



Acta de Correcciones al Proyecto de Grado Ingeniería Biomédica

Fecha: 30 de enero de 2025

Autores: Joseph Arroyave Restrepo.

Nombre del Proyecto de Grado: Diseño e implementación de un sistema de localización para equipos biomédicos mediante la integración de tecnología RFID y WIFI.

Directora: Valentina Corchuelo Guzmán.

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

Firma de Director(a) del Proyecto de Grado



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**Facultad de Ingeniería
y Ciencias**

Ingeniería Biomédica

MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO

Diseño e implementación de un sistema de localización
para equipos biomédicos mediante la integración de
tecnología RFID y WIFI

Joseph Arroyave Restrepo

Director

Ing. Valentina Corchuelo Guzmán

Codirector

Ing. Juan Esteban Palacios Duarte

27 de enero de 2025

Santiago de Cali, 27 de enero de 2025

Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ciudad

Cordial Saludo.

Por medio de la presente me permito presentarle el Trabajo de Grado titulado “Diseño e implementación de un sistema de localización para equipos biomédicos mediante la integración de tecnología RFID y WIFI”.

Espero que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,



Joseph Arroyave Restrepo

Santiago de Cali, 27 de enero de 2025

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño

Decano

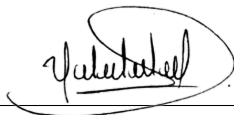
Facultad de Ingeniería y Ciencias

Ciudad

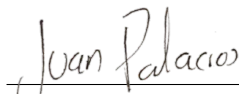
Cordial Saludo.

Certificamos que el presente Trabajo de Grado titulado “Diseño e implementación de un sistema de localización para equipos biomédicos mediante la integración de tecnología RFID y WIFI”, realizado por Joseph Arroyave Restrepo, estudiante de Ingeniería Biomédica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,



Ing. Valentina Corchuelo Guzmán
Director Trabajo de Grado



Ing. Juan Esteban Palacios Duarte
Co-Director Trabajo de Grado

Agradecimientos

A todos quienes participaron y fueron parte de este proyecto.

Glosario

Símbolos

δ_i	Se emplea para denotar el tiempo límite de ejecución para la i -ésima Tarea [ms].
τ_i	Se emplea para denotar la i -ésima Tarea.
μ	Promedio (media aritmética) de los datos.
x_i	Valores individuales registrados (tiempos en segundos).
n	Número total de pruebas o datos registrados.
σ	Desviación estándar de los datos.
Rango	Diferencia entre el valor máximo y el mínimo en los datos.
Mediana	Valor central de los datos ordenados o promedio de los dos valores centrales.

Acrónimos y Abreviaturas

<i>EB</i>	Equipo biomédico
<i>IoT</i>	Internet of Things
<i>RFID</i>	Radio-frequency identification
<i>AIDC</i>	Automatic identification and data capture
<i>RTLS</i>	Real time location system
<i>HRTLS</i>	Hospital real time location system
<i>IPS</i>	Institucionalizadlos prestadora de servicios de salud
<i>INVIMA</i>	Instituto nacional de vigilancia de medicamentos y alimentos
<i>FDA</i>	Food and Drug Administration
<i>SGSSS</i>	Sistema general de seguridad social en salud
<i>ANE</i>	Asociación nacional del espectro
<i>BLE</i>	Bluetooth low energy
<i>UUID</i>	Universally unique identifier
OFF	Resultados obtenidos con el sistema apagado.
ON	Resultados obtenidos con el sistema encendido.
ON, ajustado	Resultados con intervención excluyendo datos anómalos.
Mejora (%)	Porcentaje de mejora en los resultados tras la intervención.
p -valor	Probabilidad asociada a la prueba t de Student.
T-test estadístico	Valor calculado en la prueba t de Student.

Términos

<i>Promedio</i>	Media aritmética de los datos numéricos registrados.
<i>Mediana</i>	Valor central de un conjunto de datos ordenados.
<i>Desviación estándar</i>	Medida de dispersión que indica la variabilidad de los datos respecto al promedio.

Resumen

Las instituciones prestadoras de servicios de salud en Colombia enfrentan un desafío crítico relacionado con la localización de equipos biomédicos necesarios para procedimientos médicos, lo que genera pérdidas de tiempo. Este problema se agrava por la seguridad de los equipos y su impacto en el cumplimiento de estándares de habilitación de servicios de salud.

Este proyecto tiene como objetivo diseñar e implementar un sistema de localización de equipos biomédicos mediante la integración de tecnología RFID (radio-frequency identification) y WIFI. Para lograrlo, se analizará la normativa de salud colombiana, se diseñará un sistema de localización basado en áreas de circulación, puntos de acceso, labores y necesidades del personal técnico y asistencial, y se verificará su funcionamiento en un entorno de prueba.

La implementación de tecnología RFID se presenta como una herramienta prometedora para la gestión de equipos biomédicos. El prototipo del sistema incluye etiquetas RFID, receptores RFID, y una base de datos dispuesta en un servicio de cloud en línea.

Para el alcance del proyecto, se estableció la implementación de un prototipo del sistema de localización en el Hospital Simulado de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Este prototipo estará diseñado para satisfacer las necesidades identificadas en términos de localización dentro de una institución de salud de alta complejidad en Santiago de Cali. El informe final incluirá una descripción detallada de los componentes del sistema, su arquitectura y su funcionamiento.

Palabras Clave: Radiofrecuencia, RFID, equipos biomédicos, hospitales, localización, gestión, tecnología.

Abstract

Healthcare institutions in Colombia face a critical challenge related to locating biomedical equipment required for medical procedures, leading to time losses. This issue is exacerbated by concerns over equipment security and its impact on meeting healthcare service accreditation standards.

This project aims to design and implement a biomedical equipment tracking system through the integration of RFID (Radio-Frequency Identification) and WIFI technologies. To achieve this, Colombian healthcare regulations will be analyzed, a localization system will be designed based on circulation areas, access points, tasks, and the needs of technical and healthcare staff, and its functionality will be verified in a test environment.

The implementation of RFID technology is presented as a promising tool for managing biomedical equipment. The system prototype includes RFID tags, RFID receivers, and a database hosted on an online cloud service.

For the scope of the project, the implementation of a prototype tracking system was established in the Simulated Hospital at Pontificia Universidad Javeriana Cali. This prototype is designed to meet the identified needs for equipment localization within a high-complexity healthcare institution in Santiago de Cali. The final report will provide a detailed description of the system's components, architecture, and functionality.

Keywords: Radiofrequency, RFID, biomedical equipment, hospitals, localization, management, technology.

Índice general

1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo General	7
4.2. Objetivos Específicos	7
5. Marco de Referencia	9
5.1. Áreas Temáticas	9
5.2. Marco Teórico	9
5.2.1. Equipo biomédico	9
5.2.2. RFID	9
5.2.3. Aplicación WEB	10
5.2.4. Cliente/Servidor	11
5.2.5. Arquitectura web	11
5.2.6. Bases de datos	12
5.2.7. Inventario	12
5.3. Marco ético-legal	14
5.3.1. Declaración de Helsinki	14
5.3.2. Resolución 8430 de 1993	15
5.4. Trabajos Relacionados	16
5.4.1. Trabajos Relacionados	16
6. Materiales y Métodos	19
6.1. Metodología	19
6.1.1. Tipo de Estudio	20
7. Resultados y Discusión	23
7.1. Análisis de la normativa de salud vigente en Colombia relacionada con la gestión de equipos biomédicos en entornos hospitalarios	23
7.1.1. Decreto 4725 de 2005	23
7.1.2. Resolución 3100 de 2019	25
7.1.3. Resolución 4816 de 2008	26
7.1.4. Resolución 184 de 2024	27

7.2. Instituciones y organismos reguladores relacionados con equipos biomédicos en Colombia	28
7.2.1. Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA)	28
7.2.2. Superintendencia Nacional de Salud:	30
7.2.3. Ministerio de Salud y Protección Social:	30
7.3. Sistema de localización de equipos biomédicos	31
7.3.1. Nivel internacional	31
7.3.2. Nivel nacional y local	33
7.4. Diseño del sistema para localización de equipos biomédicos	35
7.4.1. Identificación de tecnologías en telecomunicaciones más adecuadas para el sistema	35
7.4.2. Análisis de viabilidad de tecnología en telecomunicaciones en entornos hospitalarios.	38
7.4.3. Requerimientos del sistema	40
7.4.4. Selección de tecnologías para montaje del prototipo del sistema de localización.	47
7.4.5. Prototipo funcional del sistema de localización.	49
7.5. Verificación del funcionamiento del sistema a través de la medición del tiempo de localización de equipos biomédicos.	59
7.5.1. Pruebas de alcance y potencia de emisión	59
7.5.2. Implementación el sistema de localización en el hospital simulado, incluyendo la instalación de etiquetas RFID y puntos de acceso Wi-Fi.	63
7.5.3. Protocolo de pruebas de tiempos de localización de equipos biomédicos.	65
7.5.4. Pruebas de localización de equipos biomédicos.	67
7.5.5. Retroalimentación del personal del hospital simulado sobre el sistema de localización de equipos biomédicos	70
8. Conclusiones	75
8.1. Conclusión General	75
8.2. Cumplimiento de los Requerimientos Técnicos	75
8.3. Eficiencia en la Localización y Gestión de Activos	76
8.4. Adaptabilidad y Personalización del Sistema	76
8.5. Desafíos y Limitaciones	76
9. Trabajos futuros	77
9.1. Trabajos Futuros	77
9.1.1. Seguridad en la Transmisión de Datos	77
9.1.2. Reducción de Tamaño y Mejora del Diseño	77
9.1.3. Incorporación de Nuevas Funcionalidades	78
9.1.4. Diseño Hermético y Resistente a Líquidos	78
9.1.5. Desarrollo de un Receptor Portátil	78
9.1.6. Ampliación de Escenarios de Prueba	78

Índice general	19
<hr/>	
9.1.7. Integración con Tecnologías Emergentes	78
10. Anexos	81
Anexos	81
Anexo 1 – Códigos utilizados en el sistema de localización de equipos biomédicos	81
Anexo 2 – Consentimiento informado resultado encuesta	82
Anexo 3 – Consentimiento informado	83
Anexo 4 – Pregunta 8 encuesta resultado	85
Anexo 5 – Pregunta 10 encuesta resultado	86
Anexo 6 – Pregunta 12 encuesta resultado	87
Anexo 7 – Pregunta 18 encuesta resultado	88
Anexo 8 – Pregunta 21 encuesta resultado	89
Anexo 9 – Pregunta 22 encuesta resultado	90
Anexo 10 – Etiqueta activa.	91
Anexo 11 – Bomba de infusión rastreada.	92
Anexo 12 – Ecógrafo rastreado.	93
Anexo 13 – Tensiómetro manual móvil.	94
Anexo 14 – Monitor de signos vitales en mesa auxiliar.	95
Anexo 15 – Electrocardiógrafo en mesa auxiliar.	96
Anexo 16 – Ventilador mecánico.	97
Bibliografía	99

Índice de figuras

7.1. Clasificación de dispositivos médicos. Fuente: Decreto 4725 de 2005	24
7.2. Estructura sistema RFID pasivo	36
7.3. Pregunta 3 encuesta.	41
7.4. Pregunta 4 encuesta.	41
7.5. Pregunta 5 encuesta.	42
7.6. Pregunta 6 encuesta.	42
7.7. Pregunta 7 encuesta.	43
7.8. Pregunta 9 encuesta.	43
7.9. Pregunta 14 encuesta	44
7.10. Pregunta 15 encuesta	44
7.11. Pregunta 16 encuesta	45
7.12. Pregunta 17 encuesta	45
7.13. Pregunta 19 encuesta	46
7.14. Pregunta 20 encuesta	46
7.15. Estructura de sistema Maestro-Esclavo	49
7.16. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema Maestro-Esclavo	50
7.17. Gráfico ejemplo de un sistema de posicionamiento estratégico de receptores	51
7.18. Descripción partes del sistema	51
7.19. Diagrama de flujo del sistema de posicionamiento estratégico de receptores	52
7.20. Arduino ESP32 Nano. Fuente: Página oficial de Arduino	53
7.21. Diseño 3D del receptor	54
7.22. Ejemplo de la estructura base de datos en firebase	55
7.23. Aplicativo web - Pestaña resumen	56
7.24. Mapa del Hospital simulado con delimitación de áreas	57
7.25. Xiao Seeed NRF52840. Fuente: Página oficial de Xiao Seeed	57
7.26. Modelo 3D caja emisor	58
7.27. Etiquetas impresas	59
7.28. Lugar de pruebas: Laboratorio de ingeniería biomédica y electrónica	60
7.29. Área de trabajo de pruebas	63
7.30. Posición de los receptores del sistema de localización	64
10.1. Consentimiento informado resultado encuesta	82
10.2. Pregunta 8 encuesta resultado	85
10.3. Pregunta 10 encuesta resultado	86
10.4. Pregunta 12 encuesta resultado	87
10.5. Pregunta 18 encuesta resultado	88
10.6. Pregunta 21 encuesta resultado	89

10.7. Pregunta 22 encuesta resultado	90
10.8. Etiqueta activa.	91
10.9. Bomba de infusión rastreada.	92
10.10 Ecógrafo rastreado.	93
10.11 Tensiómetro manual móvil.	94
10.12 Monitor de signos vitales en mesa auxiliar.	95
10.13 Electrocardiografo con etiqueta.	96
10.14 Ventilador mecánico.	97

Índice de cuadros

7.1. Comparación de tecnologías de comunicación	37
7.2. Bandas ICM[1].	38
7.3. Requerimientos para el sistema de localización de equipos biomédicos.	47
7.4. Cuadro Comparativo [1] [2]	48
7.5. Especificaciones del ESP32-S3	53
7.6. Características del Seeed Studio XIAO nRF52840 [3].	58
7.7. Tabla de resultados resumida	62
7.8. Tabla de resultados de las pruebas	68
7.9. Resultados estadísticos de las pruebas.	68

Introducción

Las Instituciones Prestadoras de Salud (IPS) presentan un constante aumento en la diversidad y cantidad de sus equipos biomédicos (EB), esto tiene una relación directa con la expansión física de sus instalaciones, servicios y complejidad. Los EB están definidos como un dispositivo médico operacional y funcional que reúne sistemas y subsistemas eléctricos, electrónicos o hidráulicos, incluidos los programas informáticos que intervengan en su buen funcionamiento, destinado por el fabricante a ser usado en seres humanos con fines de prevención, diagnóstico, tratamiento o rehabilitación, definición extraída del decreto 4725 del 2005, por el cual se reglamenta el régimen de registros sanitarios, permiso de comercialización y vigilancia sanitaria de los dispositivos médicos para uso humano [4]. Este crecimiento ha generado la necesidad apremiante de adoptar nuevas herramientas para gestionar de manera más eficiente y precisa la tecnología biomédica, especialmente para una rápida oportunidad de localización de los EB, estos son vitales para garantizar la calidad y seguridad de la atención médica al paciente, de lo contrario esto generaría retrasos en el tratamiento, una reducción de la productividad, efectividad de los procedimientos médicos y los costos operativos de las instituciones de salud[5][6]. Ante este desafío, surge la necesidad de desarrollar un sistema de localización que permita el seguimiento y control efectivo de estos EB dentro de las instituciones.

Para abordar estos desafíos, en este proyecto se diseñó un sistema de localización para EB que sea aplicable a IPS en Colombia. Este sistema tiene como fin proporcionar información sobre la ubicación de los EB dentro de las instalaciones de las IPS y su diseño se basa en la integración de identificación por radiofrecuencia (RFID) y Wi-Fi.

Esta propuesta busca optimizar la gestión de recursos, eficiencia y tiempos de respuesta de personal técnico y asistencial, garantizando un acceso rápido y oportuno a los equipos biomédicos necesarios para brindar una atención médica de calidad o para llevar a cabo procesos de gestión de la tecnología biomédica de manera eficaz y oportuna.

Este documento tiene como propósito presentar la propuesta de trabajo de grado enmarcada en el área de la ingeniería clínica y la contribución al campo de la gestión de la tecnología biomédica para la prestación de servicios de salud. Con el avance en el desarrollo del proyecto, se profundizará la propuesta de diseño, con el objetivo de brindar una solución efectiva y sostenible a un problema crítico en el sector de la salud colombiano.

Planteamiento del Problema

Uno de los problemas más frecuentes que enfrentan las IPS en Colombia es la dificultad para localizar rápidamente los EB necesarios para la atención en salud, en el marco de la prevención, diagnóstico, tratamiento o rehabilitación. Al revisar la literatura, se evidencia que, se han documentado problemas relacionados con la localización de EB a nivel local, en proyectos de grado y proyectos de investigación, sin embargo, la información reportada es limitada[7] [8].

En [7] se identifica que, en el Hospital Pablo Tobón Uribe de Medellín, pese a que existe una ubicación asignada para cada uno de los EB dada por los diferentes servicios, a menudo estos se extravían debido a traslados o préstamos entre los servicios, lo que lleva a una pérdida de tiempo de aproximadamente 30 minutos en la búsqueda de equipos biomédicos según una encuesta realizada al personal asistencial de la institución.

En [8] se identifica que, en la Clínica Colsubsidio de Bogotá, se enfrentan desafíos similares. En este caso se presenta un desafío adicional: restricción del acceso a la información sobre la ubicación de los equipos, solo dos computadoras en la institución cuentan con acceso a dicha información, lo que obstaculiza la eficiencia del departamento de ingeniería biomédica y afecta de manera negativa al personal asistencial, dificultando la búsqueda y localización de los equipos necesarios para procedimientos médicos o para las actividades de mantenimiento.

Esta problemática se agrava aún más por la seguridad de los equipos biomédicos. Según un comunicado emitido por el Instituto Nacional de Vigilancia de Alimentos y Medicamentos (INVIMA) en febrero de 2019, se reportaron 17 equipos médicos sustraídos de instituciones hospitalarias colombianas, lo que subraya la importancia de una gestión eficaz, ya que una gestión ineficiente no solo afecta la eficiencia de los procedimientos médicos, sino que también expone a los equipos biomédicos a un riesgo adicional: el hurto, con consecuencias financieras y de seguridad significativas para la atención médica y la integridad de los activos [9].

Gestionar de manera ineficiente la tecnología biomédica se traduce en pérdida de tiempos, y sobre todo en costos significativos. Ribeiro habla de que en promedio, los hospitales experimentan una pérdida anual entre el 15% y el 35% de los costos totales de activos debido a la falta de un rastreo eficiente de los equipos[5]. Además se señala que el 20% del total de equipos están extraviados por diversas razones[5]. En una encuesta realizada por Nursing Times se revela que una de cada tres enfermeras dedica al menos una hora o más por turno en la búsqueda de equipamiento médico para usar con sus pacientes [6].

En un estudio realizado en el “Glasgow Royal Infirmary (GRI)”, un hospital de Escocia, se revelaron mejoras significativas en la búsqueda y localización de equipos biomédicos al utilizar tecnología de Bluetooth tagging [10], una tecnología que integra un sistema similar a la que propone se propone en este proyecto. Según un informe del “The Scottish Health Technologies Group (SHTG)”, se registró una reducción drástica en el tiempo dedicado a la búsqueda de equipos luego de la integración de este sistema de localización en su flujo de trabajo. Inicialmente el tiempo promedio dedicado a la búsqueda de equipos era de 25 horas al mes, luego de la implementación del sistema RTLS (Real-Time Location System), el tiempo promedio dedicado a la búsqueda de equipos fue de 5 horas [10], una reducción del 80%. Esta experiencia demostró cómo la tecnología puede resolver los desafíos de localización de EB.

La problemática de la localización de equipos biomédicos en entornos hospitalarios en Colombia es una realidad que tiene un impacto significativo en la calidad de la atención médica y la gestión de tecnología biomédica en las IPS. Ante la necesidad de abordar este problema y desarrollar soluciones efectivas para la localización de EB, la implementación de tecnologías, RFID, es una vía prometedora para mejorar la gestión de equipos biomédicos y, por ende, es una herramienta que contribuirá en el mejoramiento de la calidad en la prestación de los servicios de salud en Colombia [11].

Justificación

El IoT (internet de las cosas) se establece hoy en un punto muy importante de investigación y desarrollo ante la necesidad de automatizar procesos, aumentar la eficacia y eficiencia de flujos de trabajo de las empresas, este avance se ha reflejado en el desarrollo de la tecnología AIDC (Identificación y captura de datos automática). Esta tecnología se encuentra integrada en sector salud bajo el estándar de GS1 para identificación de dispositivos médicos[12]. Este avance tecnológico ha ido acompañando la evolución de diferentes herramientas tecnológicas como el uso de Data Matrix (Códigos de barras, QR) y RFID y sus respectivos métodos de captura.

En los últimos avances tecnológicos, los desarrollos emergentes que se utilizaban principalmente en logística, inventario y cadenas de producción, han ido ganando cada vez más terreno en el sector salud. En Corea del sur, el ministro de seguridad en alimentos y medicamentos introdujo en el 2019 el sistema de UID (Identificación única) para gestionar toda la información desde la producción hasta la distribución y uso final de los dispositivos médicos, aumentando la trazabilidad de estos [13].

Cuando se integran tecnologías como IoT, AIDC y radiofrecuencia en un sistema, se desarrolla un sistema de localización de activos o personal en entornos de salud, dando origen a los sistemas de localización en tiempo real (HRTLS) para hospitales. Un HRTLS (Hospital Real-Time Location System) está definido como una aplicación basada en la computación ubicua, que aumenta la visibilidad y la eficiencia operativa de los flujos de trabajo clínicos y administrativos en el entorno de atención médica [14]. La implementación de un sistema basado en RTLS (Real Time Location System) en un hospital es una tecnología excepcional que puede mejorar la eficiencia del sistema de salud gracias a su principio automatización. La tecnología en el momento con basta documentación y con un gran desarrollo es la de RFID, mostrando unos prometedores resultados [15]. En Texas Health Presbyterian Hospital en Dallas, Estados Unidos, se implementó un sistema basado RFID para rastrear más de 7000 activos hospitalarios y demostró grandes beneficios, incluido el ahorro del tiempo de las enfermeras hasta un 15 % en tareas de búsqueda de activos críticos. La mayor ventaja de los sistemas RFID es que reducen la intervención humana y permiten rastrear e identificar objetos y personas de manera automática [15].

La adopción de tecnologías avanzadas ha permitido a hospitales en Europa mejorar significativamente su gestión de recursos y atención al paciente. Un ejemplo destacado es el St. Hospital Louis de Luxemburgo, que implementó una solución de Localización en Tiempo Real (RTLS) proporcionada por Aero Scout. Esta solución utiliza etiquetas RFID activas basadas en Wi-Fi para

rastrear diversos activos dentro del hospital. La integración de esta tecnología no solo ha permitido un seguimiento preciso, sino que también ha resultado en un ahorro considerable de tiempo y una reducción de costes, optimizando así las operaciones del hospital [16].

Diversos hospitales han implementado sistemas RTLS basados en RFID para mejorar la gestión de recursos y la atención al paciente. En Bélgica, un hospital utiliza este tipo de sistema en su área de emergencias, enviando señales a través de la red Wi-Fi para localizar pacientes y activos hospitalarios. Las etiquetas activas notifican su ubicación mediante mensajes de texto a los teléfonos del personal médico, lo que agiliza la respuesta en situaciones críticas [17].

Por su parte, el hospital TerGooi en los Países Bajos ha reportado que su sistema RTLS no solo optimiza el tiempo del personal, sino que también mejora la calidad de los servicios, permitiendo una mayor dedicación a la atención directa al paciente gracias a una gestión más eficiente de los recursos hospitalarios [18].

En entornos donde los recursos son limitados, la falta de un sistema de localización puede causar ineficiencias. Un estudio en el Reino Unido mostró que un electrocardiógrafo (EKG) compartido entre cinco áreas hospitalarias no registraba su ubicación, lo que generaba tiempos de espera mientras el personal buscaba el equipo [19].

Estos ejemplos destacan cómo los sistemas RTLS basados en RFID pueden transformar la gestión hospitalaria, mejorando la eficiencia operativa y la atención al paciente.

La implementación de un sistema de localización para equipos biomédicos mediante la integración de tecnología RFID y Wi-Fi en entornos hospitalarios ha sido empleada como una solución efectiva para abordar los desafíos en la gestión y localización de dispositivos médicos. La automatización y rastreo efectivo de estos equipos no solo mejora la eficiencia en la atención médica, sino que también permite reforzar los procesos de gestión de la tecnología y la calidad del servicio brindado a los pacientes. Además, estas tecnologías ofrecen un potencial ahorro de recursos, en tiempo y costos. Los ejemplos exitosos de hospitales en algunas partes del mundo que han adoptado sistemas similares subrayan la necesidad de explorar e implementar estas soluciones en el ámbito de la atención médica. Este proyecto busca mejorar procesos relacionados con el uso de equipos biomédicos de acuerdo con el ciclo de gestión de la tecnología biomédica, con una propuesta de diseño que integra conocimientos de la ingeniería para atender una necesidad de las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud.

Objetivos

4.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de localización para equipos biomédicos mediante la integración de tecnología RFID y WIFI como herramienta para la gestión y uso de la tecnología biomédica en entornos hospitalarios.

4.2. Objetivos Específicos

Analizar la normativa de salud vigente en Colombia relacionada con la gestión de equipos biomédicos en entornos hospitalarios para la definición de los criterios de diseño del sistema.

Diseñar un sistema para localización de equipos biomédicos con los requerimientos funcionales basado en áreas de circulación, personal asistencial, personal técnico y tecnologías en telecomunicaciones.

Verificar el funcionamiento del sistema a través de la medición de los tiempos de localización para 5 equipos biomédicos del hospital simulado de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali.

Marco de Referencia

5.1. Áreas Temáticas

Las áreas temáticas que el proyecto de investigación aborda para el diseño de un sistema de localización de equipos biomédicos son:

- Ingeniería clínica.
- Ingeniería Biomédica.
- Gestión de tecnología biomédica.
- Gestión de activos.
- Localización de activos.
- Tecnología RFID y WIFI.
- IoT (Internet of Things).

5.2. Marco Teórico

5.2.1. Equipo biomédico

Un equipo biomédico está definido en el decreto 4725 del 2005 de Colombia como: dispositivo médico operacional y funcional que reúne sistemas y subsistemas eléctricos, electrónicos o hidráulicos, incluidos los programas informáticos que intervengan en su buen funcionamiento, destinado por el fabricante a ser usado en seres humanos con fines de prevención, diagnóstico, tratamiento o rehabilitación. No constituyen equipo biomédico, aquellos dispositivos médicos implantados en el ser humano o aquellos destinados para un sólo uso [4].

5.2.2. RFID

La tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) permite el almacenamiento y acceso a información de manera inalámbrica mediante el uso de señales de radiofrecuencia. Esta tecnología utiliza un identificador único (ID) asociado a cada etiqueta o tag, lo que facilita la distinción y el seguimiento de los objetos marcados. Como señalan Portillo y colaboradores, un sistema RFID está compuesto por varios elementos esenciales [20]:

- **Etiquetas (tags o transpondedores):** Son dispositivos que desempeñan dos funciones principales: almacenar datos en un microchip y transmitir esa información a un lector mediante una antena. Las etiquetas pueden ser *activas*, con batería integrada, o *pasivas*, que dependen de la energía proporcionada por el lector.
- **Lectores:** Dispositivos encargados de captar la información transmitida por las etiquetas. En el caso de etiquetas pasivas, también suministran la energía necesaria para que estas operen.
- **Programadores:** Utilizados para grabar datos en las etiquetas.
- **Middleware:** Software intermedio que gestiona la transferencia y procesamiento de datos entre los lectores y los sistemas de información.
- **Sistema de información:** Responsable de analizar los datos capturados por el middleware y ejecutar acciones en función de esa información.

Es importante destacar que cualquier sistema que utilice radiofrecuencia para comunicarse, como LoRa, Sigfox, BLE o Zigbee, también puede considerarse dentro del concepto ampliado de identificación por radiofrecuencia. Esto se debe a que comparten las mismas características fundamentales: el uso de radiofrecuencia para transmitir datos de un dispositivo (etiqueta o tag) a otro (lector) sin necesidad de contacto físico o visual. En estos sistemas, las etiquetas o dispositivos emisores cumplen la función de almacenar información y transmitirla a receptores dentro del alcance[20].

Una de las principales ventajas de RFID y sus tecnologías relacionadas es la capacidad de transmitir datos de manera eficiente a través de radiofrecuencia, permitiendo la identificación simultánea de múltiples etiquetas dentro del rango de cobertura del lector. Esto elimina la necesidad de contacto visual directo o proximidad inmediata, lo que amplía sus aplicaciones en entornos como la localización de activos, la gestión de inventarios y el seguimiento en tiempo real [20].

5.2.3. Aplicación WEB

El Internet de las Cosas (IoT) abarca una amplia gama de aplicaciones tecnológicas en diversos contextos y sectores. Uno de los desafíos actuales radica en la automatización de procesos que, hasta el momento, se han llevado a cabo de manera manual y que no necesariamente agregan valor comercial. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que una piedra angular en esta transformación es la conectividad a Internet. Por lo tanto, es esencial familiarizarse con conceptos como servidor web y arquitectura web, ya que una parte fundamental del sistema se gestionará mediante ellos. De esta manera, el personal asistencial y los departamentos biomédicos podrán acceder a un portal web para localizar los equipos biomédicos necesarios de manera eficiente.

Las aplicaciones web están conformadas por: Un servidor web, un servidor de aplicaciones y una base de datos. A cada una de estas partes le corresponde unas funciones específicas a cada uno de los componentes de la aplicación web, estas funciones pueden ser algunas tales como: administrar

las solicitudes del usuario, completar la tarea solicitada y almacenar información, respectivamente [21].

Como ventajas se encuentra:

- La posibilidad de poder ser ejecutada en diferentes plataformas debido a su versátil portabilidad en los navegadores web.
- No ocupan espacio en el disco duro.
- El consumo de recursos computacionales es bajo.
- Acceso remoto a la información.

Como desventajas se encuentra:

- En la mayoría de los casos se necesita conexión a internet para que funcione la aplicación web.
- El usuario no tiene permitido elegir la versión de la aplicación web que desee usar, por lo que puede generar inconformidades al usuario.
- El desarrollador de la aplicación web rastrea toda la actividad realizada por el usuario, por lo cual, esto podría causar problemas de privacidad.

5.2.4. Cliente/Servidor

Una aplicación web comúnmente funcionan de acuerdo con el paradigma cliente/servidor. Cliente/Servidor operan en conjunto a través de una red para realizar una tarea. Esto significa que los servidores ejecutan funciones esperando a que lleguen las solicitudes de los programas del usuario y luego procesando dichas peticiones [22].

5.2.5. Arquitectura web

Los tradicionales sitios web funcionan únicamente mostrando y retirando información al usuario o cliente que estuviesen haciendo uso del sitio. El modo de funcionamiento clásico de estos sitios web consiste en que el usuario interacciona con este a través de un navegador lo que genera peticiones al servidor. En el servidor se aloja la aplicación la cual hace uso de una base de datos que almacena la información. El servidor procesa la petición y envía la respuesta al navegador el cual se la presenta al usuario. Por lo tanto, este proceso lo componen: El navegador, servidor de aplicaciones y una base de datos [23].

5.2.6. Bases de datos

En el contexto de la gestión de equipos biomédicos en entornos hospitalarios, uno de los pilares fundamentales para garantizar un seguimiento preciso y eficiente de estos dispositivos es la utilización de bases de datos. Las bases de datos desempeñan un papel crucial al proporcionar un sistema centralizado de almacenamiento y gestión de información relacionada con los equipos, su ubicación, estado y otros datos relevantes. Estas bases de datos no solo facilitan la ubicación oportuna de los dispositivos, sino que también permiten un control más efectivo de su mantenimiento y cumplimiento de regulaciones. La gestión de datos se convierte en un componente esencial para el éxito de cualquier sistema de localización en el entorno hospitalario, contribuyendo a una atención médica más segura y eficaz.

Los sistemas gestores de bases de datos son, fundamentalmente, la herramienta más utilizada para almacenar datos en un sistema de información, debido a sus características de seguridad, gestión centralizada, recuperación ante fallos, estandarización del lenguaje de consulta y funcionalidad avanzada. Una base de datos es una parte fundamental en el entorno informático en la actualidad y tiene aplicación múltiples campos [24].

Una base de datos es un conjunto de datos que ha sido organizado bajo un mismo contexto, cuya información está almacenada y lista para ser utilizada en cualquier momento. Las bases de datos pueden almacenar información sobre personas, productos, ventas o cualquier tipo de dato. La información se organiza en tablas compuestas por columnas y filas [25].

5.2.7. Inventario

El concepto de inventario adquiere una relevancia sustancial para la administración de activos biomédicos en instituciones prestadoras de servicios de salud. Un inventario eficiente va más allá de llevar un registro de los dispositivos disponibles. En el contexto hospitalario, abarca la gestión integral de los equipos, desde su adquisición hasta su retiro, incluyendo su ubicación, estado, mantenimiento y cumplimiento de regulaciones. Un inventario bien gestionado es esencial para asegurar la disponibilidad de equipos cuando se necesitan, reducir costos y, especialmente, mantener altos estándares de calidad y seguridad en la atención médica.

El inventario se puede definir como un registro detallado de los activos en posesión de una institución [26]. Para que el inventario sea efectivo, es fundamental mantenerlo actualizado en todo momento, reflejando con precisión el estado de cada activo. Los datos que se controlan y la actualización del inventario pueden variar según la naturaleza de la organización y sus activos asociados, lo que determina la información registrada en caso de cambios [26]. El propósito principal del inventario es conservar un registro preciso y actualizado de todos los activos de la organización, permitiendo una representación clara y confiable de su estado y disponibilidad. En el contexto de la Gestión de Tecnología de la Salud (GTS), el inventario de equipos médicos se convierte en una herramienta esencial con múltiples propósitos [26]:

- Ofrecer una evaluación técnica de la tecnología disponible, incluyendo información sobre el tipo y cantidad de equipos, así como su estado operativo actual.
- Facilitar la programación del mantenimiento preventivo y el seguimiento de tareas de mantenimiento, reparaciones, alertas y bajas de equipos, contribuyendo a una gestión eficiente de los activos.
- Proporcionar información financiera que respalda evaluaciones económicas y de presupuesto.
- Establecer los fundamentos para organizar un departamento eficiente de GTS, que gestiona elementos como historiales y cuadernos de uso de equipos, manuales de uso y reparación, procedimientos e indicadores de análisis y aseguramiento de la calidad.
- Los inventarios de accesorios, material fungible y repuestos están directamente relacionados con el inventario principal de equipo médico.

Los inventarios de equipos médicos pueden gestionarse a distintos niveles dentro del sistema de salud de un país. A nivel nacional, el Ministerio de Salud o una entidad reguladora puede llevar el control de equipos complejos o de alto riesgo, como los utilizados en medicina nuclear o los que emiten radiaciones ionizantes. Estos inventarios son esenciales para garantizar un servicio adecuado, proteger las inversiones en tecnología avanzada y minimizar riesgos, como la exposición a radiaciones. En el caso de los equipos de propiedad pública, el inventario puede ser nacional o, en su lugar, regional o provincial [26].

No obstante, la mayoría de los inventarios de equipos se mantienen en los diversos centros de atención sanitaria. En organizaciones de menor tamaño, como consultorios locales, los inventarios pueden constar de unos pocos artículos sencillos y requieren actualización con poca frecuencia. Por otro lado, los hospitales especializados de alto nivel pueden gestionar inventarios de miles de artículos con actualizaciones continuas. La complejidad y tamaño de cada inventario son únicos, adaptados al registro de activos de cada centro y dependen de su finalidad y de la escala de la actividad[26].

Además de los inventarios de equipos médicos, los centros de atención sanitaria también deben mantener inventarios separados de material fungible necesario para utilizar los equipos. Esto incluye elementos como tubos para venoclisis, electrodos, papel electrocardiográfico, gel conductor y reactivos. El inventario de material fungible implica un sistema de control de existencias que permite el seguimiento de cantidades y fechas de caducidad, asegurando un suministro constante de los artículos necesarios y su uso antes de que caduquen [26].

Mantener un inventario de repuestos es igualmente esencial para garantizar el funcionamiento seguro y eficaz de los equipos médicos. Cada dispositivo médico requiere existencias de artículos que se desgastan con el tiempo o deben ser reemplazados periódicamente, como filtros, juntas y otras piezas recomendadas por el fabricante. Además, se debe garantizar la disponibilidad de materiales de mantenimiento generales, como fusibles, tornillos o cables eléctricos, mediante el uso del inventario.

Un inventario de repuestos también contribuye a estimar los costos anuales de mantenimiento de los equipos médicos existentes [26].

Otros tipos de inventarios auxiliares o complementarios relacionados con las tecnologías sanitarias pueden incluir [26]:

- Herramientas de taller y equipos de medición, que ayudan al equipo de mantenimiento de equipos médicos a mantener sus instrumentos y equipos de medición organizados, en buen estado de funcionamiento y calibrados.
- Equipos industriales y hospitalarios, como calderas, autoclaves, equipos de lavandería, generadores eléctricos o sistemas de distribución de aire comprimido, vacío y gases médicos, que son esenciales para el buen funcionamiento del hospital y requieren mantenimiento.
- Equipos de seguridad, como extintores, mangueras de incendios, alarmas o lavajojos, que deben mantenerse en buen estado para funcionar cuando sea necesario.
- Materiales y residuos radiactivos y peligrosos, cuyo inventario es necesario para garantizar una gestión y eliminación adecuada, evitando contaminaciones innecesarias.

Cada centro de atención sanitaria requiere una variedad de información que debe incluirse en el inventario de cada artículo. En un inventario de equipos médicos, cada equipo recibe un número único para su identificación inequívoca entre todos los equipos inventariados. Este número de identificación actúa como un vínculo esencial para organizar información relacionada, como historiales de mantenimiento, reparaciones, mantenimiento preventivo y uso de repuestos. La gestión del inventario consta de tres etapas: recopilación inicial de datos, actualización de la información y auditoría anual. Aunque mantener un inventario en formato papel es válido, los sistemas computarizados pueden facilitar la gestión, especialmente en entornos más grandes. Un sistema de gestión del mantenimiento computarizado (CMMS) combina inventario, historiales de reparaciones, mantenimiento y control de órdenes de trabajo, y puede incluir otras funciones necesarias. Las ventajas de un CMMS incluyen la generación de informes para análisis, el registro de historiales de mantenimiento y la gestión de órdenes de servicio [26].

5.3. Marco ético-legal

5.3.1. Declaración de Helsinki

Este proyecto de investigación se adhiere a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial. En consonancia con el Principio 5 y el Principio 7, se reconoce que el progreso de la medicina requiere investigaciones en seres humanos, siempre priorizando los derechos e intereses de los participantes, según el Principio 8. Asimismo, se ha minimizado al máximo el impacto ambiental del estudio, conforme al Principio 11 [27].

Se ha garantizado el acceso adecuado a la participación para grupos subrepresentados en la investigación médica (Principio 13) y se ha elaborado un protocolo de investigación claro y detallado, que incluye consideraciones éticas, información sobre financiamiento, patrocinadores, afiliaciones institucionales, posibles conflictos de interés e incentivos para los participantes, según el Principio 22 [27].

El protocolo ha sido aprobado por el comité de ética de investigación de la Pontificia Universidad Javeriana Cali (Principio 23) y se han tomado todas las precauciones necesarias para resguardar la privacidad de los participantes (Principio 24). Además, la participación en el estudio ha sido completamente voluntaria para los individuos que pudieron dar su consentimiento informado (Principio 25).

Finalmente, los resultados del estudio, tanto positivos como negativos, serán publicados de manera transparente, incluyendo información sobre el financiamiento, las afiliaciones institucionales y los conflictos de interés (Principio 36) [27].

5.3.2. Resolución 8430 de 1993

Este proyecto de investigación se adhiere a la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia, que establece las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud. A continuación, se describen los aspectos relevantes en el desarrollo del estudio:

- **Contribución al conocimiento en salud:** Según el Artículo 4, la investigación contribuye al estudio de técnicas y métodos recomendados para la prestación de servicios de salud, específicamente en la localización de equipos biomédicos en entornos hospitalarios [28].
- **Respeto a los derechos de los participantes:** En cumplimiento del Artículo 5, se ha priorizado el respeto a la dignidad, derechos y bienestar de los participantes en todo momento [28].
- **Criterios éticos y científicos:** Siguiendo el Artículo 6, la investigación se ajusta a principios científicos y éticos. Se ha garantizado la seguridad de los participantes, se han expresado claramente los riesgos (mínimos), y se ha obtenido el consentimiento informado de los sujetos de investigación, con la aprobación del Comité de Ética correspondiente [28].
- **Protección de la privacidad:** De acuerdo con el Artículo 8, se ha protegido la privacidad de los participantes, solicitando únicamente la información necesaria para el estudio, como la ciudad de desempeño laboral, sin requerir datos personales adicionales [28].
- **Riesgo mínimo:** Según el Artículo 10, se ha identificado que los participantes estarán expuestos a un riesgo mínimo, ya que el proceso se basa en procedimientos no invasivos, como se establece en el Artículo 11 [28].

- **Consentimiento informado:** En cumplimiento del Artículo 14, se ha obtenido el consentimiento informado de todos los participantes, asegurando que comprendan los procedimientos, beneficios y riesgos asociados a su participación [28].
- **Cumplimiento institucional:** La investigación se realiza en una institución con un Comité de Ética en Investigación y un manual de procedimientos internos que apoya la aplicación de estas normativas, conforme a los Artículos 2 y 3 [28].

De esta manera, el proyecto asegura el cumplimiento de los estándares éticos y científicos establecidos en la Resolución 8430, protegiendo los derechos y el bienestar de los participantes [28].

5.4. Trabajos Relacionados

5.4.1. Trabajos Relacionados

En el ámbito de la gestión de activos y el control de inventario de infraestructura tecnológica en entornos como los centros de cómputo y data centers, existe un conjunto de investigaciones y proyectos previos que se asemejan al propósito de este proyecto. En el trabajo “Implementación de prototipo de un sistema de control y ubicación de inventario de infraestructura tecnológica por medio de radiofrecuencia” [29], el propósito de los autores era abordar el control de activos en un data center, permitiendo un tratamiento más efectivo de sus equipos tecnológicos.

En esta investigación se propuso por medio de la implementación de un prototipo de un sistema de control y ubicación de inventario de infraestructura tecnológica mediante tecnología de radiofrecuencia (RFCode). Para llevar a cabo la investigación, se empleó un enfoque cualitativo y métodos descriptivos. Además, se utilizaron entrevistas y observaciones para recopilar información relevante. El sistema de RFCode demostró su capacidad para proporcionar información sobre la ubicación y estado de los activos, incluyendo la visualización en mapas anidados. Además, se exploró la posibilidad de medir la temperatura y la humedad de los equipos en el data center. Como resultados, los autores encontraron que el uso de la tecnología RFID en data centers puede mejorar significativamente los procesos, cumplir con las normas ISO y reducir los riesgos operativos [29].

En [29] se ofrecen valiosas perspectivas y hallazgos sobre cómo abordar el desafío de nuestro proyecto utilizando tecnología de radiofrecuencia y destaca la importancia de un enfoque cualitativo para recopilar datos relevantes. Estos resultados subrayan la relevancia y el potencial impacto de la implementación de sistemas de control de inventario basados en tecnología de radiofrecuencia en entornos tecnológicamente críticos como los data centers [29].

En [30] se desarrolló un sistema de monitorización basado en RFID para dispositivos médicos del servicio de cirugía oftalmológica, en este trabajo se empleó un sistema RFID para la monitorización de dispositivos médicos en el ámbito hospitalario, específicamente en cirugía oftalmológica. La investigación aborda la problemática de la falta de seguimiento de estos dispositivos médicos, lo

cual es crucial para garantizar la seguridad, cumplimiento de normativas y la eficiencia en la gestión del inventario. El estudio incluye la construcción del sistema electrónico, el desarrollo de una aplicación web y la evaluación del sistema de monitorización. Aunque este trabajo logra una detección efectiva del 80,42 % de los dispositivos, se reconoce que ciertas variables como el posicionamiento de la antena y las interferencias pueden afectar el rendimiento. La relevancia de este trabajo radica en su enfoque en la monitorización de dispositivos médicos en un entorno de alta complejidad [30].

Materiales y Métodos

6.1. Metodología

Para abordar el proyecto de desarrollo de un sistema de localización para equipos biomédicos en entornos hospitalarios, se empleó una estrategia metodológica que combinó métodos cualitativos y cuantitativos. Esto permitió obtener una comprensión completa de los problemas y necesidades en la gestión de tecnología hospitalaria. La estrategia metodológica se divide en las siguientes fases:

- **Revisión Documental y Normativa.** Inicialmente, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la normativa y regulaciones relacionadas con la gestión de equipos biomédicos en Colombia y sobre el uso de espectro radioeléctrico. Esto proporcionó un marco normativo sólido para el proyecto y tuvo en cuenta que se cumplieran los requisitos legales en la implementación del sistema.
- **Encuestas.** Se realizaron encuestas a profesionales de la salud, ingenieros biomédicos y personal hospitalario con experiencia en la gestión de equipos biomédicos. Estas encuestas permitieron identificar desafíos, obstáculos y necesidades específicas en la gestión de tecnología hospitalaria, estas se administraron a diferentes departamentos en entornos hospitalarios. Estas encuestas recopilaron datos cuantitativos y cualitativos sobre la percepción y experiencia del personal en la búsqueda y uso de equipos biomédicos.
- **Análisis de Datos.** Los datos recopilados se analizaron de manera integral. Se utilizarán herramientas de análisis de datos para identificar patrones, tendencias y áreas críticas en la gestión de equipos biomédicos en hospitales. Este análisis será fundamental para definir los requisitos funcionales del sistema de localización.
- **Diseño y Desarrollo del Sistema.** Basándose en los resultados de la revisión documental y los datos recopilados en las encuestas, se procedió al diseño detallado del sistema de localización. Se consideraron aspectos técnicos, de usabilidad y adaptación a las necesidades hospitalarias.
- **Pruebas y Verificación.** Se llevaron a cabo pruebas para verificar el funcionamiento del sistema. Esto incluyó pruebas de localización de equipos biomédicos y mediciones de tiempos de respuesta en el Hospital Simulado de la Pontificia Universidad Javeriana Cali como escenario de pruebas.

6.1.1. Tipo de Estudio

El proyecto se desarrolló en el marco de un estudio experimental y una investigación aplicada, dado que su objetivo principal fue desarrollar una solución tecnológica concreta para abordar un el problema de control de inventario en la gestión de equipos biomédicos en Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud en Santiago de Cali. La investigación aplicada, también conocida como activa o dinámica, se enfoca en la aplicación inmediata de conocimientos teóricos a problemas concretos, buscando confrontar la teoría con la realidad [31].

Su fuente de datos fue de campo, considerando que fue necesario evaluar, establecer y documentar todo lo que se que se llevó a cabo en el proyecto. Se utilizaron fuentes documentales para establecer el marco normativo y legal realizando una revisión de la normativa relacionada vigente. Además, se recopilaron datos de campo a través de las entrevistas al personal del Hospital Simulado de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, y encuestas a profesionales de la salud y personal técnico asistencial que desarrollan sus actividades en el ámbito hospitalario.

El tipo de investigación que se llevó a cabo fue mixta, ya que se combinó lo cuantitativo para medir la eficacia y efectividad del sistema, y cualitativo para medir la percepción personal en relación con la gestión de equipos biomédicos. La combinación de métodos y técnicas de investigación permitió una evaluación integral de la problemática para la toma de decisiones en la implementación del sistema de localización.

Las estrategias metodológicas y el tipo de estudio adoptados en este proyecto siguieron las directrices establecidas por Robert K. Yin en su obra 'Case Study Research: Design and Methods' [32].

Criterios de Inclusión: Estos criterios determinan los aspectos que deben cumplir los casos o elementos seleccionados para ser incluidos en el estudio. En este proyecto, se incluyen equipos biomédicos y personal del hospital que participan directamente en la gestión de dichos equipos dentro de áreas de alta actividad y con la infraestructura adecuada para la implementación de la tecnología de localización. A continuación, se detallan los criterios de inclusión:

1. **Equipos Biomédicos:** Equipos frecuentemente utilizados y requeridos en distintos departamentos dentro de la Institución Prestadora de Servicios de Salud.
2. **Entornos Hospitalarios:** Áreas de alta actividad como urgencias, UCI y quirófanos, donde la gestión eficiente de equipos es crucial.
3. **Personal Hospitalario:** Profesionales que interactúan regularmente con equipos biomédicos y participan en su gestión.
4. **Infraestructura Tecnológica:** Instalaciones con la infraestructura mínima necesaria para implementar sistemas de localización, como cobertura Wi-Fi o compatibilidad con RFID.

5. **Equipos de Alta Prioridad:** Equipos críticos para la atención de pacientes que requieren rápida localización en situaciones de emergencia.

Criterios de Exclusión: Estos criterios identifican los elementos o casos que no serán considerados en el estudio. Los criterios de exclusión aseguran que el estudio se enfoque en los aspectos relevantes y que se excluyan aquellos que no cumplen con los requisitos técnicos, operativos o éticos. En este estudio, los criterios de exclusión son:

1. **Equipos en Desuso:** Equipos fuera de servicio, obsoletos o en proceso de baja administrativa.
2. **Áreas de Baja Actividad:** Departamentos o zonas del hospital con flujo no crítico de equipos biomédicos.
3. **Personal No Relacionado:** Miembros del personal que no tienen responsabilidades directas en la gestión o uso de equipos biomédicos.
4. **Limitaciones Técnicas:** Entornos hospitalarios donde no es factible instalar la tecnología requerida para el sistema de localización (ej. falta de cobertura Wi-Fi adecuada).
5. **Áreas con Restricciones de Acceso:** Zonas con acceso restringido donde la instalación del sistema podría ser complicada o no permitida.
6. **Interferencias Tecnológicas:** Áreas o equipos donde la tecnología de localización podría interferir con otros sistemas críticos.
7. **Equipos con Sistemas Existentes:** Equipos biomédicos que ya cuentan con sistemas de localización integrados.

Variables Independientes: Son aquellos factores que se manipulan o controlan para observar su efecto en las variables dependientes. En este estudio, las variables independientes son:

- **Tipo de Tecnología de Localización:** Diferentes tecnologías utilizadas para la localización, como RFID, Wi-Fi, Bluetooth, etc.
- **Configuración del Sistema:** Diferentes configuraciones del sistema de localización, como la densidad de puntos de acceso o el tipo de etiquetas utilizadas.
- **Métodos de Implementación:** Estrategias y procedimientos utilizados para la instalación y configuración del sistema.
- **Formación del Personal:** El nivel de capacitación y entrenamiento proporcionado al personal sobre el uso del sistema de localización.
- **Infraestructura Tecnológica:** Condiciones previas de la infraestructura tecnológica del hospital, como la disponibilidad de redes Wi-Fi o el tipo de dispositivos existentes.

Variables Dependientes: Son los resultados que se miden y dependen de las variables independientes. En este caso, las variables dependientes son:

- **Tiempo de Localización de Equipos:** El tiempo requerido para localizar un equipo biomédico utilizando el sistema de localización.
- **Precisión de la Localización:** La exactitud con la que el sistema identifica la ubicación de los equipos biomédicos.
- **Satisfacción del Personal:** La percepción y satisfacción del personal hospitalario con respecto a la facilidad de uso y eficacia del sistema de localización.
- **Eficiencia Operativa:** Mejoras en la eficiencia operativa del hospital relacionadas con la gestión y recuperación de equipos biomédicos.
- **Número de Equipos Encontrados:** La cantidad de equipos biomédicos que se localizan exitosamente con el sistema en comparación con los que se pierden o no se encuentran.

Variables Cuantitativas: Son aquellas que se pueden medir numéricamente y se utilizan para realizar análisis estadísticos. En este proyecto, las variables cuantitativas incluyen:

- **Tiempo de Localización de los Equipos:** Se registrará el tiempo promedio necesario para localizar un equipo biomédico antes y después de la implementación del sistema de localización.
- **Número de Equipos Encontrados:** Se contabilizará el número de equipos biomédicos localizados exitosamente dentro de un periodo específico antes y después de la implementación del sistema.

Resultados y Discusión

7.1. Análisis de la normativa de salud vigente en Colombia relacionada con la gestión de equipos biomédicos en entornos hospitalarios

En el marco de la gestión de la tecnología biomédica tiene como objeto regular y establecer los lineamientos, procedimientos y responsabilidades para la gestión adecuada de la tecnología biomédica. En estas se abordan aspectos fundamentales en relación con el ciclo de vida de la tecnología biomédica y buscan garantizar la eficiencia operativa de los servicios de salud.

7.1.1. Decreto 4725 de 2005

El decreto 4725 regula los requisitos para obtener registros sanitarios, la autorización de comercialización, y la supervisión de actividades relacionadas con la fabricación, manipulación, almacenamiento, venta, importación, exportación y mantenimiento de dispositivos médicos para uso humano. Estas normativas, emitidas por el Ministerio de Salud y Protección Social, son de obligatorio cumplimiento para todas las entidades, tanto individuales como jurídicas, que operan en el territorio nacional, incluyendo las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS). Su objetivo es garantizar la seguridad, eficacia y calidad de los dispositivos médicos, protegiendo la salud pública y fomentando buenas prácticas en el sector [4].

La normativa define un dispositivo médico para uso humano como cualquier instrumento, aparato, máquina, software, equipo biomédico o artículo relacionado, utilizado solo o en combinación, que incluya componentes, accesorios o programas informáticos necesarios para su correcta aplicación. Estos dispositivos se emplean con los siguientes fines[4]:

- Diagnóstico, prevención, supervisión, tratamiento o alivio de una enfermedad.
- Diagnóstico, prevención, supervisión, tratamiento, alivio o compensación de una lesión o de una deficiencia.
- Investigación, sustitución, modificación o soporte de la estructura anatómica o de un proceso fisiológico.
- Diagnóstico del embarazo y control de la concepción.

- Cuidado durante el embarazo, el nacimiento o después del mismo, incluyendo el cuidado del recién nacido.
- Productos para desinfección y/o esterilización de dispositivos médicos.

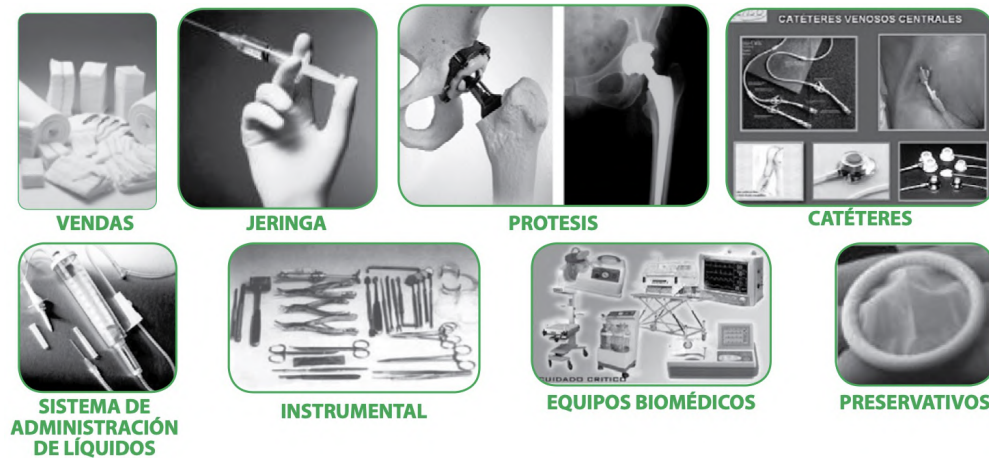


Figura 7.1: Clasificación de dispositivos médicos. Fuente: Decreto 4725 de 2005 [4].

El artículo 5° del decreto establece que la clasificación de los dispositivos médicos realizada por el fabricante se fundamenta en los riesgos potenciales relacionados con su uso y posibles fallos. Estos riesgos se evalúan considerando criterios como la duración del contacto del dispositivo con el cuerpo humano, su grado de invasividad y si sus efectos son locales o sistémicos. Dichos parámetros permiten definir la categoría de riesgo y garantizan una adecuada supervisión del dispositivo [4].

El artículo 7° del decreto establece que la clasificación de los dispositivos médicos se realiza según las reglas basadas en el nivel de riesgo inherente a su uso. Esta clasificación considera diversos criterios técnicos, como el grado de invasividad del dispositivo, si interactúa con fluidos corporales, su función principal, su aplicación en procedimientos o tratamientos, y si tiene la capacidad de modificar la composición biológica o química del cuerpo. Además, incluye dispositivos utilizados para el diagnóstico por imágenes u otras tecnologías similares. La categorización por riesgo busca garantizar la seguridad del paciente y optimizar la regulación según la complejidad del dispositivo [4].

El artículo 18 del decreto, titulado "Documentación para la evaluación técnica de los dispositivos médicos y equipos biomédicos que no sean de tecnología controlada", enfatiza que la evaluación técnica tiene como objetivo conceptuar sobre la capacidad técnica del fabricante, del proceso de fabricación y de la calidad del producto, incluyendo aspectos de seguridad y protección para la salud [4].

El artículo 35 establece los requerimientos generales para los equipos biomédicos de tecnología controlada, contemplando aspectos como la entrega de manuales de operación y mantenimiento, la garantía de soporte técnico y repuestos, la necesidad de contar con responsables técnicos calificados, y la exigencia de que los productos mantengan sus características durante el almacenamiento y transporte [4].

Asimismo, el artículo 38 aborda la responsabilidad compartida en la etapa de pos venta de los equipos biomédicos, especificando las obligaciones del fabricante o importador, así como del propietario o tenedor del equipo, en términos de mantenimiento, verificación de calibración y funcionamiento seguro del equipo biomédico [4].

El artículo 39 establece los requisitos para el recurso humano encargado del mantenimiento de los equipos biomédicos de Clases IIB y III, exigiendo que estén a cargo de profesionales en ingeniería biomédica o personal técnico debidamente acreditado [4].

Finalmente, el artículo 60 señala la obligación de notificar al Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA) sobre incidentes adversos, uso indebido, falencias en el mantenimiento y otros aspectos relacionados con la seguridad y el funcionamiento de los dispositivos médicos y equipos biomédicos comercializados en el país, detallando las responsabilidades de los titulares del registro, fabricantes, representantes y usuarios, así como las medidas a tomar por las autoridades sanitarias en caso de incidencias [4].

7.1.2. Resolución 3100 de 2019

Establece los procedimientos y condiciones para la inscripción de prestadores de servicios de salud y la habilitación de servicios de salud. Adopta el Manual de Inscripción de Prestadores y Habilitación de Servicios de Salud. Establece los lineamientos para la inscripción de prestadores de servicios de salud, así como las pautas y requisitos mínimos necesarios para llevar a cabo estos procesos. Tiene por objeto garantizar la calidad y seguridad en la prestación de servicios de salud en el país como componente del Sistema Obligatorio de Garantía de Calidad en Salud [33].

La resolución aborda aspectos relacionados con la responsabilidad de los prestadores de servicios de salud, señalando que el prestador es responsable del cumplimiento de los estándares y criterios aplicables a los servicios que habilita. También establece procedimientos para revocar la inscripción de un prestador en caso de incumplimiento de las condiciones de habilitación [33].

Los estándares de habilitación son criterios establecidos para garantizar las condiciones mínimas necesarias e indispensables para la prestación segura y de calidad en los servicios de salud. Estos estándares incluyen requisitos específicos que deben cumplir las instituciones de salud y se estruc-

turan en torno a diversos aspectos fundamentales. Entre ellos se encuentran el talento humano, que abarca la capacitación y las competencias del personal; la infraestructura, que se refiere a los espacios físicos adecuados para la atención; y la dotación de equipos biomédicos, que asegura la disponibilidad y el mantenimiento de los dispositivos requeridos para ofrecer servicios eficientes y seguros. Estos criterios son aplicables a todos los servicios de salud, promoviendo la uniformidad y calidad en la atención prestada [33].

La dotación de equipos biomédicos que en lo que se centra este proyecto, se establecen requisitos para garantizar las condiciones técnicas de calidad de estos equipos, incluyendo un programa de mantenimiento preventivo y registros adecuados de mantenimiento [33].

El inventario de la tecnología biomédica es fundamental para asegurar el cumplimiento de los estándares de dotación de equipos biomédicos y para facilitar la realización oportuna de actividades como mantenimientos preventivos y metrologías, tal como lo dicta la resolución [33].

Contar con un inventario actualizado permite la ubicación rápida y precisa de los equipos biomédicos en las instalaciones de la IPS, garantizando que los equipos necesarios estén disponibles en los lugares adecuados en todo momento. Además, facilita el seguimiento de los equipos que se retiran temporalmente, asegurando su pronta reposición en su ubicación designada.

El inventario es una herramienta crucial para la planificación y ejecución de actividades de mantenimiento preventivo y metrologías. Al identificar qué equipos requieren estas acciones, garantiza que se realicen de manera oportuna y de acuerdo con los requisitos establecidos por la Resolución 3100.

Contar con un inventario que incluya la ubicación actualizada juega un papel vital en el cumplimiento de los estándares de dotación y en la gestión eficiente de las actividades relacionadas con la seguridad y calidad de los equipos biomédicos en las IPS, conforme a la normativa vigente.

7.1.3. Resolución 4816 de 2008

La Resolución 4816 tiene por objetivo reglamentar el Programa Nacional de Tecnovigilancia con el fin de fortalecer la protección de la salud y la seguridad de los pacientes, operadores y todas aquellas personas que se vean implicadas directa o indirectamente en la utilización de dispositivos médicos [34].

Esta al igual que las anteriores cuenta un campo de aplicación en IPS. Cada institución prestadora de servicios de salud en Colombia deberá contar con un manual institucional de tecnovigilancia [34].

La trazabilidad de los dispositivos médicos es fundamental para asegurar su correcta identificación, seguimiento y control durante todo su ciclo de vida. Esto incluye desde su adquisición y almacenamiento, hasta su utilización clínica y disposición final. Contar con un inventario actualizado permite a las instituciones de salud garantizar que los dispositivos estén disponibles cuando se necesiten, así como identificar y gestionar de manera oportuna aquellos que presenten algún tipo de problema o riesgo para la seguridad del paciente [34].

La Resolución 4816 establece requisitos específicos para la documentación y registro de dispositivos médicos, incluyendo información sobre su identificación, características técnicas, fecha de adquisición, ubicación y estado de conservación. Esto facilita su gestión, control y la identificación de posibles irregularidades [34].

Asimismo, la normativa resalta la importancia de un inventario preciso y actualizado como parte de las actividades de tecnovigilancia. Este inventario asegura la trazabilidad de los dispositivos a lo largo de su ciclo de vida y permite la detección y gestión de eventos adversos, apoyando la tecnovigilancia activa mediante alertas sanitarias emitidas por el INVIMA u organismos internacionales como la FDA. Además, contribuye a la identificación oportuna de dispositivos específicos en caso de incidentes adversos y facilita la notificación de eventos serios a las autoridades competentes, en cumplimiento con la normativa [34].

7.1.4. Resolución 184 de 2024

El objeto de la normativa es adoptar la Política de Dispositivos Médicos contenida en el Anexo Técnico adjunto. Adicionalmente, La Dirección de Medicamentos y Tecnologías en Salud con el apoyo de la Oficina Asesora de Planeación y Estudios Sectoriales del Ministerio de Salud y Protección Social realizarán un seguimiento anual a la ejecución de las acciones propuestas para el cumplimiento del objetivo de la presente política, presentando informes de avance anuales en el periodo comprendido entre 2024 y 2026 y un informe de cierre final en el año 2027 [35].

La Resolución en cuestión se emitió considerando la falta de un sistema completo de información sobre Dispositivos Médicos, con el objetivo de promover la investigación, el desarrollo y la innovación en este campo, entre otros aspectos [35].

Por otra parte, según describe la resolución, el Instituto de Evaluación Tecnológica en Salud (IETS), mediante diagnóstico realizado en 2019, encontró que el sector de Dispositivo Médico (DM) no cuenta con un sistema de información oficial público que reúna las características de información "periódica, confiable, oportuna, eficiente, disponible, comparable, histórica y completa" que permita la toma de decisiones informadas al conjunto de actores y agentes del Sistema General de Seguridad Social en Salud [35].

En línea con los objetivos de la Resolución 184 de 2024, se han establecido una serie de líneas

de acción para fortalecer los lineamientos postmercado, la regulación y la reglamentación técnica, con énfasis en la promoción de la calidad y seguridad de los dispositivos médicos [35].

Una de estas líneas de acción, contemplada entre el año 2025 y 2026, implica la optimización de los lineamientos del sistema de vigilancia postmercado de los dispositivos médicos. El Ministerio de Salud y Protección Social, en articulación con el INVIMA, las entidades territoriales de salud y otros actores, definirá lineamientos para promover la vigilancia proactiva, activa e intensiva dentro de los programas de vigilancia postmercado [35].

Asimismo, entre el año 2025 y 2026, se establecerá una propuesta de lineamientos para el mantenimiento y el uso de la metrología de equipos biomédicos, articulada con el Subsistema Nacional de Calidad, con la participación de los actores pertinentes y la revisión de los lineamientos internacionales existentes en el tema [35].

Según el anexo técnico, entre el año 2024 y 2026, se definirán lineamientos sobre la disposición final tanto hospitalaria como comunitaria de los dispositivos médicos, especialmente para dispositivos médicos implantables, equipos biomédicos, incluyendo la mitigación de los impactos en la sostenibilidad ambiental, en colaboración con los actores relevantes del sector [35].

La implementación de un sistema de inventario con localización de activos biomédicos en las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS) es fundamental para cumplir con los lineamientos de la Resolución 184 de 2024 y otras normativas vigentes. Este sistema optimiza la gestión de dispositivos médicos al permitir su identificación precisa, planificación oportuna de mantenimientos preventivos y respuesta rápida ante incidentes o alertas de tecnovigilancia.

Además, garantiza la trazabilidad de los equipos, facilitando el cumplimiento de los requisitos normativos para el reporte de eventos adversos y mejorando la seguridad del paciente. En este sentido, no solo contribuye a la calidad en la atención, sino que también fortalece la toma de decisiones informadas dentro del SGSSS [35].

7.2. Instituciones y organismos reguladores relacionados con equipos biomédicos en Colombia

7.2.1. Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA)

Ente regulador creado a partir de la expedición de la Ley 100 del 23 de diciembre de 1993, el cual comenzó a ejercer sus funciones a partir de febrero de 1995. Es una entidad encargada de regular y supervisar la seguridad, eficacia y calidad de los dispositivos médicos en el territorio colombiano. El INVIMA emite registros sanitarios para dispositivos médicos y establece normativas para su

fabricación, comercialización y uso, así como se ha podido puntuar en la normativa previamente vista [36].

El Invima tiene como objeto actuar como una institución de referencia nacional en materia sanitaria y ejecutar las políticas formuladas por el Ministerio de Salud y Protección Social en materia de vigilancia sanitaria y de control de calidad de los medicamentos, productos biológicos, alimentos, bebidas, cosméticos, dispositivos y elementos médico-quirúrgicos, odontológicos, productos naturales homeopáticos y los generados por biotecnología, reactivos de diagnóstico, y otros que puedan tener impacto en la salud individual y colectiva [36].

Objetivos institucionales:

- Fortalecer la inspección, vigilancia y control sanitario, garantizando la salud pública y el reconocimiento nacional e internacional.
- Proveer servicios con altos estándares de calidad para generar confianza.
- Mejorar las capacidades de los servidores públicos.
- Implementar medidas para combatir la ilegalidad y la corrupción.

Funciones principales:

- Inspeccionar y controlar establecimientos que producen y comercializan productos regulados.
- Certificar buenas prácticas, emitir y gestionar registros sanitarios.
- Identificar infracciones, aplicar sanciones y colaborar con autoridades competentes.
- Establecer directrices técnicas y brindar asistencia a entidades territoriales.
- Actuar como laboratorio de referencia y coordinar la Red de Laboratorios.
- Realizar control sanitario sobre publicidad de productos regulados.
- Promover investigación, campañas educativas y armonización de normas internacionales.

Dirección de Dispositivos Médicos y Otras Tecnologías:

Esta dirección propone estrategias y lineamientos técnicos para la regulación y supervisión de dispositivos médicos. Sus funciones incluyen [36]:

- Diseñar e implementar modelos de vigilancia y control basados en gestión de riesgos.
- Analizar riesgos y elaborar informes para la toma de decisiones.
- Gestionar registros sanitarios y servicios asociados, además de apoyar actividades de pre y post comercialización.

- Coordinar programas de control de calidad y evaluación de tecnologías en salud.
- Brindar asesoría técnica y capacitación a entes territoriales.
- Colaborar con la formulación de normas técnicas y políticas de calidad en salud.
- Participar en el fortalecimiento de la Red de Laboratorios y garantizar el cumplimiento normativo.

7.2.2. Superintendencia Nacional de Salud:

La Superintendencia Nacional de Salud es responsable de garantizar el cumplimiento de las normativas de salud y proteger los derechos de los ciudadanos en relación con la atención médica [37]. Sus funciones se centran en inspección, vigilancia y control, abarcando entidades como EPS, clínicas, hospitales y secretarías de salud.

Entre sus funciones principales destacan [37]:

- Inspeccionar, vigilar y controlar el cumplimiento de normas del Sistema General de Seguridad Social en Salud.
- Proteger los derechos de los usuarios, asegurando el acceso a servicios de calidad y sin restricciones.
- Supervisar la eficiencia en la gestión y aplicación de recursos del sistema.
- Controlar el cumplimiento del Sistema Obligatorio de Garantía de Calidad.
- Administrar información financiera y asistencial requerida para sus funciones.
- Ejercer control sobre los servicios farmacéuticos, el servicio de ambulancia prepagado y recursos destinados a la salud en entidades territoriales.
- Imponer sanciones por incumplimientos y autorizar cambios en entidades del sector.
- Promover acuerdos de reestructuración de pasivos y supervisar el manejo de nuevas patologías, incluidas enfermedades huérfanas y de alto riesgo.

Estas acciones garantizan la adecuada gestión del sistema de salud y la protección de sus usuarios.

7.2.3. Ministerio de Salud y Protección Social:

El Ministerio de Salud y Protección Social coordina las políticas públicas de salud y asistencia social en el país, y establece directrices para el aseguramiento de la población en los regímenes de pensión y salud [38].

Además de formular, ejecutar y evaluar políticas de salud pública, el Ministerio también contribuye a las políticas pensionales y de riesgos laborales, supervisando el Sistema Sectorial de Información y elaborando proyectos de ley relacionados con su ámbito [38].

En salud pública, el Ministerio lidera el sistema de vigilancia, fomenta la investigación en salud, regula la oferta de servicios de salud y negocia precios de medicamentos y equipos médicos, asegurando su calidad [38]. En cuanto a los equipos biomédicos, el Ministerio regula su oferta, establece normas y promueve la investigación y el desarrollo para garantizar su accesibilidad [38].

Asimismo, el Ministerio fomenta el reconocimiento de los derechos en salud, promueve la participación comunitaria en acciones de salud y gestiona recursos para la protección social [38].

El Ministerio desempeña un papel clave en la regulación y supervisión de los servicios de salud, incluidos los equipos biomédicos, con el fin de mejorar la calidad de vida y prevenir enfermedades [38].

7.3. Sistema de localización de equipos biomédicos

7.3.1. Nivel internacional

RFID journal es una publicación líder sobre tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID). Fundada en 1999, la revista ofrece noticias, análisis, informes y estudios de casos sobre las últimas aplicaciones de RFID en una amplia gama de industrias. Para este caso se realizó una búsqueda entre sus estudios de casos y White papers sobre RFID aplicado en la industria de la salud para analizar algunos casos del uso de la tecnología RFID para la localización de activos en entornos hospitalarios.

En febrero del 2017 Ceri Anstee, directora de Anstee Indication Systems, publicó un White paper titulado "Tracking medical devices: The role of active and passive RFID as part of an effective medical device management system". Este artículo se expusieron algunos casos de estudio exitosos sobre el uso de la tecnología de identificación por radiofrecuencia en entornos clínicos [39].

7.3.1.1. RFID medical device management case study: Cambridge University Hospitals NHS Foundation Trust

En el ámbito de la atención sanitaria, la implementación de tecnologías innovadoras es clave para mejorar la eficiencia operativa, la gestión de riesgos y la seguridad del paciente. Un ejemplo destacado es el uso de la tecnología de Identificación por Radiofrecuencia (RFID) en entornos hospitalarios. El caso del Cambridge University Hospitals (CUH) NHS Foundation Trust en el Reino Unido demuestra cómo la RFID puede transformar la gestión hospitalaria [39].

El CUH etiquetó todos sus dispositivos médicos con RFID, reduciendo el tiempo de auditoría de varias horas a solo 10 minutos. Esto aumentó la precisión de los datos del 65 % a más del 90 %, mejorando la gestión de inventarios y la localización de equipos. Además, el uso de los estándares GS1 ha sido crucial para mejorar la seguridad del paciente y los procesos operativos, con un ahorro proyectado de £300,000 al año al optimizar el alquiler de dispositivos [39].

El CUH planea ampliar el uso de la RFID a 200 dispositivos no médicos de alto valor, como estaciones de trabajo móviles, lo que refuerza su compromiso con la innovación continua. El Profesor Paul White, Jefe de Ingeniería Clínica, destacó que la RFID ha mejorado el cuidado del paciente y proporcionado un retorno de inversión significativo, integrándose profundamente en las operaciones del hospital [39].

Esta experiencia subraya los beneficios tangibles de la RFID, como la optimización del flujo de pacientes y la reducción de los costos asociados al alquiler de equipos. Antes de la implementación, el 35 % de los dispositivos no se contabilizaban en las auditorías. Con RFID, el CUH ha logrado auditorías rápidas y eficientes, maximizando la utilización de equipos y mejorando la gestión hospitalaria [39].

El caso del CUH es un claro ejemplo del impacto transformador de la RFID en la seguridad del paciente, la eficiencia operativa y la gestión de costos, sirviendo como modelo e inspiración para otras instituciones de salud [39].

7.3.1.2. Case Studies East Kent Hospitals University NHS Foundation Trust operates across three hospital sites: William Harvey, Queen Elizabeth the Queen Mother and Kent and Canterbury Hospital.

En el ámbito de los desafíos operativos y financieros que enfrentan los sistemas de salud en todo el mundo, la experiencia del East Kent Hospitals University NHS Foundation Trust en el Reino Unido ofrece otro ejemplo de cómo la tecnología de Identificación por Radiofrecuencia (RFID) puede ser implementada para transformar la gestión de dispositivos médicos en entornos hospitalarios. Con la adopción de esta tecnología, el Trust ha logrado notables mejoras en eficiencia operativa, manejo de inventarios y en la calidad de la atención al paciente, sirviendo como un modelo a seguir en el sector sanitario internacional [40].

En 2014, un recién nombrado equipo de gestión de física médica se enfrentó a múltiples desafíos, incluida la gestión de un extenso inventario de dispositivos médicos distribuidos en tres sitios hospitalarios, presupuestos reducidos, un incremento en el número de pacientes y la urgente necesidad de mejorar una calificación insuficiente por parte de la Comisión de Calidad de Cuidado. La situación se describía como caótica, con mantenimientos deficientes y dificultades constantes para localizar equipos críticos cuando eran necesarios [40].

La solución llegó con la decisión del Trust de invertir en el sistema RFID Discovery de Harland Simon, complementando esta tecnología con la creación de una biblioteca de equipos médicos. Se han etiquetado aproximadamente 5,000 dispositivos médicos, incluidas más de 1,000 camas, con etiquetas RFID activas. Lectores de red ubicados estratégicamente en cada sitio hospitalario, junto con lectores móviles utilizados por el equipo de ingeniería clínica, han garantizado una cobertura completa [40].

La integración del sistema RFID Discovery con el Sistema de Gestión de Activos F2 de East Kent ha permitido identificar cuáles dispositivos necesitan mantenimiento o verificación, apoyando así la gestión de riesgos y el cumplimiento de normativas. Esta integración ha hecho posible que la información sobre la ubicación de los dispositivos médicos esté directamente disponible en la base de datos de activos y que datos importantes de los activos, como las fechas de mantenimiento preventivo y otras alertas, se retroalimenten en el sistema RFID Discovery [40].

Los beneficios alcanzados tras la introducción de este sistema han sido significativos, incluyendo la precisión en la información sobre la ubicación de todos los dispositivos etiquetados, la maximización de los niveles de utilización de los dispositivos, la reducción en el número de dispositivos necesarios, la disminución del tiempo que el personal clínico y los técnicos invierten buscando equipos, y la optimización en la gestión de inventarios. Además, este avance tecnológico ha tenido un impacto positivo en el informe de la CQC, contribuyendo a mejorar la calificación general del Trust [40].

Un ejemplo específico de los beneficios ha sido la notable reducción en la necesidad de adquisición de nuevos dispositivos, como las bombas de infusión, al revelarse a través del manejo de los datos que existía un excedente de equipos no utilizados. Además, la mejora en la gestión de inventarios ha facilitado la prestación de cuidados, asegurando que el equipo necesario esté disponible en el momento y lugar correctos, evitando retrasos en la atención al paciente [40].

La retroalimentación del equipo de gestión del Trust ha subrayado el nivel sin precedentes de confianza y evidencia que el sistema RFID Discovery ha aportado a la gestión de dispositivos médicos. El apoyo recibido por parte de Harland Simon ha sido crucial, permitiendo al Trust gestionar sus dispositivos de manera eficaz y cumplir con sus objetivos de mantenimiento con los recursos disponibles [40].

7.3.2. Nivel nacional y local

Durante el desarrollo de este proyecto de grado, no se identificó información o reportes en la literatura sobre clínicas, hospitales, fundaciones o institución de servicios de salud en Colombia que haya integrado la tecnología de Identificación por Radio Frecuencia (RFID) para la localización de activos fijos, específicamente equipos biomédicos, en sus instalaciones. Se encontraron algunos proyectos de grado relacionados con la implementación de esta tecnología. Sin embargo no fue posible

confirmar si al término de dichos proyectos se llevaron a cabo las propuestas o si se mantuvieron las implementaciones de los sistemas de localización de activos biomédicos.

En la práctica, muchas instituciones en Colombia, ante la falta de integración de tecnologías avanzadas como RFID para la localización de activos biomédicos, recurren a métodos más tradicionales de gestión. Estos incluyen procedimientos manuales, el uso de hojas de cálculo como Excel, y sistemas de identificación mediante códigos de barras o códigos QR asignados a cada activo. Sin embargo, algunas instituciones, como la Clínica Imbanaco en Santiago de Cali, han optado por adoptar el estándar GS1 para una gestión más eficiente de sus activos [41].

El caso de la IPS Cama del Bosque en Bogotá ilustra las fortalezas y debilidades internas, así como las oportunidades y amenazas del entorno que impactan la gestión de activos biomédicos [42]. Entre las fortalezas destacadas, se encuentra el conocimiento profundo de las normativas de las IPS, un equipo humano altamente capacitado en Elektromedical Barod con experiencia en el manejo y resolución de problemas de equipos, y un enfoque sólido en la educación continua y la comunicación efectiva, factores esenciales para la administración adecuada de los activos biomédicos. Sin embargo, también se identifican debilidades críticas, como la ausencia de sistemas de información para la trazabilidad de mantenimientos y una gestión documental ineficiente, lo que limita la capacidad para mantener inventarios actualizados y, por ende, afecta la disponibilidad de equipos esenciales.

Además, la situación se ve agravada por la falta de entrenamiento práctico para el personal administrativo encargado de la gestión de estos equipos y dispositivos, lo que resalta la necesidad urgente de una capacitación continua en nuevas tecnologías. Desde el punto de vista externo, se presentan oportunidades para mejorar la gestión mediante la centralización, organización y actualización de documentos e inventarios, así como el diseño de sistemas de información más eficientes. No obstante, el entorno también conlleva amenazas, como la fuerte competencia de empresas que ya cuentan con tecnología de vanguardia y sistemas de gestión robustos, lo que subraya la urgencia de fortalecer las capacidades internas y aprovechar las oportunidades que el entorno ofrece.

7.4. Diseño del sistema para localización de equipos biomédicos

7.4.1. Identificación de tecnologías en telecomunicaciones más adecuadas para el sistema

Para el proyecto se planteó el uso RFID para la adquisición y emisión de las señales de identificación en conjunto con WiFi para diseñar un sistema que busque dar solución a la localización de equipos biomédicos en entornos hospitalarios, pues al ser un sistema inalámbrico se evita el factor humano en el funcionamiento, la actualización del sistema y la captación de los datos de las etiquetas. Actualmente los sistemas de Identificación por Radiofrecuencia emplean señales en varias bandas, como por ejemplo 125 KHz, 13.56 MHz, 433-860-960 MHz y 2.45 GHz, según el tipo de sistema. Las señales por radiofrecuencia no requieren una línea de visión directa para su lectura [43].

Segun un informe realizado por MARKETS AND MARKETS en el 2023 enfocado en realizar un benchmarking titulado 'RTLS for Healthcare Companies - Securitas Healthcare, LLC (US), Zebra Technologies Corporation (US) and Aruba Networks (US) are the Key Players' resaltó a las compañías líderes en el mercado [44]:

- Securitas Healthcare LLC (US)
- Zebra Technologies Corp. (US)
- HPE Aruba Networking (US)
- Impinj, Inc. (US)
- TeleTracking Technologies, Inc. (US)

Estas empresas líderes en el mercado RTLS emplean tecnologías de identificación por radiofrecuencia (RFID), incluyendo Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee, LoRa y otras bandas de radiofrecuencia (125 KHz, 13.56 MHz, 433-860-960 MHz) como protocolos para la identificación y seguimiento de activos. Estas etiquetas funcionan mediante la transmisión de información a través de señales de radiofrecuencia, permitiendo la comunicación con el sistema principal. Dependiendo de su naturaleza, las etiquetas RFID pueden ser activas, es decir, requieren una fuente de alimentación como una batería para transmitir información, o pasivas, que no necesitan alimentación externa y obtienen la energía necesaria del campo electromagnético del lector. Entre las tecnologías mencionadas, solo las etiquetas pasivas están implementadas en sistemas RFID tradicionales. En el caso de BLE, Zigbee y LoRa, las etiquetas suelen ser de naturaleza activa, debido a las características propias de sus protocolos de comunicación [44, 20].

Portillo definió en un informe de vigilancia tecnológica "tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID): aplicaciones en el ámbito de la salud" que un sistema RFID consta principalmente de cuatro componentes clave [20]:

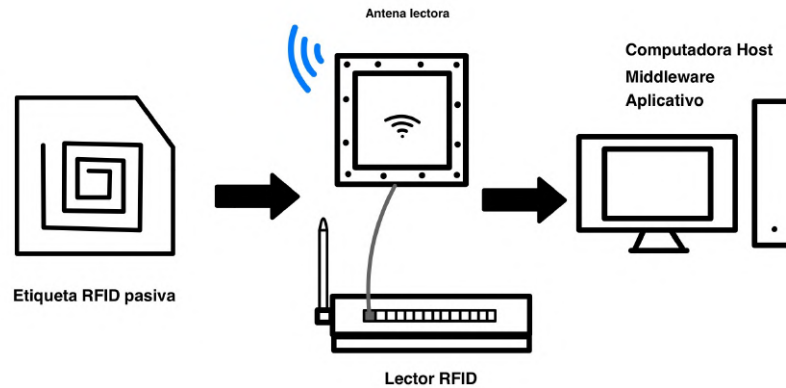


Figura 7.2: Estructura sistema RFID pasivo

- **Etiqueta RFID:** la etiqueta RFID, también conocida como tag o transpondedor, se coloca en objetos, animales o personas para transportar información relevante. Está equipada con un microchip que almacena datos y una pequeña antena que permite la comunicación por radiofrecuencia con el lector.
- **Lector o Interrogador:** el lector RFID cumple la función de transmitir energía a la etiqueta y leer los datos que esta envía. Se compone de un módulo de radiofrecuencia que incluye transmisor y receptor, una unidad de control y una antena destinada a la comunicación con las etiquetas. Algunos lectores también tienen la capacidad de escribir información en las etiquetas.
- **Computadora, Host o Controlador:** este componente es el encargado de desarrollar la aplicación RFID y recolectar la información de uno o varios lectores para posteriormente comunicarla al sistema de información y puedes realizar copias de seguridad de la base de datos de forma local. Además, según el diseño del sistema este puede emitir comandos al lector.
- **Middleware y Sistema ERP:** estos elementos son fundamentales para recolectar, filtrar y administrar los datos provenientes de la tecnología RFID en un contexto empresarial.

Para el caso de este proyecto se empleó una frecuencia de uso libre, también conocidas como bandas de espectro sin licencia o ISM (Industrial, Scientific and Medical) en algunos contextos, son rangos de frecuencia que se pueden utilizar sin necesidad de obtener una licencia específica para su uso. En Colombia, la ANE (Agencia Nacional del Espectro) ha asignado ciertas bandas de espectro para uso libre vease en el cuadro 7.2 , lo que significa que se pueden utilizar sin costo y con menos restricciones, bajo la resolución 105 del 2020 de Colombia [1].

Aspectos	Zigbee	Wi-Fi	Otros RFID	BLE	Sigfox	LoRa
Normativa	IEEE802.15.4	IEEE 802.15.1	ISO 11784/I- SO 11785 Low frequency (125-134kHz) ISO 14443/I- SO15693 High frequency (13.56MHz) ISO 18000- 6c/EPC global Gen 2 Ultra High frequency (860-960MHz) ISO 18000-4 RFID mi- crowaves (2.4GHz)	IEEE 802.15.1	SigFox	R 1.0 standard in LoRa WAN
Frecuencia de operación	2.4GHz	2.4GHz / 5GHz	125-134 kHz, 13.56 MHz, 860-960 MHz, 2.4GHz	2.4GHz	868MHz (EU) 902MHz (USA)	868/900 MHz
Tasa de transmisión de datos	Data rate of 20-240 kb/s approx	50-200 Mbps approx	4Mbps approx	1Mbps approx	100 bps (UL), 600 bps (DL)	0.32 to 50 kb/s
Costo promedio por unidad (Dólar)	\$10	\$100	\$20	\$5	\$5	\$50
Rango de transmisión	Short Range 10-100m	18 to 90m	Short Range Up to 200m	Short Range 15-30m approx	Long Range 10km (UR- BAN) 50km (RU- RAL)	Less than 28 km
Consumo de energía	Bajo	Moderado	Bajo	Muy bajo	Bajo	Muy bajo
Tipo de modulación	BPSK, BPSK-QPSK	BPSK, QPSK, 6-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM	ASK, FSK, PSK, PIE, FM0	TDMA, GFSK	UNB DBPSK (UL), GFSK (DL)	GSS

Cuadro 7.1: Comparación de tecnologías de comunicación

[45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74]

Las bandas de espectro sin licencia en Colombia suelen incluir frecuencias que se utilizan comúnmente para tecnologías inalámbricas de corto alcance, como Wi-Fi, Bluetooth, y otros dispositivos

Límite inferior (MHz)	Límite superior (MHz)
6.765	6.795
13.553	13.567
26.957	27.283
40.66	40.7
902	928
2400	2500
5725	5875
24000	24250
61000	61500
122000	123000
244000	246000

Cuadro 7.2: Bandas ICM[1].

de comunicación y control. Estas bandas están destinadas para aplicaciones de uso general, pero es importante seguir las regulaciones y estándares establecidos por la ANE y otras entidades reguladoras para garantizar un uso apropiado y evitar interferencias con otros servicios [1].

En el cuadro 7.1 se realizó un análisis comparativo de diferentes tecnologías y protocolos usados para la captura y lectura de información de etiquetas asignadas a seguimiento de por ejemplo activos fijos, acceso de personal a zonas restringidas o dentro de compañías de envíos.

7.4.2. Análisis de viabilidad de tecnología en telecomunicaciones en entornos hospitalarios.

En relación con el proyecto actual, es pertinente mencionar que la norma IEC 60601-1-2 establece los siguientes niveles máximos de inmunidad radiada para equipos electromédicos [75]:

- Para equipos que no son de soporte vital:
 - 10 V/m en el rango de frecuencias de 80 MHz a 2.5 GHz
- Para equipos de soporte vital:
 - 3 V/m en el rango de frecuencias de 80 MHz a 2.5 GHz

Adicionalmente, para frecuencias puntuales en las que operan equipos de comunicación inalámbrica de radiofrecuencia como 385 MHz, 450 MHz y 710 MHz, los niveles de campo eléctrico máximos especificados en la norma son 10 V/m para equipos que no son de soporte vital y 3 V/m para equipos de soporte vital. Esto establece niveles más estrictos de inmunidad radiada (3 V/m) para equipos electromédicos críticos de soporte vital, con el fin de garantizar un funcionamiento seguro y confiable en presencia de interferencias electromagnéticas [75]. Tener esto en consideración es necesario para

el proceso de desarrollo del dispositivo de localización, pues este usa Rf para emitir sus señales y estará adherido al equipo biomédico en cuestión que se desee localizar a través del sistema.

Es crucial destacar el papel de los estándares y regulaciones en el éxito y la seguridad de la implementación de la tecnología RFID. Una amplia gama de organizaciones internacionales, como la ISO, IEC, ASTM y EPCglobal, han establecido criterios específicos para garantizar la interoperabilidad, seguridad y eficiencia de los sistemas RFID. Estos estándares incluyen desde la especificación de la estructura del código de radiofrecuencia para transpondedores usados en animales (ISO 14223), hasta protocolos para la gestión de ítems a través de RFID (ISO 18000) y sistemas de intercambio de información sin contacto (ISO 18092).

Este marco regulatorio no solo asegura el cumplimiento y la compatibilidad entre sistemas y dispositivos a nivel mundial, sino que también proporciona una guía clara para la implementación segura y efectiva de la tecnología RFID en una multitud de aplicaciones. Con estos estándares y regulaciones en su lugar, el camino hacia la adopción y el aprovechamiento de las capacidades únicas de la RFID se vuelve más accesible y predecible, abriendo la puerta a innovaciones futuras en este campo dinámico.

La antena del microcontrolador usado para la etiquetas Seeed Xiao NRF52840 en su data sheet especifica las características y componentes de su antena, que en este caso es una antena de tipo Onboard.

Características de una Antena Onboard

- **Tipo más común:** Las antenas integradas suelen ser del tipo *PCB* (trazadas en el circuito impreso) o *chip cerámico*. Ambas están optimizadas para trabajar en la banda de 2.4 GHz. En el data sheet no se especifica la clase.
- **Impedancia típica:** Diseñadas para trabajar con 50Ω , maximizando la eficiencia de transferencia de potencia desde el módulo RF. En el data sheet no se especifica la impedancia.
- **Ganancia:** Las antenas PCB o de chip tienen ganancias bajas, típicamente entre -3 dBi y $+2$ dBi, lo cual afecta el rango de transmisión. En el data sheet no se especifica la ganancia.

Diseño del Circuito

- La red de adaptación *LC* (Bobina de 4,7 nH y condensadores de 0,8 pF y 0,5 pF) está diseñada para adaptar la impedancia del módulo RF con la antena onboard, asegurando un buen acoplamiento.

Estimación del Campo Eléctrico (V/m)

- Con un TX Power configurado a -16 dBm y una antena onboard con ganancia de 0 dBi, podemos calcular la potencia irradiada y el campo eléctrico.

4.1. Potencia Irradiada (EIRP)

- **Ganancia de la antena:** $G = 0$ dBi.
- **Potencia de transmisión:** $P_{TX} = -16$ dBm.
- **Potencia irradiada:**

$$P_{EIRP} = P_{TX} + G = -16 \text{ dBm.}$$

- Convertimos P_{EIRP} de dBm a mW:

$$P_{EIRP} = 10^{\frac{-16}{10}} = 0,0251 \text{ mW.}$$

Campo Eléctrico (E) La fórmula para calcular el campo eléctrico es:

$$E = \sqrt{\frac{30 \cdot P_{EIRP}}{r^2}},$$

donde:

- $P_{EIRP} = 0,0251 \text{ mW} = 2,51 \times 10^{-5} \text{ W}$,
- r : distancia en metros.

A una distancia de $r = 1$ m:

$$E = \sqrt{\frac{30 \cdot 2,51 \times 10^{-5}}{1^2}} = \sqrt{7,53 \times 10^{-4}} \approx 0,0274 \text{ V/m.}$$

- **Potencia irradiada (EIRP):** Aproximadamente -16 dBm o $0,0251$ mW.
- **Campo eléctrico a 1 metro:** Aproximadamente $0,0274$ V/m.

Basado en el análisis de los resultados de las formulas de contaminación electromagnética el Tag cumpliría con estar por debajo del limite de emisión de 3 V/m.

7.4.3. Requerimientos del sistema

A continuación, los requerimientos del sistema, fundamentados en la revisión de la normativa colombiana vigente sobre la gestión de equipos biomédicos, el uso del espectro de radiofrecuencia, la compatibilidad electromagnética en equipos biomédicos, y los resultados obtenidos de una encuesta dirigida al personal técnico y asistencial en donde se les realizaron preguntas enfocadas en la experiencia previa con la localización de equipos biomédicos dentro de instituciones hospitalarias y en las preferencias de los usuarios finales sobre un sistema que pudiera mejorar la localización de estos equipos biomédicos.

Resultados de la encuesta

3. En su institución, ¿se realiza un registro de seguimiento de ubicación y traslados de los equipos biomédicos entre los diferentes servicios?



Figura 7.3: Pregunta 3 encuesta.

4. Considera el registro de la ubicación de los equipos biomédicos es:



Figura 7.4: Pregunta 4 encuesta.

De acuerdo con los resultados de la pregunta 3 de la encuesta 11 de los 12 encuestados respondieron que si se realiza algún registro de la ubicación de los equipos biomédicos de cada servicio, incluyendo traslados.

De acuerdo con los resultados de la pregunta 4, de los 11 participantes que afirman que se realiza alguna tipo de registro de ubicación y traslado de equipos biomédicos consideran un 89% que el registro que se lleva actualmente puede mejorar. Considerando los casos de *Eficiente pero puede mejorar*, *Poco eficiente* y *No es eficiente*.

La mayoría de los encuestados consideran que la ubicación asignada de los equipos biomédicos en la institución no se conserva de forma adecuada; ocho de los doce respondieron que *algunas veces no se conserva*, mientras que dos afirmaron que *no se conserva en absoluto*. Solo uno de los encuestados indicó que siempre se mantiene la ubicación. Estos resultados sugieren que existe una falta de consistencia en el seguimiento de la ubicación de los equipos, lo cual podría afectar su

5. Con respecto a la asignación y ubicación de los equipos biomédicos en los diferentes servicios, usted considera que en su institución:



Figura 7.5: Pregunta 5 encuesta.

disponibilidad y eficiencia operativa.

6. ¿Qué impacto cree que tendría la capacidad de localizar los equipos biomédicos de manera instantánea en las operaciones relacionadas con la gestión de la tecnología biomédica y el trabajo del personal asistencial? Por favor, seleccione todas las opciones que considere pertinentes.

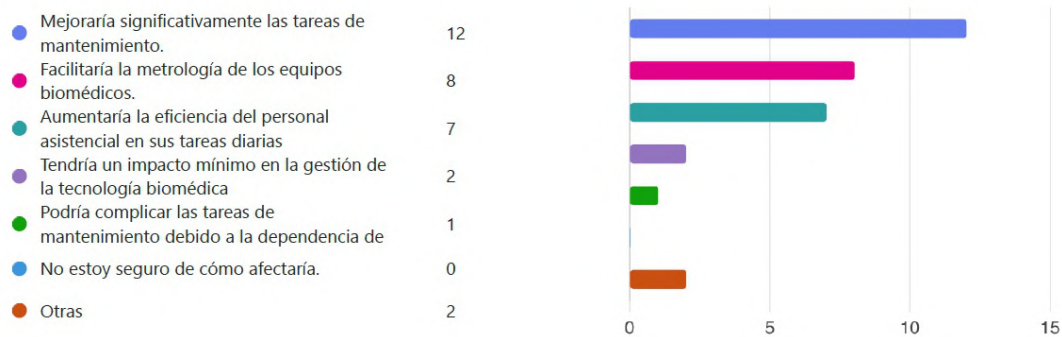


Figura 7.6: Pregunta 6 encuesta.

Algunos encuestados mencionaron beneficios adicionales, como contribuir a la trazabilidad durante auditorías. Sin embargo, tres participantes señalaron que podría tener un impacto mínimo o complicar el mantenimiento debido a la dependencia tecnológica.

La mayoría de encuestados indicaron que ubicar un equipo biomédico fuera de su lugar asignado toma entre 1 y 3 horas. Otros mencionaron tiempos menores, como menos de 1 hora, mientras que uno de los participantes reportó que la búsqueda puede extenderse por más de 3 horas y dos hasta una semana.

7. ¿Cuánto tiempo suele tomar en promedio ubicar un equipo biomédico cuando no se encuentra en su lugar asignado?

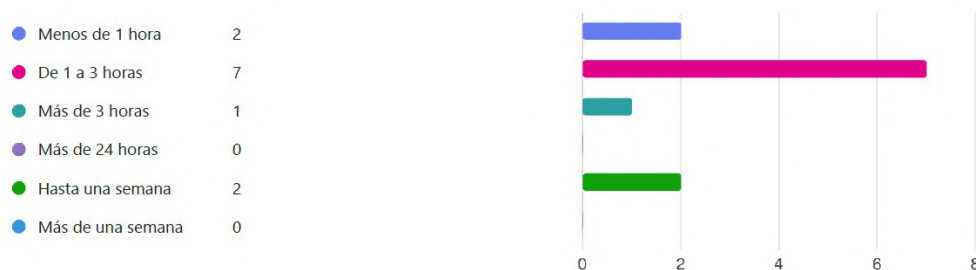


Figura 7.7: Pregunta 7 encuesta.

9. ¿Se ha enfrentado su institución a situaciones relacionadas con la pérdida o el extravío de equipos biomédicos en el pasado?



Figura 7.8: Pregunta 9 encuesta.

El 100% de los encuestados confirmó que sus instituciones sí se han enfrentado a situaciones de pérdida o extravío de equipos biomédicos al interior de sus instituciones hospitalarias, confirmando que algunas de las IPS de Colombia se encuentra presente la problemática sobre la trazabilidad de la localizaciones de los EB.

Con respecto a las respuestas de la pregunta 11 *Escriba que clase de desafíos presentan.* de la encuesta que pide describir aquellas clases de desafíos que se presentan dentro de las instituciones respecto a la localización de los EB los desafíos más comunes relacionados con la ubicación de los equipos biomédicos incluyen la dificultad para localizar equipos de menor tamaño y la necesidad de buscar en múltiples áreas debido a la falta de una ubicación fija. La práctica de prestar equipos entre servicios sin el registro adecuado también contribuye a que ciertos equipos *desaparezcan* por períodos prolongados. Esto genera retrasos en el mantenimiento preventivo, correctivo, metrológico y otras actividades esenciales, ya que los equipos no siempre están disponibles cuando son necesarios. Además, el incumplimiento en los cronogramas de mantenimiento y la pérdida de equipos durante

el traslado de pacientes entre áreas también representan obstáculos significativos para la gestión eficiente de los dispositivos biomédicos.

En la pregunta 13 como se observa en el Anexo10.5 de la encuesta donde se le solicita a los participantes que compartan las estrategias que han implementado en la institución para conservar la ubicación asignada de los equipos biomédicos, incluyen diversas medidas de control y organización. Algunas áreas han establecido inventarios entregados a los jefes de cada servicio y registros de traslados para mantener un seguimiento continuo. Otros mecanismos incluyen la asignación de responsabilidades al personal, el uso de listas de chequeo por turno y la rotulación con códigos de colores específicos para cada área, facilitando la identificación y ubicación de los equipos. Además, se utilizan sistemas como SAP para actualizar la localización, aunque su eficacia no es total.

14. ¿Con que frecuencia se realiza inventario de equipos biomédicos para verificar su ubicación en la institución?

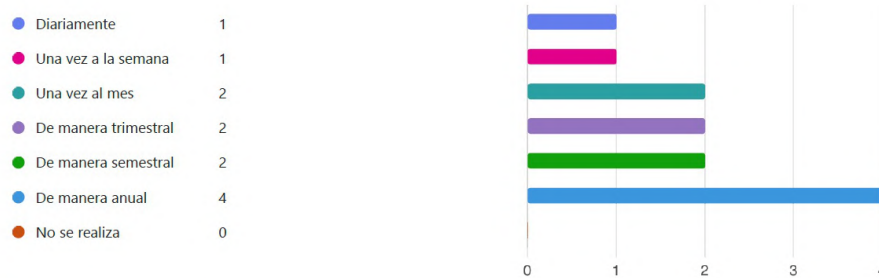


Figura 7.9: Pregunta 14 encuesta

15. ¿Cuánto tiempo le toma realizar el inventario de los equipos biomédicos de la Institución?



Figura 7.10: Pregunta 15 encuesta

Las respuestas relacionadas con la frecuencia y el tiempo requerido para realizar el inventario de los equipos biomédicos en la pregunta 14 y 15 reflejan una notable variabilidad. Mientras algunos participantes señalaron que este proceso se lleva a cabo de manera anual, otros mencionaron inter-

valos semestrales, trimestrales, mensuales, semanales e incluso diarios. Esta diversidad se explica por las diferentes dinámicas y responsabilidades dentro del personal encuestado. Por ejemplo, el personal de enfermería puede que realice un control diario de los equipos asignados a su servicio, especialmente durante los cambios de turno, debido a que cuenta con un número limitado de equipos biomédicos, lo que contrasta con los procedimientos más espaciados y que tomen un mayor tiempo que suelen seguir otros roles como el personal de ingeniería dentro de la institución que debe realizar un inventario de todos los equipos de la institución.

16. Si existiera un dispositivo capaz de adherirse a un equipo biomédico y que su función sea la de retransmitir su localización actual, usted preferiría que el tamaño y la portabilidad del dispositivo fuese:

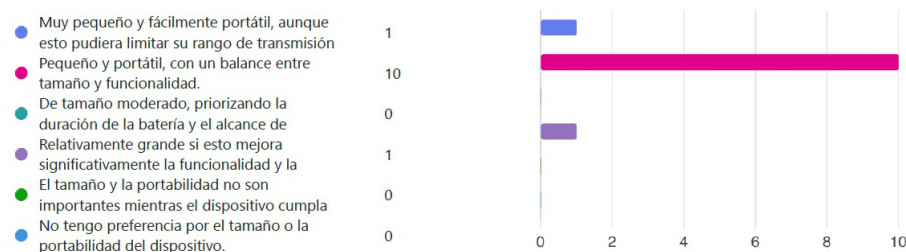


Figura 7.11: Pregunta 16 encuesta

En términos de portabilidad un 83% de los encuestados destaca la importancia de un dispositivo que logre un balance adecuado entre tamaño y funcionalidad. Sin embargo, un 8% expresa que estaría dispuesto a considerar un dispositivo más grande si esto mejora significativamente su funcionalidad y precisión en la localización, y otro 8% que preferiría la versión más reducida posible en dimensiones aun cuando esto pudiera limitar su rango de transmisión y su duración de batería.

17. Considerando que este dispositivo capaz de adherirse a un equipo biomédico y retransmitir su localización dentro de la institución requiere una batería para su funcionamiento, usted esperaría que la autonomía de la batería fuese:



Figura 7.12: Pregunta 17 encuesta

Las expectativas sobre la autonomía de la batería de un dispositivo diseñado para retransmitir la localización de equipos biomédicos varían entre los encuestados. Un 42 %, prefiere una autonomía de más de 6 meses, indicando preferencia por dispositivos que requieran poco mantenimiento.

19. ¿Qué capacidad de personalización y adaptación a las necesidades específicas de la institución considera primordial para el sistema de localización?



Figura 7.13: Pregunta 19 encuesta

La percepción sobre la capacidad de personalización y adaptación del sistema de localización de equipos biomédicos muestra una clara preferencia entre los encuestados. Un 50 % valora alta capacidad de personalización, enfatizando la importancia de adaptar el sistema a las necesidades específicas de la institución. En contraste, un 25 % considera que una baja capacidad de personalización es suficiente, priorizando la simplicidad de implementación. Por otro lado, un 25 % opta por una capacidad moderada de personalización, con opciones predefinidas que permiten ciertos ajustes.

20. ¿Que facilidad esperaría usted en el uso del sistema de localización?

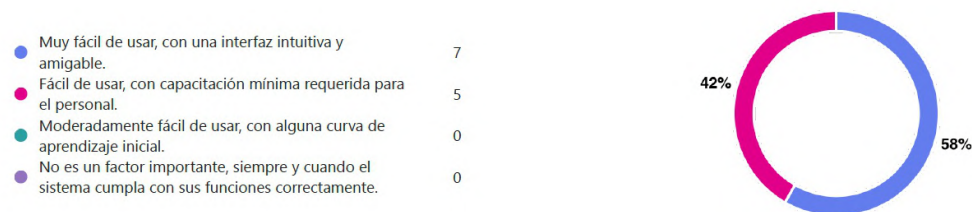


Figura 7.14: Pregunta 20 encuesta

Las expectativas sobre la facilidad de uso del sistema de localización de equipos biomédicos son claras entre los encuestados. Un 58 % considera que el sistema debería ser muy fácil de usar, destacando la importancia de una interfaz intuitiva y amigable. Además, un 42 % espera que sea fácil de usar, indicando que se requiere capacitación mínima para el personal.

La opinión sobre la vida útil ideal del dispositivo de localización varía entre los encuestados. Un 50 % considera que debería ser de más de 5 años, mientras que un 25 % prefiere un rango de 3 a 5 años. Por otro lado, un 17 % opina que la vida útil debería ser de 1 a 3 años, y solo un 8 % sugiere que debería ser menos de 1 año. Estas respuestas indican que la mayoría de los encuestados valora una durabilidad prolongada para maximizar la inversión en el dispositivo.

Requerimientos del sistema

Requerimiento	Detalle del Requerimiento	Fundamento
Banda de frecuencia	Uso de banda de frecuencia libre de licencia, sin requerimiento de permisos.	Asociación Nacional de Espectro Colombia
Compatibilidad electromagnética	Equipos no de soporte vital: 10 V/m (80 MHz a 2.5 GHz). Equipos de soporte vital: 3 V/m (80 MHz a 2.5 GHz).	IEC 60601-1-2
Dimensiones del tag y portabilidad	El dispositivo debe ser compacto y fácilmente transportable, adecuado para su adhesión a equipos biomédicos.	Encuesta
Autonomía del tag	El dispositivo debe ofrecer una duración de batería de al menos 6 meses para minimizar el mantenimiento.	Encuesta
Personalización y adaptabilidad	El sistema debe ser flexible para adaptarse a las necesidades específicas de cada institución.	Encuesta
Interfaz del sistema	Interfaz fácil de usar, accesible para el personal sin necesidad de entrenamiento avanzado.	Encuesta
Vida útil del sistema	El dispositivo debe garantizar un funcionamiento fiable durante más de 5 años.	Encuesta
Nivel y frecuencia de mantenimiento	El dispositivo debe requerir un mantenimiento ocasional y actualizaciones menores, con un enfoque en la mínima intervención operativa.	Encuesta

Cuadro 7.3: Requerimientos para el sistema de localización de equipos biomédicos.

Para el alcance, recursos y tiempos de este proyecto no será de estricto cumplimiento todos los requerimientos del sistema expuesto en la tabla 7.3, se procurará en el proceso de diseño abordar la mayor parte de ellos y su cumplimiento.

7.4.4. Selección de tecnologías para montaje del prototipo del sistema de localización.

Basado en los requerimientos del sistema obtenidos de la revisión bibliográfica, la normativa vigente, los resultados de las encuestas y el análisis de las tecnologías disponibles en el mercado para identificación por radiofrecuencia, se concluyó que las mejores opciones para el sistema de localización de equipos biomédicos son el Bluetooth de bajo consumo (BLE) y RFID activo.

En este proyecto se realizó un prototipo de cada tecnología (RFID y BLE) descartando entre medio a las otras tanto por su baja comercialización y acceso a productos de entrada como que algunos están diseñados para otros ambientes como lo es LoRa que aun si es bajo consumo esta dedicado al largo alcance, en el cuadro 7.4 se muestra la comparativa y los resultados de la comparación de estas dos tecnologías. Por temas de muy bajo consumo, en su grado de comercialización, y que es una de las soluciones que mas se implementa en las compañías que se mencionaron al principio de la sección en el benchmarking por el uso de BLE como protocolo para el sistema de localización, integrando el WiFi como medio comunicación con la base de datos en línea.

Ítem	RFID	BLE
Microcontrolador	Atmega328p	Xiao Seeed nrf52840
Tecnología integrada	-	BLE, LED RGB integrado
Componentes adicionales necesarios	Resistencias, oscilador, PCB, condensadores, módulo RFID 433MHz, batería, sensor de vibración, botón para reset, LED indicador, batería.	Batería
Frecuencia de operación	433MHz	2.4GHz
Banda ISM	Sí	Sí
Personalización alcance	A través de hardware modificando el voltaje de entrada al módulo RFID de 433MHz.	A través de software permitiendo la modificación de la potencia de transmisión en dB.
Consumo de energía durante reposo	9 mAh	0.013 mAh
Consumo de energía durante emisión	13 mAh	0.13 mAh

Cuadro 7.4: Cuadro Comparativo [1] [2]

Ambas opciones se basan en un enfoque de sistema activo, ya que los sistemas pasivos implican mayores costos, la necesidad de más componentes y una intervención más significativa en la infraestructura hospitalaria existente. Por ejemplo, la implementación de etiquetas RFID pasivas requeriría la instalación de antenas en cada servicio, lo cual incrementa la complejidad. Además, estudios previos destacan que las instituciones que implementan sistemas de localización en tiempo real (HRTLs) suelen utilizar tecnologías híbridas, empleando etiquetas pasivas para activos de baja rotación, y etiquetas activas para aquellos de alta rotación, como ya se analizó en las soluciones internacionales anteriormente.

En el contexto de Colombia, según la Resolución 3100 en el apartado sobre suficiencia y dotación de equipos biomédicos, algunos equipos pueden ser compartidos entre servicios, dependiendo del nivel de complejidad y la modalidad de los servicios habilitados, mientras que otros deben ser de uso exclusivo para un servicio específico. Los equipos de alta rotación, que se trasladan frecuentemente entre servicios, son críticos en términos de localización, por lo que el uso de etiquetas activas sería

ideal. Por ejemplo, equipos fijos como monitores multiparamétricos o de signos vitales, comúnmente anclados en cubículos de UCI, no requieren un seguimiento constante, por lo que serían más adecuados para el uso de etiquetas pasivas para estos casos, mientras que equipos como un ecógrafo que pueden ser compartido entre diferentes servicios se definiría entonces como un equipo de alta rotación.

Para el sistema propuesto se descartan las tecnologías Zigbee, WiFi, Sigfox y LoRa en el diseño de las etiquetas debido a que las tecnologías RFID y BLE ofrecen una buena disponibilidad de soluciones comerciales, son de fácil acceso, presentan menores costos, y disponen de una amplia variedad de documentación técnica. Además, estas tecnologías están optimizadas para operar en entornos interiores, lo cual las hace ideales para su implementación en instituciones hospitalarias. La facilidad de integración y el rango de operación de BLE y otros RFID hacen que sean más adecuadas para este tipo de aplicaciones, superando las limitaciones que otras tecnologías podrían presentar en términos de alcance, infraestructura necesaria, autonomía, como en el caso de LoRa que está pensado para exteriores y muy largo alcance.

7.4.5. Prototipo funcional del sistema de localización.

Para el sistema de localización de equipos biomédicos se propusieron las siguientes opciones:

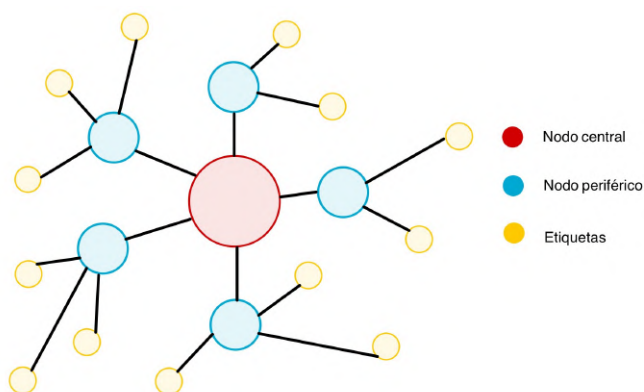


Figura 7.15: Estructura de sistema Maestro-Esclavo

Este diseño es de tipo **Maestro-Esclavo (Master-Slave)**, el cual se compone de tres elementos principales: un nodo central, nodos periféricos y las etiquetas adheridas a los activos, como se ilustra en la Figura 7.15 y como se describe su funcionamiento en 7.16. A continuación, se describe la función de cada uno:

Nodo central (rojo): Es el *maestro* del sistema y está ubicado en la sala de servidores del hospital. Se conecta a la base de datos principal y gestiona las comunicaciones con los nodos periféricos. Su función principal es solicitar y consolidar información de las etiquetas a través de los nodos periféricos, asegurando que todos los datos se integren para el análisis y monitoreo continuo.

Nodos periféricos (azules): Son los *esclavos* del sistema y están distribuidos estratégicamente en diferentes áreas del hospital, como urgencias, quirófanos y UCI. Captan las señales emitidas por las etiquetas de los activos cercanos y envían esta información al nodo central únicamente cuando reciben una solicitud.

Etiquetas (amarillas): Dispositivos adheridos a los activos biomédicos, como monitores y bombas de infusión, que emiten señales mediante tecnología *BLE* o *RFID activo*. Estas señales permiten identificar y localizar los equipos constantemente al ser detectadas por los nodos periféricos.

El funcionamiento básico del sistema es el siguiente: el *nodo central* envía una solicitud a los *nodos periféricos* para que estos identifiquen las etiquetas dentro de su área de cobertura. Los periféricos que encuentren etiquetas cercanas responden al nodo central con la información de localización. Esto garantiza que solo se transmita la información necesaria en el momento adecuado, logrando un sistema más eficiente tanto en términos de consumo energético como de tráfico de datos.

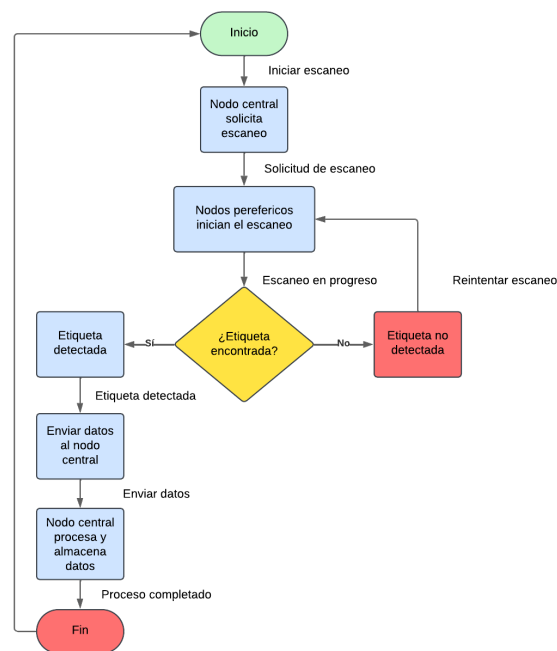


Figura 7.16: Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema Maestro-Eslavo

El segundo sistema propuesto se basa en posicionamiento de receptores en lugares estratégicos dentro del entorno hospitalario, con el fin de localizar de manera eficiente los activos etiquetados. En la figura 7.17, los receptores se representan mediante esferas azules, mientras que los equipos biomédicos etiquetados se muestran con esferas amarillas. En esta figura se ve un ejemplo de una planta con diferentes habitaciones que alberga activos etiquetados, en donde se fijaron receptores

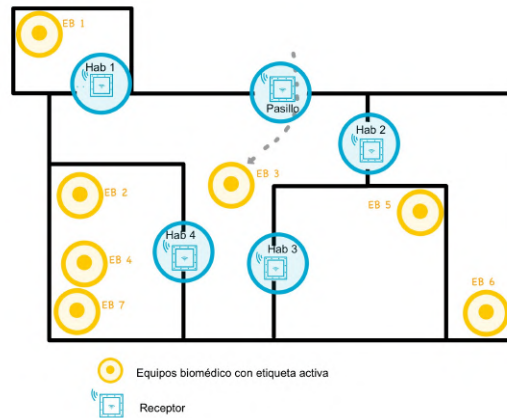


Figura 7.17: Gráfico ejemplo de un sistema de posicionamiento estratégico de receptores

en puntos de acceso claves, suficientes y en tales posiciones que puedan dar con la localización de las etiquetas.

Receptores en puntos clave: Los receptores se encuentran ubicados en diferentes habitaciones y pasillos; puntos de acceso generalmente (por ejemplo, Hab 1, Hab 2, etc.), permitiendo detectar las señales emitidas por las etiquetas activas colocadas en los equipos biomédicos.

Rango de los receptores: Cada receptor cubre un área determinada, representada por las esferas azules en la figura. Cualquier equipo etiquetado que se encuentre dentro de este rango será detectado y su ubicación será registrada.

Etiquetas activas: Los equipos biomédicos están equipados con etiquetas activas que emiten constantemente su identificación y ubicación. Cuando un equipo entra en el rango de un receptor, se transmite la información al sistema central, lo que permite rastrear su localización en tiempo real.

Actualización de la localización: Cada vez que un equipo es trasladado de una ubicación a otra (por ejemplo, de Hab 1 a Hab 2), el receptor más cercano detecta la nueva posición y actualiza la base de datos con la nueva localización. Este proceso ocurre continuamente, facilitando la gestión y localización de los equipos en cualquier momento.

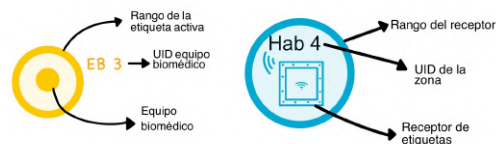


Figura 7.18: Descripción partes del sistema

Este diseño asegura un rastreo eficiente y preciso de los equipos biomédicos dentro de las instalaciones hospitalarias, permitiendo optimizar el uso de los recursos y mejorar la disponibilidad de los equipos para el personal técnico y asistencial.

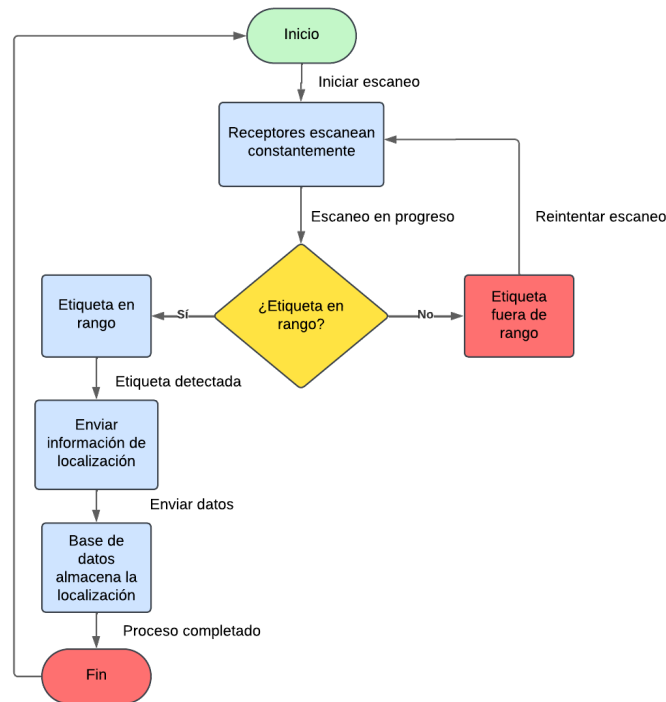


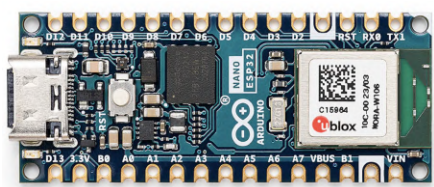
Figura 7.19: Diagrama de flujo del sistema de posicionamiento estratégico de receptores

7.4.5.1. Diseño de receptor

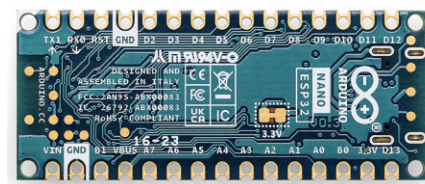
Los receptores se basaron en el microcontrolador Arduino Nano ESP32, una plataforma que destaca por su facilidad de uso y programación, así como por su amplia compatibilidad con librerías optimizadas para la arquitectura ESP32.

El microcontrolador cuenta con un procesador de doble núcleo, lo que lo hace ideal para distribuir eficientemente las tareas. Un núcleo se puede dedicar exclusivamente a la recepción de datos, evitando así la pérdida de lecturas de etiquetas, mientras que el segundo núcleo se encarga del procesamiento, gestión de buffer y envío de los datos a la plataforma de base de datos.

El Arduino Nano ESP32 dispone de suficiente memoria para manejar el buffer de datos recibidos y enviarlos de manera eficiente, además de contar con una distribución equilibrada de pines digitales y analógicos que permite integrar módulos adicionales tal como se puede apreciar sus demás



(a) Arduino ESP32 Nano



(b) Lado posterior Arduino ESP32 Nano

Figura 7.20: Arduino ESP32 Nano. Fuente: Página oficial de Arduino [76].

características en el cuadro 7.5, como uno de radiofrecuencia para un sistema RFID. Otra ventaja importante es que incluye conectividad Wi-Fi y BLE integrada. El Wi-Fi estará dedicado a el envío de los datos recibido de activo fijo junto con su ubicación a la base de datos, mientras que BLE estará dedicado a la recepción de los datos de las etiquetas, su UUID.

Especificación	Detalle
Microcontrolador	ESP32-S3
Arquitectura	Xtensa® Dual-Core 32-bit
Velocidad CPU	240 MHz
Memoria Flash	16 MB
RAM	512 KB
PSRAM	8 MB
Wi-Fi	802.11b/g/n (2.4 GHz)
Bluetooth	5.0 (BLE)
Entradas/Salidas	14 pines digitales
ADC	8 canales (12-bit)
DAC	2 (8 bits)
Comunicación	I2C, SPI, UART, CAN, I2S
Vel. Serie	Hasta 5 Mbps
Vel. I2C	Hasta 1 MHz
GPIO	22 GPIO
V. operación	3.3V
V. entrada	5V
Modo Deep Sleep	10 μ A
Almacenamiento	SPI Flash (16 MB)
Dimensiones	45 x 18 mm

Cuadro 7.5: Especificaciones del ESP32-S3

Cabe destacar su tamaño compacto, lo que lo convierte en una opción ideal para sistemas embebidos y espacios limitados. Estos receptores requieren una fuente de alimentación estable de 5V, que puede obtenerse fácilmente mediante un cargador de pared común, como los utilizados para cargar teléfonos móviles.

Se diseñó un modelo 3D para el empaquetado del receptor, asegurándose de respetar todas sus dimensiones y adaptándolo a los componentes internos. El diseño de la figura 7.21 incluye una tapa deslizante que facilita el acceso interno para mantenimiento o ajustes, y una abertura

específicamente ubicada para permitir el acceso al puerto USB tipo C, que funciona tanto como entrada de alimentación eléctrica.

El empaquetado fue modelado para asegurar la estabilidad estructural y una apariencia estética adecuada, manteniendo un diseño funcional y compacto. Posteriormente, el modelo se imprimió físicamente en una impresora 3D utilizando filamento de PLA, un material común en prototipado por su facilidad de manejo, rigidez y acabado limpio. Este empaquetado sirvió como un entregable tangible del proyecto, tanto para la evaluación del diseño como para la presentación final del receptor en un formato completamente ensamblado.

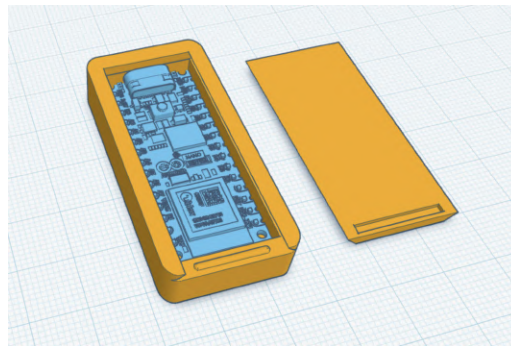


Figura 7.21: Diseño 3D del receptor

El prototipo incluye marcación en su parte posterior, en este caso, indicando el área donde sería ubicado. No se requirió de ningún hardware adicional mas allá de su fuente de alimentación.

7.4.5.2. Diseño de la base de datos

Para el proyecto fue fundamental la creación de una base de datos a la cual se pueda acceder de manera fácil y oportuna, donde se actualizará la información acerca de la ubicación de los equipos biomédicos. Una aplicación web es una aplicación cliente/servidor que interactúa con el usuario y accede a través de un servidor web o de una intranet mediante un navegador. Un sitio web solo da información de archivos estáticos [22].

Para el servicio de recepción y manejo de bases de datos, se optó por utilizar Firebase, una plataforma en línea ofrecida por Google. Firebase está diseñada específicamente para la gestión de bases de datos, incluidas bases de datos en tiempo real, alojamiento de aplicaciones web y servicios de autenticación, entre otras funciones. El manejo de datos en su servicio de Real Time Data Base se hace a través de formato JSON.

Esta estructura de base de datos en **Firestore Realtime Database** muestra el registro de diferentes equipos biomédicos, cada uno identificado por un código único, como 1003, 1004, 1005, entre otros. Estos códigos representan los **activos fijos** de cada equipo biomédico.

Cada uno de estos códigos contiene la siguiente información detallada sobre un equipo:



Figura 7.22: Ejemplo de la estructura base de datos en firebase

- **Equipo:** Describe el tipo de equipo biomédico. Ejemplos: “Monitor Fetal”, “Incubadora”, “Desfibrilador”.
- **Modelo:** El modelo específico del equipo, como por ejemplo “FET-MON-300”, “INC-400”, “DEF-700”.
- **Serie:** El número de serie del equipo para su identificación única, como “543869”, “297846”, “663547” asimilándose al el numero de serie único que debe tener cada equipo biomédico emitido desde el fabricante.
- **Ubicación:** La ubicación actual del equipo dentro de la institución, como “Unidad de hospitalización” o “UCI” (Unidad de Cuidados Intensivos).

En su versión gratuita, Firebase ofrece una capacidad considerable, permitiendo hasta 20,000 operaciones de envío de datos diarias, lo que la convierte en una excelente opción para proyectos de tamaño medio. Además, para sistemas que requieren un mayor volumen de datos, Firebase es altamente escalable a través de sus planes de pago. Otra ventaja significativa es la disponibilidad de librerías dedicadas, compatibles con la plataforma de desarrollo Arduino, lo que facilita la integración con los microcontroladores Arduino Nano ESP32 para el envío y la lectura de datos desde la base de datos solamente con la dirección web de la base de datos y habilitando los permisos de lectura y escritura.

7.4.5.3. Diseño del aplicativo

Para el desarrollo del aplicativo web con interfaz de usuario, que permite al usuario tener una interacción visual e intuitiva con el sistema, se utilizaron los servicios de Power BI de Microsoft. Power BI ofrece conectividad con bases de datos en línea y proporciona una amplia gama de herramientas visuales mediante plugins y widgets, facilitando así la interacción con los datos. Esto permite que los usuarios accedan y visualicen la información de manera sencilla y eficiente.

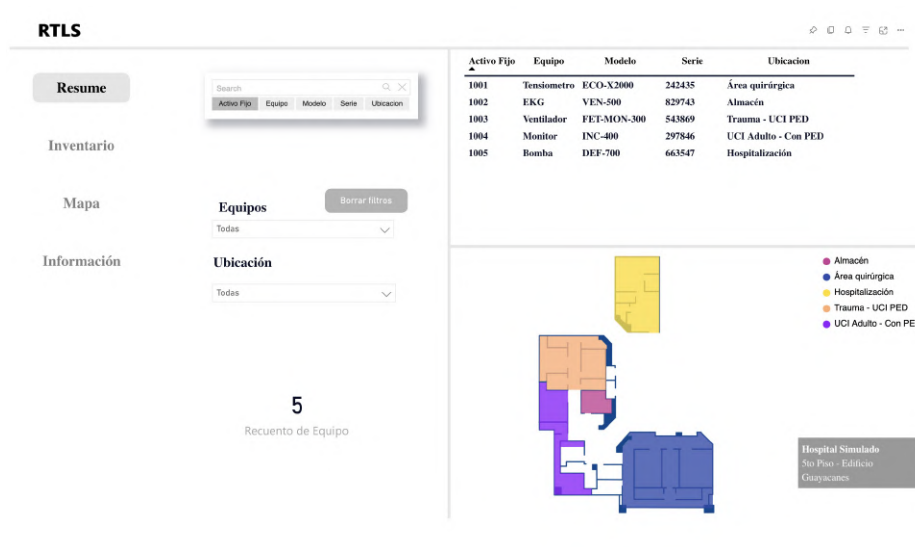


Figura 7.23: Aplicativo web - Pestaña resumen

Sin embargo, es importante señalar que los cambios realizados en la base de datos de Firebase no se reflejan de manera inmediata en el aplicativo creado en Power BI, ya que, en su versión gratuita, Power BI solo permite 12 actualizaciones automáticas diarias de la base de datos (aunque es posible actualizar manualmente de forma ilimitada). Dado que es crucial que el sistema esté actualizado de manera constante, se programó en el equipo que actuará como host y respaldo de la base de datos un atajo que, a través de comandos de teclas programados, permite la actualización automática cada 5 minutos del aplicativo web. Este atajo emula de forma automática los pasos manuales necesarios para refrescar la base de datos en Power BI, garantizando así que los datos estén siempre actualizados sin intervención manual constante. Pasando de 12 actualizaciones diarias que permitía PowerBi a 288 actualizaciones diarias del sistema.

Este aplicativo web cuenta 4 diferentes pestañas, la sección de *Resume* muestra una visual entre el inventario y el mapa de lugar, para este caso es el plano del Hospital Simulado de la Pontificia universidad Javeriana Cali dividido en 5 secciones, con diferentes filtros y opciones de búsqueda, este será el lugar de pruebas del sistema.

Se dividió el hospital simulado en 5 áreas distintas divididas por color y estas fueron objeto de estudio y planificación basándose en puntos de accesos, pasillos, infraestructura y alcance de lectura de los receptores y alcance de transmisión de los emisores.

7.4.5.4. Diseño del emisor

Dado que se eligió BLE como protocolo de comunicación entre las etiquetas y el receptor, se investigaron microcontroladores que integraran esta tecnología. Los criterios de selección incluyeron la posibilidad de programarlos en lenguaje C++ a través del IDE de Arduino, así como la dispo-

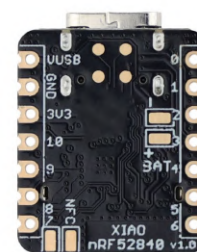


Figura 7.24: Mapa del Hospital simulado con delimitación de áreas

nibilidad de librerías compatibles para BLE que permitieran personalizar aspectos como el UUID emitido, los servicios, el nombre, la potencia y la frecuencia de emisión. Además, se priorizó un consumo energético eficiente, ya que el emisor estaría alimentado por una batería, la cual, según los requisitos del sistema, debería tener una duración ideal de al menos 6 meses.



(a) Xiao Seed NRF52840



(b) Lado posterior del Xiao Seed NRF52840

Figura 7.25: Xiao Seed NRF52840. Fuente: Página oficial de Xiao Seed [3].

El Xiao Seed nrf52840 es un microcontrolador que cumple con todo lo mencionado anteriormente, además cuenta con más amenidades súper útiles tales como un led RGB, puerto USB tipo C, unas dimensiones súper reducidas y un módulo de gestión de carga y descarga integrado BQ25100 para batería recargables como las de Ion de litio, muy populares en aplicaciones IOT. A través de

Item	Seed Studio XIAO nRF52840
Processor	Nordic nRF52840, ARM [®] Cortex [®] -M4 with FPU, runs up to 64 MHz
Wireless	Bluetooth 5.0 / NFC
On-chip Memory	1 MB flash and 256 kB RAM
Onboard Memory	2 MB QSPI flash
Interface	1x UART, 1x I ² C, 1x SPI, 1x NFC, 1x SWD, 11x GPIO (PWM), 6x ADC
Sensors	/
Dimensions	21 x 17.8 mm
Power	Circuit operating voltage: 3.3V@200mA Charging current: 50mA/100mA Input voltage (VIN): 5V Standby power consumption: <5 A

Cuadro 7.6: Características del Seed Studio XIAO nRF52840 [3].

puerto USB tipo C se puede cargar la batería y demás características que se pueden ver en el cuadro 7.6.

Por la parte posterior del microcontrolador incorpora las terminales para soldar directamente los contactos de fuente de alimentación. Para la fuente de alimentación de cada etiqueta se usó una celda de batería de litio 18650 de la marca panasonic, con una capacidad aproximada de 3450 mAh y una tensión de 3,7v.

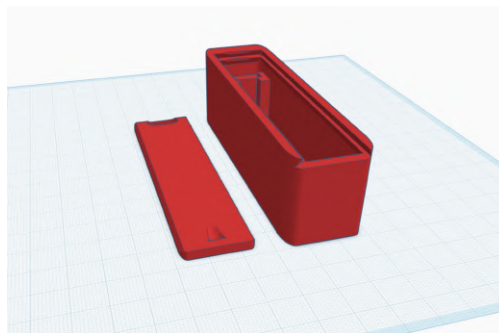


Figura 7.26: Modelo 3D caja emisor

El empaquetado del dispositivo fue diseñado en 3D, combinando una apariencia estética atractiva con un diseño funcional y compacto. Posteriormente, el modelo fue fabricado físicamente mediante impresión 3D utilizando filamento de PLA. Este empaquetado se presentó como un entregable tangible del proyecto, sirviendo tanto para evaluar el diseño como para la exhibición final del receptor en un formato completamente ensamblado. El diseño incluye un espacio optimizado para albergar el microcontrolador, una batería 18650, y un soporte para la batería con terminales y cables integrados.



Figura 7.27: Etiquetas impresas

7.5. Verificación del funcionamiento del sistema a través de la medición del tiempo de localización de equipos biomédicos.

7.5.1. Pruebas de alcance y potencia de emisión

El sistema, al ser adaptable a la infraestructura donde se instale, permite modificar parámetros como la ubicación de los receptores y la potencia de emisión de las etiquetas. Este último aspecto fue evaluado previamente en un campo de pruebas, realizando ensayos con todas las configuraciones posibles de potencia de emisión del microcontrolador de las etiquetas. Durante estas pruebas, se midieron el RSSI (Received Signal Strength Indicator), que indica la potencia de la señal de radio recibida por un dispositivo inalámbrico, y el intervalo de tiempo entre las señales emitidas por las etiquetas a diferentes distancias del receptor.

En el código de programación de la etiqueta se encuentra una sección denominada TXpower, que permite configurar la potencia de transmisión en diferentes niveles expresados en decibelios (dBm). Los valores disponibles son: -40dBm, -20dBm, -16dBm, -12dBm, -8dBm, -4dBm, 0dBm, +2dBm, +3dBm, +4dBm, +5dBm, +6dBm, +7dBm y +8dBm. Además, es posible ajustar la frecuencia de emisión de la señal de advertising (publicidad), la cual contiene información clave de la etiqueta, como su nombre, UUID y protocolo. Para evitar colisiones de señales en el receptor, estas emisiones se configuran para producirse en intervalos aleatorios dentro de un rango de 320 ms a 1600 ms.

Estas pruebas tuvieron lugar en el laboratorio de ingeniería biomédica e ingeniería electrónica la Pontificia Universidad Javeriana Cali.



Figura 7.28: Lugar de pruebas: Laboratorio de ingeniería biomédica y electrónica

7.5.1.1. Protocolo de pruebas

Objetivo. Evaluar la precisión y consistencia de la medición de distancias en un sistema de localización utilizando tecnología Bluetooth Low Energy (BLE). El análisis se centró en la relación entre la potencia de señal recibida (RSSI) y la distancia bajo diferentes niveles de potencia de emisión, identificando la potencia de emisión óptima para garantizar un alcance efectivo.

Rangos de Emisión. Se evaluaron las siguientes potencias de emisión del emisor BLE: +8 dBm, +7 dBm, +6 dBm, +5 dBm, +4 dBm, +3 dBm, +2 dBm, +0 dBm, -4 dBm, -8 dBm, -12 dBm, -16 dBm, -20 dBm y -40 dBm.

Materiales y Equipos

- Emisores Bluetooth BLE configurables con ajuste de potencia de emisión (tags activos del sistema).
- Receptor Bluetooth BLE para filtrar y registrar datos de RSSI.
- Software de análisis de datos (Python, Excel, MATLAB u otro equivalente).
- Herramientas de medición de distancia, como flexómetro o cinta métrica.
- Espacio de prueba controlado con baja interferencia electromagnética.

Pasos de la Prueba

1. Preparación del Entorno de Prueba

- Seleccionar un espacio para la prueba.
- Marcar intervalos regulares desde el receptor (por ejemplo, de 1 a 3 metros).
- Montar el receptor a la misma altura del cual se van a ubicar los receptores.

2. Configuración de los Dispositivos

- Configurar el emisor BLE con una potencia inicial de 0 dBm.
- Asegurarse de que el receptor BLE registre datos de RSSI e identificadores (UUID o MAC).
- Iniciar el receptor en modo de escaneo continuo para capturar todas las señales disponibles.

3. Procedimiento de Captura de Datos

- Colocar el emisor a 1 metro del receptor y registrar el valor de RSSI.
- Repetir la medición 10 veces por posición y calcular el promedio.
- Incrementar la distancia en pasos de 1 metro, hasta los 3 metros.
- Cambiar la potencia de emisión (por ejemplo, +2 dBm, -4 dBm, etc.) y repetir las mediciones.
- Documentar cualquier anomalía durante la captura (intermitencias o pérdida de señal).

4. Registro y Formato de Datos

- Crear una tabla con las siguientes columnas: *Distancia (m)*, *Potencia de Emisión (dBm)*, *RSSI Promedio (dBm)*, *Observaciones*.

Análisis de Resultados

1. Relación entre Potencia de Emisión y RSSI:

- A medida que la potencia de emisión disminuye, el RSSI (Received Signal Strength Indicator) tiende a disminuir, lo que indica una señal más débil.
- Por ejemplo, con una potencia de emisión de -20 dBm, el RSSI promedio es alrededor de -92.4 dBm a 2 metros, mientras que con una potencia de emisión de 0 dBm, el RSSI promedio es alrededor de -69.9 dBm a 1 metro.

2. Influencia de la Distancia:

- La distancia también afecta significativamente el RSSI. A mayor distancia, el RSSI disminuye.

Potencia de Emisión (dB)	Distancia (m)	Media RSSI (dB)	Media diferencia de tiempo (ms)
-20	2	-92.4	2820.8
-20	1	-84.4	3021.0
-20	3	-84.4	3021.0
-16	1	-81.3	2616.0
-16	2	-91.2	2820.8
-16	3	-81.3	2616.0
-12	1	-73.3	2219.3
-12	3	-73.3	2219.3
-12	2	-88.4	2820.8
-8	1	-67.9	2226.0
-8	3	-67.9	2226.0
-8	2	-84.4	3021.0
-4	1	-75.8	2820.8
-4	3	-75.8	2820.8
-4	2	-86.8	2820.8
-2	1	-73.7	2414.0
-2	3	-73.7	2414.0
-2	2	-84.4	3021.0
0	1	-69.9	2422.2
0	3	-69.9	2422.2
0	2	-84.4	3021.0
2	2	-79.6	2218.6
2	1	-70.2	2218.6
2	3	-70.2	2218.6
3	1	-69.9	2794.0
3	3	-69.9	2813.6
3	2	-75.6	2813.6
4	1	-66.6	2597.6
4	3	-66.6	2597.6
4	2	-78.6	2597.6
5	3	-65.8	2819.6
5	1	-68.4	2819.6
5	2	-74.4	2819.6
6	1	-70.8	2605.6
6	2	-78.8	2605.6
6	3	-78.8	2605.6
7	1	-66.7	1992.8
7	2	-76.8	2222.2
7	3	-75.8	2605.6
8	2	-71.8	2344.4
8	1	-71.2	2344.2
8	3	-72.8	2605.6

Cuadro 7.7: Tabla de resultados resumida

- Por ejemplo, a 1 metro con una potencia de emisión de -20 dBm, el RSSI promedio es -84.4 dBm, mientras que a 2 metros, el RSSI promedio es -92.4 dBm.

3. Diferencia de Tiempo:



Figura 7.29: Área de trabajo de pruebas

- La media de la diferencia de tiempo no parece estar directamente correlacionada con la potencia de emisión o la distancia de manera consistente.
- Sin embargo, se observa que la diferencia de tiempo tiende a ser mayor en distancias más largas y potencias de emisión más bajas.

4. Comparación entre Distancias:

- A 1 metro, el RSSI es generalmente más fuerte que a 2 o 3 metros, independientemente de la potencia de emisión.
- La diferencia de tiempo también tiende a ser menor a 1 metro en comparación con 2 o 3 metros.

5. Observaciones Generales:

- La potencia de emisión y la distancia son factores críticos que afectan la calidad de la señal recibida (RSSI).
- La diferencia de tiempo puede variar significativamente, pero no parece seguir un patrón claro en relación con la potencia de emisión o la distancia.
- El emisor configurado a -40dB directamente no se registra ni siquiera a un metro de distancia, lo hace aproximadamente como mucho a 20cm del receptor.

7.5.2. Implementación el sistema de localización en el hospital simulado, incluyendo la instalación de etiquetas RFID y puntos de acceso Wi-Fi.

Como se mencionó anteriormente, la selección de área y delimitación de las mismas fueron objeto de estudio, donde se analizaron lugares de alta presencia de equipos, áreas de circulación, puntos de acceso a las diferentes áreas, dentro de las instalaciones del hospital simulado. Las designaciones finales fueron:

- **Área quirúrgica:** el posicionamiento del receptor fue en el único punto de acceso que se encuentra para ese área, además es un sitio donde se encuentran muchos espacios de simulación y existe la alta movilización de equipos. Ahí se encuentran una sala de partos, una sala de cirugía, un consultorio y una bodega.
- **Hospitalización:** dicha área se encuentra en una habitación aparte del resto de las instalaciones pero dentro del mismo piso, así que este es un espacio totalmente apartado, criterio fundamental de posicionamiento de un receptor en su único punto de acceso igualmente.
- **Almacén:** el área de Almacén a pesar de ser pequeña también se designó como un área crucial de localización, pues hay que recordar que este proyecto se adapta a las necesidades de cada lugar y para este caso el almacén es un sitio que muy alta rotación de equipos, allí se encuentra gran parte de los equipos que no son de muy grandes dimensiones.
- **UCI Adulto y Consultorio pediátrico:** para este caso se designó este como una de las posiciones claves para un receptor por el acceso que se le tiene al consultorio pediátrico, este es un lugar con un único punto de acceso también y que se encuentra relativamente alejado y desconectado de las demás instalaciones a dentro del hospital.
- **Sala de Trauma y UCI Pediátrica:** El receptor se posicionó estratégicamente para cubrir la segunda mitad del pasillo, mientras que el receptor ubicado en la UCI de adultos y el consultorio pediátrico garantiza la cobertura de la primera mitad del pasillo.



Figura 7.30: Posición de los receptores del sistema de localización

Previo a la implementación del sistema RTLS en el hospital, se llevaron a cabo pruebas funcionales para optimizar la ubicación de los receptores y ajustar sus parámetros de operación. Estas pruebas tenían dos objetivos principales:

- **Ubicación estratégica de los receptores:** Se buscó determinar los puntos ideales de instalación en función de la disposición de los espacios, evitando tanto la superposición de rangos de detección entre receptores como áreas de cobertura inconsistente.
- **Configuración de la potencia de emisión:** Durante las pruebas, se evaluaron diferentes niveles de potencia de emisión para encontrar el valor más adecuado. El nivel ideal determinado fue **-16 dBm**, ya que:
 - A **-14 dBm**, las etiquetas ubicadas cerca de los límites entre dos receptores mostraban un comportamiento inconsistente, cambiando constantemente entre dos posiciones en el sistema.
 - A **-20 dBm**, algunas etiquetas no eran detectadas al pasar cerca del receptor, indicando una cobertura insuficiente.

En la Figura 7.30, se observa la disposición final de los receptores (indicados con 'X') en el mapa. Los círculos rojos alrededor de cada receptor representan aproximadamente el rango de lectura en el que las etiquetas pueden ser detectadas al ingresar en esta área.

En el caso de que una etiqueta no sea leída al pasar por un punto de acceso donde se encuentra un receptor, el sistema conservará en la base de datos la última ubicación enviada por la etiqueta. Este diseño garantiza que el sistema mantenga un registro continuo del movimiento de las etiquetas a través de los puntos de acceso, proporcionando una localización histórica en tiempo real dentro del hospital.

7.5.3. Protocolo de pruebas de tiempos de localización de equipos biomédicos.

7.5.3.1. Protocolo de pruebas del sistema

Objetivo de la prueba

El objetivo del protocolo es evaluar la efectividad del sistema de localización para rastrear y gestionar equipos biomédicos en diferentes áreas dentro del Hospital simulado de la Universidad Javeriana de Cali. Se busca comparar el desempeño del sistema en escenarios **Con Sistema** y **Sin Sistema**.

Procedimiento de la prueba

Se realizaron múltiples pruebas siguiendo los pasos descritos a continuación:

1. Preparación de los Equipos

- Selección de cinco equipos biomédicos:
 - Monitor de signos vitales.
 - Bomba de infusión.
 - Electrocardiógrafo.
 - Ventilador mecánico.
 - Ecógrafo
- Etiquetado de los equipos con identificadores únicos (**TAGs**), utilizando las etiquetas BLE configuradas con intervalos de publicidad específicos, UUID correspondiente al número de activo fijo asignado para el ejercicio y potencia de emisión a -16dB.

En caso de que uno de los equipos no se encuentre disponible se podrá elegir otro que cumpla con tener unas dimensiones similares.

2. Configuración del Entorno

- Identificación de las áreas clave en el hospital:
 - UCI adulto.
 - Consultorio pediátrico.
 - Área quirúrgica.
 - Trauma.
 - Almacén.
 - Hospitalización.
- Instalación de receptores BLE (beacons) en puntos estratégicos para capturar señales de los TAGs.
- Configuración del sistema para registrar y enviar los datos al sistema.

3. Procedimiento

Se realizaron 12 pruebas en total, alternando entre escenarios **Sistema OFF** y con **Sistema ON**:

1. Pruebas Sin Sistema:

- El participante de ubicar de manera manual los 5 equipos en las 5 diferentes áreas.
- Registro manual de la posición de cada equipo, sin utilizar el sistema.

2. Pruebas Con Sistema:

7.5. Verificación del funcionamiento del sistema a través de la medición del tiempo de localización de equipos biomédicos.

67

- Activación del sistema para rastrear las ubicaciones.
 - El participante debe ubicar los 5 equipos repartidos en las 5 áreas con ayuda del sistema.
3. Cada prueba consistió en mover los equipos biomédicos entre áreas específicas siguiendo un itinerario predefinido. Este itinerario se definió a través de un script en python que consistía en crear un archivo tipo XLSX donde se le iba a asignar de manera aleatoria a cada equipo una ubicación para cada prueba, dando lugar a que pudiera haber más de un equipo por área.

4. Registro de Datos

- Los datos de ubicación se registraron en una tabla que incluye:
 - Identificación del equipo.
 - TAG asignado.
 - Área registrada (manual o por el sistema).
 - Tiempo de búsqueda total por prueba.

Resultados Esperados

- Validación de la capacidad del sistema para identificar con precisión la ubicación de los equipos en tiempo real.
- Comparación del tiempo requerido para localizar los equipos en ambos escenarios.
- Detección de inconsistencias en el sistema para futuros ajustes.

7.5.4. Pruebas de localización de equipos biomédicos.

Se llevaron a cabo dos jornadas de pruebas del sistema, realizadas en días distintos. En la primera jornada se etiquetaron los siguientes equipos: monitor de signos vitales, ecógrafo, bomba de infusión, electrocardiógrafo y ventilador mecánico. La selección de estos equipos no respondió a un criterio específico, más allá de su fácil disponibilidad en el momento y la posibilidad de colocar la etiqueta en un atril o mesa móvil. En la segunda jornada, las pruebas se realizaron con: monitor de signos vitales, tensiómetro manual, bomba de infusión, electrocardiógrafo y ventilador mecánico.

Para cada jornada asistió a la prueba una persona distinta del personal del hospital simulado. La asignación de espacios si fue igual en ambas jornadas.

Prueba	Tiempo (min)	Sistema
1	1:41	ON
2	3:12	OFF
3	5:59	ON
4	2:38	OFF
5	3:10	ON
6	3:49	OFF
7	3:07	ON
8	5:49	OFF
9	2:22	ON
10	3:44	OFF
11	1:26	ON
12	2:55	OFF

Cuadro 7.8: Tabla de resultados de las pruebas

Estadístico	Valor
Promedio (OFF)	221.17
Promedio (ON)	177.50
Mediana (OFF)	208.00
Mediana (ON)	164.50
Desviación estándar (OFF)	68.39
Desviación estándar (ON)	98.66
Porcentaje de mejora	19.74 %
Rango (OFF)	191
Rango (ON)	273
T-test estadístico	0.891
P-valor	0.394
Mínimo (OFF)	158
Máximo (OFF)	349
Mínimo (ON)	86
Máximo (ON)	359

Cuadro 7.9: Resultados estadísticos de las pruebas.

7.5.4.1. Análisis de resultados

Evaluación estadística de los tiempos de localización

El análisis se centró en comparar los tiempos de localización de equipos biomédicos en escenarios **ON** (sistema encendido) y **OFF** (sistema apagado), a partir de los resultados obtenidos en las 12 pruebas realizadas. En particular, se identificó que en una de las pruebas **ON** el tiempo de localización fue inusualmente alto (359 segundos) debido a una anomalía en el sistema, donde se mostró la ubicación incorrecta de un equipo, generando confusión al usuario. Este evento fue

considerado en el análisis estadístico para evaluar su impacto en los resultados globales.

Cálculo de medidas de tendencia central:

- **Promedio:** El promedio fue calculado utilizando la fórmula:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (7.1)$$

donde x_i representa los tiempos registrados y n el número de pruebas.

$$\mu_{\text{OFF}} = \frac{3 : 12 + 2 : 38 + 3 : 49 + 5 : 49 + 3 : 44 + 2 : 55}{6} = 221,17 \text{ seg}$$

$$\mu_{\text{ON}} = \frac{1 : 41 + 5 : 59 + 3 : 10 + 3 : 07 + 2 : 22 + 1 : 26}{6} = 177,50 \text{ seg}$$

Se realizó un análisis adicional excluyendo la prueba anómala (359 segundos):

$$\mu_{\text{ON, ajustado}} = \frac{1 : 41 + 3 : 10 + 3 : 07 + 2 : 22 + 1 : 26}{5} = 140,80 \text{ seg}$$

- **Mediana:** La mediana se calculó ordenando los tiempos y seleccionando el valor central o el promedio de los valores centrales si n es par:

$$\begin{aligned} \text{Mediana}_{\text{OFF}} &= 208,00 \text{ seg} \\ \text{Mediana}_{\text{ON}} &= 164,50 \text{ seg} \\ \text{Mediana}_{\text{ON, ajustado}} &= 143,00 \text{ seg} \end{aligned}$$

Cálculo de medidas de dispersión:

- **Desviación estándar:** Se utilizó la fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}, \quad (7.2)$$

donde μ es el promedio.

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{OFF}} &= 68,39 \text{ seg} \\ \sigma_{\text{ON}} &= 98,66 \text{ seg} \\ \sigma_{\text{ON, ajustado}} &= 62,17 \text{ seg} \end{aligned}$$

- **Rango:** Se determinó como la diferencia entre el valor máximo y mínimo:

$$\begin{aligned} \text{Rango}_{\text{OFF}} &= 349 - 158 = 191 \text{ seg} \\ \text{Rango}_{\text{ON}} &= 359 - 86 = 273 \text{ seg} \\ \text{Rango}_{\text{ON, ajustado}} &= 190 - 86 = 104 \text{ seg} \end{aligned}$$

Comparación de resultados:

- **Porcentaje de mejora:** Se calculó como:

$$\text{Mejora (\%)} = \frac{\mu_{\text{OFF}} - \mu_{\text{ON}}}{\mu_{\text{OFF}}} \times 100, \quad (7.3)$$

resultando en:

$$\begin{aligned} \text{Mejora (\%)} &= \frac{221,17 - 177,50}{221,17} \times 100 = 19,74 \% \\ \text{Mejora (\%, ajustado)} &= \frac{221,17 - 140,80}{221,17} \times 100 = 36,34 \% \end{aligned}$$

- **Prueba t de Student:** Para evaluar la diferencia estadísticamente significativa entre los dos conjuntos de datos, se utilizó la prueba t:

$$\text{T-test estadístico (ajustado)} = 2,133,$$

$$\text{P-valor (ajustado)} = 0,049.$$

Dado que el valor de $p < 0,05$ tras ajustar, se concluye que la diferencia es estadísticamente significativa.

Discusión de resultados

Los tiempos promedio y medianos muestran una reducción significativa en la localización de equipos utilizando el sistema, con una mejora promedio ajustada del **36.34 %** en los tiempos de búsqueda. Sin embargo, la dispersión inicial (**desviación estándar**) se incrementó debido a la anomalía, lo que resalta la importancia de garantizar la precisión de la localización en el sistema.

El análisis ajustado demuestra que, al excluir eventos atípicos, el sistema no solo mejora significativamente los tiempos de localización, sino que también logra una mayor consistencia en los resultados. Es fundamental abordar errores en la localización para evitar confusiones que impacten negativamente la experiencia del usuario.

7.5.5. Retroalimentación del personal del hospital simulado sobre el sistema de localización de equipos biomédicos

Con el propósito de evaluar el prototipo funcional del sistema de localización de equipos biomédicos basado en tecnología RFID y Wi-Fi, se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas dirigidas al personal del Hospital Simulado de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

Se eligió el formato de entrevista semiestructurada debido a su flexibilidad, que permite explorar en profundidad las percepciones y opiniones de los participantes, ajustándose dinámicamente a sus respuestas para abordar temas relevantes de manera más detallada.

Para garantizar la ética y la transparencia durante el proceso, se implementó un formato de consentimiento informado. En este documento se comunicaron claramente los siguientes puntos a los participantes:

- Los objetivos generales de la entrevista.
- La grabación del audio de sus respuestas, asegurando la confidencialidad de los datos.
- La ausencia de repercusiones laborales o personales por su participación.
- La omisión de datos personales en el proceso.
- Su derecho a retirarse de la entrevista en cualquier momento sin justificación.

Cada participante fue entrevistado de manera individual. Las preguntas planteadas se centraron en evaluar el sistema desde diferentes perspectivas prácticas y funcionales:

1. ¿Cómo percibe, en términos generales, el prototipo del sistema de localización de equipos biomédicos?
2. Basándose en los resultados positivos obtenidos durante las pruebas, ¿considera que la reducción en el tiempo para localizar equipos biomédicos impactaría positivamente en su trabajo diario?
3. ¿En qué situaciones específicas cree que el sistema aporta más valor para la localización de equipos?
4. ¿Considera que la precisión del sistema para detectar equipos biomédicos es suficiente para las necesidades de su trabajo?
5. ¿El tamaño y diseño del tag son adecuados para adherirse a los equipos biomédicos sin interferir en su uso?
6. ¿Qué es lo que más le gusta del sistema?
7. ¿Qué aspectos cambiaría o mejoraría del sistema?

Tras la recopilación de las respuestas, estas se organizaron en temas clave para su análisis y posterior interpretación. Este análisis permitió identificar fortalezas del sistema, áreas de oportunidad y sugerencias prácticas para mejorar su funcionalidad y aceptación por parte del personal hospitalario.

7.5.5.1. Subcategorización y análisis de las respuestas

Las entrevistas realizadas, con una duración aproximada de 10 a 15 minutos cada una, se centraron exclusivamente en aspectos relacionados con el sistema de localización de equipos biomédicos basado en Bluetooth Low Energy (BLE) y Wi-Fi. Ambas entrevistas proporcionaron información valiosa para evaluar la percepción y posibles mejoras del prototipo.

Subcategorización de respuestas Las opiniones y comentarios obtenidos de los participantes fueron organizados en las siguientes categorías:

- **Portabilidad y tamaño del dispositivo:** Ambos participantes resaltaron la importancia de mejorar la portabilidad del sistema, sugiriendo una reducción en el tamaño del dispositivo. Si bien entendieron que el tamaño actual está mayormente condicionado por la batería, mencionaron que un diseño más compacto sería deseable para facilitar su implementación.
- **Adiciones funcionales:** Los participantes sugirieron la incorporación de un buzzer o bocina que permitiera localizar equipos rápidamente a través de señales auditivas. Esta funcionalidad complementaría el sistema actual y mejoraría la experiencia del usuario en situaciones prácticas.
- **Aplicativo y experiencia de usuario:** El aplicativo asociado al sistema recibió comentarios muy positivos. Fue descrito como intuitivo y fácil de usar. Los participantes destacaron la integración fluida con una base de datos en Excel, lo que consideraron un punto fuerte del sistema por su capacidad de interoperabilidad.
- **Dependencia tecnológica:** Uno de los entrevistados señaló una preocupación en caso de que el sistema muestre datos de localización incorrectos. Mencionó que una dependencia excesiva en la tecnología podría generar inconvenientes si no se dispone de una validación rápida o alternativas manuales en esos casos.
- **Sistema de sujeción:** Se mencionó que el tag fue colocado directamente sobre los equipos o sus soportes, pero no se utilizó ningún sistema de sujeción dedicado. Los participantes expresaron que incorporar una forma eficiente de adherir los tags a los equipos sería beneficioso para garantizar su estabilidad y uso continuo.
- **Duración de la batería:** La duración de la batería fue percibida como adecuada y satisfactoria, lo que representa una ventaja importante en el diseño actual del dispositivo.

Análisis de las respuestas En general, las percepciones del personal fueron muy positivas. Ambos participantes reconocieron el valor del sistema para la localización de equipos biomédicos y destacaron su potencial para optimizar tiempos y facilitar tareas diarias. Sin embargo, se identificaron áreas de mejora que podrían aumentar la aceptación y la eficacia del sistema:

- **Portabilidad:** Reducir el tamaño del dispositivo podría aumentar su adaptabilidad y aceptación, especialmente en entornos donde el espacio es limitado o se requiere mayor movilidad.

- **Funcionalidades adicionales:** Incorporar un buzzer o señal auditiva permitiría localizar equipos de manera más eficiente y rápida en entornos complejos.
- **Precisión y confiabilidad:** Mejorar la precisión del sistema es fundamental para reducir la dependencia tecnológica y aumentar la confianza en los resultados.
- **Diseño práctico:** Un sistema de sujeción para los tags garantizaría un uso más estable y práctico en el día a día.

El sistema, tal como está diseñado, ya integra características valiosas como la interoperabilidad con bases de datos existentes y un aplicativo intuitivo que facilita su uso. Estas fortalezas, combinadas con las sugerencias de mejora, pueden contribuir significativamente a optimizar la solución propuesta.

Conclusiones

8.1. Conclusión General

El desarrollo e implementación de un sistema de localización en tiempo real para equipos biomédicos, basado en tecnologías RFID y Wi-Fi, demostró ser una herramienta técnica efectiva para la gestión y localización de activos biomédicos en instituciones de salud. Este proyecto cumplió con los objetivos planteados, abordando necesidades específicas del sector y destacándose por su capacidad de adaptación a diferentes entornos hospitalarios. Además, proporcionó resultados medibles en términos de eficiencia operativa, como la reducción de tiempos de búsqueda de equipos en un 36.34 % y la mejora en la trazabilidad de activos.

El personal entrevistado del hospital simulado brindó una percepción positiva del sistema, destacando su potencial para optimizar el trabajo diario. Sin embargo, subrayaron áreas de mejora, como la necesidad de reducir aún más el tamaño de las etiquetas activas para facilitar su integración en equipos biomédicos y la incorporación de elementos adicionales, como un buzzer o bocina, que facilite una localización más rápida mediante señales auditivas. Estas observaciones refuerzan la importancia de iterar en el diseño para responder a las expectativas del usuario final.

8.2. Cumplimiento de los Requerimientos Técnicos

El sistema desarrollado utiliza tecnologías BLE y Wi-Fi, seleccionadas por su idoneidad para entornos hospitalarios, destacando por su bajo consumo energético, robustez y capacidad para operar en interiores con interferencias electromagnéticas mínimas. Este diseño respondió satisfactoriamente a los requerimientos de operar en bandas de frecuencia libres de licencia y asegurar la compatibilidad electromagnética conforme a IEC 60601-1-2, evitando interferencias con otros dispositivos biomédicos.

A pesar de que las etiquetas activas fueron consideradas compactas, los entrevistados señalaron que una reducción adicional en su tamaño sería deseable, especialmente en el contexto de su uso en equipos médicos portátiles. Asimismo, la autonomía de la batería proyectada, estimada en más de seis meses, fue bien recibida como una característica esencial para minimizar las necesidades de mantenimiento.

8.3. Eficiencia en la Localización y Gestión de Activos

Durante las pruebas, el sistema logró una reducción ajustada del 36,34 % en los tiempos de búsqueda de equipos biomédicos. Aunque este porcentaje no iguala los niveles reportados en estudios internacionales, constituye un avance significativo para instituciones locales, donde las limitaciones tecnológicas y operativas suelen ser mayores. Esta mejora fue valorada positivamente en las entrevistas, ya que los usuarios percibieron un impacto directo en su capacidad para localizar equipos esenciales de manera más ágil.

El aplicativo web, diseñado para mostrar en tiempo real la ubicación de los equipos mediante mapas interactivos, también recibió comentarios favorables por su interfaz intuitiva. Los entrevistados destacaron la interoperabilidad del sistema con bases de datos existentes, como hojas de cálculo en Excel, lo que facilitó su integración en flujos de trabajo preexistentes.

8.4. Adaptabilidad y Personalización del Sistema

El diseño modular del sistema permitió su adaptación a diferentes áreas del hospital simulado, asegurando cobertura y precisión en entornos variados. Además, la personalización de parámetros clave como el UUID, la potencia de emisión y la frecuencia de actualización amplió su versatilidad para responder a necesidades específicas. Sin embargo, la dependencia de la infraestructura de red para garantizar la continuidad del sistema en tiempo real se mantuvo como un desafío pendiente.

8.5. Desafíos y Limitaciones

El sistema enfrentó desafíos técnicos relacionados con la precisión de localización en áreas específicas y la estabilidad de la red Wi-Fi, aspectos que influyeron en la percepción de dependencia tecnológica mencionada por los entrevistados. Este punto subraya la necesidad de continuar trabajando en estrategias de mitigación para asegurar un desempeño confiable, especialmente en situaciones críticas.

Trabajos futuros

9.1. Trabajos Futuros

El sistema de localización en tiempo real para equipos biomédicos desarrollado en este proyecto ha demostrado ser funcional y eficaz para mejorar la gestión de activos en entornos hospitalarios. Sin embargo, aún existen múltiples oportunidades de mejora e investigación que permitirían optimizar su desempeño, incrementar su robustez y expandir sus funcionalidades. A continuación, se describen algunas líneas de trabajo futuro que podrían explorarse para avanzar en este campo.

9.1.1. Seguridad en la Transmisión de Datos

Un aspecto fundamental para el perfeccionamiento del sistema es garantizar la seguridad en el envío y recepción de datos. Actualmente, el sistema utiliza comunicación Wi-Fi para interactuar con la base de datos en tiempo real. No obstante, esta infraestructura podría ser susceptible a vulnerabilidades informáticas, como interceptación de datos, accesos no autorizados o manipulación de la información.

Por lo tanto, futuros trabajos deberían centrarse en implementar protocolos de seguridad avanzados, tales como la encriptación de extremo a extremo (end-to-end encryption), el uso de certificados SSL/TLS para conexiones seguras y mecanismos de autenticación robustos basados en OAuth o tokens de acceso. Estas mejoras permitirían proteger tanto los datos almacenados como los transmitidos, reduciendo significativamente el riesgo de incidentes de ciberseguridad.

9.1.2. Reducción de Tamaño y Mejora del Diseño

Otra área de mejora destacada es la reducción del tamaño de las etiquetas activas. A pesar de que el prototipo desarrollado cumplió con los requisitos de portabilidad, los usuarios indicaron que un diseño más compacto sería ideal para su integración en equipos biomédicos más pequeños o en aquellos con espacio limitado. Trabajos futuros deberían enfocarse en optimizar la distribución interna de los componentes electrónicos, utilizar baterías más pequeñas con alta densidad energética y explorar tecnologías de integración de circuitos más avanzadas, como la miniaturización mediante PCB multicapa.

Además, sería importante desarrollar un diseño industrial más ergonómico y estético, que facilite su instalación en equipos de diferentes formas y tamaños, así como incorporar características

adicionales como sistemas de sujeción universales para asegurar su fijación en condiciones de uso intensivo.

9.1.3. Incorporación de Nuevas Funcionalidades

Con base en los comentarios obtenidos durante las entrevistas con el personal de las instituciones de salud, se identificaron funcionalidades adicionales que podrían enriquecer la experiencia de uso del sistema. Una de estas es la integración de un *buzzer* o altavoz en las etiquetas activas, lo que permitiría localizar equipos mediante señales acústicas en caso de que la visualización en el mapa no sea suficiente. Esta característica sería particularmente útil en situaciones donde los equipos están fuera de la vista o en áreas congestionadas.

9.1.4. Diseño Hermético y Resistente a Líquidos

El prototipo presentado no cuenta con un diseño hermético, lo cual representa una limitación en entornos hospitalarios donde los equipos biomédicos pueden estar expuestos a líquidos como medicamentos, sangre o soluciones quirúrgicas. Trabajos futuros deberían enfocarse en desarrollar un encapsulado que cumpla con estándares de protección IP (Ingress Protection), asegurando resistencia al agua, polvo y líquidos corrosivos. Esto no solo incrementaría la durabilidad del sistema, sino que también mitigaría riesgos de cortocircuitos o fallos operativos en condiciones adversas.

9.1.5. Desarrollo de un Receptor Portátil

Otra línea de investigación relevante es el diseño de un receptor portátil con pantalla integrada, que permita a los usuarios realizar inventarios manuales o localizar equipos específicos de manera directa. Este receptor podría funcionar como una herramienta adicional para complementar la interfaz web, proporcionando una experiencia más práctica en áreas donde el acceso a computadoras o dispositivos móviles sea limitado. El receptor debería incluir capacidades como la visualización del nivel de señal RSSI (Received Signal Strength Indicator) y la opción de registrar manualmente los equipos biomédicos por áreas.

9.1.6. Ampliación de Escenarios de Prueba

Finalmente, futuros trabajos podrían enfocarse en realizar pruebas más extensivas y en escenarios hospitalarios reales. Esto permitiría validar el sistema en condiciones operativas diversas, identificar nuevas necesidades o limitaciones y ajustar su diseño en función de los resultados obtenidos. Además, se podrían explorar implementaciones en instituciones con infraestructuras tecnológicas limitadas, evaluando su viabilidad como una solución adaptable a diferentes contextos.

9.1.7. Integración con Tecnologías Emergentes

Adicionalmente, sería interesante investigar la integración del sistema con tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (ML, por sus siglas en inglés). Estas

herramientas podrían utilizarse para predecir patrones de uso de los equipos biomédicos, optimizar su distribución en tiempo real y mejorar la precisión de localización basada en el análisis de datos de múltiples sensores.

Los trabajos futuros abarcan desde la mejora en la seguridad de los datos hasta el desarrollo de hardware más compacto, robusto y funcional. Estas iniciativas no solo potenciarían la utilidad del sistema, sino que también reforzarían su impacto en la eficiencia y seguridad de las operaciones en instituciones de salud.

Anexo 1 – Códigos utilizados en el sistema de localización de equipos biomédicos

El siguiente link pertenece a un repositorio en GitHub público que alberga todos los códigos utilizados para el sistema.

<https://github.com/josepharroyavepuj/Trabajo-de-grado-RFID---WIFI.git>

Anexo 2 – Consentimiento informado resultado encuesta

Declaro que actúo consciente, libre y voluntariamente como participante de la presente encuesta, contribuyendo a la fase de recolección de información. Acepto la información aquí detallada, que también me fue explicada detalladamente.

● Acepto	12
● No acepto	0

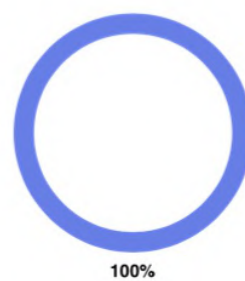


Figura 10.1: Consentimiento informado resultado encuesta

Anexo 3 – Consentimiento informado

Introducción

Mi nombre es Joseph Arroyave Restrepo, soy estudiante del programa de Ingeniería Biomédica en la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Como parte de mi proyecto de grado titulado “Diseño e implementación de un sistema de localización para equipos biomédicos mediante la integración de tecnología RFID y WIFI”, quisiera invitarlo/a a participar en este estudio. Esta investigación tiene como objetivo identificar las necesidades en términos de acceso y localización de equipos biomédicos, para ayudar a establecer los requisitos funcionales y no funcionales del sistema propuesto. Este proyecto tiene una finalidad estrictamente académica, sin patrocinadores externos, y cuenta con el aval del programa de Ingeniería Biomédica de la Universidad.

Declaración del Participante

El proceso de investigación será supervisado por un asesor académico, quien garantizará que las pruebas y procedimientos se realicen de manera correcta y ética. Asimismo, se respetará en todo momento su privacidad. No se publicará información personal ni se revelarán datos que puedan considerarse sensibles. La información recolectada será tratada con el mayor cuidado para proteger su intimidad. Los datos recolectados serán almacenados de manera segura y manejados únicamente por los investigadores responsables del estudio. No se recopilarán datos sensibles sin su consentimiento explícito, y todos los datos serán tratados conforme a la Ley 1581 de 2012 sobre protección de datos personales en Colombia, así como de acuerdo a la resolución 8430 de 1993.

Su participación en este cuestionario tendrá una duración aproximada de 10 minutos. Si tiene alguna pregunta o inquietud sobre esta investigación, puede contactar al equipo investigador a través de los siguientes correos electrónicos:

- valentina.corchuelo@javerianacali.edu.co
- josepharroyave@javerianacali.edu.co
- juanesteban.palacios@javerianacali.edu.co

También puede comunicarse con el Comité de Ética de la Universidad en el correo etica.investigacion@javerianacali.edu.co.

Consentimiento

Declaro que actúo consciente, libre y voluntariamente como participante de la presente encuesta, contribuyendo a la fase de recolección de información. Acepto la información aquí detallada, que también me fue explicada detalladamente.

El objetivo de esta investigación es diseñar e implementar un sistema que facilite la localización de equipos biomédicos utilizando tecnologías RFID y WIFI, mejorando así la eficiencia en su uso y manejo dentro de instituciones de salud. Para ello, se le pedirá que complete un cuestionario en línea, el cual tomará aproximadamente 10 minutos. El cuestionario incluirá preguntas sobre su experiencia y preferencias relacionadas con el acceso a equipos biomédicos y su localización. Es importante destacar que su participación es completamente voluntaria y anónima; no se le solicitará información personal o profesional.

Aunque la participación en este estudio conlleva un riesgo mínimo, existe un bajo riesgo en relación con la confidencialidad de los datos, y se han implementado medidas para proteger su información. Además, si las preguntas del cuestionario le resultan incómodas usted puede optar por no responder cualquier pregunta que le resulte molesta o desistir de su participación sin repercusión alguna, ya que su participación en este estudio es completamente voluntaria y no afectará de ninguna manera su estatus laboral, ni tendrá repercusiones en su trabajo.

Principios Éticos

- **Respeto a la Autonomía:** Usted tiene plena libertad para decidir si desea o no participar en este estudio. La decisión de participar o retirarse del estudio en cualquier momento es completamente suya, y puede hacerlo sin necesidad de justificar su decisión y sin que esto le genere ninguna consecuencia negativa.
- **No Maleficencia:** La investigación está diseñada para evitar cualquier daño a los participantes. No se prevén riesgos significativos, y toda la información proporcionada se manejará con la máxima confidencialidad y seguridad para proteger su bienestar.
- **Beneficencia:** Aunque no hay beneficios materiales directos para los participantes, su contribución será valiosa para el desarrollo de un sistema que potencialmente mejorará la gestión de equipos biomédicos en entornos clínicos, beneficiando a futuras generaciones de pacientes y profesionales de la salud.
- **Justicia:** Todos los participantes tienen derecho a que se les respondan todas sus dudas, se respete la privacidad de sus datos, y se garantice la confidencialidad y el resguardo seguro de la información recolectada. Este trabajo de grado quedará a disposición del público en la biblioteca de la Universidad, respetando siempre la confidencialidad de los participantes.

Confidencialidad

La información proporcionada se manejará de manera confidencial, será anónima y se almacenará en los archivos de los miembros del proyecto. Toda la información recolectada será tratada bajo estricta confidencialidad y se utilizará únicamente con fines académicos, asegurando su custodia segura para evitar cualquier filtración o mal uso.

Firma del Participante: _____

Fecha: _____

Anexo 4 – Pregunta 8 encuesta resultado

8. ¿Está familiarizado con la tecnología RFID (Identificación por Radiofrecuencia)?

● Si	5
● No	7

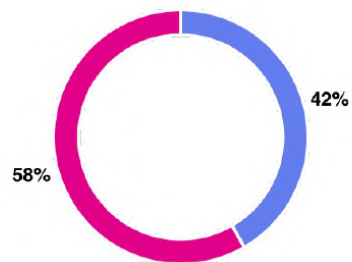


Figura 10.2: Pregunta 8 encuesta resultado

Anexo 5 – Pregunta 10 encuesta resultado

10. ¿En su institución se presentan desafíos relacionados con la gestión y localización de equipos biomédicos?



Figura 10.3: Pregunta 10 encuesta resultado

Anexo 6 – Pregunta 12 encuesta resultado

12. ¿En su institución se lleva a cabo alguna estrategia para conservar la ubicación asignada de los equipos biomédicos?



Figura 10.4: Pregunta 12 encuesta resultado

Anexo 7 – Pregunta 18 encuesta resultado

18. ¿Cuál es su percepción sobre el costo del sistema de localización de equipos biomédicos dentro de una institución?



Figura 10.5: Pregunta 18 encuesta resultado

Anexo 8 – Pregunta 21 encuesta resultado

21. ¿Cuál considera que debería ser la vida útil ideal del dispositivo de localización?

- Menos de 1 año. 1
- De 1 a 3 años. 2
- De 3 a 5 años. 3
- Más de 5 años. 6

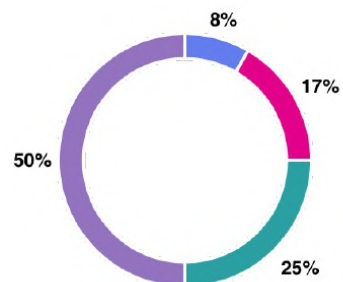


Figura 10.6: Pregunta 21 encuesta resultado

Anexo 9 – Pregunta 22 encuesta resultado

22. ¿Qué nivel de mantenimiento e intervención del dispositivo considera aceptable?

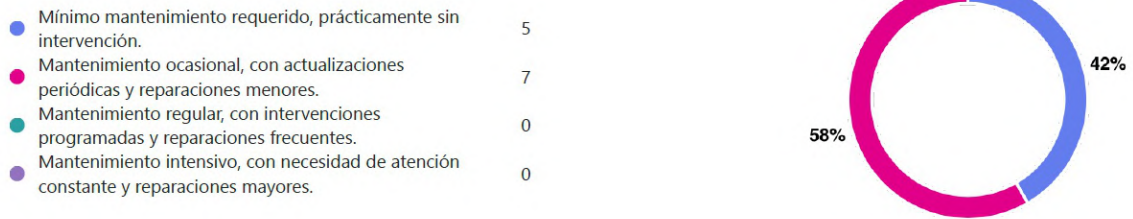


Figura 10.7: Pregunta 22 encuesta resultado

Anexo 10 – Etiqueta activa.



Figura 10.8: Etiqueta activa.

Anexo 11 – Bomba de infusión rastreada.



Figura 10.9: Bomba de infusión rastreada.

Anexo 12 – Ecógrafo rastreado.



Figura 10.10: Ecógrafo rastreado.

Anexo 13 – Tensiómetro manual móvil.



Figura 10.11: Tensiómetro manual móvil.

Anexo 14 – Monitor de signos vitales en mesa auxiliar.

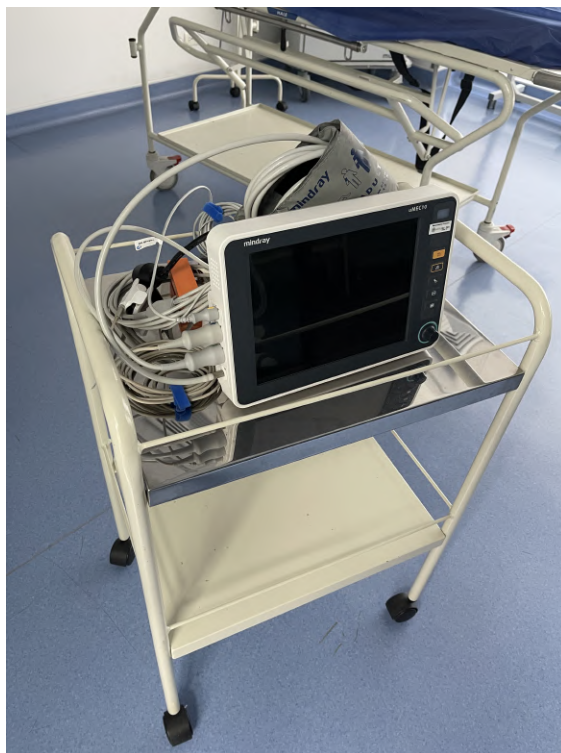


Figura 10.12: Monitor de signos vitales en mesa auxiliar.

Anexo 15 – Electrocardiógrafo en mesa auxiliar.



Figura 10.13: Electrocardiógrafo con etiqueta.

Anexo 16 – Ventilador mecánico.



Figura 10.14: Ventilador mecánico.

Bibliografía

- [1] A. nacional de espectro, “Resolución 105,” 2020.
- [2] S. Studio. (2024) Xiao nrf52840: A small yet powerful ble development board. [Online]. Available: <https://www.seeedstudio.com/XIAO-nRF52840-p-5026.html>
- [3] Seeed Studio, “Xiao seeed nrf52840,” 2025, imágenes extraídas de la página oficial de Xiao Seeed. Disponible en: <https://www.seeedstudio.com> [Accedido el 14-01-2025].
- [4] M. de Salud y Protección Social, “Decreto 4725 del 2005,” 2005.
- [5] C. Ribeiro. (2021) Rapidly indentify and access essential healthcare equipment. [Online]. Available: <https://smartxhub.com/healthcare-asset-tracking-using-rfid/>
- [6] S. Ford. (2009) Nurses waste ‘an hour a shift’ finding equipment. [Online]. Available: <https://www.nursingtimes.net/archive/nurses-waste-an-hour-a-shift-finding-equipment-10-02-2009/>
- [7] M. I. Olarte García and A. M. Aristizabal Urrego, “Monitoreo de equipos hospitalarios en tiempo real,” 2020.
- [8] M. A. Santafé Alfonso *et al.*, “Desarrollo de aplicación móvil para el registro y seguimiento de equipos biomédicos en la clínica colsubsidio calle 100 por medio de internet de las cosas,” 2020.
- [9] Invima. (2019) Comunicaciones del invima, relacionado con el hurto de dispositivos médicos. actualización del 20 de febrero de 2019. [Online]. Available: <https://www.atlantico.gov.co/index.php/tecnovigilancia/alertas-sanitarias/11652-comunicaciones-del-invima-relacionado-con-el-hurto-de-dispositivos-medicos-actualizacion-del-20-de-febrero-de-2019>
- [10] S. H. T. Group. (2022) Bluetooth tagging – evaluation of potential for efficiency gains from tracking medical equipment. shtg assessment. [Online]. Available: <https://shtg.scot/our-advice/bluetooth-tagging-evaluation-of-potential-for-efficiency-gains-from-tracking-medical-equipment/>
- [11] V. N. Carrasco and S. S. Jackson, “Real time location systems and asset tracking: new horizons for hospitals,” *Biomedical instrumentation & technology*, vol. 44, no. 4, pp. 318–323, 2010.
- [12] I. Lopes-Martínez, L. Paradela-Fournier, J. Rodríguez-Acosta, J. L. Castillo-Feu, M. I. Gómez-Acosta, and A. Cruz-Ruiz, “The use of gs1 standards to improve the drugs traceability system in a 3pl logistic service provider,” *Dyna*, vol. 85, no. 206, pp. 39–48, 2018.
- [13] J. Han and H. Kim, “Information system for traceability to protect patient safety: South korean serialization regulation perspective,” *ICIC express letters. Part B, Applications: an international journal of research and surveys*, vol. 11, no. 7, pp. 697–703, 2020.

- [14] L. Gholamhosseini *et al.*, “Hospital real-time location system (a practical approach in health-care): A narrative review article,” *Iranian Journal of Public Health*, vol. 48, no. 4, pp. 593–602, 2019.
- [15] E. C. Jones, S. Gupta *et al.*, “Hospital supply chain management by implementing rfid,” *International Journal of Supply Chain Management*, vol. 4, no. 3, 2015.
- [16] P. Lewis. (2007) Aeroscout wins innovative european healthcare project for patient, staff and asset tracking. Business Wire (a Berkshire Hathaway company). [Online]. Available: <https://www.eleconomista.es/empresas-finanzas/noticias/229350/06/07/AeroScout-Wins-Innovative-European-Healthcare-Project-for-Patient-Staff-and-Asset-Tracking.html>
- [17] B. Bacheldor, “Belgium hospital combines rfid, sensors to monitor heart patients,” *RFID Journal*, 2007.
- [18] A. Manzoor, “Rfid applications in healthcare-state-of-the-art and future trends,” in *Healthcare Ethics and Training: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. IGI Global, 2017, pp. 1490–1512.
- [19] A. Ali, H. Khan, and V. Tully, ““where is the ecg machine?”: a quality improvement project using whatsapp to improve the efficiency in locating shared medical devices in an inpatient unit,” *BMJ Open Quality*, vol. 11, no. 1, p. e001569, 2022.
- [20] J. I. Portillo García, A. B. Bermejo Nieto, and A. M. Bernardos Barbolla, *Tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID): Aplicaciones en el ámbito de la salud*, ser. VT. Autor-Editor, 2009.
- [21] M. Rojas and G. Sullca, “Desarrollo de una aplicación web para el registro de historias clínicas electrónicas (hce) para el hospital nacional guillermo almenara,” *Lima: Universidad Tecnológica del Perú*, 2012.
- [22] R. R. Leon Shklar, *Web Application Architecture Principles, protocols and practices*, 1st ed. England: John Wiley Sons Ltd, 2003.
- [23] J. M. Almaraz Hernández, P. Campos Cantero, and T. Castelo Delgado, “Desarrollo de una aplicación web para la gestión de entornos virtuales,” 2011.
- [24] V. Olaya, “Sistemas de información geográfica,” 2014.
- [25] F. L. O. Rivera, *Base de datos relacionales*. Itm, 2008.
- [26] O. M. de la Salud, *Introducción a la gestión de inventarios de equipo médico - Serie de documentos técnicos de la OMS sobre dispositivos médicos*, 1st ed. Switzerland: Organización Mundial de la Salud, 2012.

- [27] E. Editorial, “Declaración de helsinki de la asociación médica mundial,” *Arbor*, vol. 184, no. 730, p. 349–352, abr. 2008. [Online]. Available: <https://arbor.revistas.csic.es/index.php/arbor/article/view/183>
- [28] M. de Salud, “Resolución 8430 de 1993,” 1993.
- [29] R. J. Romero Coloma. (2019) Implementación de prototipo de un sistema de control y ubicación de inventario de infraestructura tecnológica por medio de radiofrecuencia. [Online]. Available: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/12619/1/T-UCSG-PRE-ING-CIS-222.pdf>
- [30] D. A. Barón Santamaría, “Sistema de monitorización basado en rfid para dispositivos médicos del servicio de cirugía oftalmológica de una institución prestadora de servicios de salud de alta complejidad,” 2020.
- [31] M. Tamayo *et al.*, *El proceso de la investigación científica*. Editorial Limusa, 2001.
- [32] R. K. Yin, *Case study research: Design and methods*. sage, 2009, vol. 5.
- [33] M. de Salud y Protección Social, “Resolución 3100 del 2019,” 2019.
- [34] M. de Salud y Protecci’ Social, “Resolución 4816 del 2008,” 2008.
- [35] —, “Resolución 184 de 2024,” 2024.
- [36] Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA). (2024) Página principal del INVIMA. Consultado el 1 de mayo de 2024. [Online]. Available: <https://www.invima.gov.co/el-instituto/quienes-somos>
- [37] Superintendencia Nacional de Salud. (2024) Página principal de la Superintendencia Nacional de Salud. Consultado el 1 de mayo de 2024. [Online]. Available: <https://www.supersalud.gov.co/>
- [38] Ministerio de Salud y Protección Social. (2024) Página principal del Ministerio de Salud y Protección Social. Consultado el 1 de mayo de 2024. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/>
- [39] C. Anstee, “Rfid medical device management case study: Cambridge university hospitals nhs foundation trust,” *RFID Journal*, pp. 26–27, 2017, extraído del white paper: *Tracking medical devices: The role of active and passive RFID as part of an effective medical device management system* [?]. [Online]. Available: <https://www.rfidjournal.com/wp-content/uploads/2020/01/565.pdf>
- [40] —, “Case studies east kent hospitals university nhs foundation trust operates across three hospital sites: William harvey, queen elizabeth the queen mother and kent and canterbury hospital.” *RFID Journal*, pp. 28–29, 2017, extraído del white paper: *Tracking medical devices: The role of active and passive RFID as part of an effective medical device management system* [?]. [Online]. Available: <https://www.rfidjournal.com/wp-content/uploads/2020/01/565.pdf>

- [41] D. Gómez Tascón, “Actualización de la estrategia de control de inventarios bajo el estándar gs1 de la clínica imbanaco grupo quirón salud,” 2022, pasantía institucional (Ingeniero Biomédico)– Universidad Autónoma de Occidente, 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10614/13644>
- [42] S. A. Avella Otero and S. A. Avella Otero, “Gestión de la documentación de equipos biomédicos para el adecuado manejo, inventario y planeación, en la ips cafam sede el bosque,” 2022.
- [43] S. Bhatia, Z. A. Jaffery, and S. Mehruz, “A comparative study of wireless communication protocols for use in smart farming framework development,” in *2023 3rd International Conference on Intelligent Communication and Computational Techniques (ICCT)*, 2023, pp. 1–7.
- [44] Markets and Markets. (2023) Rtls for healthcare companies - securitas healthcare, llc (us), zebra technologies corporation (us) and aruba networks (us) are the key players. [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com/ResearchInsight/rtls-healthcare-market.asp>
- [45] R. Porkodi and V. Bhuvanewari, “The internet of things (iot) applications and communication enabling technology standards: An overview,” in *Intelligent Computing Applications (ICICA), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 324–329.
- [46] F. Samie, L. Bauer, and J. Henkel, “Iot technologies for embedded computing: A survey,” in *Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ ISSS), 2016 International Conference on*, 2016, pp. 1–10.
- [47] M. of Economic Affairs, “Internet of things in the netherlands: Applications, trends, and potential impact on radio spectrum,” 2015.
- [48] K. T. Zemedu, “Explosion of the internet of things: What does it mean for wireless devices?” *Keysight Technologies*, 2015.
- [49] C. Goursaud and J.-M. Gorce, “Dedicated networks for iot: Phy/mac state of the art and challenges,” *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 2015.
- [50] C. Gomez and J. Paradells, “Wireless home automation networks: A survey of architectures and technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 6, 2010.
- [51] A. D. Rathnayaka, V. M. Potdar, and S. J. Kuruppu, “Evaluation of wireless home automation technologies,” in *Digital Ecosystems and Technologies Conference (DEST), 2011 Proceedings of the 5th IEEE International Conference on*, 2011, pp. 76–81.
- [52] A. Aragues, I. Mart’inez, P. Del Valle, P. Muñoz, J. Escayola, and J. D. Trigo, “Trends in entertainment, home automation and e-health: Toward cross-domain integration,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 6, 2012.
- [53] P. López, D. Fernández, A. J. Jara, and A. F. Skarmeta, “Survey of internet of things technologies for clinical environments,” in *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2013 27th International Conference on*, 2013, pp. 1349–1354.

- [54] R. Tabish, A. B. Mnaouer, F. Touati, and A. M. Ghaleb, "A comparative analysis of ble and 6lowpan for u-healthcare applications," in *GCC Conference and Exhibition (GCC), 2013 7th IEEE*, 2013, pp. 286–291.
- [55] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.
- [56] M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Review of communication technologies for smart homes/building applications," in *Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA), 2015 IEEE*, 2015, pp. 1–6.
- [57] S. S. I. Samuel, "A review of connectivity challenges in iot-smart home," in *Big Data and Smart City (ICBDSC), 2016 3rd MEC International Conference on*, 2016, pp. 1–4.
- [58] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area networks: An overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017.
- [59] R. J. Azamuddin Bin Ab Rahman, "Comparison of internet of things (iot) data link protocols," 2015.
- [60] L. Alliance, "A technical overview of lora and lorawan," November 2015.
- [61] S. Shah and T. M., "Security of nfc data," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 6, (ISSN: 2277 128X).
- [62] J. Hughes, J. Yan, and K. Soga, "Development of wireless sensor network using bluetooth low energy (ble) for construction noise monitoring," *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 1379–1405, 2015.
- [63] A. Ahmad, *Wireless and mobile data networks*. John Wiley & Sons, 2005.
- [64] C. Gomez, J. Oller, and J. Paradells, "Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology," *Sensors*, vol. 12, no. 9, pp. 11 734–11 753, 2012.
- [65] R. Sanchez-Iborra and M.-D. Cano, "State of the art in lp-wan solutions for industrial iot services," *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 708, 2016.
- [66] G. Cerruela García, I. Luque Ruiz, and M. Gómez-Nieto, "State of the art, trends and future of bluetooth low energy, near field communication and visible light communication in the development of smart cities," *Sensors*, vol. 16, no. 11, p. 1968, 2016.
- [67] L. Frenzel, "The fundamentals of short-range wireless technology," October 2012.
- [68] V. Alarcon-Aquino, M. Dominguez-Jimenez, and C. Ohms, "Design and implementation of a security layer for rfid systems," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 69–82, 2008.

- [69] M. Amin, M. Reaz, J. Jalil, and L. Rahman, "Digital modulator and demodulator ic for rfid tag employing dsss and barker code," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 10, no. 6, pp. 819–825, 2012.
- [70] A. Abdollahi, K. Rejeb, A. Rejeb, M. M. Mostafa, and S. Zailani, "Wireless sensor networks in agriculture: Insights from bibliometric analysis," *Sustainability*, vol. 13, no. 21, p. 12011, Oct 2021.
- [71] R. Sokullu, "Lora based smart agriculture network," in *2022 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, 2022.
- [72] M. Ballerini, T. Polonelli, D. Brunelli, M. Magno, and L. Benini, "Experimental evaluation on nb-iot and lorawan for industrial and iot applications," in *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2019.
- [73] T. A. Khoa, M. M. Man, T.-Y. Nguyen, V. Nguyen, and N. H. Nam, "Smart agriculture using iot multi-sensors: A novel watering management system," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 8, no. 3, p. 45, 2019.
- [74] E. Bäumker, A. M. Garcia, and P. Woias, "Minimizing power consumption of lora® and lorawan for low-power wireless sensor nodes," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1407, no. 1, p. 012092, 2019.
- [75] *IEC 60601-1-2: Medical electrical equipment - Part 1-2: General requirements for basic safety and essential performance - Collateral Standard: Electromagnetic disturbances - Requirements and tests*, International Electrotechnical Commission Std., 2014, standard, Geneva.
- [76] Arduino, "Arduino esp32 nano," 2025, imágenes extraídas de la página oficial de Arduino. Disponible en: <https://www.arduino.cc> [Accedido el 14-01-2025].