

Desarrollo de un dispositivo “TAG WiFi” para localización activa de equipos médicos en ambientes hospitalarios

Development of a “WiFi Tag” device for active location of medical equipment in hospital environments

Javier Díaz V.¹

 <https://orcid.org/0009-0003-0516-4346>

Pablo Roncagliolo B.^{1*}

 <https://orcid.org/0000-0001-6208-8843>

Recibido 12 de octubre de 2024, aceptado 28 de noviembre de 2024

Received: October 12, 2024

Accepted: November 28, 2024

RESUMEN

El Sistema de Información y Gestión de Equipamiento Médico (SIGEM-UV) desarrollado por la Escuela de Ingeniería Biomédica de la Universidad de Valparaíso, busca mejorar la gestión de equipos médicos a través de diversas herramientas y sistemas. Entre estos, destaca el módulo LocDEM, enfocado en la localización activa de equipamiento médico utilizando tecnología TAG WiFi. Este proyecto aborda la problemática de localización de equipamiento médico en establecimientos de salud, lo cual interfiere en el flujo de trabajo, consume tiempo y, en algunos casos, deriva en el robo de equipos. Aunque existen soluciones comerciales, estas requieren una infraestructura específica, presentando una barrera de entrada significativa. El proyecto TAG WiFi de SIGEM-UV propone una solución que utiliza la infraestructura WiFi existente, minimizando costos adicionales. Se desarrolló un sistema de localización basado en un microcontrolador conectado a un servidor web con una interfaz de usuario intuitiva. Este dispositivo, de tamaño reducido y mejor autonomía, recoge datos de redes WiFi cercanas y los envía al servidor, donde se procesan para determinar la ubicación del equipo. La interfaz de usuario permite visualizar la ubicación en un plano del edificio, facilitando la identificación rápida del equipo. Los resultados principales muestran la viabilidad del diseño y su implementación, y niveles eficacia en la localización adecuados para entornos hospitalarios. Este sistema presenta una alternativa viable y de bajo costo para la gestión y localización de equipos médicos en instituciones de salud.

Palabras clave: Localización activa, TAG WiFi, gestión de equipos médicos, infraestructura WiFi.

ABSTRACT

The Medical Equipment Information and Management System (SIGEM-UV), developed by the Biomedical Engineering School of the Universidad de Valparaíso, aims to improve medical equipment management through various tools and systems. Among these, the LocDEM module stands out. It focuses on the active localization of medical equipment using WiFi TAG technology. This project addresses the issue of locating medical equipment in healthcare facilities, which interferes with workflow, consumes time, and, sometimes leads to equipment theft. Although commercial solutions exist, they require specific infrastructure, presenting a significant barrier to entry. The SIGEM-UV WiFi TAG project offers a solution that utilizes the existing WiFi infrastructure, minimizing additional costs. A localization system was developed based on a microcontroller connected to a web server with an intuitive user interface. This small-sized device with improved autonomy collects data from nearby WiFi networks and sends it to the server, where it is

¹ Universidad de Valparaíso. Escuela de Ingeniería Civil Biomédica. Valparaíso, Chile.

E-mail: javier.diazv@alumnos.uv.cl; pablo.roncagliolo@uv.cl

* Autor de correspondencia: pablo.roncagliolo@uv.cl

processed to determine the equipment's location. The user interface allows the location to be displayed on a building plan, facilitating the quick identification of the equipment. The main results demonstrate the feasibility of the design and its implementation, with adequate localization levels suitable for hospital environments. This system presents a viable low-cost alternative for managing and localizing medical equipment in healthcare institutions.

Keywords: Active location, TAG WiFi, medical equipment management, WiFi infrastructure.

INTRODUCCIÓN

El Sistema de Información y Gestión de Equipamiento Médico (SIGEM-UV) es un proyecto de la Escuela de Ingeniería Biomédica de la Universidad de Valparaíso [1]. Su objetivo es desarrollar herramientas y sistemas que optimicen la gestión de equipos médicos, basándose en las experiencias, mejores prácticas y recomendaciones de organismos técnicos nacionales e internacionales [2].

En particular el módulo propuesto en este trabajo, denominado TAG WiFi, consiste en un dispositivo activo, basado en un microcontrolador, que mediante el análisis de la intensidad de señal recibida de los puntos de acceso WiFi disponibles en un recinto hospitalario, logre estimar el piso y el sector aproximado en el cual se encuentra ubicado un equipo médico específico. Los equipos que normalmente se requieren ubicar, son aquellos de tipo portátil tales como, ecógrafos, monitores multiparámetros y equipos de cirugía, que se desplazan entre diferentes pabellones, bodegas o servicios de un hospital.

Existen soluciones comerciales como el “T12s Asset Tag” de Securitas Healthcare [3], el “Beeks Tag” de HDI Global [4] y el “Eye Beacon” de Teltonika [5], que utilizan principalmente tecnología Bluetooth. Aunque estas opciones presentan un bajo consumo energético, requieren la instalación de una infraestructura específica, esto es, una red de balizas y antenas, distribuidas en todos los recintos de la institución, lo que genera una limitante muy significativa para su implementación, sobre todo en hospitales en funcionamiento. Además de Bluetooth, otras tecnologías como Zigbee, RFID y WSN (Wireless Sensor Networks) han sido propuestas para la localización de equipos en entornos de salud. Zigbee y WSN ofrecen redes de nodos interconectados con bajo consumo energético, pero su cobertura limitada y complejidad de instalación pueden dificultar su implementación. Por otro lado,

RFID proporciona una localización eficiente en corto alcance, pero su precisión depende en gran medida de la infraestructura instalada y la proximidad a los lectores.

En investigaciones previas, se ha explorado la localización activa en entornos de salud utilizando sistemas como LAURA, que combina WSN y sensores portátiles para ofrecer una precisión de localización promedio inferior a 2 metros en el 80% de los casos [6]. A pesar de la precisión obtenida, la necesidad de infraestructura adicional y la complejidad de implementación continúan siendo un desafío significativo. Otro estudio propone un método eficiente basado en el ángulo de incidencia de las señales (AoA) para la localización en interiores, empleando puntos de acceso Wi-Fi especiales de múltiples antenas con dirección conocida. Esta metodología logra un error de localización inferior a 2.5 metros en entornos de línea de vista, superando algunas de las limitaciones de los métodos basados en RSSI, pero incorporando la complejidad de utilizar puntos de acceso especiales con los costos de instalación que ello implica [7].

Además, la integración de tecnologías RFID y redes de sensores permite mejorar la precisión y robustez en la localización en interiores. Se ha demostrado que el uso de un sistema híbrido de RFID y WSN puede alcanzar una precisión de hasta 0,45 metros, superando significativamente las soluciones basadas únicamente en RFID [8]. No obstante, la implementación de estos sistemas requiere una infraestructura densa y costos elevados, lo que limita su aplicación en entornos hospitalarios.

Por otro lado, en un entorno hospitalario, la interferencia electromagnética y los altos costos de infraestructura limitan la aplicación de ciertas tecnologías. El uso de RFID en frecuencias UHF para la localización de dispositivos médicos ha sido explorado, logrando superar las restricciones

de interferencia y asegurar un entorno seguro para los pacientes [9]. Sin embargo, la implementación en entornos clínicos sigue enfrentando desafíos significativos debido a la complejidad de la infraestructura y la necesidad de minimizar la interferencia en dispositivos críticos.

El proyecto TAG WiFi, vinculado a SIGEM-UV, ha avanzado en pruebas de concepto, mediciones de RSSI (indicador de intensidad de la señal recibida) y trilateración basada en WiFi. Sin embargo, estos avances iniciales se centraron en el uso de dispositivos con tecnología Raspberry Pi, que aunque útil para realizar pruebas de concepto, no es viable para su implementación masiva en dispositivos médicos debido a su gran tamaño, alto costo y baja autonomía [10].

En este contexto, se propone un sistema de localización activa basado en TAG WiFi, el cual es un microcontrolador conectado a un servidor web y una interfaz de usuario. Este dispositivo destaca por su tamaño reducido, mejor autonomía y facilidad de uso e instalación, requiriendo únicamente el TAG WiFi, la infraestructura WiFi existente en la institución y un catastro de los SSID (identificador de la red) y MAC (dirección hexadecimal de la red) de cada uno de los puntos de acceso WiFi disponibles. A diferencia de las soluciones comerciales basadas en Bluetooth o RFID, este sistema aprovecha la infraestructura WiFi existente, eliminando la necesidad de implementar una infraestructura adicional, como balizas o sensores, y reduciendo significativamente los costos.

El objetivo general de este proyecto es desarrollar e implementar un sistema costo-eficiente de localización activa de equipos médicos basado en tecnología TAG WiFi. Los objetivos específicos incluyen el desarrollo y evaluación del hardware que compone el TAG WiFi, el desarrollo del software y la interfaz de usuario web, así como el diseño de un modelo de bajo consumo para maximizar la autonomía del TAG WiFi. Este enfoque busca proporcionar una alternativa más accesible y eficiente en comparación con otras tecnologías de localización disponibles en el mercado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo corresponde a un proyecto de desarrollo experimental, ya que se centra en el diseño,

implementación y evaluación de un sistema de localización activa de equipos médicos utilizando tecnología TAG WiFi. El proyecto se llevó a cabo en varias etapas, que incluyeron la selección y configuración de hardware, el desarrollo de software y la integración del sistema en un entorno controlado. A continuación, se detallan los materiales utilizados y los métodos empleados para llevar a cabo cada una de estas etapas.

Funcionamiento del TAG WiFi

El TAG WiFi es una herramienta de localización activa que se basa en la infraestructura WiFi disponible en el establecimiento objetivo, sin la necesidad de inversión de una nueva infraestructura exclusiva para su utilización. Su funcionamiento se basa en el propio TAG WiFi y un servidor Web en donde se aloja la interfaz de usuario, la base de datos con la información de la red WiFi y se realiza la lógica computacional de estimación de la ubicación del TAG WiFi en los diferentes pisos del recinto.

El TAG WiFi obtiene directamente el porcentaje de batería y su dirección MAC. Adicionalmente, recoge todas las redes WiFi cercanas con su SSID, MAC y señal RSSI, se conecta a una red WiFi establecida con acceso a internet y envía todos estos datos al servidor Web. Por otro lado, el servidor Web se encarga de recibir dicha información para procesar e interpretar. Dentro de dicha interpretación, el servidor posee una interfaz de usuario en donde se selecciona el dispositivo a rastrear, y dentro de un plano por piso del edificio, se generan coincidencias de las MACs leídas por el TAG y las pertenecientes a los puntos de acceso WiFi (*access point* AP) del edificio para mostrar de manera gráfica en qué piso se encuentra el dispositivo y cerca de qué repetidores WiFi está como se ilustra en la Figura 1.

Requisitos y materiales para la implementación

Para la implementación de esta tecnología es necesario tener en cuenta los siguientes requisitos y materiales:

- TAG WiFi con Batería Cargada al 100%: Se seleccionaron TAGs en dos versiones, uno con batería de 500 mAh y otro con batería de 2000 mAh, asegurando que estén completamente cargados y con el código actualizado para conectarse a la red WiFi definida para el proyecto.



Figura 1. Esquema de funcionamiento del TAG WiFi.

- Red WiFi Disponible: La implementación se llevó a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso. Se utilizó la red WiFi “Visitas UV” para la conexión y la red “Alumnos UV” para el análisis de MACs. Es crucial contar con una red de conexión corporativa, que tenga el mismo nombre y contraseña en todos los pisos donde se localiza el TAG WiFi.
- Dispositivo Médico para Rastreo: Aunque se planea asociar el TAG WiFi a un equipo o dispositivo médico para su rastreo, en este caso por simplificación, el dispositivo se usó de forma independiente para facilitar su movilidad dentro del edificio.
- Planos Actualizados por Piso del Edificio: Es esencial contar con planos actualizados de cada piso del edificio para que el usuario pueda posicionar adecuadamente el dispositivo dentro de las instalaciones.
- Access Points (AP) por Piso: Para garantizar una localización adecuada, se requiere al menos a dos access points por piso del edificio. Los algoritmos de detección se basan en la señal RSSI de cada AP para estimar la posición.
- Levantamiento de MACs WiFi de Access Points: Se realizó un levantamiento manual de cada access point, extrayendo su MAC y ubicación estimada respecto al plano del piso. Para esta tarea, se utilizó un dispositivo programable M5stack Core, el cual fue programado con una interfaz de usuario que, al presionar un botón, mostraba en pantalla las redes WiFi disponibles junto con su RSSI, MAC y SSID.

Este dispositivo se coloca cerca del AP a analizar, se presiona el botón y se registran las redes WiFi emitidas por el AP junto con los datos mencionados.

La información relevante de dicho AP (MAC) se guarda en la base de datos, como se ilustra en la Figura 2.

Selección de hardware

La configuración de hardware seleccionada para este dispositivo se originó a partir de la necesidad de reducir el tamaño y el consumo de energía del sistema inicial basado en una Raspberry Pi [10], cuyas dimensiones son de 85 x 56 x 17 mm sin batería. Aunque la Raspberry Pi es útil, su tamaño, costo y baja autonomía la hacen inviable para dispositivos médicos portátiles. Para abordar estos desafíos, se planteó el uso de un microcontrolador en lugar de un procesador complejo como el Raspberry Pi.



Figura 2. M5 stack core utilizado para levantamiento de MACs.

Inicialmente, se evaluó el uso de un Arduino con un módulo WiFi. Sin embargo, se identificaron opciones más eficientes, como los microcontroladores ESP32 de la marca Espressif. Los ESP32 son altamente versátiles, permiten el desarrollo de proyectos IoT de manera sencilla, y destacan por su tamaño reducido, bajo consumo energético y menor precio en comparación con una Raspberry Pi. Tras evaluar las necesidades del proyecto, se determinó que los microcontroladores ESP32 cumplieran con las principales características requeridas: conectividad WiFi, tamaño compacto, bajo consumo de energía, menor costo y con la posibilidad de agregar un circuito integrado para conexión de batería. La investigación se centró en encontrar un microcontrolador en formato pequeño que pudiera ser colocado en un dispositivo por un largo periodo de tiempo, sin ser invasivo para el equipo médico ni interferir con su uso cotidiano (Tabla 1).

En una fase inicial, se comenzó con un ESP Wroom32 de la marca WeMos (Figura 3a) con módulo de batería 18650 incluido, que cumplía con las cualidades de WiFi, autonomía y bajo costo (US\$23 sin batería), pero sus dimensiones son demasiado grandes (91 mm x 30 mm x 20 mm). Posteriormente, se optó por un ESP32 Lolin32 (Figura 3b), que también cumple con las cualidades de WiFi, conexión de batería para

funcionamiento autónomo, menor costo (US\$15 sin batería) y un tamaño de 25 mm x 40mm x 8mm. Sin embargo, este no poseía un divisor de voltaje incorporado en el circuito requerido para la medición del voltaje de la batería.

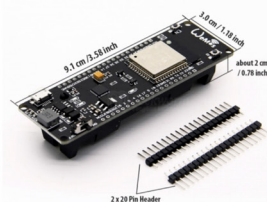
Finalmente se eligieron los modelos “Adafruit QT Py ESP32-S3 WiFi Dev Board with STEMMA QT” y “Adafruit QT Py ESP32-S2 WiFi Dev Board with STEMMA QT” debido a su conectividad WiFi, tamaño compacto de 21.7 mm x 17.8 mm x 5.7 mm, y compatibilidad con un módulo de carga que no incrementa significativamente su tamaño, el “Adafruit LiIon or LiPoly Charger BFF Add-On for QT Py”. con un costo de US\$14 y US\$5 respectivamente sin batería. Estos microcontroladores también tienen la capacidad de entrar en un modo de bajo consumo “*deep sleep*” con un consumo mínimo de 70 uA [11].

Al elegir dos componentes compatibles y de la misma marca, el módulo cargador de baterías se conecta como una *shield* a los mismos pines del dispositivo, con un divisor de voltaje conectado al pin A2 para medir el nivel de la batería (Figura 3c).

Otro aspecto importante del hardware es el empaquetamiento del circuito dentro de una carcasa

Tabla 1. Comparación entre diferentes ESP32.

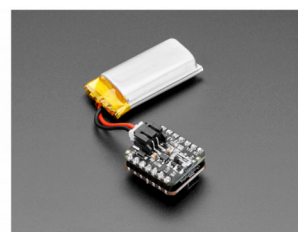
Dispositivo	Costo [US \$]	Dimensiones [mm]	Características	Observaciones
ESP Wroom 32 (WeMos).	US \$23	91 x 30 x 20	WiFi, autonomía, bajo costo, conexión de batería incluida.	Tamaño demasiado grande.
ESP32 Lolin32.	US \$15	25 x 40 x 8	WiFi, conexión de batería para funcionamiento autónomo, menor costo.	No posee divisor de voltaje incluido.
Adafruit QT Py ESP32-S3/ S2 WiFi Dev Board with STEMMA QT.	US \$14	21,7 x 17,8 x 5,7	WiFi, tamaño compacto, compatibilidad con módulo de carga.	Tamaño reducido, buena autonomía.



a. ESP Wroom 32.



b. ESP32 Lolin32.



c. ESP32-S2/S3 + Cargador de batería.

Figura 3. Diferentes modelos de ESP32.

protectora. Para esto, se utilizó el programa Autodesk Fusion 360 (Figura 4a) para el modelado digital en 3D. Posteriormente, la carcasa fue impresa en 3D utilizando PLA en una impresora Creality K1 Max (Figura 4b), creando así un modelo físico robusto y funcional para su uso en un contexto real.

Desarrollo del firmware (Microcontrolador)

El desarrollo del firmware necesario para el microcontrolador ESP32 fue programado C++ utilizando el entorno de desarrollo Arduino. Para lograr esto, se utilizaron varias bibliotecas esenciales, entre ellas WiFi.h y HTTPClient.h. La biblioteca WiFi.h proporciona las funciones necesarias para la conexión a redes WiFi, mientras que HTTPClient.h permite realizar solicitudes HTTP, necesarias para enviar datos al servidor web.

Este firmware permite que el ESP32 se conecte a una red WiFi, escanee las redes disponibles, y envíe estos datos a un servidor web, entrando en modo *deep sleep* para ahorrar energía entre cada ciclo de transmisión de datos.

Para una mejor comprensión del firmware, se presenta el diagrama de flujo en la Figura 5. El proceso comienza con la conexión a la red WiFi y se inicia un temporizador de 10 segundos. Si el dispositivo no logra conectarse a la red dentro de ese tiempo, entra en modo *deep sleep* para ahorrar batería. Si el dispositivo se conecta a la red antes de los 10 segundos, continúa con el flujo normal, realizando un escaneo de todas las redes cercanas. Los datos recopilados se organizan en un arreglo en donde se registra la MAC del propio TAG WiFi que transmite, su nivel de batería y el SSID, MAC y RSSI de todas las redes encontradas, para luego enviarlas al servidor mediante una petición GET. Posteriormente, el dispositivo entra en modo *deep sleep* por un tiempo definido, repitiendo este ciclo hasta que la batería se agote.

Optimización de batería

Dado que uno de los objetivos del proyecto es desarrollar un modelo de bajo consumo para optimizar la batería y maximizar su duración con una sola carga, se diseñó un plan para medir el

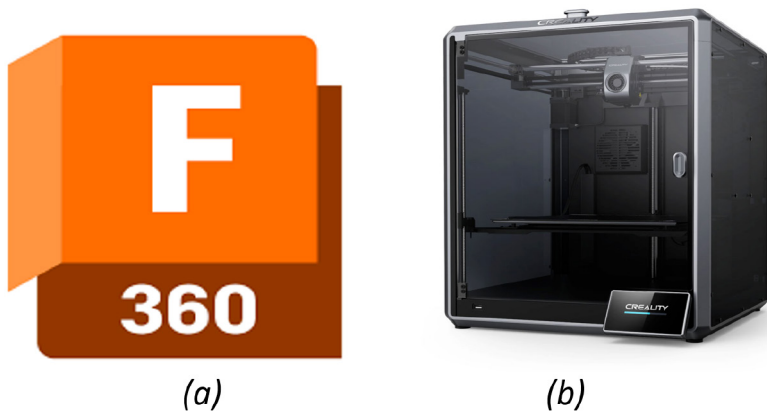


Figura 4. Herramientas utilizadas para el empaquetamiento del circuito.

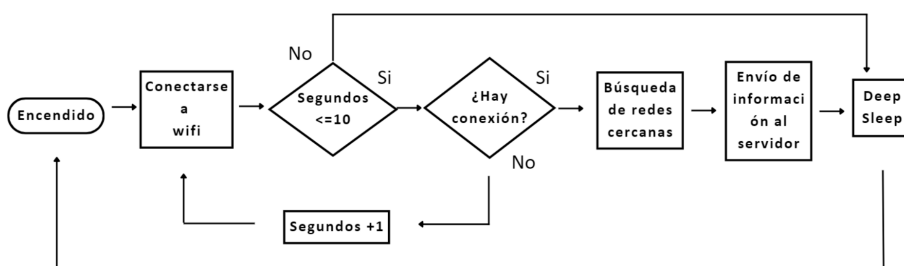


Figura 5. Diagrama de flujo de firmware TAG WiFi.

consumo energético del dispositivo utilizando el instrumento Joule Scope[12], que mide el consumo de corriente en función del tiempo. Esta medición se realizó conectando la fuente de poder del dispositivo (batería) a los terminales -IN e +IN, y los terminales -OUT y +OUT al conector de batería del TAG WiFi (Figura 6a), para luego hacer la conexión directa del dispositivo de medición al computador con la aplicación de Joule Scope en ejecución.

Luego de optimizar el código para reducir los tiempos de conexión a la red WiFi y transmisión de datos, se decidió optimizar la frecuencia de encendido, transmisión y entrada en modo *deep sleep* basándose en las mediciones obtenidas con el Joule Scope para cada ciclo de escaneo y transmisión. Aquí se analizó el comportamiento de un TAG WiFi en modo de conexión a una red, transmisión y *deep sleep*, para luego analizar el consumo y tiempo observando el área bajo la curva de cada una de las fases (Figura 6b).

A partir de las mediciones realizadas, se obtuvieron diversos parámetros relacionados con el consumo energético del dispositivo, como la carga consumida durante la transmisión de datos y la carga consumida en modo *deep sleep*, ambos medidos en coulombs.

Además, se registró el tiempo de transmisión de datos y se verificó el tiempo de *deep sleep* configurado en el firmware, ambos medidos en segundos. Con esta información, se pudo establecer la ecuación (1) para luego calcular el tiempo óptimo de *deep sleep*, basado en el tiempo final de duración esperado (T_f) del TAG WiFi.

De acuerdo con la nomenclatura expresada en la Figura 7, a partir de una regla de proporcionalidad, se obtiene la corriente promedio I_{prom} , que se consume en cada ciclo de transmisión-hibernación, como se expresa en la ecuación (1):

$$I_{prom} = \frac{I_{wifi}T_{wifi} + I_{sleep}T_{sleep}}{T_{wifi} + T_{sleep}} \quad (1)$$

Considerando una carga conocida de la batería C_{bat} expresada normalmente en miliamperes por unidad de tiempo, se puede estimar su duración dividiendo por el consumo promedio de corriente I_{prom} de cada ciclo. De esta forma el tiempo de duración final estimado T_f , se puede determinar según la ecuación (2):

$$T_f = \frac{C_{bat}}{(I_{wifi} \cdot T_{wifi} + I_{sleep} \cdot T_{sleep})} \cdot (T_{wifi} + T_{sleep}) \quad (2)$$

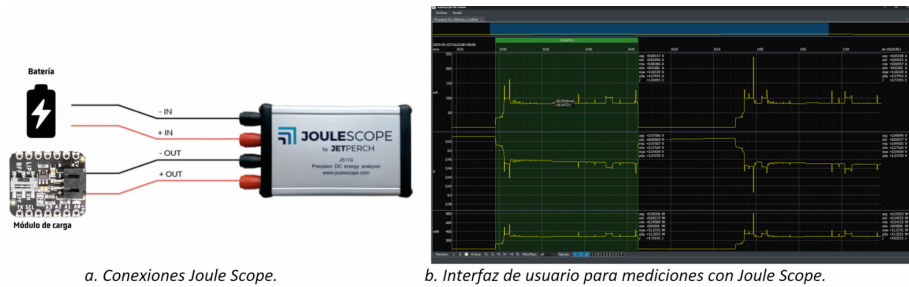


Figura 6. Mediciones con Joule Scope [12] en transmisión de datos ESP32 S2 y S3.

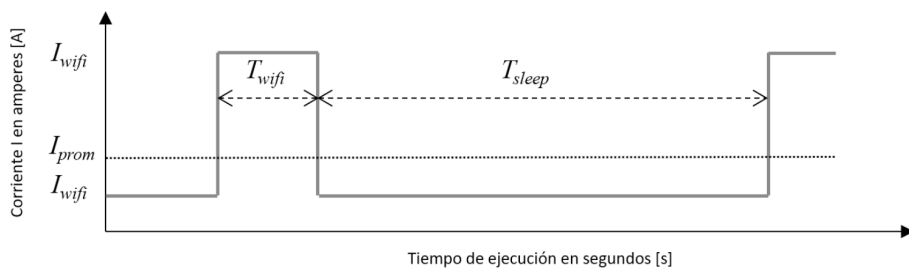


Figura 7. Esquema de ciclo de consumo de corriente según tiempo de ejecución.

En donde,

- T_f = Tiempo esperado de duración en segundos [s].
- T_{wifi} = Tiempo de transmisión en segundos [s].
- T_{sleep} = Tiempo de hibernación del microcontrolador en segundos [s].
- C_{bat} = Carga de la batería en miliamperes segundos [mA/s].
- I_{wifi} = Corriente consumida en transmisión en miliamperes [mA].
- I_{sleep} = Corriente consumida en hibernación en miliamperes [mA].

Finalmente, bajo un desarrollo algebraico simple, se obtiene una fórmula general para estimar el tiempo óptimo T_{sleep} en base al tiempo final de duración esperado T_f , dado el tiempo regular de transmisión T_{wifi} como se representa en la ecuación (3):

$$T_{sleep} = \frac{C_{bat} \cdot T_{wifi} - T_f \cdot I_{wifi} \cdot T_{wifi}}{T_f \cdot I_{sleep} - C_{bat}} \quad (3)$$

Aplicación web

Para la aplicación web, se tiene una estructura basada en un servidor Linux estándar en el dominio <https://www.sigem-uv.cl>. La programación del servidor se basa en la tecnología PHP, Javascript, HTML y CSS. La lógica de programación se realiza con PHP, las animaciones y actualizaciones de datos con JavaScript, la estructura de las páginas web con HTML y los estilos con CSS y Bootstrap para aspectos de usabilidad.

Procesamiento de datos del TAG

Como ya se sabe que existe una interacción entre el firmware del TAG WiFi y el servidor web como se mostró en la Figura 1. Es necesario explicar cómo el servidor interactúa con la información que entrega el TAG. Dentro del servidor de SIGEM-UV existe un módulo dedicado a la localización activa. Aquí existe un código PHP encargado de recopilar todas las peticiones GET que realiza el TAG, agregarles

fecha y hora de la transmisión y guardarlas en un archivo CSV para luego ser analizadas por el servidor (Figura 8).

Interacción entre códigos

Para una mejor ilustración del funcionamiento del código de la aplicación web y su interfaz de usuario, se ha elaborado el diagrama de la Figura 9. Este diagrama muestra la interacción entre los diferentes componentes del código, en donde se distinguen tres principales acciones: la carga inicial de la interfaz, luego la carga de dispositivos disponibles y luego la selección de dispositivos.

- Carga Inicial: En la primera etapa, cuando el usuario accede a la página web del módulo, se carga el archivo `index.php`. Este archivo realiza la petición de gestión de información de la interfaz llamando al archivo `main.js` que se encarga de gestionar la interfaz de usuario, configurando los elementos necesarios para que el sistema funcione correctamente. Esta etapa prepara el entorno visual y funcional para la interacción del usuario.
- Carga de dispositivos disponibles: Una vez que la interfaz está configurada, `main.js` envía una solicitud a `api.php` para obtener la lista de direcciones MAC de los TAG WiFi asociados a los dispositivos disponibles. `api.php` procesa esta solicitud interactuando con la base de datos MySQL, de donde extrae la información de las MACs y dispositivos disponibles. Después de obtener la información, `api.php` la devuelve a `main.js`, que actualiza el selector de dispositivos en la interfaz de usuario, permitiendo al usuario ver y seleccionar entre las MACs disponibles.
- Selección de Dispositivo: Cuando el usuario selecciona un dispositivo del menú desplegable, `main.js` envía una solicitud a `api.php` solicitando información específica sobre el dispositivo seleccionado. `api.php` procesa esta solicitud



Figura 8. Representación de procesamiento de datos del TAG WiFi.

Carga inicial**Carga de dispositivos disponibles****Selección de dispositivo**

Figura 9. Interacciones entre códigos PHP y JS.

extrayendo la información relevante de la base de datos. Durante este proceso, se analiza la última transmisión del dispositivo seleccionado, filtrando específicamente por la red utilizada. Luego, se ordenan todas las redes WiFi detectadas desde la mayor hasta la menor intensidad de señal recibida y se comparan las MACs de los puntos de acceso disponibles en la base de datos como se puede ver en la parte inferior izquierda de la Figura 10.

Mediante un análisis simple, se determina el piso en el que se encuentra el dispositivo basándose en la mejor

señal RSSI que coincide entre la última transmisión y los datos de la base de datos. Posteriormente, api.php envía esta información de vuelta a main.js. Una vez que main.js recibe los datos, actualiza la interfaz de usuario mostrando la información del dispositivo seleccionado, incluyendo las redes WiFi detectadas en el área, el piso en el que se encuentra, la fecha y hora de la última transmisión y el nivel de batería.

Medición de RSSI

Para este análisis, se realizó un levantamiento de las señales RSSI en los pasillos de tres pisos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso

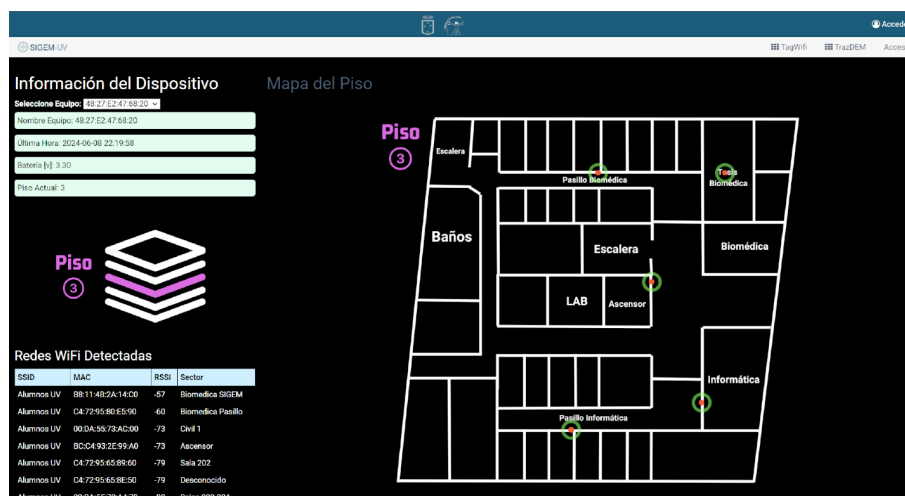


Figura 10. Interfaz de usuario para localización de dispositivos.

(recinto de 6 pisos y aproximadamente 9 mil m²), con el objetivo de visualizar la “iluminación WiFi” de cada piso y entender la relación e interferencia de las redes de un piso y otro. Se diseñó un experimento para tomar muestras de señales RSSI cada 4 metros cuadrados, creando un patrón de “tablero de ajedrez” (Figura 11a) en cada piso, con columnas etiquetadas desde la letra A hasta V y filas numeradas del 1 al 20. Para llevar a cabo este levantamiento, se utilizó un plano esquemático del edificio y se desarrolló un programa especial para el dispositivo M5 Core, que incluye una interfaz que permite seleccionar el piso y la coordenada alfanumérica de la posición, para luego realizar la lectura de todas las redes WiFi en esa ubicación (Figura 11b) y enviarlas al servidor para ser guardadas en un archivo CSV. Este procedimiento se aplicó en todos los pasillos y salas accesibles de los pisos 1, 2 y 3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hardware

El hardware seleccionado es un “Adafruit QT Py ESP32-S2 WiFi Dev Board with STEMMA QT” y

un “Adafruit LiIon or LiPoly Charger BFF Add-On for QT Py”.

Con la selección del dispositivo, se procedió a la unión del ESP32 con su módulo de carga como se aprecia en la Figura 12.

Una vez que el ESP32 se integró con su módulo de carga, se procedió a utilizarlo con baterías de 2.000 mAh y 500 mAh. Debido a la necesidad de acomodar dos tamaños de batería diferentes, se diseñaron dos tipos de carcasas, como se muestra en la Figura 13a. Las dimensiones finales de las carcasas fueron de 70 x 70 x 28,5 mm para el dispositivo con la batería de 2000 mAh y 55 x 55 x 25 mm para el dispositivo con la batería de 500 mAh. Estas carcasas representan una reducción volumétrica del 59,4% y 78% respectivamente, en comparación con la Raspberry Pi 3 más batería (85 x 56 x 72 mm) utilizada en una versión anterior del proyecto (Figura 13b).

Optimización de batería

Con la aplicación de la ecuación (3) se logró parametrizar el tiempo de *deep sleep* utilizando

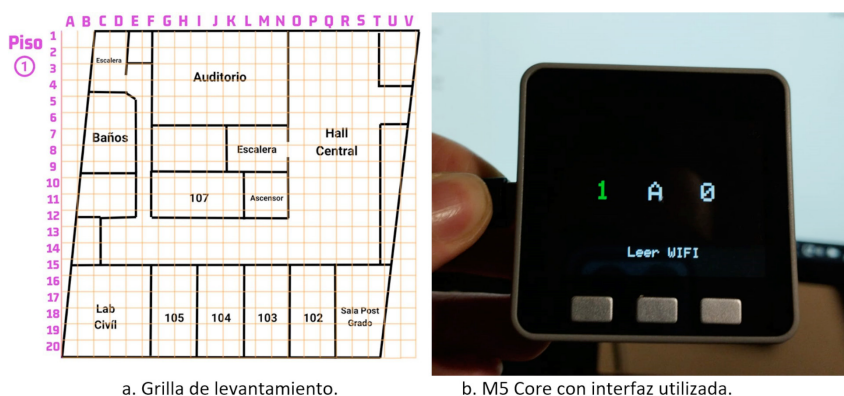


Figura 11. Ejemplo de grilla y dispositivo utilizado para levantamiento de RSSI.

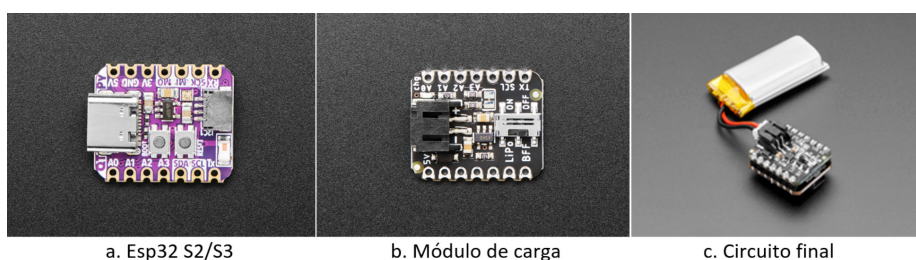


Figura 12. Circuito del dispositivo final.



Figura 13. Dispositivos finales y comparación de tamaños.

los datos proporcionados por el Joule Scope para cada una de las variables. Los resultados obtenidos se presentan en las Tabla 2 y Tabla 3, donde se muestra el tiempo de *deep sleep* en segundos, minutos, horas o veces por día, dependiendo de la cantidad de meses que se desea que el dispositivo funcione con una sola carga, y dado el tamaño de la batería utilizada.

Considerando que en el contexto hospitalario nacional las normas de acreditación de los recintos establecen la necesidad de implementar mantenimiento (anual o semestral) de los equipos médicos críticos o relevantes [13], se establece un escenario de uso del TAG WiFi en periodos de 6 meses para equipos de

mayor criticidad o de 12 meses para equipos médicos con mantenimiento preventivo anual. Durante dicho proceso de mantenimiento preventivo, es posible incorporar el reemplazo o recarga de la batería del TAG WiFi. En función de lo anterior, se destaca en la Tabla 2 la estimación de T_{sleep} para una duración de 6 meses y en la Tabla 3 se destaca la estimación para una duración de 12 meses.

Bajo este análisis, se determinó que el tiempo óptimo de T_{sleep} para el dispositivo de 500 mAh es de aproximadamente 20.450 segundos, lo que equivale a 4 transmisiones al día, permitiendo una duración de la batería de 6 meses. Para el dispositivo de 2.000 mAh, el tiempo óptimo de T_{sleep} es de

Tabla 2. Resultados de T_{sleep} para batería de 500 [mAh].

Tiempo entre ciclo de transmisión				
Meses de transmisión	Segundos	Minutos	Horas	Veces x día
1	2050,8	34,2	0,6	42
2	4471,3	74,5	1,2	19
3	7344,7	122,4	2,0	12
4	10811,3	180,2	3,0	8
5	15075,9	251,3	4,2	6
6	20449,8	340,8	5,7	4
7	27430,8	457,2	7,6	3
8	36866,4	614,4	10,2	2
9	50327,3	838,8	14,0	2
10	71087,8	1184,8	19,7	1
11	107294,3	1788,2	29,8	1
12	186396,2	3106,6	51,8	1

Tabla 3. Resultados de Tsleep para batería de 2.000 [mAh].

Tiempo entre ciclo de transmisión				
Meses de transmisión	Segundos	Minutos	Horas	Veces x día
1	593,3	9,9	0,2	145
2	1207,0	20,1	0,3	72
3	1820,8	30,3	0,5	48
4	2434,6	40,6	0,7	36
5	3048,3	50,8	0,8	28
6	3662,1	61,0	1,0	24
7	4275,9	71,3	1,2	20
8	4889,6	81,5	1,4	18
9	5503,4	91,7	1,5	16
10	6117,2	102,0	1,7	14
11	6730,9	112,2	1,9	13
12	7344,7	122,4	2,0	12

aproximadamente 7.345 segundos, lo que equivale a 12 transmisiones al día, asegurando una duración de la batería de 12 meses.

Aunque es posible extender la duración de la batería utilizando baterías de mayor capacidad, esto incrementa tanto el costo del dispositivo como su tamaño. De manera similar, elegir una batería muy pequeña para minimizar el tamaño del dispositivo requiere aumentar los tiempos de *deep sleep*, llegando a un punto donde no resulta práctico tener un tag que transmita solo cada ciertos días en lugar de varias veces al día.

Medición de RSSI

Como se indicó previamente, para determinar los niveles de intensidad de la señal WiFi recibida se

procedió a analizar los datos registrados durante el proceso de levantamiento. La codificación de la información se realizó conforme a los planos esquemáticos que se presentan en la Figura 14, donde para cada punto de medición se codificó en base al piso y coordenadas.

Los resultados de las mediciones fueron almacenados en una base de datos, de la cual se extrajo una tabla de tipo pivotal (Figura 15) y se analizaron los resultados utilizando la aplicación Tableau Public. La cantidad de datos considerados en el estudio supera los 38.000 registros. Es importante destacar que el proceso de búsqueda de las redes disponibles detecta todas las redes presentes en el recinto, incluyendo dispositivos móviles y computadores en modo de *access point*. Por esta razón, el sistema

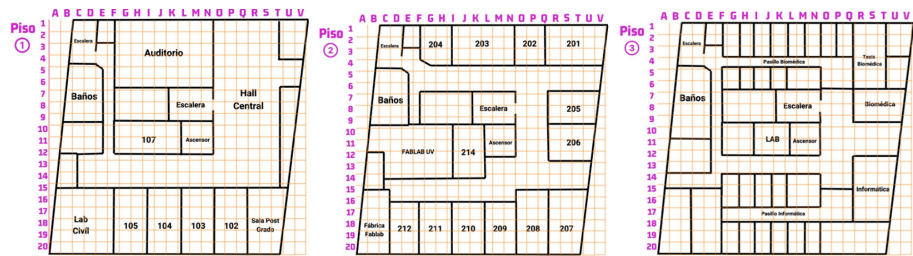


Figura 14. Planos esquemáticos de los 3 pisos considerados en el levantamiento.

desarrollado permite filtrar sólo aquellas SSID/MAC conocidas, es decir, de las cuales se dispone su ubicación fija en los planos esquemáticos según levantamiento previo.

Con ello se obtuvo el nivel de señal (RSSI) para cada AP en todas las coordenadas del levantamiento de datos. Sólo a modo de ejemplo se presenta el resultado gráfico del nivel de señal detectado por el dispositivo respecto de dos AP ubicados en el piso 2 del recinto. Como se puede observar en la parte superior de la Figura 16, el AP ubicado en el sector

de la sala 210 “ilumina” con mayor intensidad de señal el sector cercano. Algo similar se muestra en la parte inferior de la Figura 16 con el AP ubicado en el sector de sala 203. En consecuencia, se ratifica empíricamente, la disminución radial de la intensidad en función de la distancia.

Considerando que en cada piso del recinto existen entre 3 a 6 equipos AP asociados a la red principal, se cuenta con la información mínima requerida para que los algoritmos de trilateración permitan estimar la posición del dispositivo TAG.

DateTime	Piso	X	Y	SSID	MAC	RSSI
22-07-2024 10:32	1	A	2	TV UV	C4:72:95:80:DE:66	-56
22-07-2024 10:32	1	A	2	eduroam	C4:72:95:80:DE:63	-56
22-07-2024 10:32	1	A	2	Visitas UV	C4:72:95:80:DE:65	-56
22-07-2024 10:32	1	A	2	Fablab	C4:72:95:80:DE:64	-57
22-07-2024 10:32	1	A	2	Fun./Acad. UV	C4:72:95:80:DE:61	-57
22-07-2024 10:32	1	A	2	Alumnos UV	C4:72:95:80:DE:60	-57
22-07-2024 10:32	1	A	2	Acreditación	C4:72:95:80:DE:68	-57
22-07-2024 10:32	1	A	2	TV UV	00:AF:1F:B6:32:66	-62
22-07-2024 10:32	1	A	2	Visitas UV	00:AF:1F:B6:32:65	-62
22-07-2024 10:32	1	A	2	Acreditación	00:AF:1F:B6:32:68	-63
22-07-2024 10:32	1	A	2	Fablab	00:AF:1F:B6:32:64	-63
22-07-2024 10:32	1	A	2	Fun./Acad. UV	00:AF:1F:B6:32:61	-63
22-07-2024 10:32	1	A	2	eduroam	00:AF:1F:B6:32:63	-63
22-07-2024 10:32	1	A	2	Alumnos UV	00:AF:1F:B6:32:60	-63
22-07-2024 10:32	1	A	2	Alumnos UV	08:96:AD:B7:C6:10	-64
22-07-2024 10:32	1	A	2	Acreditación	08:96:AD:B7:C6:18	-64
22-07-2024 10:32	1	A	2	Fablab	08:96:AD:B7:C6:14	-64
22-07-2024 10:32	1	A	2	TV UV	08:96:AD:B7:C6:16	-64
22-07-2024 10:32	1	A	2	Fun./Acad. UV	08:96:AD:B7:C6:11	-64

Figura 15. Extracto de tabla pivote con resultado de levantamiento de RSSI.



Figura 16. Resultado gráfico de mediciones RSSI de 2 puntos de acceso seleccionados en piso 2 y su efecto en pisos 1 y 3.

Es importante resaltar, que la estimación de la posición de los dispositivos para el contexto de uso definido (hospitales de gran envergadura) no requiere de una alta precisión. Es decir, el objetivo del sistema implementado se cumple si se logra localizar el piso y el sector aproximado en el cual se encuentra el TAG, y por consiguiente el equipo médico en cuestión.

Limitaciones y consideraciones técnicas

Aunque los resultados obtenidos con el sistema TAG WiFi han sido positivos en cuanto a la localización de equipos médicos en entornos controlados, es crucial considerar varias limitaciones y aspectos técnicos que podrían afectar su implementación en entornos hospitalarios reales.

Uno de los principales desafíos son las áreas de un hospital donde existen equipos médicos como resonadores magnéticos y escáneres de tomografía que generan fuertes campos electromagnéticos, lo que puede interferir con las señales de radiofrecuencia del sistema WiFi, afectando la localización de los equipos en algunos sectores del recinto. Estudios anteriores sobre la localización en entornos médicos han resaltado este problema [7].

Además, las interferencias en áreas del hospital donde coexisten múltiples sistemas de comunicación inalámbrica, sumada a la operación de dispositivos electromédicos, puede degradar la calidad de la señal WiFi y, en consecuencia, la precisión del sistema TAG WiFi. Investigaciones previas que exploran tecnologías como Zigbee y redes de sensores en estos entornos han demostrado que estas interferencias pueden dificultar la localización de dispositivos, especialmente cuando hay varios sistemas trabajando simultáneamente [6].

Otro aspecto crucial es la dependencia de una cobertura WiFi adecuada en el recinto hospitalario. La eficacia del sistema TAG WiFi depende directamente de la disponibilidad de puntos de acceso bien distribuidos y de una señal estable en las distintas áreas del hospital. En zonas con poca cobertura, como aquellas con sombras o bloqueos físicos, pueden presentarse errores de localización o incluso la pérdida de la señal. Investigaciones han mostrado que la variabilidad en la cobertura WiFi en edificios grandes es una limitación importante que puede impactar la precisión y confiabilidad del

sistema [8]. No obstante, esta dependencia del sistema respecto de la red WiFi del recinto hospitalario, si bien es una limitación o requerimiento indispensable, representa a la vez la principal ventaja del sistema desarrollado, el cual no requiere de la instalación de una nueva infraestructura tecnológica, que resultaría altamente complejo y costoso de habilitar en hospitales en funcionamiento.

Para mitigar algunos de estos problemas, se podrían implementar VLANs dedicadas exclusivamente al equipamiento médico podría aislar el tráfico de red de los dispositivos TAG WiFi, evitando posibles interferencias o saturaciones que afecten su desempeño. Este enfoque ha sido sugerido en otros estudios como una forma eficaz de garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento de los sistemas de localización en hospitales [9].

Finalmente, las consideraciones de seguridad son fundamentales en todo sistema de información. Sin embargo, es importante resaltar que el sistema propuesto no interactúa con los equipos médicos ni con información asociada a pacientes. En consecuencia, el sistema desarrollado no accede a información sensible, pues su finalidad es apoyar solamente la localización y gestión de estos dispositivos por parte del personal técnico de los recintos hospitalarios.

CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación del sistema de localización activa de equipos médicos basado en tecnología TAG WiFi ha demostrado ser una solución viable, eficiente y de bajo costo. El diseño del dispositivo ha sido optimizado significativamente respecto de su versión anterior, logrando una reducción del tamaño del hardware en un 59,4% y 78%, gracias al uso del microcontrolador “Adafruit QT Py ESP32-S2 WiFi Dev Board” junto con el “Adafruit LiIon or LiPoly Charger BFF Add-On for QT Py”. Este avance permitió diseñar carcasas más compactas, adecuadas para baterías de 2000 mAh y 500 mAh, manteniendo la autonomía y la funcionalidad necesarias para entornos hospitalarios sin comprometer la portabilidad.

Un aspecto destacado del proyecto es la optimización del consumo energético. Mediante la implementación de ciclos de *deep sleep* y la gestión eficiente de la

energía, se logró extender significativamente la duración de la batería del dispositivo. Las estimaciones realizadas con baterías de 500 mAh proyectan una autonomía de hasta 6 meses, mientras que las baterías de 2000 mAh permitirían que el dispositivo funcione de manera continua por hasta 12 meses con una sola carga. Este balance entre la frecuencia de transmisión y el consumo energético garantiza una solución práctica y sostenible para la localización continua de equipos médicos en hospitales.

A pesar de los resultados positivos, es importante considerar las limitaciones que podrían presentarse en entornos hospitalarios reales. Una de ellas es la eventual falta de cobertura de la red WiFi en algunos sectores del recinto o la existencia de zonas con mayores interferencias lo que podría limitar la precisión del sistema. Esto se podría compensar con una mejor distribución de los puntos de acceso WiFi para asegurar una cobertura homogénea y una localización adecuada en distintas áreas del hospital.

En conclusión, el sistema TAG WiFi representa una propuesta de solución eficiente, de bajo costo y con una autonomía razonable. Los escenarios de uso contemplados se ajustaron para lograr una autonomía de los TAGs de hasta 6 meses con baterías de 500 mAh y hasta 12 meses con baterías de 2000 mAh, lo que coincide con los ciclos regulares de mantenimiento de los equipos médicos relevantes. Estas características, junto con la reducción significativa del tamaño del dispositivo, lo hacen adecuado para la localización de equipos médicos. No obstante, para su implementación exitosa, es necesario realizar pruebas exhaustivas en entornos hospitalarios reales y abordar las eventuales limitaciones relacionadas con la cobertura WiFi.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro sincero agradecimiento al Laboratorio FabLab de la Universidad de Valparaíso, por proporcionar el espacio y la maquinaria requerida para el desarrollo de los prototipos. Así mismo, al laboratorio AC3E de la Universidad Técnica Federico Santa María por facilitar el acceso al equipo JouleScope utilizado en las mediciones de consumo de corriente del dispositivo y al profesor Alejandro Weinstein por su orientación técnica. Estos recursos y apoyos han sido fundamentales para el progreso de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Universidad de Valparaíso, “Sistema de Información y Gestión de Equipamiento Médico”, SIGEM-UV. sigem-uv.cl. Accedido: 20 de Julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sigem-uv.cl/>
- [2] S. Navarro, “Diseño e implementación de un sistema de identificación y localización de equipos médicos para instituciones prestadoras de salud: LocEM”, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso, Chile, 2022.
- [3] Securitas Healthcare, “T12s Asset Tag,” securitashealthcare.com. Accessed: Jul. 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.securitashealthcare.com/products/t12s-asset-tag>
- [4] Boreal Technologies, “HID Beeks Industrial V2 Grey BVBI45G2,” borealtech.com. Accessed: Jul. 31, 2024. [Online]. Available: <https://borealtech.com/producto/hid-beeks-industrial-v2-grey-bvbi45g2/>
- [5] Teltonika, “Sensors and Beacons”. teltonika-gps.com. Accessed: Jul. 31, 2024. [Online]. Available: <https://teltonika-gps.com/es/products/accessories/sensors-beacons>
- [6] A. Redondi, M. Chirico, L. Borsani, M. Cesana, and M. Tagliasacchi, “An integrated system based on wireless sensor networks for patient monitoring, localization and tracking,” *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 1, pp. 39-53, 2013, doi: 10.1016/j.adhoc.2012.04.006.
- [7] Y. Hou, X. Yang, and Q.H. Abbasi, “Efficient AoA-Based wireless indoor localization for hospital outpatients using mobile devices” *Sensors*, vol. 18, no. 11, Art. no. 3698, 2018, doi: 10.3390/s18113698.
- [8] Z. Dian, L. Kezhong, and M. Rui, “A precise RFID indoor localization system with sensor network assistance,” *China Communications*, vol. 12, no. 4, pp. 13-22, 2015, doi: 10.1109/CC.2015.7114062.
- [9] D. Laqua, K. Blau, and M. Nass, “Wireless equipment localization for medical environments,” *2017 First IEEE MTT-S International Microwave Bio Conference (IMBIOC)*, Gothenburg, Sweden, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/IMBIOC.2017.7965777.
- [10] J. Collantes, “LocDEM: Diseño y desarrollo de un sistema de localización activa de un equipo médico basado en tecnología

- TAG WIFI”, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso, Chile, 2023.
- [11] Adafruit, “Adafruit QT Py ESP32-S3”. adafruit.com. Accessed: Jul. 31, 2024. [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/adafruit-qt-py-esp32-s3>
- [12] Joulescope, “Precision DC Energy Analyzer”. learn.adafruit.com. Accessed: Jul. 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.joulescope.com/>
- [13] Superintendencia de Salud de Chile. *Manual del Estándar General de Acreditación para Prestadores Institucionales* (2009). Accedido: 26 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.superdesalud.gob.cl/observatorio/674/articles-23460_recurso_1.pdf