógico a digital, y este envía una señal digital con la temperatura y la humedad. (ver anexo .3)

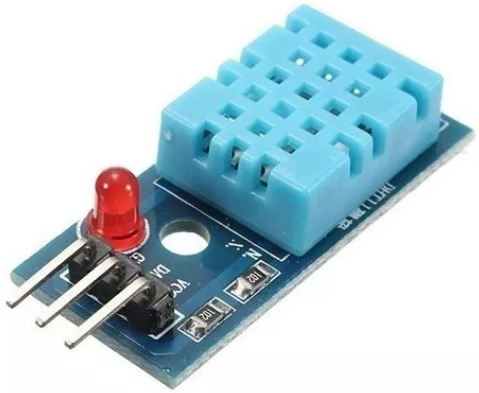

Figura 12. Sensor de Temperatura DHT11

Usando este sensor obtendremos los valores de la temperatura ambiente para calcular la velocidad del sonido, en tiempo y condiciones ambientales reales. En el epígrafe 4.2.7 se explica cómo está conectado este dispositivo en nuestro prototipo de módulo sensorial.

4.2.4. Cálculo de la distancia hacia el obstáculo

A 20°C, la velocidad del sonido es aproximadamente de 343 m/s o 0.034 cm/μs. Digamos que el tiempo entre enviar y recibir las ondas de sonido es de 2000 microsegundos. Si se multiplica la velocidad del sonido por el tiempo que viajaron las ondas de sonido, se obtendrá la distancia que recorrieron las ondas de sonido.

Partimos de la ecuación 1 básica para el cálculo de la distancia:

$$S = VxT \tag{1}$$

S = Distancia
V = Velocidad
t = Tiempo

Pero ese no es el resultado que estamos buscando. La distancia entre el sensor y el objeto es en realidad solo la mitad de esta distancia, considerando que la persona permanece estática, o bien se mueve a velocidad despreciable, porque las ondas de sonido viajaron desde el sensor al objeto y regresaron del objeto al sensor. Entonces se necesita dividir el resultado entre dos, como refleja la ecuación 2.

$$S = \frac{C \times t}{2} \tag{2}$$

C = Velocidad del sonido (m/s)
S = distancia hacia el obstáculo (cm)
t = tiempo en que se envia y recibe la onda de sonido (μs)

Pero la velocidad del sonido en realidad depende en gran medida de la temperatura y, en un grado mucho menor, de la humedad del aire. La velocidad del sonido aumenta con aproximadamente 0.6 m/s por grado Celsius. Para la mayoría de los casos, a 20°C se puede usar 343 m/s (Velasco *et al.*, 2004), pero para obtener lecturas más precisas, necesitamos calcular la velocidad del sonido dependiendo de la temperatura en tiempo real, con la siguiente fórmula:

$$C(m/s) = 331.4x(0.606 \times T) \quad (3)$$

T = temperatura ambiente

Si sustituimos la ecuación 3 en 2, obtenemos lo siguiente:

$$S = \frac{331.4x(0.606 \times T) \times t}{2} \quad (4)$$

Los valores de velocidad que nos interesa controlar no están en el rango de los m/s, sino de los cm/μs. Aplicando las debidas conversiones en la ecuación 4, obtenemos la fórmula 5 para implementar en nuestro módulo sensorial y obtener la distancia hacia los obstáculos que encuentre:

$$S = \frac{331.4x(0.606 \times T)x10^{-4} \times t}{2} \quad (5)$$

La cual si acomodamos quedaría de la siguiente manera:

$$S = \frac{331.4x(0.606 \times T) \times t}{2x10^{4}} \quad (6)$$

Esta fórmula no incluye la humedad ya que su efecto sobre la velocidad del sonido es muy pequeño por lo que como consideración de nuestro trabajo no la tendremos en cuenta (Velasco *et al.*, 2004). El valor de la temperatura en tiempo real se obtiene utilizando el sensor DHT11 como se explicó en el epígrafe anterior.

4.2.5. Dispositivo BLE utilizado: HM10

Este módulo está diseñado utilizando el sistema BLE en chip (SoC) CC2540 o CC2541 de Texas Instruments (ver anexo .4). El diseño del módulo y el firmware se originaron en la Compañía de Tecnología Jinan Huamao.(Figura 13)

La comunicación y transmisión de datos del Arduino con este módulo HM-10 se

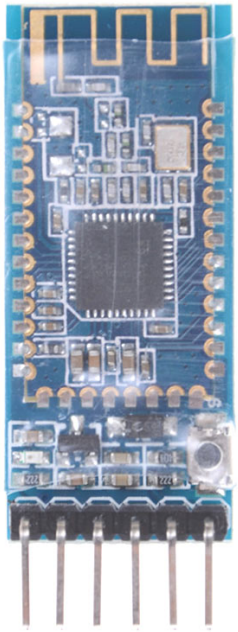

Figura 13. Dispositivo Bluetooth Low Energy 4.0 HM-10

realiza a través de la interfaz de serie UART, la cual se puede ver en la Figura 14.

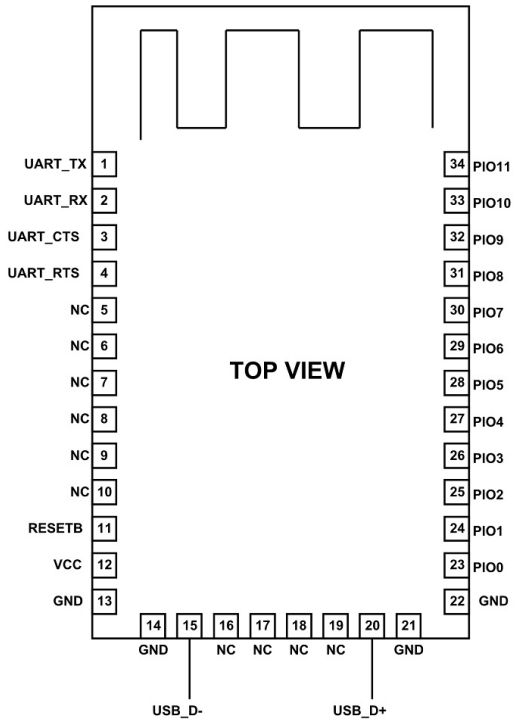

Figura 14. Interfaz de serie UART HM-10

Este módulo se compró en un sitio de comercio electrónico a un precio muy asequible ($78.50 MXN), con el inconveniente de que no cuenta con el firmware original. Esto no es problema porque en el sitio oficial de Arduino explican cómo realizar el proceso de actualización al firmware original [2], y proveen las ligas para las herramientas que se necesitan para hacerlo. Luego de realizar la actualización, probamos y vemos que obtenemos el funcionamiento del dispositivo como si fuera original. En el epígrafe 4.2.7 se explica cómo está conectado este dispositivo en nuestro prototipo de módulo sensorial.

Todos los servicios en el HM-10 están predefinidos, excepto uno. Este es un servicio personalizado que tiene una característica personalizada. Los servicios y características predefinidos son aquellos en los que el organismo rector de Bluetooth establece el UUID y el nombre. El HM-10 utiliza la característica personalizada para enviar y recibir los datos que recibe a través de la interfaz serial UART. Funciona estableciendo el valor de la característica personalizada en el valor de los datos a transmitir. Luego envía una notificación al dispositivo remoto para decir que hay nuevos datos disponibles. El dispositivo remoto está buscando las notificaciones y cuando recibe una, sabe que hay un nuevo valor, por lo que lee los datos y luego envía un mensaje de confirmación [3].

A continuación, en la figura 15 se representan los servicios y características que se encuentran definidas dentro del dispositivo HM-10 [4]:

[2] https://forum.arduino.cc/index.php?topic=393655.0
[3] http://www.martyncurrey.com/hm-10-bluetooth-4ble-modules/
[4] http://www.martyncurrey.com/hm-10-bluetooth-4ble-modules/

SERVICE 1
UUID: 00001800-0000-1000-8000-00805F9B34FB
GENERIC ACCESS

- UUID: 00002A00-0000-1000-8000-00805F9B34FB
- DEVICE NAME
- READ

- UUID: 00002A01-0000-1000-8000-00805F9B34FB
- APPEARANCE
- READ

- UUID: 00002A02-0000-1000-8000-00805F9B34FB
- PERIPHERAL PRIVACY FLAG
- READ/WRITE

- UUID: 00002A03-0000-1000-8000-00805F9B34FB
- RECONNECTION ADDRESS
- READ/WRITE

- UUID: 00002A04-0000-1000-8000-00805F9B34FB
- PERIPHERAL PREFERRED CONNECTION PARAMETERS
- READ

SERVICE 2
UUID: 00001801-0000-1000-8000-00805F9B34FB
GENERIC ATTRIBUTE

- UUID: 00002A05-0000-1000-8000-00805F9B34FB
- SERVICE CHANGED
- INDICATE

SERVICE 3
UUID: 0000FFE0-0000-1000-8000-00805F9B34FB
CUSTOM SERVICE

- UUID: 0000FFE1-0000-1000-8000-00805F9B34FB
- CUSTOM CHARACTERISTIC
- READ/WRITE/NOTIFY

Figura 15. Perfil genérico del dispositivo HM-10

La característica personalizada referenciada mediante el UUID FFE1, es mediante la cual se pasa el dato que se quiere transmitir a su campo valor (Value). Este campo puede contener hasta 20 caracteres, lo cual significa que, si se envía una cadena de más de 20 caracteres, el HM-10 divide la información en paquetes de 20 caracteres y envía cada uno por turno hasta que no quede ninguno [5].

[5] http://www.martyncurrey.com/hm-10-bluetooth-4ble-modules/

4.2.6. Librería “NewPing” para la implementación del funcionamiento del sensor en el Arduino Board

La librería NewPing [6] fue creada por Tim Eckel para la plataforma Arduino dado el hecho que las librerías disponibles hasta el momento no cumplían con el rendimiento que los sensores ultrasónicos eran capaces de ofrecer. Además, le agregó nuevas potencialidades a los distintos sensores a los cuales se puede aplicar:

- Funciona con muchos modelos diferentes de sensores ultrasónicos: HC-SR04, SRF05, SRF06, DYP-ME007, JSN-SR04T, etc.
- Opción para interactuar con todos menos el sensor SRF06 usando solo un pin Arduino
- No se retrasa por un segundo completo si no se recibe eco de ping como todas las otras bibliotecas de ultrasonidos.
- Compatible con toda la línea Arduino (y clones), la familia Teensy y microcontroladores no AVR.
- Hace ping a los sensores de manera consistente y confiable hasta 30 veces por segundo
- Método de filtro digital incorporado “ping_median” para una fácil corrección de errores.
- Utiliza registros de puerto al acceder a los pines para una ejecución más rápida y un tamaño de código más pequeño.
- Permite configurar una distancia máxima donde los pings más allá de esa distancia se leen como no ping o clear.
- Facilidad de usar múltiples sensores.
- Cálculo de distancia más preciso (cm, pulgadas y microsegundos).
- No utiliza pulseIn, que es lento y da resultados incorrectos con algunos modelos de sensores ultrasónicos.

[6] https://bitbucket.org/teckel12/arduino-new-ping/wiki/Home#!event-timer-sketch

- Desarrollado activamente con características que se agregan y errores / problemas resueltos.

Importante destacar la implementación de un método de filtrado digital que, aunque simple, ayuda a mejorar las lecturas y obtener valores más confiables.

La presencia de ruido en la señal significa inconsistencia en las mediciones de los datos, lo que trae consigo un rendimiento pobre del sistema sensorial. Aunque en este trabajo no entramos en profundidad en el análisis de la presencia de ruido en la señal, estamos consciente del impacto que tiene sobre el funcionamiento del sistema. Por lo tanto proponemos como trabajo complementario al nuestro, la aplicación de un método de filtrado de la señal en nuestro módulo; y para ello sugerimos que se estudie el algoritmo de filtrado de Kalman para el sensor que utilizamos en nuestro trabajo, el HC-SR04. (Al Tahtawi, 2018)

4.2.7. Funcionamiento del módulo de forma independiente

Una vez vistas las características de las partes que conforman nuestro módulo, entraremos a explicar la integración de todos y el funcionamiento obtenido. Para auxiliarnos en la creación del módulo sensorial ultrasónico, utilizamos una breadboard para facilitar las conexiones, cables conectores macho-macho y macho-hembra y una batería ProCell de 9V para alimentar de corriente al módulo.

Las partes del módulo quedaron conectadas como se muestra a continuación en la Figura 16:

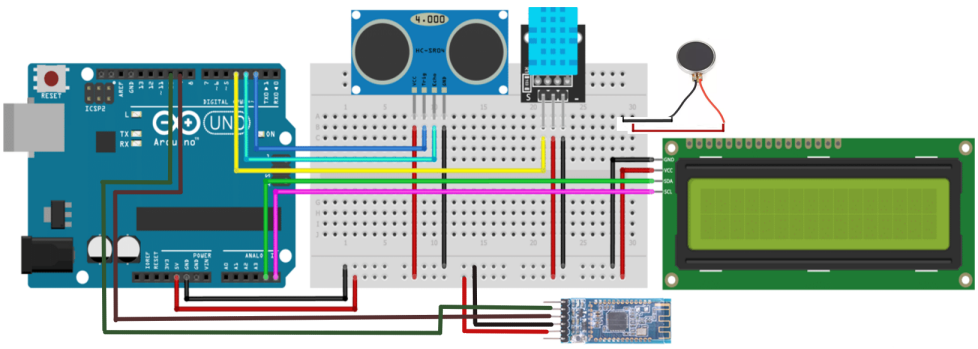

Figura 16. Prototipo de módulo sensorial

- El sensor ultrasónico HC-SR04 tendrá conectados los pines TRIG y ECHO a los

pines digitales 2 y 3 del Arduino UNO respectivamente. Los otros 2 pines son para el suministro de corriente y la conexión a tierra.

- El sensor de temperatura DHT11 tendrá conectado su pin DATA al pin digital 4 de la placa Arduino. De igual manera los otros dos pines son conectores de corriente y tierra.
- El dispositivo BLE HM-10 tendrá su pin de transmisión TXD conectado al pin digital 9, mientras que el pin de recepción RXD estará conectado al pin digital 10 de la placa Arduino. Los otros pines son para las conexiones de corriente y tierra.
- El motor vibrador usado estará conectado al pin digital 5 del Arduino.
- Para propósitos meramente de prueba, usamos una pantalla 1602 I2C LCD, donde imprimimos los valores de temperatura real que se están registrando, y los valores de distancia determinados por el módulo.

Como módulo independiente, detectará un obstáculo en frente de él mediante el sensor ultrasónico, y su lectura, junto a la lectura de temperatura obtenida por el sensor de temperatura, serán procesadas en la lógica implementada en la placa Arduino Uno. A partir del resultado obtenido del procesamiento anterior, se emitirán señales de alerta al usuario por la vía vibratoria a través del motor:

- Notificación: el obstáculo se encuentra entre 0.51m y 1.2m.
- Alerta: el obstáculo se encuentra a menos de 0.51m.

Como parte de la red WBAN, los módulos sensoriales además de lo anterior, enviarán los datos, con el modelo que se explicó anteriormente, hacia el dispositivo central, el cual procesará la información obtenida y emitirá notificaciones auditivas que se corresponderán con las notificaciones vibratorias que se obtienen del módulo.

4.3. Conformación de la red WBAN

Las redes inalámbricas ad hoc son una buena opción para establecer comunicaciones inalámbricas y móviles dentro del IoT, ya que no dependen de una infraestructura

preexistente, requieren una configuración mínima y se implementan rápidamente con un bajo costo. Las redes compuestas de diferentes tecnologías de acceso se conocen como redes heterogéneas y deben mantener la conectividad y el servicio para diferentes aplicaciones, incluso con la movilidad del usuario. (Domingo, 2012)

Una red de área personal inalámbrica es una tecnología de red inalámbrica ad hoc, basada en radiofrecuencia que interconecta pequeños nodos con capacidades de sensor o actuador en, sobre o alrededor de un cuerpo humano interconectados con un gateway. Los sensores pueden ser módulos para captar señales fisiológicas del cuerpo, por ejemplo, un sensor de electrocardiograma (ECG) que se usa para monitorear la actividad cardiovascular, un oxímetro que se usa para monitorear el pulso y los niveles de oxígeno en la sangre, un sensor de proximidad para la detección de obstáculos, etc. El gateway se comunica de forma inalámbrica con una aplicación de host local o remota en una estación base doméstica o un servidor central remoto. (Jacobsen *et al.*, 2011)

La red WBAN de nuestro trabajo la conforman tantos módulos sensoriales adquiera el usuario como desee, formando una topología de estrella, respaldando el objetivo de modularidad que se propuso, en dependencia de sus necesidades; y el móvil personal de la persona invidente, que sirve como gateway hacia el exterior, tanto hacia WBANs cercanas como hacia otras redes y servicios de terceros, es donde se ejecutará la aplicación que se desarrolla en este trabajo. Los protocolos de comunicación, la capa física y todo el resto de la configuración es establecida a través de los estándares de BLE versión 4.0 que es la que usamos.

Como explicamos anteriormente en el epígrafe 3.4.1, la tecnología que decidimos usar fue BLE por las facilidades que propone, las cuales ya se mencionaron. Los dispositivos BLE pueden tener cuatro roles diferentes: emisor, observador, periférico y central. Un emisor está diseñado para aplicaciones de solo transmisor, por ejemplo, balizas unidireccionales, mientras que un observador solo admite recepción. Los dispositivos periféricos tienen baja complejidad y admiten una sola conexión, que en nuestro sistema serían los módulos sensoriales. La función más compleja es la de un dispositivo central que puede iniciar y controlar múltiples conexiones con periféricos (Bensky, 2019). Para nuestro sistema sería un teléfono inteligente el dispositivo central que controle los módulos sensoriales.

Los periféricos y el dispositivo central manejan cuatro tipos de eventos: anuncios (ver anexo .5), anuncios extendidos, anuncios periódicos y eventos de conexión. En la figura 17 se analiza el evento de conexión entre un periférico y nuestro equipo central.

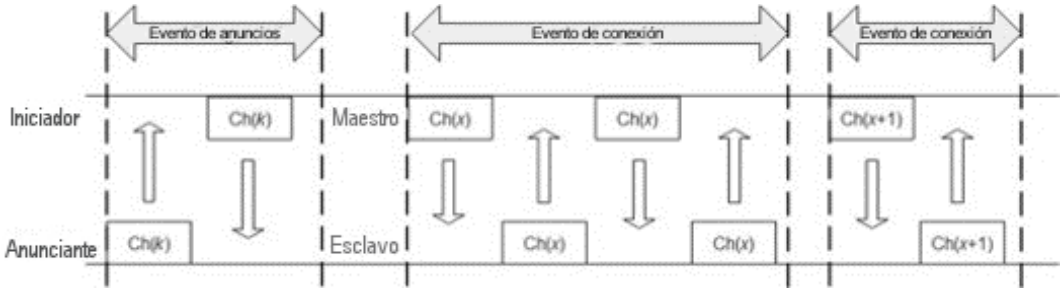

Figura 17. Evento de conexión entre periférico y central

Eventos de Conexión: Una conexión es un intercambio continuo de datos periódicos de paquetes entre dos dispositivos. Un dispositivo periférico envía paquetes anuncios conectables periódicamente durante eventos anuncios. Un dispositivo central, llamado iniciador, escanea las frecuencias en busca de paquetes anuncios conectables y, cuando sea adecuado, inicia una conexión. Una vez que la conexión se establece a través de la aceptación del anunciante, el iniciador se convierte en el dispositivo maestro de una piconet y el anunciante se convierte en el dispositivo esclavo. El maestro gestiona el tiempo e inicia el comienzo de cada evento de conexión. El salto de frecuencia adaptativo (AFH) se utiliza para una transmisión y recepción robustas. El evento de conexión comienza cuando el maestro envía un paquete al esclavo en un intervalo de conexión definido. Una ventaja clave de este arreglo es el ahorro de energía: dos dispositivos pueden encenderse, intercambiar datos y luego ir a dormir hasta el próximo evento de conexión (Woolley, 2019). Luego de establecida la conexión, ocurre un proceso denominado emparejamiento de tipo Passkey o proveer clave para que el central pueda identificar al periférico con el cual intercambiara información. En este tipo de proceso, se le pone una clave de 6 dígitos al central que es la clave que le permite el acceso al periférico.

Una vez emparejados todos los periféricos que posee el usuario, con el dispositivo central, obtenemos una WBAN con topología de estrella, donde la comunicación se realiza de los periféricos al central, y de este a los periféricos, para el caso en que se realicen configuraciones a los últimos desde el primero. Nunca la comunicación se realizará entre periféricos.

Aprovechando las potencialidades de BLE, se utilizó el perfil GATT (por sus siglas en inglés Generic Attribute Profile) como mecanismo para garantizar la semántica de los datos dentro del sistema, es decir, la manera de poder interpretar los datos dentro de un paquete, la forma en que están delimitados los datos, determinar los campos que proveen la información, etc. (Woolley, 2019). GATT se refiere a:

- Generic: No se restringe el tipo de atributos que se puede manejar. Puede manejar perfiles ya definidos como estándar dentro de BLE o alguno creado por un usuario.
- Attribute: Es un elemento de datos que tiene 2 partes: nombre y valor. Los atributos son administrados a través del protocolo ATT, el cual junto al GATT definen como almacenar y transmitir datos a través de todas las capas de la pila Bluetooth.
- Profile: Descripción de todas las funcionalidades requeridas a través de todas las capas del protocolo para implementar una solución en particular. (ver anexo .6)

GATT define una serie de perfiles como estándares dentro de su concepción. No obstante, tiene la flexibilidad de aceptar un perfil personalizado. Para nuestro trabajo, trabajamos con el perfil genérico ya que el sensor HM-10 utiliza un servicio y una característica personalizada para el envío de los datos. Para dicho envío, GATT se apoya en el protocolo ATT el cual, a su vez, realiza la comunicación a través de L2CAP (por sus siglas en inglés Logical Link Control and Adaptation Protocol) el cual se encarga de la revisión de errores durante el envío, y de haber errores, se encarga de la retransmisión de los datos. (ver anexo .6)

La información que se transmitirá de un periférico a un central, será enviada a través de unidades de datos de protocolos (PDU- por sus siglas en inglés Protocol Data Unit), los cuales tienen la estructura que se muestra en el anexo 7. Dentro del payload o carga útil del PDU es donde se guarda la información que se va a transmitir. Para nuestro trabajo definimos la información que estarán entregando los módulos sensoriales al dispositivo central en la lógica del Arduino UNO, y tendrá la estructura que se muestra en la Figura 18:

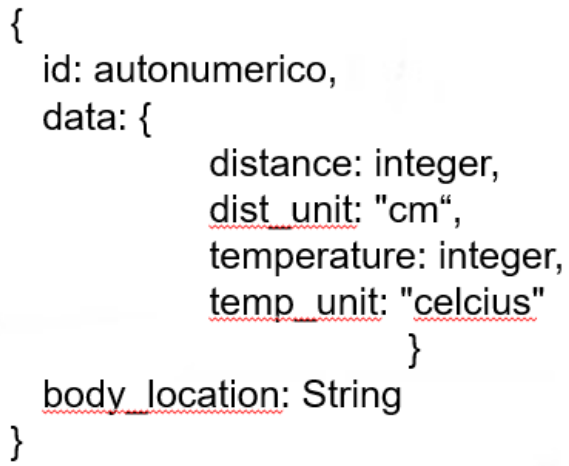

Figura 18. Estructura de la información enviada del periférico al central

- id: será un valor autogenerado que me permitirá identificar el modulo sensorial
- data: objeto que me permitirá enviar los valores de información de los sensores del módulo.
- body_location: valor definido para indicar donde es la ubicación del módulo en el cuerpo.

Para la configuración de los módulos sensoriales desde el central, la estructura de la información será como se muestra en la Figura 19

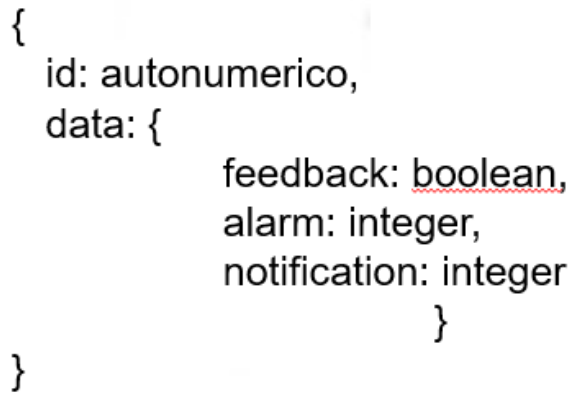

Figura 19. Estructura de la información enviada del central al periférico

- id: será el identificador del módulo sensorial que se quiere configurar

- data: objeto que me permitirá enviar los valores de información de los sensores del módulo.
- feedback: activar/desactivar la retroalimentacion vibratoria en el módulo sensorial
- alarm: distancia a partir de la que se quiere que se active la alarma
- notification: distancia a partir de la que se quiere que se active la notificación

Para el tratamiento de la seguridad de la información, expertos criptográficos crearon un algoritmo criptográfico bastante estándar para BLE, conocido como ECDH (por sus siglas en inglés Elliptic-Curve Diffie-Hellman) que combina material de claves con el texto plano del mensaje para crear un criptograma blindado. Permite a las 2 partes establecer un secreto compartido, lo cual se puede convertir en claves a largo plazo para que la próxima vez que se comuniquen el central y el periférico, no necesiten una nueva clave, y utilicen la que ya habían negociado para establecer comunicación segura (Figura 20). El secreto generado por dicho mecanismo no puede ser deducido ni siquiera por alguien que este monitoreando el proceso de negociación de las 2 partes, lo cual fortalece dicho procedimiento.[7]. Este proceso entra en juego luego de haberse realizado un emparejamiento exitoso.

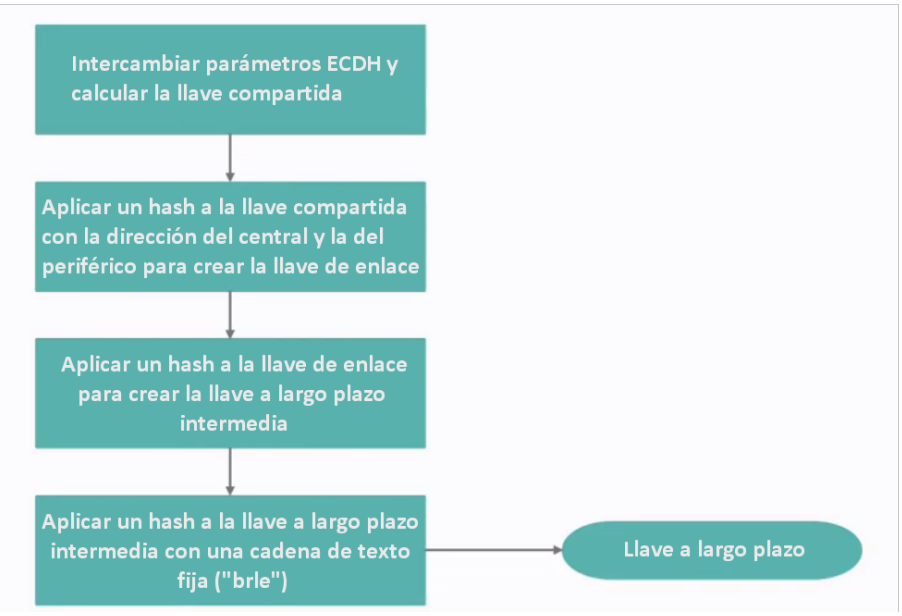

Figura 20. Algoritmo criptográfico ECDH

[7] https://www.bluetooth.com/

Además de ejecutar este mecanismo, BLE se apoya en otros procesos para garantizar la seguridad de la información. No es objetivo de nuestro trabajo entrar en detalles sobre estos, pero por su importancia en el proceso general de seguridad los referenciamos en el anexo .8.

BLE opera en la banda de frecuencias ISM 2.402 GHz a 2.480 GHz. En esta banda de frecuencia convergen un gran número de dispositivos y tecnologías inalámbricas dedicadas a aplicaciones industriales, científicas y médicas, por lo que un factor imprescindible a tener en cuenta en la utilización de la tecnología BLE, para una determinada aplicación, es la interferencia que pueda provocarse en un entorno real, saturado de dispositivos que emiten ondas electromagnéticas de manera constante en esta banda de frecuencia, siendo necesario el análisis de las características que presenta esta tecnología, para la mitigación de la problemática en contexto. Salto de Frecuencia Adaptable (AFH- por sus siglas en inglés Adaptative Frecuency Hopping), es específicamente el método utilizado por la tecnología BLE para la inmunidad ante interferencias, el cual está basado en el Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (FHSS- por sus siglas en inglés Frequency Hopping Spread Spectrum). A pesar de que AFH es un factor crítico en la mitigación de la interferencia, existen ocasiones en las que no es suficiente, por lo que la tecnología Bluetooth lo complementa con otras características que se detallan en el anexo .9.

4.4. Implementación de la aplicación móvil.

La red WBAN cuenta con un hub central al cual se conectan todos los dispositivos sensoriales y este a su vez se conecta con un host remoto para el intercambio de datos. En nuestro sistema, esta función la realiza el smartphone personal del discapacitado a través de la aplicación que desarrollamos.

Para la creación de la aplicación móvil, tras un estudio de las tecnologías de desarrollo móvil, se escogió usar React Native, una tecnología desarrollada por Facebook, debido a las ventajas que proporciona:

- Permite el desarrollo de aplicaciones nativas usando JavaScript, un lenguaje muy conocido y fácil de utilizar.

- Existe una comunidad de soporte muy grande y en constante auge, por lo que el soporte está garantizado.
- Un proyecto en React Native puede ser compilado en IOS o en Android, aun cuando son 2 sistemas operativos bien distintos.

Al iniciar la aplicación por primera vez, el usuario necesita registrarse en el sistema con sus datos personales, creándose un perfil que permitirá reconocerlo cada vez que acceda (ver Figura 21). Este proceso debe hacerse con conexión a internet por una persona no discapacitada visualmente, preparada en la instalación de la app, para que queden registrados todos los campos requeridos por el sistema en el servicio en la nube, entre ellos el de usuario y contraseña que utilizará para acceder.

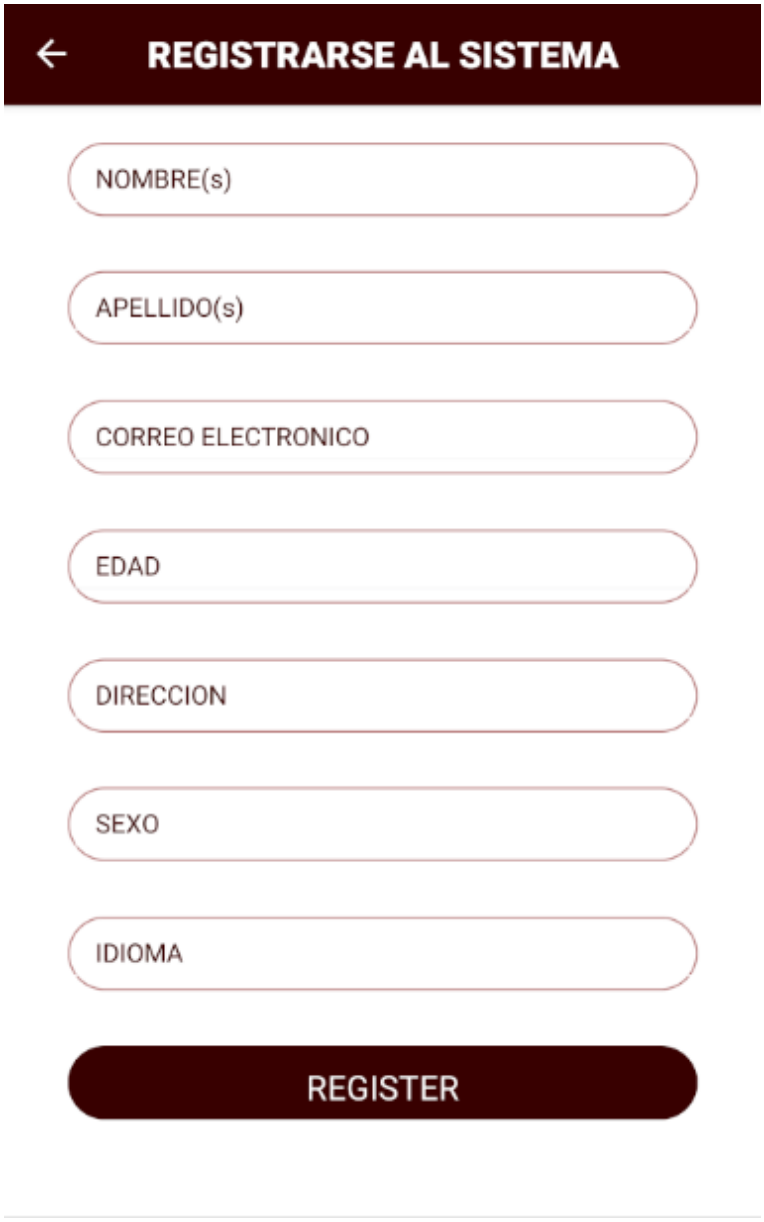

Figura 21. Registrar un usuario nuevo

Una vez registrado satisfactoriamente, el sistema proporcionará un identificador (ID) único al perfil del usuario. Este ID será mapeado con la MAC del smartphone personal del usuario de manera que cada vez que el usuario acceda a la aplicación móvil mediante la ventana de acceso (ver Figura 22), se verifiquen los parámetros anteriores y automáticamente se cargue el perfil del usuario. También se usará como parte de las rutas para acceder a los recursos de la API. Esto se detallará más en próximos epígrafes. Desde el punto de vista de seguridad, de esta manera se controla que nadie acceda al perfil del usuario desde otro smartphone. Si el usuario decide cambiar de dispositivo, entonces deberá ponerse en contacto con el equipo de soporte

del sistema para que le actualice la MAC mapeada a su ID.

Figura 22. Acceder a la aplicación móvil

La seguridad de la autenticación es controlada mediante el marco de trabajo de autorización OAUTH2 (Beazley y Jones, 2013), el cual permite trabajar con sistemas externos de forma segura utilizando identificadores digitales llamados “tokens”.

La aplicación móvil permitirá la conexión de uno o varios dispositivos sensoriales mediante la tecnología BLE. Una vez conectados los sensores, se monitorean los valores que devuelven y se emiten distintos tipos de alarmas auditivas para las diferentes situaciones:

- Advertencia: cuando el obstáculo detectado se encuentre entre 0.51 y 1.2m de

distancia

- Alerta: cuando el obstáculo detectado se encuentra a menos de 0.51m de distancia

Se decidió que la retroalimentación auditiva fuera de una sola palabra por simplicidad y de fácil entendimiento por el usuario para que pueda reaccionar a tiempo.

Otra parte principal de la aplicación es la relacionada con la localización del usuario, como se muestra en la Figura 23. Esta funcionalidad está implementada usando la API de Google Maps y el GPS del teléfono móvil o Tablet que use el usuario, para ayudarlo a que pueda determinar dónde se encuentra, qué lugares de interés existen en el área y la posibilidad que guarde la localización de alguno de ellos como parte de sus sitios importantes y que después los pueda compartir con sus contactos como parte de la interacción que tienen con la comunidad de personas discapacitados visuales.

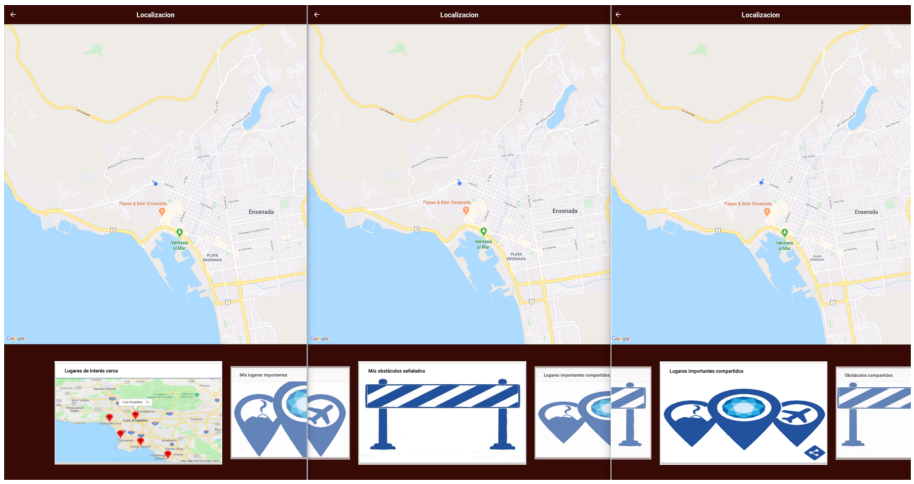

Figura 23. Funcionalidad de localización de la aplicación móvil

Por último, el módulo de configuración de los parámetros de la aplicación permite adaptarla a los requerimientos y necesidades del usuario con discapacidad visual, como podemos apreciar en la figura 24.

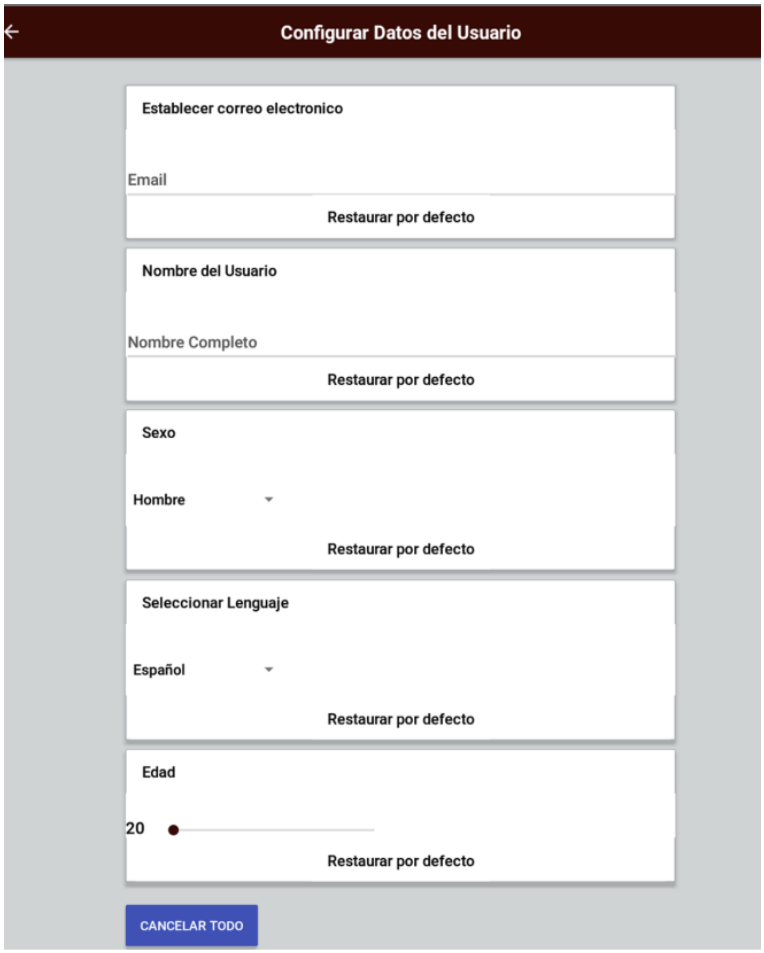

Figura 24. Configuración del usuario en la aplicación móvil

Una vez que ya se tienen conectados los módulos, podemos realizar configuraciones en los mismos desde la aplicación, como se muestra en la figura 25.

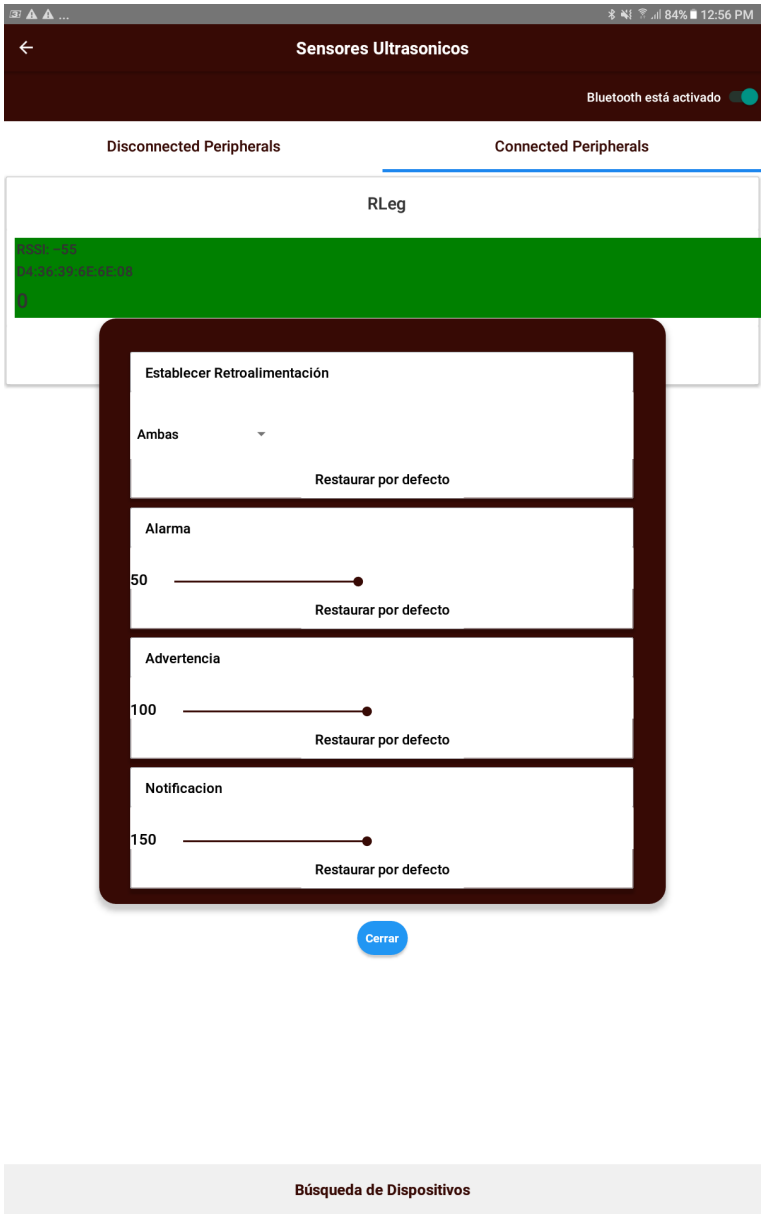

Figura 25. Configuración de los módulos desde la aplicación móvil.

4.5. Implementación de una API REST en la nube

Como servicio en la nube se implementó una API REST para el acceso a la información del sistema por el usuario discapacitado o su cuidador, a través de la aplicación móvil. Dicha información está almacenada en el servidor de base de datos MongoDB Atlas en la nube. Esta plataforma de base de datos como servicio (DBaaS) garantiza disponibilidad 24/7, escalabilidad y cumplimiento de los estándares de privacidad y seguridad de los datos más rigurosos. En un sub-epígrafe posterior se explicará más a detalle el uso de esta plataforma. Cómo fue diseñada la API, los métodos y una breve

descripción de cómo funciona, se detalla en la tabla 5:

Tabla 5. Descripción de la API creada para el sistema

Métodos	Ruta	Descripción
GET	/users	Obtener todos los usuarios del sistema
POST		Insertar un usuario nuevo en el sistema. Obtenemos el id del usuario que se creo
GET / PUT / DELETE	/users/:id	Obtiene/Actualiza/Elimina el usuario especificado por el id
GET / POST	/users/:id/places	Obtener/Insertar lugares/lugar que el usuario considera importantes
GET / POST	/users/:id/modules	Obtener/Insertar módulos del sistema
GET / PUT / DELETE	/users/:id/modules/:id	Obtener/Actualizar/Eliminar un módulo del usuario
GET / PUT / DELETE	/users/:id/places/:id	Obtener/Actualizar/Eliminar un lugar de los importantes para el usuario
GET / POST	/users/:id/obstacles	Obtener/Insertar la localización de obstáculos/obstáculo que el usuario quiso almacenar.
GET / PUT / DELETE	/users/:id/obstacles/:id	Obtener/Actualizar/Eliminar un obstáculo de los almacenados por el usuario.
GET	/users/:id/sharedplaces	Obtener los lugares que han sido compartidos con el usuario.
GET / PUT / DELETE	/users/:id/sharedplaces/:id	Obtener/Actualizar/Eliminar un lugar que le hayan compartido al usuario.
GET	/users/:id/nearby	Obtener lugares de interés cercanos a partir de los intereses que el usuario definió en su perfil
GET	/users/:id/sharedobstacles	Obtener los obstáculos compartidos con el usuario.
GET / PUT / DELETE	/users/:id/sharedobstacles/:id	Obtener/Actualizar/Eliminar un obstáculo compartido con el usuario.

Además de la API que se implementó, se usaron las APIs de Google como Places, ya mencionada anteriormente para determinar lugares de interés y mostrarlos en el mapa; y Route para indicar rutas de un lugar a otro para guiar a los usuarios. El protocolo que usamos para acceder a las API REST es el estándar HTTP en modo seguro, HTTPS.

4.6. Base de datos en la plataforma MongoDB Atlas en la nube

MongoDB es una base de datos documental, lo que significa que almacena datos en forma de documentos tipo JSON. Según sus creadores, esta es la forma más natural de concebir los datos; frente al tradicional modelo de filas y columnas, esta es mucho más expresiva y potente [8].

MongoDB Atlas es un motor de base de datos en la nube totalmente administrada, desarrollada por los creadores de MongoDB. Atlas maneja toda la complejidad de implementar, administrar y reparar sus implementaciones en el proveedor de servicios en la nube que elija (AWS, Azure y GCP) [9]. Cada uno de esos proveedores ofrecen la creación de clúster gratis lo cual nos conviene en principio de prueba de nuestro sistema. Ya en un ambiente de producción las ofertas de precios para la creación de clúster son asequibles. Todas las ofertas se pueden analizar en la página oficial.

La plataforma de base de datos se diseñó e implementó de la siguiente manera:

- Se creó un clúster que se denominó “Cluster-BlindAPI” donde va a estar el pro-

[8] https://www.mongodb.com/es
[9] https://docs.atlas.mongodb.com/

yecto al que vamos a hacer referencia.

- Se creó la base de datos donde se va a almacenar toda la información que se necesita del sistema. La denominamos “BlindAPI”.
- Se crearon diversas colecciones para estructurar la información de los modelos de la API (ver anexo .10):
  - blindUsers
  - sensorModule
  - placesInterests

4.7. Conclusiones

En este capítulo se analizó la implementación del sistema en sus 3 etapas: prototipo del dispositivo sensorial, red WBAN y aplicación móvil, y la implementación de la infraestructura en la nube. A partir de este punto estamos listos para trazar una línea de pruebas y experimentos para poner a prueba todo lo explicado en esta parte.

Capítulo 5. Experimentos y Resultados

En este capítulo estaremos evidenciando el diseño y los instrumentos utilizados, durante los experimentos realizados y los resultados que se obtuvieron, especificados en cada una de las etapas de desarrollo de este trabajo: funcionalidad de detección de obstáculos, creación de una WBAN con una aplicación móvil para la administración de los periféricos, y el consumo de servicios web API REST para la administración de datos de importancia para el discapacitado visualmente.

5.1. Etapa de detección de obstáculos

Una vez diseñado e implementado el módulo sensorial que necesitamos para el sistema, se desarrollaron experimentos para revisar que cumpliera con la funcionalidad de detección de obstáculos. Antes de pasar a explicarlas, hay que señalar que debido a la contingencia que nos ha estado afectando desde marzo del presente año, no se pudo realizar un número mayor de pruebas, así como en un ambiente más elaborado y estructurado.

A partir de las especificaciones del sensor HC-SR04 (ver anexo 2), se procedió a realizar unas pruebas para medir su exactitud, precisión y rango de acción:

1) Rango: distancia mínima y máxima a las que el sensor puede detectar obstáculos.
2) Precisión (de un sistema de medición): es el grado en el que repetidas mediciones, bajo las mismas condiciones, muestran el mismo resultado.
3) Exactitud (de un sistema de medición): es el grado de cercanía de las mediciones de una cantidad al valor real de esa cantidad.

Se implementó un ejemplo, como se muestra en la figura 26, simple y doméstico, para realizar un estudio de los parámetros especificados anteriormente en el módulo ultrasónico. Se colocó el módulo encima de la mesa, de forma fija, conectado a una laptop que se usó para registrar los valores de distancia hacia un objeto ubicado en frente del módulo a 30cm primero y luego a 50cm, mediante el monitor en serie, de

la herramienta Arduino [1]. El esquema implementado incluyó 10 lecturas consecutivas con diferentes intervalos de tiempo: 1, 10, 50, 100 y 200 microsegundos. También, para descartar la influencia del factor de hardware del sensor HC-SR04, se realizaron las mismas pruebas con otro sensor ultrasónico HC-SR04 idéntico al anterior.

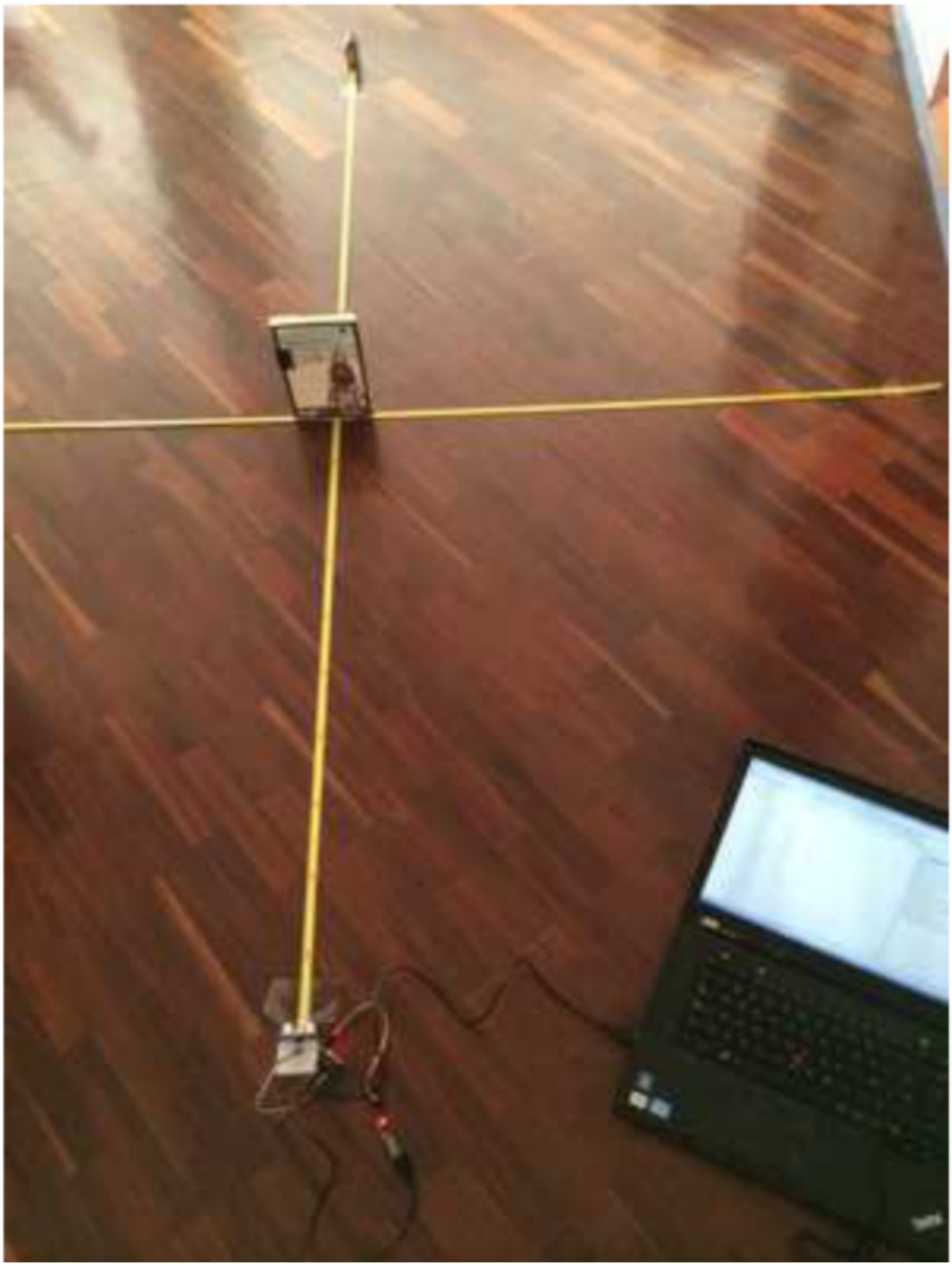

Figura 26. Escenario de comprobación de las mediciones obtenidas por los módulos sensoriales.

[1] https://www.arduino.cc/

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

1) El valor del rango se midió desde los 4cm hasta los 300cm, comprobados.
2) La precisión de los valores obtenidos se caracterizó por: la desviación estándar de los datos sin procesar suele estar entre 0.14cm y 0.29cm.
3) La exactitud obtenida se caracterizó por: se midieron errores absolutos que varían entre 0.18cm y 0.23cm.

En las tablas 6 y 7, se explican más a detalle los resultados anteriores y como se obtuvieron:

Tabla 6. Cálculo de precisión y exactitud del módulo sensorial a 30cm de distancia de un obstáculo.

	Intervalos de tiempo (μs)				
Mediciones	1	10	50	100	200
1	30.19	29.87	29.8	29.77	29.8
2	29.87	29.87	30.33	29.77	29.77
3	30.19	29.87	29.87	29.77	29.77
4	30.19	29.87	29.87	29.87	29.8
5	29.77	29.77	29.77	29.87	29.8
6	30.29	29.8	29.77	29.87	29.87
7	29.77	29.77	29.77	29.77	29.77
8	30.22	29.8	29.77	29.77	29.91
9	29.77	29.8	29.77	29.77	29.77
10	30.29	29.77	29.77	29.77	29.77
media	30.06	29.82	29.85	29.8	29.80
desviación estándar	0.23	0.05	0.17	0.05	0.05
exactitud	0.21	0.04	0.10	0.04	0.03
	Distancia 30cm				

Tabla 7. Cálculo de precisión y exactitud del módulo sensorial a 50cm de distancia de un obstáculo.

	Intervalos de tiempo (μs)				
Mediciones	1	10	50	100	200
1	49.55	49.44	49.54	49.44	49.54
2	49.86	49.41	49.44	49.44	49.47
3	49.44	49.44	49.05	49.54	49.54
4	49.55	49.44	49.89	49.44	49.44
5	49.03	49.41	49.16	49.44	49.44
6	49.44	49.55	49.16	49.03	49.02
7	49.44	49.03	49.02	49.44	49.44
8	49.44	49.44	49.05	49.03	49.02
9	49.44	49.44	49.02	49.44	49.02
10	49.44	49.44	49.02	49.03	49.44
media	49.46	49.40	49.24	49.327	49.34
desviación estándar	0.20	0.14	0.29	0.21	0.22
exactitud	0.11	0.07	0.23	0.18	0.19
	Distancia 50cm				

De acuerdo a investigaciones realizadas, se encontró un foro dedicado a pruebas y resultados realizados con el sensor HC-SR04 dentro de la comunidad de Arduino [2], donde explican más a detalle otras pruebas realizadas al sensor HC-SR04 (HC-SR04 Tests R1 1/11, 2014), las cuales referimos a modo de complemento de este trabajo, para dar una solidez mayor en la utilización del sensor ultrasónico, en cuestión dentro del módulo que se diseñó.

Estas pruebas fueron realizadas en ambos módulos sensoriales creados, y los valores de distancias obtenidos entre ambos solo variaban en el rango de 0.01 a 0.05, lo cual permitió concluir que ambos módulos funcionan de la misma manera. Sería interesante poder replicar varias de las pruebas que proponen en la comunidad de Arduino, como las que se evidencian en (Gonzalez, 2014) para este sensor y poder establecer conclusiones específicas para este trabajo.

5.2. Etapa de creación de una WBAN y una aplicación móvil para la administración de los periféricos.

Para esta etapa se usó una tableta Samsung A6 para correr la aplicación móvil y 2 sensores modulares ultrasónicos idénticos para crear una WBAN; y un Iphone X

[2] https://forum.arduino.cc/index.php?topic=243076.0

para realizar la comparación de localización. En la comprobación del funcionamiento correcto de la WBAN junto con la aplicación móvil, se decidió realizar las siguientes pruebas:

1) Conectar más de un módulo sensorial y verificar que funcionan de la forma esperada.
2) Poner obstáculos frente a todos los módulos conectados, simultáneamente, y comprobar que la captura de datos y la retroalimentación funcionen de manera correcta.
3) En exteriores, probar que se muestre la ubicación en tiempo real y compararla con un dispositivo IPhone corriendo la aplicación Maps.

Evaluando los resultados de las pruebas mencionadas anteriormente con carácter cualitativo, se puede destacar que:

1) Se logró que la aplicación que se ejecuta en una tableta Samsung A6 reconociera y conectara 2 módulos sensoriales. Una vez conectados se verificó que ambos funcionaran en modo periférico al no estar visibles a otros dispositivos Bluetooth, que funcionan en modo central y pudieran ser emparejados por estos. Se verificó que una vez conectados, dichos módulos enviaban información sobre la detección de obstáculos mediante el valor de distancia desde el sensor hacia el obstáculo.
2) Al poner obstáculos en frente de los módulos sensoriales, se revisó que el valor de distancia reflejado en la tableta es el mismo que el que se muestra en una pantalla que se añadió en el módulo sensorial, con fines experimentales. Al alcanzar los umbrales de distancia definidos en el epígrafe 4.2.7, el periférico emite una retroalimentación vibratoria para alertar al usuario de la existencia de un obstáculo. Por la parte de la aplicación, ante la misma situación se ejecuta una retroalimentación mediante un mensaje auditivo de alerta al usuario.
3) En exteriores se utilizó la aplicación Maps de un dispositivo IPhone para realizar la comparación con la opción de localización de la aplicación. En dicha comparativa se refleja la ubicación en tiempo real en la aplicación, con un retraso de tiempo de 1.4 segundos con respecto a la aplicación Maps de IPhone.

Los objetivos que se persiguieron al desarrollar las pruebas, por muy modestos que fueron, se lograron, lo cual sirve para plantearse nuevos retos mediante otras pruebas en trabajos futuros. Desafortunadamente solo se conectaron 2 módulos sensoriales porque no se pudo crear más por falta de dispositivos para conformarlos. Las pruebas de conexión y transmisión de datos solo se pudieron realizar dentro de la WBAN y accediendo a los servicios API REST, tanto el propio confeccionado para el sistema como los de Google; hubiera sido interesante poder hacer pruebas con otras WBANs de otros usuarios.

5.3. Etapa de consumo de servicios web API REST

Una vez implementado el servicio API REST propio para el sistema, y el consumo de servicios API REST de terceros (e.g Google Places, Google Routes) en esta etapa, se desarrollaron pruebas para revisar el cumplimiento de las funcionalidades requeridas de la primera y los resultados que arrojaron se evaluaron con carácter cualitativo.

Para realizar dichas pruebas funcionales de la API, primero se plantearon los siguientes objetivos:

1) Garantizar que la implementación funcione correctamente sin errores.
2) Garantizar que la implementación funcione según lo establecido de acuerdo con la especificación de requisitos (que más adelante se convertirá en nuestra documentación de la API REST).

Para darle cumplimiento al objetivo 2, a continuación, se establece la especificación de los requisitos de nuestra API REST:

1) **Formato de las respuestas**: Objeto JSON. Dicho formato será especificado en el encabezado de la petición HTTP, mediante el parámetro Accept (e.g Accept: application/json).
2) **Versionando la API**: Para evitar que se produzcan cambios importantes. Permite el acceso a diferentes versiones de la API sin necesidad de modificar código. Simplemente se usa como prefijo en la URL la cadena “vX” donde X indica el número de versión del recurso (e.g /v1/users/:id/modules).

3) **Estructura de la URL**: Las URL deben ser breves y descriptivas y utilizar la jerarquía natural de la estructura de la ruta. También es importante ser coherente con la pluralización.

4) **Códigos de estado HTTP**: Para las diferentes peticiones HTTP existen códigos que reflejan el estado de cumplimiento de dichas peticiones. Se tiene que cumplir los siguientes códigos:

   - 2XX: Respuesta satisfactoria.
   - 3XX: Redireccionamiento.
   - 4XX: Error del cliente.
   - 5XX: Error del servidor.

5) **Estado del sistema**: Las peticiones HTTP pueden generar cambios en el sistema en dependencia de los métodos que sean llamados. En la implementación de la API REST se tuvieron en cuenta 4 de ellos:

   - Método GET: obtener un recurso, no genera un cambio del sistema.
   - Método POST/PUT/DELETE: Agregar/Modificar/Eliminar un recurso. En cualquiera de los anteriores se evidencia un cambio en el estado del sistema que puede ser comprobado satisfactoriamente haciendo del método anterior correspondiente.

6) **Manejo de errores**: Cuando se obtienen errores en las peticiones HTTP, se tiene que especificar el tipo de error (e.g, 400 Bad Request) y devolver un mensaje de error con una descripción más detallada de lo sucedido.

Una vez establecidos los requisitos de la API REST, entonces se realizaron las siguientes pruebas usando el software Postman [3] (ver anexo .11)

1) **Pruebas positivas básicas**: Ejecutar peticiones a la API con los parámetros obligatorios válidos.

2) **Pruebas positivas con parámetros obligatorios válidos + opcionales**: Ejecutar peticiones a la API con parámetros obligatorios válidos y parámetros opcionales válidos

[3] https://www.postman.com/

3) **Prueba negativa - entrada válida**: Ejecutar peticiones a la API con una entrada válida que intente realizar operaciones ilegales.

Los parámetros que se midieron en dichas pruebas son los siguientes:

1) Validar código de estado HTTP
2) Validar respuesta (payload).
3) Validar estado del sistema.
4) Validar encabezados HTTP.
5) Rendimiento

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

#	Escenario de prueba	Acción	Descripción
1	Pruebas positivas básicas		
	Ejecutar la llamada a la API con los parámetros obligatorios válidos	Validar código de estado:	1. Todas las solicitudes devolvieron un código de estado HTTP de tipo 2XX 2. El código de estado devuelto está de acuerdo con: • 200 OK en las peticiones GET • 201 en las peticiones POST/PUT • 200, 202, o 204 para una petición DELETE
		Validar respuesta:	1. La respuesta es un objeto JSON bien formado 2. La estructura de respuesta es según el modelo de datos:

			• validación del esquema: los nombres de campo y los tipos de campo son los esperados, incluidos los objetos anidados; • los valores de campo son los esperados; • los campos que no aceptan valores NULL no son nulos.
		Validar el estado:	1. Para solicitudes GET, se verificó que no hay cambio de estado en el sistema. 2. Para las operaciones POST, DELETE, PUT, se revisó que la acción se haya realizado correctamente en el sistema mediante: • Se realizó la petición GET adecuada y se verificó de la respuesta • Se actualizó la interfaz de usuario en la aplicación web y se verificó el nuevo estado.
		Validar encabezados:	Los encabezados HTTP en las respuestas sean los esperados, incluidos el tipo de contenido, la conexión, el control de caché, expires, access-control-allow-origin, keep-alive, etc. Se verificó que la información NO se filtre a través de encabezados (por ejemplo, el encabezado X-Powered-By no se envía al usuario).
		Rendimiento:	La respuesta se recibe de manera oportuna (dentro de un tiempo esperado razonable).
2	Parámetros obligatorios válidos + opcionales		
		Validar código de estado:	1. Todas las solicitudes devolvieron un código de estado HTTP de tipo 2XX. 2. El código de estado devuelto está de acuerdo con: • 200 OK en las peticiones GET • 201 en las peticiones POST/PUT • 200, 202, o 204 para una petición DELETE
	Ejecutar una llamada a la API con parámetros obligatorios válidos y parámetros opcionales válidos. Se ejecutaron las mismas pruebas que en el n. ° 1, esta vez incluidos los parámetros opcionales (p. Ej., Filtro, clasificación, límite, etc.)	Validar respuesta:	1. La respuesta es un objeto JSON bien formado. 2. La estructura de respuesta es según el modelo de datos: • validación del esquema: los nombres de campo y los tipos de campo son los esperados, incluidos los objetos anidados. • los valores de campo son los esperados. • los campos que no aceptan valores NULL no son nulos. • filtro: las respuestas se filtraron según el valor especificado. • ordenar: se especificó el campo por el cual ordenar, probándose las opciones ascendentes y descendentes. Las respuestas arrojaron los resultados esperados.

			• límite: se revisó que el tamaño del conjunto de datos fuera acorde al límite especificado.
		Validar el estado:	1. Para solicitudes GET, se verificó que no hay cambio de estado en el sistema. 2. Para las operaciones POST, DELETE, PUT, se revisó que la acción se haya realizado correctamente en el sistema mediante: • Se realizó la petición GET adecuada y se verificó de la respuesta • Se actualizó la interfaz de usuario en la aplicación web y se verificó el nuevo estado.
		Validar encabezados:	Los encabezados HTTP en las respuestas sean los esperados, incluidos el tipo de contenido, la conexión, el control de caché, expires, access-control-allow-origin, keep-alive, etc. Se verificó que la información NO se filtre a través de encabezados (por ejemplo, el encabezado X-Powered-By no se envía al usuario).
		Rendimiento:	La respuesta se recibe de manera oportuna (dentro de un tiempo esperado razonable de 10s).
3	Prueba negativa - entrada válida		
	Se ejecutaron llamadas a la API con una entrada válida que intente realizar operaciones ilegales. es decir: Intentar crear un recurso con un nombre que ya existe (por ejemplo, crear un usuario con un email ya existente) Intentar eliminar un recurso que no existe (por ejemplo, eliminar un módulo con un ID que no existe) Intentar actualizar un recurso con datos válidos ilegales (por ejemplo, cambiar el email de un usuario a uno existente)	Validar código de estado:	Se verificó que las peticiones devolvieron un código HTTP 403 (el servidor no realizará la acción) / 404 (el servidor no encuentra como realizar la acción)
		Validar respuesta:	1. Las respuestas al manejo de errores se reciben correctamente. (e.g "El módulo a eliminar no existe") 2. Las respuestas se devuelven en formato JSON, de manera descriptiva: {"mensaje": "No existe el usuario que se quiere eliminar"}
		Validar encabezados:	Los encabezados HTTP en las respuestas sean los esperados, incluidos el tipo de contenido, la conexión, el control de caché, expires, access-control-allow-origin, keep-alive, etc. Se verificó que la información NO se filtre a través de encabezados (por ejemplo, el encabezado X-Powered-By no se envía al usuario).
		Rendimiento:	La respuesta se recibe de manera oportuna (dentro de un tiempo esperado razonable de 10s).

Capítulo 6. Conclusiones

En este último capítulo se muestran las conclusiones obtenidas a partir de todo el trabajo realizado durante el proceso de investigación de esta tesis. Dichas conclusiones se explicarán a partir de los aportes a la investigación y de las limitaciones que presenta este trabajo; estas últimas permitirán proponer mejoras para futuros trabajos relacionados con este tema.

6.1. Aportes a la investigación

El aporte principal de nuestro trabajo consiste en proveer una plataforma base para la construcción de sistemas ETA, sustentada en tres principios fundamentales: modularidad, adaptabilidad y escalabilidad. El sistema propuesto está compuesto por módulos sensoriales, tantos como el usuario necesite en dependencia de su experiencia, para realizar la detección de obstáculos. La adaptabilidad a las necesidades de los usuarios discapacitados visuales se evidencia mediante los parámetros configurables, tanto de los módulos sensoriales como de la aplicación móvil, que podrán personalizar. Por último y no menos importante, la escalabilidad se refleja en que el sistema puede ir desde un simple módulo sensorial, hasta una red de módulos sensoriales, que puede interactuar con servicios en la nube. Estos principios no se ven reflejados en ninguno de los sistemas que se analizaron en el estado del arte, ya que los mismos presentan un diseño y estructura fija, lo cual trae consigo que una modificación que se le quiera hacer, resultaría en un proceso de rediseño y reestructuración.

La solución propuesta ofrece la posibilidad de usar un solo sistema para atacar ambas problemáticas: la movilidad independiente con detección de obstáculos, y la localización. En el análisis de la literatura hecho en el capítulo 2, ninguno de los sistemas ataca las 2 problemáticas al unísono. Cada uno de ellos se refiere o a la detección de obstáculos, o a la navegación, haciendo uso de sistemas de navegación en exteriores o interiores.

6.2. Limitaciones del trabajo realizado

Como parte del estudio a lo largo del proceso de creación de este sistema, está el saber las limitantes que tiene el mismo para poder mejorarlo en un futuro. A continuación, reflejamos las principales limitantes que sugerimos sean atacadas:

- Los módulos sensoriales creados para la detección de obstáculos no fueron probados en condiciones reales en ambientes exteriores e interiores, solo fueron pruebas de funcionamiento en entornos controlados. Es decir, se armó el prototipo y se probó la detección de obstáculos en circunstancias muy específicas. No se estudió el impacto del medio ambiente (como la iluminación) en los dispositivos que se usaron para crear los módulos.
- No se realizó un estudio sobre variaciones en la ubicación de los módulos sensoriales en el cuerpo humano y su impacto en el transcurso de la marcha.
- Aún cuando se utilizó tecnología para crear aplicaciones móviles para IOS y Android, solamente se pudo probar en un dispositivo Android, debido a la falta de recursos.
- No obstante, a pesar de las capacidades de la tecnología BLE explicadas en este trabajo, hay que reconocer que se conocen las limitantes que se pueden dar en su funcionamiento, por ejemplo el rango de transmisión y el rendimiento de los datos depende mucho del hardware; el conocimiento sobre el consumo de energía se obtiene principalmente de modelos teóricos pero aún se necesita una evaluación concreta y sistemática del consumo de energía real de BLE. (Jacopo Tosi, 2017)
- No se pudieron realizar suficientes pruebas en cada una de las etapas. Una mayor cantidad de experimentos nos hubiera permitido acotar un poco más los valores en la detección de obstáculos.
- Debido a la pandemia que nos está afectando desde el pasado marzo de este año, no se pudo involucrar a usuarios discapacitados reales en el proceso de investigación y así obtener retroalimentación de su experiencia y consejos sobre como mejorarlo.

6.3. Propuesta de mejoras para trabajos futuros

Los estudios sobre la literatura realizados reflejan la necesidad de sistemas sensoriales híbridos, donde el uso de diferentes sensores en los módulos permite obtener mejores resultados en la detección de obstáculos. Como trabajo futuro se propone modificar la arquitectura de los módulos sensoriales para integrar otros tipos de sensores (e.g., radar, cámaras) para mejorar la detección de obstáculos e implementar una nueva funcionalidad, que pudiera ser la no detección de objetos, que puede servir para determinar si se está bajando una escalera o si existe un hueco en el piso. Por ejemplo, añadirle la tecnología radar es muy útil en ambientes con malas condiciones. El sensor de radar mide de objetos como automóviles, árboles, señales de tránsito, bicicletas y seres humanos, mientras que otros objetos que no tienen una alta reflectancia, como la calle y el pavimento, no se detectan. (Discant *et al.*, 2007). Con esto se lograría lo que se conoce como fusión de sensores, lo cual resulta muy útil en la mejora de la eficiencia del sistema: donde un sensor falla el otro puede tener éxito.

Una conclusión importante que surgió a partir del estudio realizado sobre la tecnología BLE, es que se necesita profundizar un poco más en la explotación de sus potencialidades para mejorar la movilidad de usuarios discapacitados visualmente en ambientes interiores, mediante el uso de perfiles definidos por el propio estándar. Por ejemplo, el estudio de los perfiles IPS (por sus siglas en inglés Indoor Positioning Service), LNP (por sus siglas en inglés Location and Navigation Profile), y LNS (por sus siglas en inglés Location and Navigation Service) pueden mejorar la información y el modelo de la misma, que se obtiene de los dispositivos sensoriales.

Por otra parte, modificar el diseño de la API REST definida en este trabajo permitirá mejorar y aumentar la funcionalidad del sistema, a partir de las necesidades y experiencias que reporten los usuarios discapacitados. Una posible modificación puede ser unificar la ruta de los obstáculos y de los lugares en una sola, lo cual simplificaría el mantenimiento de la API. Teniendo en cuenta la recomendación anterior, otra idea para trabajo futuro sería modificar el diseño del modelo de datos que usamos, para que cumpla con la mejora mencionada anteriormente.

Un aspecto que no se puede dejar pasar por alto como propuesta de trabajo futuro, es lograr realizar la mayor cantidad de experimentos posibles en cada una de las

etapas que se explicaron en el capítulo 4, para identificar los puntos débiles, atacarlos y así mejorar la funcionalidad de la propuesta de solución.

También hay oportunidades de integración con otros servicios de terceros tales como reconocimiento de comando de voz, reconocimiento de imágenes, etc. Así como incorporación de módulos que realicen aprendizaje y con ello vayan reconociendo patrones de comportamientos del usuario, lo cual podría entonces hacer predicciones para tener un sistema proactivo y que pudiera hacer recomendaciones.

Literatura citada

ABCElectronica (2016). Sensor de humedad y temperatura DHT 11 y DHT22. Consultado el 10/02/2020 de http://www.abcelectronica.net/proyectos/con-microcontrolador/dht1122/. *Abc Proyectos Electrónicos*, pp. 1–11.

Al Tahtawi, A. R. (2018). Kalman filter algorithm design for HC-SR04 ultrasonic sensor data acquisition system. *IJITEE (International Journal of Information Technology and Electrical Engineering)*, **2**(1): 2–6.

Andersson, M. (2014). Use case possibilities with bluetooth low energy in iot applications. *White Paper*, **2**: 1–16.

Basso, S., Frigo, G., y Giorgi, G. (2015). A smartphone-based indoor localization system for visually impaired people. *2015 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications, MeMeA 2015 - Proceedings*, pp. 543–548.

Beazley, D. y Jones, B. K. (2013). The OAuth 2.0 authorization framework. *Python Cookbook*, p. 706.

Bensky, A. (2019). Chapter 12 - wireless personal area networks. En: A. Bensky (ed.), *Short-range Wireless Communication (Third Edition)*. Newnes, pp. 317 – 360.

Bluetooth, H. M. (2013). HM-10 CC2540 Bluetooth 4.0 BLE. Consultado el 10/02/2020 de ftp://imall.iteadstudio.com/Modules/IM130614001_Serial_Port_BLE_Module_Master_Slave_HM-10/DS_IM130614001_Serial_Port_BLE_Module_Master_Slave_HM-10.pdf. *Datasheet V303*, pp. 1–14.

Cardillo, E., Di Mattia, V., Manfredi, G., Russo, P., De Leo, A., Caddemi, A., y Cerri, G. (2018). An electromagnetic sensor prototype to assist visually impaired and blind people in autonomous walking. *IEEE Sensors Journal*, **18**(6): 2568–2576.

Carroll, J. (2000). Introduction to this Special Issue on “Scenario-Based System Development”. *Interacting with Computers*, **13**(1): 41–42.

Cecílio, J., Duarte, K., y Furtado, P. (2015). BlindeDroid: An information tracking system for real-time guiding of blind people. En: *Procedia Computer Science*. Elsevier Masson SAS, Vol. 52, pp. 113–120.

Cook, D. J., Augusto, J. C., y Jakkula, V. R. (2009). Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities. *Pervasive and Mobile Computing*, **5**(4): 277–298.

Cytron-Technologies (2013). Product user’s manual - HCSR04 ultrasonic sensor. Consultado el 07/10/2019 de https://cdn.datasheetspdf.com/pdf-down/H/C/-/HC-SR04-Cytron.pdf. (May): 1–10.

Di Mattia, V., Scalise, L., Petrini, V., Russo, P., De Leo, A., Pallotta, E., Mancini, A., Zingaretti, P., y Cerri, G. (2016). Electromagnetic technology for a new class of electronic travel aids supporting the autonomous mobility of visually impaired people. En: *Visually Impaired: Assistive Technologies, Challenges and Coping Strategies*. pp. 1–40.

Diamantatos, P. y Kavallieratou, E. (2014). Android based electronic travel aid system for blind people. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, **436**(September): 585–592.

Discant, A., Rogozan, A., Rusu, C., y Bensrhair, A. (2007). Sensors for obstacle detection - A survey. *ISSE 2007 - 30th International Spring Seminar on Electronics Technology 2007; Conference Proceedings: Emerging Technologies for Electronics Packaging*, pp. 100–105.

Dobelle, W. H. (1994). Artificial vision for the blind. *ASAIO Journal*, **40**(4): 919–922.

Domingo, M. C. (2012). An overview of the Internet of Things for people with disabilities. *Journal of Network and Computer Applications*, **35**(2): 584–596.

Dunai, L. D., Lengua, I. L., Tortajada, I., y Simon, F. B. (2014). Obstacle detectors for visually impaired people. *2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2014*, (May): 809–816.

Dutta, S., Barik, M. S., Chowdhury, C., y Gupta, D. (2018). Divya-dristi: A smartphone based campus navigation system for the visually impaired. En: *2018 Fifth International Conference on Emerging Applications of Information Technology (EAIT)*. IEEE, pp. 1–3.

Galioto, G., Tinnirello, I., Croce, D., Inderst, F., Pascucci, F., y Giarré, L. (2018). Sensor fusion localization and navigation for visually impaired people. En: *2018 European Control Conference (ECC)*. IEEE, pp. 3191–3196.

Gonzalez, R. (2014). HC-SR04 ultrasonic sensor – accuracy and resolution tests. Consultado el 13/10/2019 de https://forum.arduino.cc/?topic=243076msg1741270. pp. 1–11.

Hakim, H. y Fadhil, A. (2019). Navigation system for visually impaired people based on rgb-d camera and ultrasonic sensor. En: *Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technology*. pp. 172–177.

Hersh, M. A. y Johnson, M. A. (2008). *Assistive technology for visually impaired and blind people*. pp. 332–362.

Islam, M. I., Raj, M. M. H., Nath, S., Rahman, M. F., Hossen, S., y Imam, M. H. (2018). An indoor navigation system for visually impaired people using a path finding algorithm and a wearable cap. En: *2018 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. IEEE, pp. 1–6.

Islam, M. M., Sadi, M. S., Zamli, K. Z., y Ahmed, M. M. (2019). Developing walking assistants for visually impaired people: A review. *IEEE Sensors Journal*, **19**(8): 2814–2828.

Jacobsen, R. H., Hansen, F. O., Madsen, J. K., Karstoft, H., Mikkelsen, P. H., Skogberg, T. A., Rasmussen, E. S., Andersen, C., Alrøe, M., y Toftegaard, T. S. (2011). A modular platform for wireless body area network research an real-life experiments. *International Journal On Advances in Networks and Services*, **4**(3): 257–277.

Jacopo Tosi, Fabrizio Taffoni, M. S. R. S. D. F. (2017). Performance evaluation of bluetooth low energy: A systematic review. pp. 1–34.

Khenkar, S., Alsulaiman, H., Ismail, S., Fairaq, A., Jarraya, S. K., y Ben-Abdallah, H. (2016). ENVISION: Assisted Navigation of Visually Impaired Smartphone Users. En: *Procedia Computer Science*. Vol. 100, pp. 128–135.

Mehmood, A., Nadeem, A., Rizwan, K., Mahmood, N., y Waqas, A. (2018). A study of wearable bio-sensor technologies and applications in healthcare. *Sukkur IBA Journal of Computing and Mathematical Sciences*, **1**(1): 67.

Negra, R., Jemili, I., y Belghith, A. (2016). Wireless body area networks: applications and technologies. *Procedia Computer Science*, **83**: 1274–1281.

Patil, K., Jawadwala, Q., y Shu, F. C. (2018). Design and construction of electronic aid for visually impaired people. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, **48**(2): 172–182.

Rizvi, S. T. H., Asif, M. J., y Ashfaq, H. (2017). Visual impairment aid using haptic and sound feedback. *Proceedings of 2017 International Conference on Communication, Computing and Digital Systems, C-CODE 2017*, pp. 175–178.

Rocha, Á., Correia, A. M., Adeli, H., Reis, L. P., y Teixeira, M. M. (2016). New advances in information systems and technologies. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, **445**.

Roentgen, U. R., Gelderblom, G. J., Soede, M., y de Witte, L. P. (2008). Inventory of electronic mobility aids for persons with visual impairments: A literature review. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, **102**(11): 702–724.

Sharp, H., Rogers, Y., y Preece, J. (2019). *Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction (5th edition)*. Wiley. pp. 408–415.

Simoes, W. C., Da Silva, L. M., Da Silva, V. J., y De Lucena, V. F. (2018). A guidance system for blind and visually impaired people via hybrid data fusion. *Proceedings - IEEE Symposium on Computers and Communications*, **2018-June**: 1261–1266.

Theodorou, P. y Meliones, A. (2019). Developing apps for people with sensory disabilities, and implications for technology acceptance models. *Global Journal of Information Technology: Emerging Technologies*, **9**(2): 33–40.

Tsirmpas, C., Rompas, A., Fokou, O., y Koutsouris, D. (2015). An indoor navigation system for visually impaired and elderly people based on radio frequency identification (rfid). *Information Sciences*, **320**: 288–305.

Velasco, S., Román, F. L., González, A., y White, J. A. (2004). A computer-assisted experiment for the measurement of the temperature dependence of the speed of sound in air. *American Journal of Physics*, **72**(2): 276–279.

Velázquez, R. (2010). Wearable assistive devices for the blind. En: *Wearable and autonomous biomedical devices and systems for smart environment*. Springer, pp. 331–349.

Wang, J., Yang, K., Hu, W., y Wang, K. (2018). An environmental perception and navigational assistance system for visually impaired persons based on semantic stixels and sound interaction. En: *2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. IEEE, pp. 1921–1926.

Woolley, M. (2019). Bluetooth Core Specification. Consultado el 12/02/2020 de https://www.bluetooth.com/specifications/adopted-specifications.

World Health Organization and others (2019). World report on vision. **214**(14): 180–235.

Yang, Z. y Ganz, A. (2019). A Sensing Framework for Indoor Spatial Awareness for Blind and Visually Impaired Users. *IEEE Access*, **7**: 10343–10352.

Yeboah, M. O., Kuada, E., Sitti, M., Govindan, K., Hagan, H., y Miriam, M. C. (2018). Design of a voice guided ultrasonic spectacle and waist belt with GPS for the visually impaired. *IEEE International Conference on Adaptive Science and Technology, ICAST*, **2018-Augus**: 1–7.

Zheng, S. (2018). An accessibility checklist for designers and developers. Consultado el 18/06/2020 de https://medium.com/microsoft-design/an-accessibility-checklist-for-designers-and-developers-a53a7d2d2c97.

Anexo

.1. Especificaciones técnicas de la placa Arduino UNO:

- Microcontrolador: ATmega328P
- Voltage Operacional: 5V
- Voltage de entrada(recomendado): 7-12V
- Voltage de entrada (límite): 6-20V
- Pines de entrada/salida digitales: 14 (6 de ellos proveen salida PWM)
- Pines de entrada/salida digitales PWM: 6
- Pines entrada analógicos: 6
- Corriente por Pin de entrada/salida: 20 mA
- Corriente por 3.3V Pin: 50 mA
- Memoria Flash: 32 KB (ATmega328P) 0.5 KB usado por el bootloader
- SRAM: 2 KB (ATmega328P)
- EEPROM: 2 KB (ATmega328P)
- Velocidad del reloj: 16 MHz
- LED_BUILTIN: 13
- Largo: 68.6 mm
- Ancho: 53.4 mm
- Peso: 25 g

.2. Especificaciones técnicas del sensor HCSR04

- Fuente de alimentación: + 5V DC
- Corriente de reposo: <2mA
- Corriente de trabajo: 15mA

- Ángulo efectivo: <15º
- Distancia de rango: 2400 cm
- Resolución: 0,3 cm.
- Ángulo de medición: 30º
- Ancho de pulso de entrada de disparador: 10uS
- Dimensión: 45 mm x 20 mm x 15 mm
- Peso: aprox. 10 g

(Cytron-Technologies, 2013)

.3. Características técnicas del sensor de temperatura DHT11

- Alimentación de 3.3V a 5VDC
- Corriente máxima 2.5mA durante la conversión
- Lectura de humedad con un +/- 5 % de precisión
- Lectura de temperatura con un +/- 2°C de precisión
- Capaz de medir humedad de 20 % a 80 %
- Capaz de medir temperatura de 0 a 50°C
- No más de 1 Hz en velocidad de muestreo (una vez cada segundo)
- Dimensiones: 15.5mm x 12mm x 5.5mm

(ABCElectronica, 2016)

.4. Características técnicas del dispositivo BLE HM10

- Versión BT: especificación Bluetooth V4.0 BLE
- Frecuencia de trabajo: banda ISM de 2.4GHz
- Método de modulación: GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)

- Potencia de RF: -23dbm, -6dbm, 0dbm, 6dbm
- Velocidad: asíncrona: 2-6K bytes, sincrónico: 2-6K Bytes
- Seguridad: autenticación y encriptación
- Servicio: 0xFFE0 (uso modificable AT + comando UUID)
- Característica: 0xFFE1 (comando modificable de uso AT + UUID)
- Característica: Notificación y escritura (uso modificable comando AT + UUID)
- Potencia: + 2.5V a 3.3VDC 50mA
- Potencia: estado activo 8.5mA; Estado de reposo 50 a 200μA
- Temperatura de trabajo: –20 a +95 centígrados
- Tamaño: HM-10 27 mm x 13 mm x 2.2 mm

(Bluetooth, 2013)

.5. Eventos Bluetooth Low Energy

El evento de anuncios proporciona una forma para que los dispositivos periféricos transmitan continuamente su presencia para que el dispositivo central pueda verlos mientras hacen posible la configuración de conexiones. Los dispositivos que transmiten paquetes de anuncios en uno o más de los tres canales PHY, se denominan anunciantes. Los dispositivos que reciben paquetes de anuncios sin la intención de conectarse se denominan escáneres. El escaneo puede ser pasivo o activo. En el escaneo pasivo, el escáner escucha los paquetes de anuncios. El escaneo activo significa que el escáner envía un paquete de solicitud de escaneo al anunciante para obtener más información sobre sus servicios (Bensky, 2019). En las siguientes imágenes se explican estos 2 eventos a mayor detalle.

Evento de anuncios: Al comienzo de cada evento de anuncios, el anunciante envía un paquete de anuncios correspondiente al tipo de evento anuncios. Dependiendo del tipo de paquete de anuncios, el escáner puede hacer una solicitud al anunciante en el mismo canal PHY de anuncios, que puede ser seguido por una respuesta del anunciante en el mismo canal PHY de anuncios. Este canal cambia en el siguiente paquete

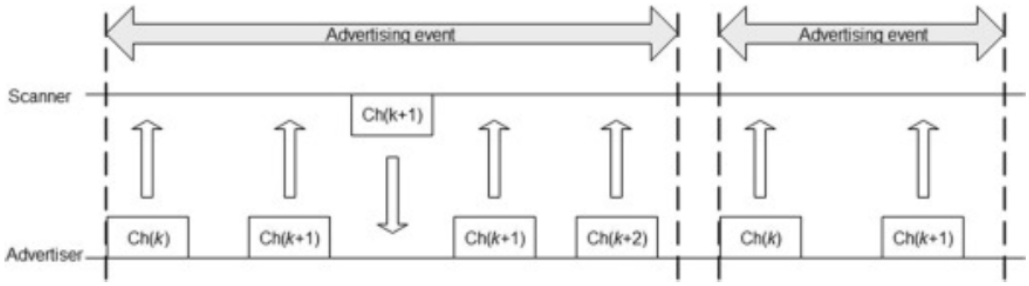

Figura 27. Evento de anuncios

de anuncios enviado por el anunciante en el mismo evento anuncios. El anunciante puede finalizar el evento anuncios en cualquier momento durante el evento (Bensky, 2019).

.6. Transmisión de datos dentro de Bluetooth Low Energy

Uno de los obstáculos que se plantea BLE en su estructura es la semántica de los datos: ¿cómo puedo interpretar los datos dentro de un paquete? ¿hay más de un campo que me dé información? ¿cómo están delimitados los datos? ¿qué unidades físicas están asociadas a los datos? Todas estas son preguntas que resuelve BLE con del tratamiento de la semántica de la información.

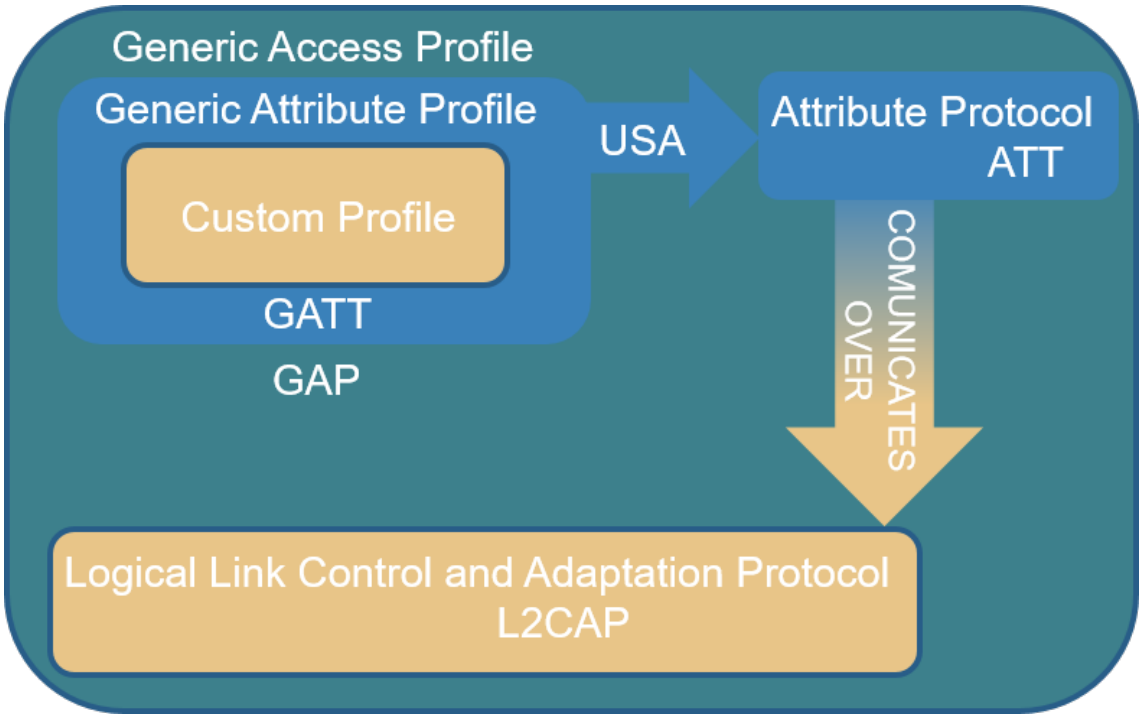

Figura 28. Perfil GATT

Un Perfil (Profile) es una colección de Servicios (Services) GATT. Un servicio es un objeto de protocolo de atributos compuesto por una colección de atributos, valga la redundancia, que describen unos elementos de información en los cuales estamos interesados. Dichos servicios son identificados por un “identificador” (type identifier) y un número (number) que puede ser de 16 bits si es un estándar de Bluetooth o de 128 bits si es uno creado por el usuario. Los elementos de información son Características (Characteristics) las cuales son definidas por un “tipo” (type) y un “valor” (value). Cada característica está compuesta por más objetos de protocolos de atributos llamados “campos” (fields) que contienen la información que necesitamos. Algunas características poseen un campo modificable denominado configuración de la característica del cliente (client characteristic configuration), el cual sirve para que el servidor pueda alertar al cliente cuando ocurre algún evento. Los eventos están relacionados con los valores de los campos de las características, es decir, si hay algún valor alterado o que está fuera de un rango, etc.; y son indicados a través de indicaciones o notificaciones (Woolley, 2019):

- Indicación: es una alerta emitida desde el servidor hacia el cliente la cual requiere confirmación.
- Notificación: es una alerta emitida desde el servidor hacia el cliente que no requiere confirmación

.7. Unidades de Datos de Protocolos

Las unidades de datos de protocolos (PDU) tienen la siguiente estructura (Woolley, 2019):

1. Preámbulo (Preamble): es el encargado de establecer la sincronicidad entre el transmisor y el receptor. Consiste en combinaciones de 0 y 1 que le permitirá al receptor sincronizar su reloj con el del transmisor. En la mayoría de los casos, el preámbulo es 1 byte (un hex AAA o hex 5:5) dependiendo si el siguiente bit es un 1 o un 0 respectivamente.
2. Dirección de acceso (Access Address): Esta parte del paquete es un código de acceso del canal físico y tiene que cumplir los sgts requerimientos:

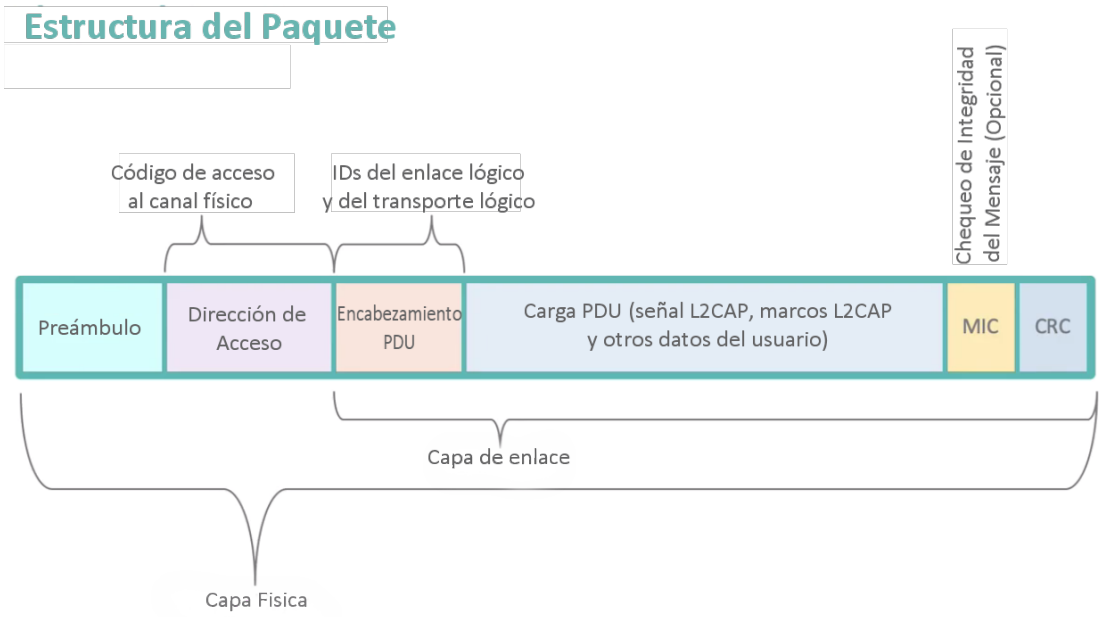

Figura 29. Estructura el PDU que transmite BLE

a) No puede ser un código que ya esté en uso.

b) No puede tener más de 6 1s o 0s consecutivos.

c) Los 4 bytes no pueden ser todos iguales.

d) No puede haber más de 24 transiciones de 1s a 0s ni de 0s a 1s.

e) Debe haber 2 transiciones de 1s a 0s o de 0s a 1s en los 6 bits más significativos.

3. Encabezado PDU (PDU Header): Indica el canal lógico de transporte y el ID de la conexión lógica que se utilizará para enviar el paquete.
4. Mensaje PDU (PDU Payload): Información que proviene de las capas superiores (del HOST)
5. MIC (chekeo de integridad del mensaje)
6. CRC (de 24 bits)

.8. Seguridad y confiabilidad en la transmisión de la información dentro de Bluetooth Low Energy

Por si fuera poco, BLE utiliza además una llave de sesión única para la conexión, que funciona de la siguiente manera (Woolley, 2019):

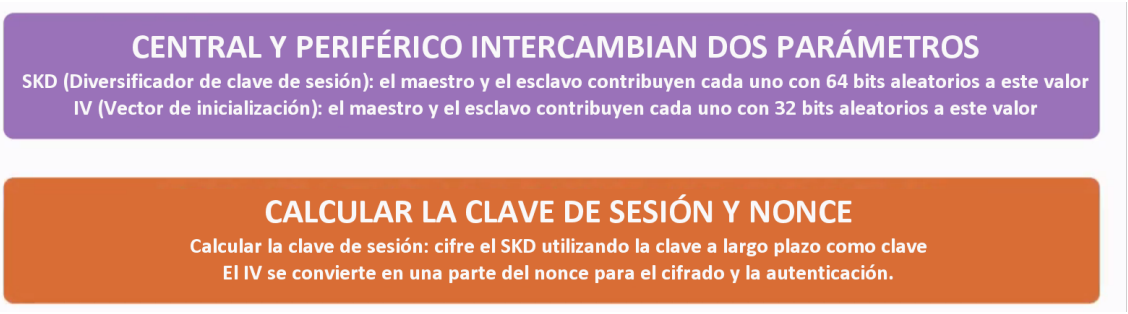

Figura 30. Clave de sesión única para la conexión BLE

BLE utiliza una técnica de encriptación de la información llamada AES-CCM (Advanced Encription Standard - Counter mode with Cbc-Mac authentication). El modo Counter está probado como un modo criptográficamente sólido y se compara bien con otras operaciones de modos de cifrado. No es objetivo de nuestro trabajo entrar en las especificaciones de cómo esta técnica funciona en detalle, pero si destacamos su importancia y lo confiable que resulta para mantener la seguridad de la información que se intercambia entre los endpoints de la conexión.

Para transmitir datos entre dispositivos, mediante ondas electromagnéticas, la tecnología BLE utiliza la Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gausiana (Gaussian Frequency Shift Keying – GFSK). GFSK es un tipo de modulación digital, como una de las variantes de cambios discretos de frecuencia de una portadora, que es el principio de funcionamiento de FSK. GFSK es uno de los esquemas de modulación más utilizados para estándares de comunicación inalámbrica de baja velocidad de datos y consumo de energía, como es el caso de BLE, además de la disposición de dispositivos de costos relativamente bajos para su compatibilidad y la mejora en el rendimiento de la tasa de error de bits, BER, y la capacidad de integración entre aplicaciones diversas [1]. En lugar de modular directamente la frecuencia con los símbolos de datos digitales, GFSK va cambiando instantáneamente la frecuencia al comienzo de cada período de símbolo, filtra los pulsos de datos codificados con un filtro gaussiano para amortiguar las transiciones y disminuir el ancho espectral, haciendo un uso más eficiente del mismo en comparación con FSK, además de permitir una buena tolerancia a la interferencia. (Woolley, 2019)

[1] https://ieeexplore.ieee.org/document/4145694

.9. Interferencia en la tecnología Bluetooth Low Energy

FHSS, también conocida como Espectro Extendido por Saltos de Frecuencia, es un método para el trabajo con señales de radio cambiando la frecuencia portadora entre varias frecuencias portadoras de sub-bandas o canales pertenecientes a un determinado espectro, basado en un código el cual solo conocen un transmisor y receptor determinados en el establecimiento de una comunicación, por lo que solo estos podrán conocer completamente el contenido de la información transmitida. Esta técnica tiene como ventaja fundamental la disminución de la interferencia, tanto la ocasionada a dispositivos externos, como la que puedan ocasionar estos, además, en caso de existir interferencia por parte de un factor externo en uno de los canales de frecuencia utilizados para la comunicación, esta será por un tiempo muy reducido, el cual dependerá del tiempo en ejecutarse un salto hacia otro de los canales disponibles que no se encuentre en una situación similar. (Woolley, 2019)

Adaptative Frequency Hooping (AFH), es específicamente el método utilizado por la tecnología BLE para la inmunidad ante interferencias, el cual está basado en FHSS, explicado anteriormente. Este método tiene como principio la clasificación de los canales en 2 grupos, usados o no usados, donde los canales usados son parte de la secuencia de saltos y los no usados son remplazados en la secuencia de salto por canales usados de una manera pseudo-aleatoria. Este mecanismo permite el uso de todos o parte de los 40 canales disponibles, en dependencia de las condiciones de la comunicación. A pesar de que AFH es un factor crítico en la mitigación de la interferencia, existen ocasiones en las que no es suficiente, por lo que la tecnología Bluetooth lo complementa con otras características mencionadas a continuación: (Woolley, 2019)

- **HCI Set Host Channel Classification**: Permite que un host informe al controlador Bluetooth local los canales que están en uso.
- **Enhanced SCO, eSCO**: Se agregan retransmisiones al enlace síncrono orientado a conexión, SCO, para combatir la interferencia.
- **MWS Coexistence Signaling**: Provee una interfaz estandarizada entre dispositivos de radiocomunicación para la aplicación de técnicas de coexistencia entre la tecnología Bluetooth y Mobile Wireless Standards, MWS.

- **Piconet Clock Adjust**: Permite que un dispositivo Bluetooth se sincronice con tecnologías externas, como Long Term Evolution, LTE.
- **Slot Availability Mask**: Provee un mecanismo para que dos dispositivos Bluetooth se indiquen los espacios de tiempo disponible para su comunicación.

.10. Modelo de datos de la base de datos en MongoDb

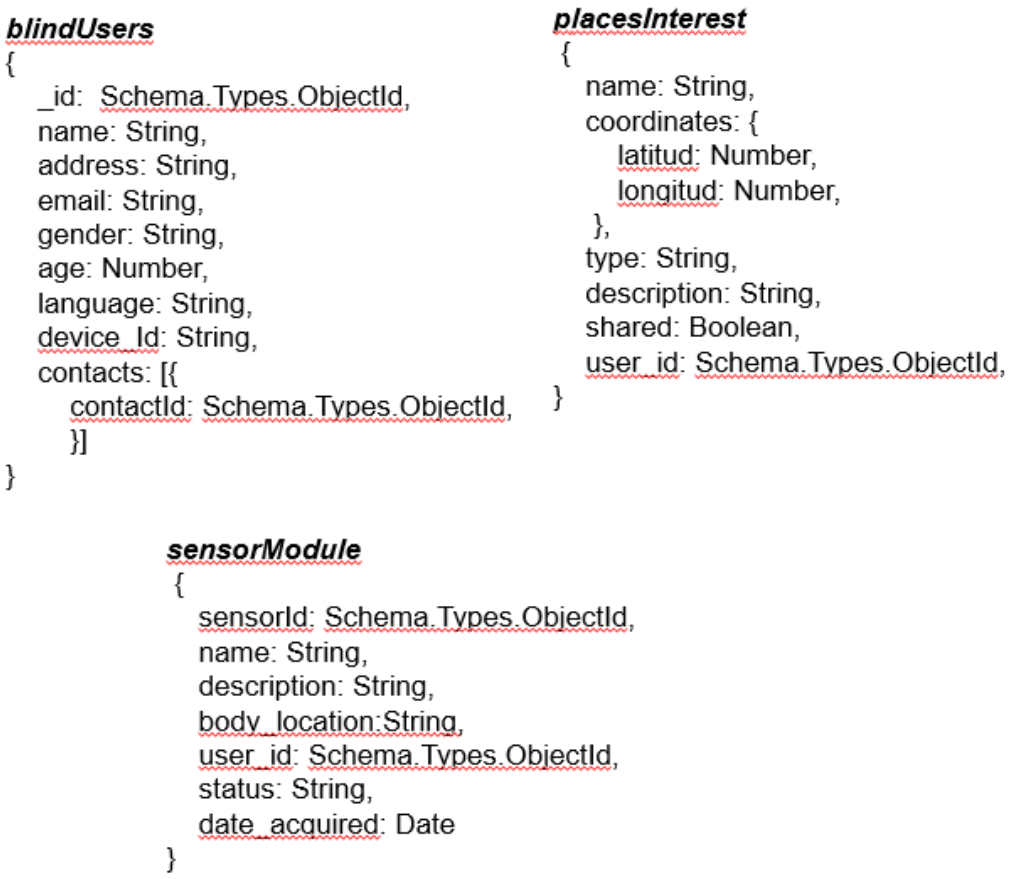

Figura 31. Modelo de Datos implementado en MongoDb

.11. Sistema Postman para ejecutar las pruebas a la API REST

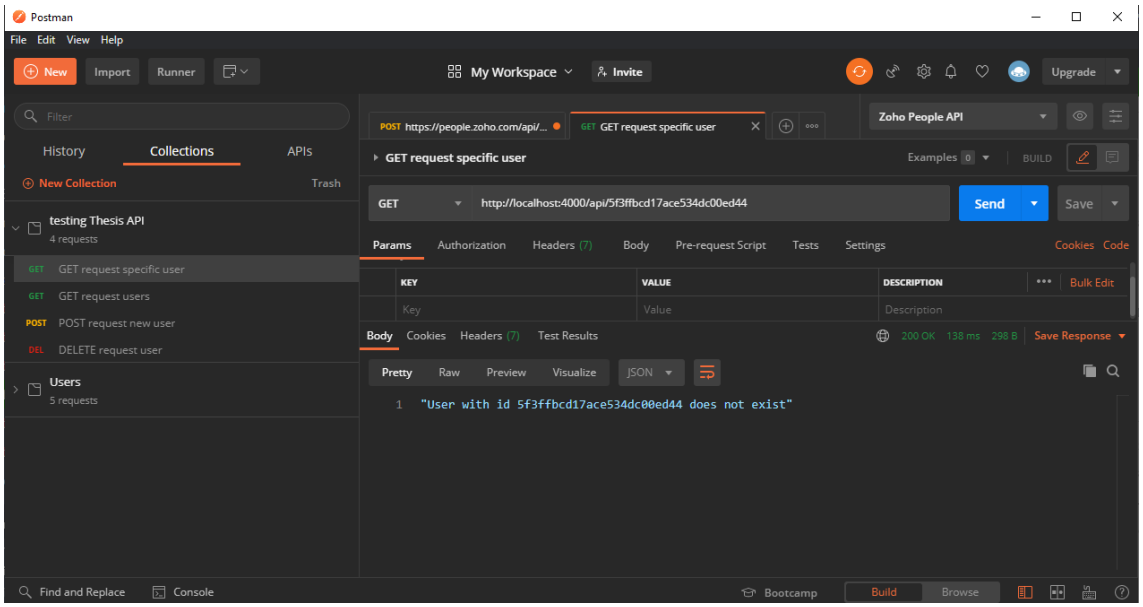

Figura 32. Ejecutando petición GET de un usuario en específico

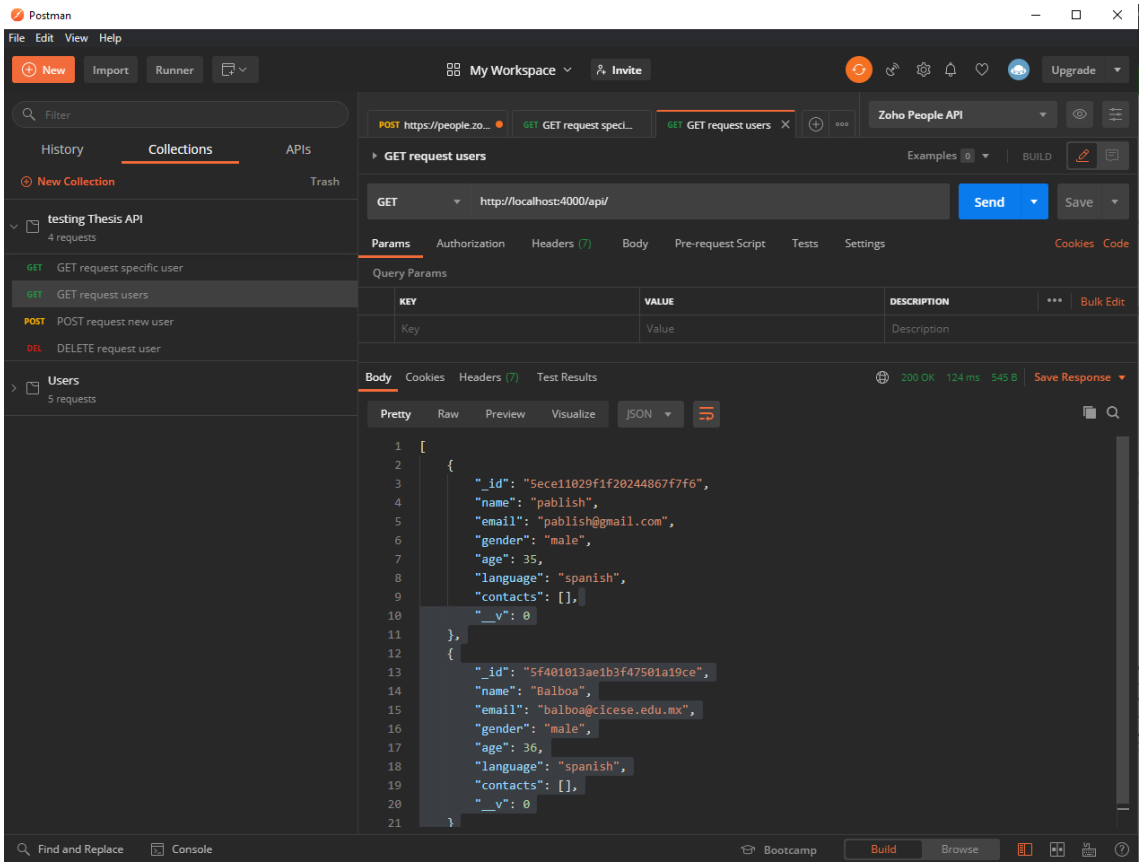

Figura 33. Ejecutando petición GET de todos los usuarios del sistema