



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Localización de un robot social en ambientes interiores usando redes de  
comunicaciones inalámbricas**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Autores:**

**PEDRO JOSÉ MUÑOZ CAMPOVERDE  
PEDRO ANDRÉS VINTIMILLA LOYOLA**

**Director:**

**DANIEL ESTEBAN ITURRALDE PIEDRA**

**CUENCA, ECUADOR**

**2025**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mis queridos padres, Pedro Muñoz y Lorena Campoverde, quienes han sido y seguirán siendo los pilares fundamentales de mi vida. Su amor incondicional, su sacrificio y su constante apoyo han hecho posible que hoy culmine esta etapa tan importante para mí. En los momentos buenos y en los difíciles, siempre estuvieron a mi lado, dándome fuerza, ánimo y confianza para seguir adelante. Les debo todo, y este trabajo no es solo resultado de mi esfuerzo, sino también del ejemplo, el cariño y la sabiduría que me han transmitido.

También quiero agradecer profundamente a mi hermana, Paula Muñoz, y a mis tíos, Dalida Astudillo y Patricio Muñoz. Su compañía durante este proceso, su preocupación constante y sus palabras de aliento fueron claves para que no perdiera el rumbo. Este logro es también de ustedes.

A mis amigos y a todas las personas que, de una u otra forma, me brindaron su apoyo, les doy las gracias de corazón. Su compañía, su motivación y su fe en mí me ayudaron a superar los momentos más duros. Sin su apoyo, este camino habría sido mucho más difícil.

Con todo mi amor y gratitud, les dedico estas páginas como un homenaje. Cada palabra escrita es también reflejo de lo que ustedes han sembrado en mí.

Pedro José Muñoz Campoverde.

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mis queridos padres, Rafael Vintimilla y Carmen Loyola, quienes han sido mi guía constante a lo largo de este proceso académico. Su amor incondicional, paciencia y sacrificio han sido el pilar fundamental de mi vida y de este logro. A pesar de las dificultades, siempre supe que su apoyo sería la base para alcanzar este objetivo. Les debo no solo este logro, sino también cada paso, cada esfuerzo y cada sacrificio que me ha permitido llegar hasta aquí. Esta tesis es, además un homenaje a ustedes, a su dedicación y al ejemplo que siempre me han brindado.

A mis hermanos Rafael y Ana Isabel, que a pesar de la distancia, han sido una fuente constante de compañía y apoyo inquebrantable. Este logro también es suyo, por sus palabras de aliento y sus consejos, los cuales me han mantenido fuerte en los momentos más desafiantes.

A mis demás familiares y amigos, gracias por compartir conmigo la alegría de cada avance y por estar siempre presentes, tanto en los momentos de felicidad como en los de dificultad.

Con todo mi cariño y reconocimiento, esta dedicatoria es un tributo a su influencia y enseñanzas. En cada palabra escrita, permanece viva su presencia, su amor y la sabiduría que me han legado.

Pedro Andrés Vintimilla Loyola.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad del Azuay por brindarnos la oportunidad de realizar este proyecto de titulación y por el apoyo recibido en cuanto a los recursos y materiales necesarios. Esta experiencia ha sido fundamental para nuestra formación tanto académica como profesional.

Nuestro profundo agradecimiento también está dirigido al Ing. Daniel Iturralde, PhD, tutor de esta tesis, cuya guía, apoyo y paciencia fueron esenciales para el desarrollo de este proyecto. Su compromiso, conocimiento y constante disposición han sido una fuente de inspiración a lo largo de este proceso.

También extendemos nuestro agradecimiento a todos los profesores que nos acompañaron durante nuestra carrera. Gracias por compartir con nosotros su conocimiento y experiencia, preparándonos de la mejor manera para enfrentar los desafíos del mundo laboral.

Finalmente, pero no por ello menos importante, queremos agradecer a nuestros compañeros de carrera.

Juntos hemos superado retos, celebrado logros y compartido momentos inolvidables que siempre llevaremos en nuestra memoria. Gracias a todos por haber sido parte de esta experiencia y por el valioso apoyo que nos han brindado.

## LOCALIZACIÓN DE UN ROBOT SOCIAL EN AMBIENTES INTERIORES USANDO REDES DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

La localización precisa de robots en ambientes interiores es un desafío significativo, ya que los métodos tradicionales, como el GPS (sistema de posicionamiento global) no son efectivos en espacios cerrados debido a las condiciones que impiden un uso eficiente. El sistema propuesto fue desarrollado con la ayuda del método de detección de proximidad, aprovechando la infraestructura de red inalámbrica existente en el campus universitario. El robot identifica la dirección MAC (control de acceso al medio) del punto de acceso al que se conecta y la compara con una base de datos local para determinar su ubicación. El sistema, ejecutado en una Raspberry Pi 4, fue sometido a pruebas funcionales, demostrando una precisión del 100% cuando se requiere llamar a la función de localización por delante de una respuesta convencional del modelo tradicional de inteligencia artificial. Estos resultados evidencian una mejora significativa en la funcionalidad del robot dentro del entorno universitario, permitiendo interacciones más eficientes y contextualizadas con los usuarios.

**Palabras clave:** Localización, Robot social, Ambientes interiores, Redes de comunicaciones inalámbricas, Inteligencia artificial.

# LOCALIZATION OF A SOCIAL ROBOT IN INDOOR ENVIRONMENTS USING WIRELESS COMMUNICATION NETWORKS

Accurate localization of robots in indoor environments is a significant challenge, as traditional methods such as GPS (global positioning system) are not effective in enclosed spaces, due to conditions that prevent efficient use. The proposed system was developed with the help of the proximity detection method, taking advantage of the existing wireless network infrastructure on the university campus. The robot identifies the MAC (medium access control) address of the access point it connects to and compares it with a local database to determine its location. The system, running on a Raspberry Pi 4, was functionally tested, demonstrating 100 percent accuracy when required to call the location function ahead of a conventional response from the traditional artificial intelligence model. These results show a significant improvement in the functionality of the robot within the university environment, enabling more efficient and contextualized interactions with users.

**Keywords:** Localization, Social robot, Indoor environments, Wireless networks, Artificial intelligence.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>Dedicatoria</b>	i
<b>Dedicatoria</b>	ii
<b>Agradecimientos</b>	iii
<b>Resumen</b>	iv
<b>Abstract</b>	v
<b>Índice de Contenidos</b>	vi
<b>Índice de Figuras</b>	vii
<b>Índice de Tablas</b>	viii
<b>I Introducción</b>	1
<b>II Metodología</b>	2
II-A Grabación . . . . .	3
II-B Voz a texto (STT, Speech To Text) . . . . .	3
II-C Function Calling . . . . .	3
II-C1 Función localización . . . . .	4
II-C2 Modelo de respuesta de OpenAI . . . . .	5
II-D Texto a Voz (TTS, Text To Speech) . . . . .	5
II-E Reproducción . . . . .	5
<b>III Resultados</b>	6
III-A Mejores prácticas para definir funciones . . . . .	6
III-A1 Nombrar la función . . . . .	6
III-A2 Mejores prácticas de ingeniería de software . . . . .	6
III-A3 Aprueba la prueba de becario . . . . .	6
III-B Pruebas de funcionamiento . . . . .	6
III-C Función localización . . . . .	7
<b>IV Conclusiones</b>	8
<b>Referencias</b>	8

## ÍNDICE DE FIGURAS

1	Análisis de mercado de servicios basados en ubicación. Adaptado del tamaño del mercado de servicios basados en la ubicación y análisis de participación de tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029). . . . .	1
2	Diagrama de funcionamiento del sistema de localización. . . . .	2
3	Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema. . . . .	3
4	Diagrama del funcionamiento de la etapa de Grabación. . . . .	3
5	Diagrama del funcionamiento de la etapa Voz a Texto. . . . .	3
6	Diagrama del funcionamiento de la etapa Function Calling. . . . .	4
7	Método de lateración. . . . .	4
8	Método de angulación. . . . .	5
9	Método de detección de proximidad. . . . .	5
10	Diagrama del funcionamiento de la etapa Texto a Voz. . . . .	5
11	Diagrama del funcionamiento de la etapa de Reproducción. . . . .	6
12	Gráfico de barras de número de preguntas por grupo. . . . .	6
13	Gráfico de barras de efectividad por cada grupo de preguntas. . . . .	7
14	Diagrama de funcionamiento de obtención de dirección MAC. . . . .	7
15	Diagrama de flujo de obtención de dirección MAC. . . . .	7

## ÍNDICE DE TABLAS

I	Tabla de grupos de preguntas. . . . .	6
II	Tabla de efectividad de grupos. . . . .	6

# Localización de un robot social en ambientes interiores usando redes de comunicaciones inalámbricas

Pedro José Muñoz Campoverde  
Ingeniería Electrónica  
Universidad del Azuay  
Cuenca, Ecuador  
pedrito.josemunoz@es.uazuay.edu.ec

Pedro Andrés Vintimilla Loyola  
Ingeniería Electrónica  
Universidad del Azuay  
Cuenca Ecuador  
pedrovintimi2@es.uazuay.edu.ec

**Resumen**—La localización precisa de robots en ambientes interiores es un desafío significativo, ya que los métodos tradicionales, como el GPS (sistema de posicionamiento global) no son efectivos en espacios cerrados debido a las condiciones que impiden un uso eficiente. El sistema propuesto fue desarrollado con la ayuda del método de detección de proximidad, aprovechando la infraestructura de red inalámbrica existente en el campus universitario. El robot identifica la dirección MAC (control de acceso al medio) del punto de acceso al que se conecta y la compara con una base de datos local para determinar su ubicación. El sistema, ejecutado en una Raspberry Pi 4, fue sometido a pruebas funcionales, demostrando una precisión del 100% cuando se requiere llamar a la función de localización por delante de una respuesta convencional del modelo tradicional de inteligencia artificial. Estos resultados evidencian una mejora significativa en la funcionalidad del robot dentro del entorno universitario, permitiendo interacciones más eficientes y contextualizadas con los usuarios.

**Palabras clave**—Localización, Robot social, Ambientes interiores, Redes de comunicaciones inalámbricas, Inteligencia artificial.

## I. INTRODUCCIÓN

La localización precisa de robots en ambientes interiores es un desafío significativo en el campo de las telecomunicaciones y robótica, ya que los métodos tradicionales, como el sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés), no son efectivos en espacios cerrados debido a las barreras que impiden su uso. Además, los sistemas de posicionamiento en interiores deben coordinar múltiples dispositivos con conciencia de ubicación, gestionando no solo la exactitud de la localización, sino también la eficiencia en la comunicación y la interacción entre ellos, lo cual es esencial para implementar servicios basados en la localización en entornos complejos, como los educativos [1].

La problemática de la localización en interiores no solo se limita a la falta de sistemas equivalentes al GPS dentro de edificios, sino también a los desafíos de precisión y calidad del servicio. En interiores es necesario el uso de técnicas avanzadas como el filtrado probabilístico y la integración de información de mapas. Estos métodos buscan alcanzar una

precisión de localización menor a 1 metro, lo cual es crítico para aplicaciones como la navegación de robots sociales [2].

Estadísticamente, el mercado de servicios basados en ubicación está experimentando un crecimiento significativo. La Fig. 1 ilustra un incremento anual del 24.11% en este sector, con el mercado alcanzando 50,85 mil millones de dólares en 2024 y proyectado a llegar a 149,73 mil millones de dólares en 2029. Este auge se debe al aumento en la producción de dispositivos inteligentes que emplean tecnologías de posicionamiento móvil, GPS por satélite y métodos híbridos como el Sistema Global de Navegación por Satélite Asistido (A-GNSS por sus siglas en inglés). La región de Asia-Pacífico lidera el crecimiento del mercado, gracias a importantes inversiones en infraestructura y tecnología, así como al aumento en la penetración de Internet y telefonía móvil [3].



Fig. 1. Análisis de mercado de servicios basados en ubicación. Adaptado del tamaño del mercado de servicios basados en la ubicación y análisis de participación de tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029).

En este contexto, la Universidad del Azuay ha desarrollado un robot social llamado UDABot, que actúa como asistente universitario, sin embargo, la versión actual del robot carece de un sistema de localización, lo que limita su funcionalidad.

Por lo que, el propósito radica en la necesidad de implementar la capacidad del robot UDABot para determinar su ubicación exacta dentro del campus universitario, ya que la falta de un sistema de localización preciso afecta su eficiencia y limita sus interacciones con los usuarios. Realizar este sistema no solo soluciona esta deficiencia, sino que también tendría importantes implicaciones sociales, al permitir que el robot identifique y comunique su ubicación precisa, mejorando así la asistencia y utilidad que proporciona a la comunidad universitaria.

El estudio realizado por [4] hace uso de tecnologías inalámbricas, específicamente ZigBee y Wi-Fi, para mejorar la localización de robots en ambientes interiores. A diferencia de los métodos tradicionales que dependen del GPS, ineficaz en espacios cerrados, este artículo fusiona datos de odometría con estimaciones de distancia basadas en el indicador de fuerza de la señal recibida, conocido por sus siglas en inglés (RSSI). Los experimentos demuestran que combinar múltiples tecnologías permite mantener una precisión razonable en la localización, incluso en áreas con cobertura deficiente.

El artículo que propone [5] es un método híbrido de localización para robots en interiores que combina el uso de RSSI y la diferencia horaria de llegada (TDOA por sus siglas en inglés). Utilizando un filtro promedio ponderado y un modelo polinómico para ajustar las mediciones de RSSI, el sistema logra una precisión de localización de aproximadamente 0.5 metros, lo que es crucial para la navegación de robots sociales.

Los autores de [6] examinan la localización de robots en interiores utilizando redes Wi-Fi, destacando la importancia de la calidad de la base de datos de señales de recepción (RSSI) para lograr una localización precisa. Se comparan dos bases de datos, una recolectada por humanos y otra por un robot, donde los resultados muestran que, aunque la recolección de datos por robots introduce errores, la precisión de localización puede ser competitiva con la recolección humana, lo que sugiere que la implementación de un sistema de localización basado en Wi-Fi, como el propuesto para este proyecto, mejorará significativamente su funcionalidad y eficiencia en entornos universitarios.

La publicación desarrollada por [7] describe un método de localización basado en Wi-Fi que utiliza la técnica de *fingerprinting*, la cual se fundamenta en la medición de RSSI. Este método se implementa en dos fases: en la fase de entrenamiento, se recopilan patrones de intensidad de señal en ubicaciones predefinidas, que se almacenan en una base de datos conocida como mapa de señal de radio. Durante la fase de posicionamiento, el robot compara su patrón actual de RSSI con el mapa previamente establecido para determinar su ubicación. Este enfoque permite una localización a nivel de un metro de distancia, lo que es adecuado para entornos interiores donde la señal puede ser afectada por obstáculos. La combinación de esta técnica con un sistema de localización ultrasónica proporciona una solución robusta para la localización precisa de robots en espacios cerrados.

El método de localización propuesto en [8] se centra en el uso de un único punto de acceso Wi-Fi para determinar la

posición del robot en interiores. Se basa en la medición de (RSSI) para calcular la distancia entre el robot y el punto de acceso. Utilizando un modelo de pérdida de señal logarítmica, se puede estimar la distancia a partir de la intensidad de la señal recibida. Este enfoque permite que el robot obtenga información de localización precisa sin la necesidad de múltiples puntos de referencia, lo que simplifica la implementación y aprovecha la infraestructura de red existente.

La investigación de [9] aborda la problemática de la localización en interiores mediante el uso de técnicas de aprendizaje automático aplicadas a arquitecturas de redes de sensores. Donde se evalúan dos enfoques para estimar la localización en entornos cerrados, destacando la importancia de (RSSI) con su filtrado y técnicas de aprendizaje automático para mejorar la precisión de la localización. Además, se explora la tolerancia a fallos en la infraestructura, lo que es crucial para aplicaciones como la navegación de robots sociales.

En la sección II se describen los métodos empleados para la localización del robot social, así como el sistema completo que integra todas las etapas necesarias para su funcionamiento. La sección III presenta los resultados obtenidos a partir de una encuesta diseñada para evaluar la efectividad de cada respuesta. Finalmente, en la sección IV se exponen las conclusiones y recomendaciones del estudio.

## II. METODOLOGÍA

Este proyecto busca integrar tecnologías avanzadas para optimizar la operatividad de robots en ambientes complejos y multifuncionales, para ello, se propone un método para la localización del robot social en interiores utilizando redes de comunicaciones inalámbricas asociadas a los puntos de acceso dentro de la Universidad del Azuay, tal como se observa en la Fig. 2. Esto no solo aprovecha la infraestructura de red existente, sino que también abre la puerta a futuras expansiones, como la integración con otros dispositivos inteligentes.

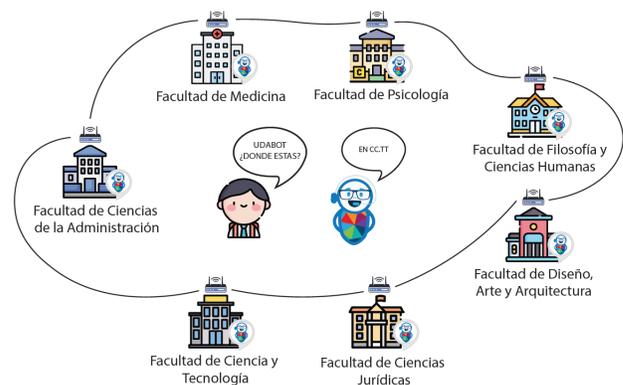


Fig. 2. Diagrama de funcionamiento del sistema de localización.

En la Fig. 3 se puede observar el diagrama de flujo del sistema, donde se especifica la estructura y los pasos a seguir para un correcto funcionamiento, también se demuestra el proceso lógico de la ejecución indicando a detalle las acciones que se realizan en cada etapa.

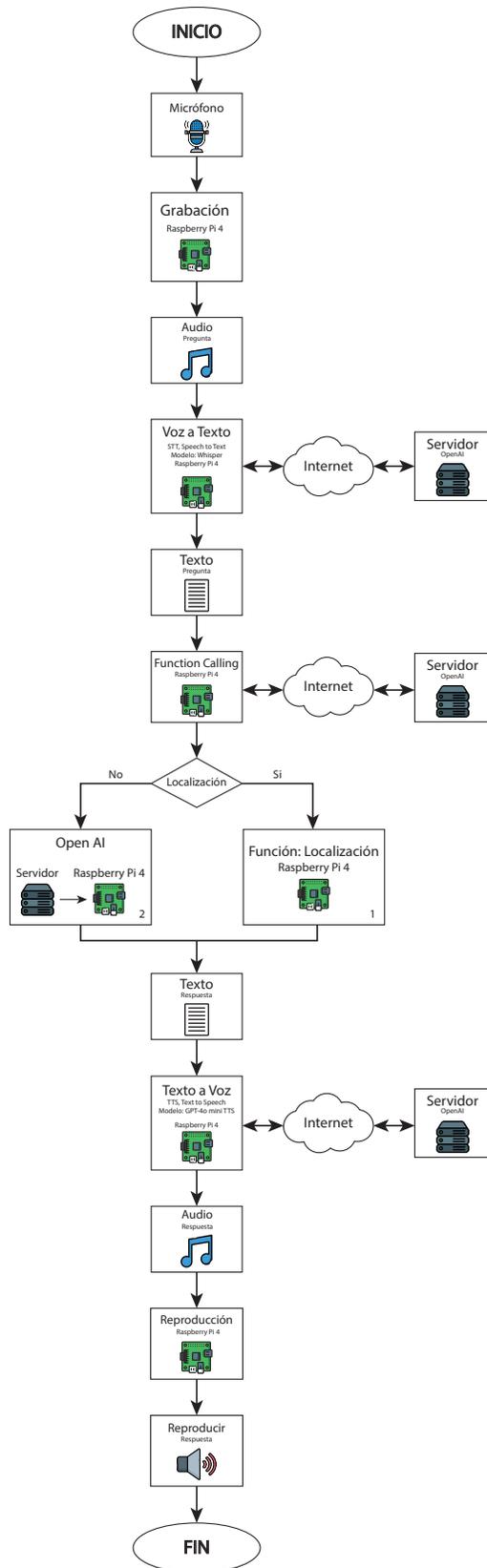


Fig. 3. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema.

### A. Grabación

Esta etapa representa el inicio del sistema para la localización del robot social en ambientes interiores, donde se captura una señal de audio a través de un micrófono, tal como se observa en la Fig. 4. Esta registra de forma precisa la voz o los comandos del usuario, el cuál mediante un Raspberry Pi 4 genera un archivo de audio que será utilizado para las siguientes etapas.



Fig. 4. Diagrama del funcionamiento de la etapa de Grabación.

### B. Voz a texto (STT, Speech To Text)

Para esta fase se convierte el archivo de audio almacenado anteriormente a una variable de tipo texto, tal como se observa en la Fig. 5. El proceso ocurre mediante métodos de reconocimiento de voz, para ello se utiliza el modelo conocido como *Whisper*, implementado por la empresa OpenAI, tiene un entrenamiento de más de seiscientos ochenta mil horas con varios datos multilingües, es robusto ante ruidos de fondo y terminologías técnicas. La arquitectura de este modelo se basa en un transformador codificador-decodificador, encargado de tomar el audio de entrada y dividirlo en segmentos de treinta segundos, para convertirlos en espectrogramas de frecuencia Mel, que es una representación gráfica del contenido frecuencial de una señal de audio en la escala Mel y a su vez, esta es una escala perceptual que ajusta las frecuencias según la sensibilidad del oído humano. Toda esta técnica se procesa mediante el codificador y el decodificador generando así la transcripción del audio original a un archivo de texto. Para el desarrollo de este método, el procedimiento descrito anteriormente tiene que ser procesado en el servidor de OpenAI y no de manera local en el Raspberry Pi 4 [10].

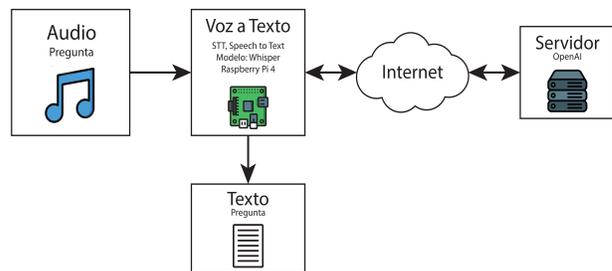


Fig. 5. Diagrama del funcionamiento de la etapa Voz a Texto.

### C. Function Calling

En esta etapa, se integra la función conocida como *Function Calling*, que se observa en la Fig. 6, proporcionada por la API de OpenAI. Esta característica permite que el modelo

de lenguaje interactúe de manera dinámica con respecto a la ejecución de tareas específicas basadas en las consultas que realizó el usuario, por lo tanto, esta función se divide en dos segmentos, el primero es la *Función localización*, que interpreta si la pregunta tiene relación a la ubicación física del robot social, mientras que el segundo segmento es el *Modelo de respuesta de OpenAI*, esta función interactúa en caso de que la consulta esté aislada de la *Función localización*. Para el procesamiento de ambos segmentos el modelo necesita ejecutarse en los servidores de la empresa OpenAI [11].

Es importante aclarar que este proyecto de titulación hace uso únicamente de capacidades de localización, y no de navegación. Por ello, resulta necesario distinguir ambos conceptos según lo señalado por [12], la localización corresponde al proceso mediante el cual un robot determina su posición dentro de un entorno previamente conocido, mientras que, la navegación abarca la planificación y ejecución de rutas para que un robot pueda desplazarse desde un punto A hacia un punto B, considerando la evasión de obstáculos y la toma de decisiones en tiempo real.

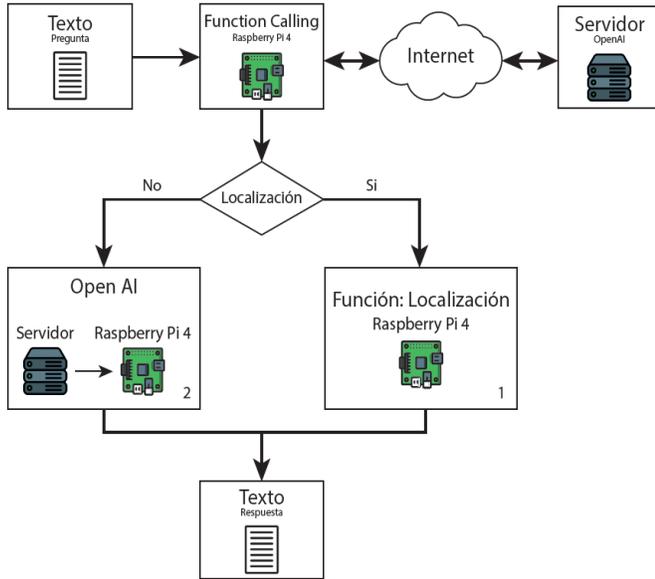


Fig. 6. Diagrama del funcionamiento de la etapa Function Calling.

1) *Función localización*: En esta sección se describen los diferentes métodos de localización para ambientes interiores.

- **Lateración**

Es un método utilizado para estimar la ubicación de un objeto mediante la medición de distancias respecto a puntos de referencia con posiciones conocidas. Al conocer la distancia entre un dispositivo y los puntos fijos, es posible determinar su ubicación mediante cálculos matemáticos. Un ejemplo es la lateración circular, donde cada punto de referencia define un círculo con un radio igual a la distancia medida. Estos círculos se interceptan en un solo punto; sin embargo, debido a errores en las mediciones, se emplean métodos como los mínimos cuadrados para

obtener una estimación más precisa de la ubicación real, este método se puede visualizar en la Fig. 7 [1].

El método desarrollado por [1] describe la ecuación 1, demostrando que la ubicación del dispositivo móvil se determina a partir de la variable  $d_i$ , que es la distancia medida entre el dispositivo y la estación base, representada por  $k$ , donde se conocen las coordenadas  $(x_i, y_i)$ , mientras que  $(x, y)$  son las coordenadas de posición desconocidas para el dispositivo, por último  $k_i(x, y)$  representa la función de distancia.

$$d_i = k_i(x, y) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad i = 1 \dots k. \quad (1)$$

Para resolver este problema a parte de la utilización de la ecuación 1, también se usa una aproximación de Taylor y mínimos cuadrados, iterando hasta la convergencia.

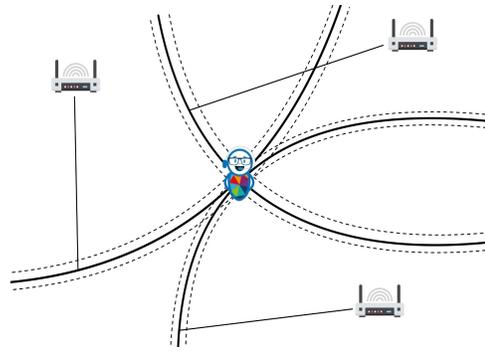


Fig. 7. Método de lateración.

- **Angulación**

Es un método de localización que permite estimar la ubicación de un dispositivo móvil midiendo los ángulos de llegada de las señales en varias estaciones base con posiciones conocidas. Para este método, se calculan los ángulos de llegada de las señales en los receptores [1]. En la Fig. 8 se puede observar el funcionamiento, donde las estaciones base emiten señales hacia el dispositivo móvil y los ángulos de llegada de estas señales se miden en cada estación, cuando se extienden las líneas de dirección se obtiene la ubicación estimada en el punto donde estas convergen.

Para calcular la ubicación cada estación base calcula el ángulo  $\alpha_i$  mediante la ecuación 2:

$$\alpha_i = \arctan \frac{y_i - y}{x_i - x} \quad i = 1 \dots k. \quad (2)$$

$(x, y)$  son las coordenadas de la posición desconocida del dispositivo,  $(x_i, y_i)$  son las coordenadas de la estación base  $i$ , y  $k$  que son el número total de estaciones base. Cada ángulo medido define una semirrecta desde la estación base en la dirección de la señal. La intersección de estas líneas permite estimar la ubicación del dispositivo. Para mejorar la precisión, se emplean técnicas

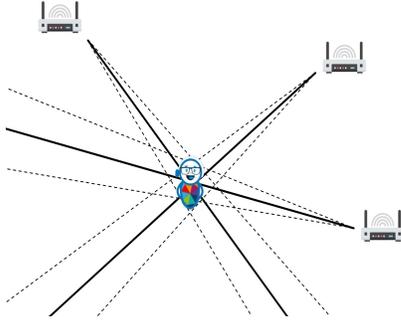


Fig. 8. Método de angulación.

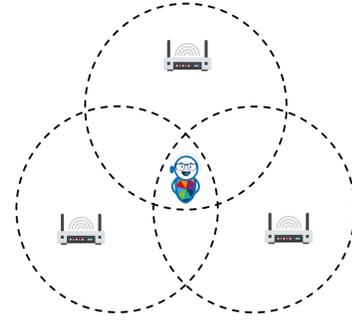


Fig. 9. Método de detección de proximidad.

de optimización como la linealización del sistema de ecuaciones mediante expansión de Taylor [1].

- *Detección de proximidad*

Es un método de localización que permite determinar la proximidad de un dispositivo móvil, que se basa en la identificación de señales de referencia emitidas por dispositivos fijos en el entorno, cuando un dispositivo móvil se encuentra dentro del alcance de una señal, se asume que está ubicado dentro de un área determinada por el rango de dicha señal. Esto es común en tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth e identificación por radio frecuencia (RFID por sus siglas en inglés), donde la detección de una señal indica que el dispositivo está cerca del transmisor. En la Fig. 9 se puede observar la representación del método donde se puede ver las estaciones base y el dispositivo que se encuentra dentro del rango [1].

La detección de proximidad puede representarse de forma matemática con la ecuación 3:

$$p \in \bigcap_i \{x \text{ mit } \|x - p_i\| < r\}. \quad (3)$$

En esta ecuación:

- $p$  representa la ubicación estimada del dispositivo.
- $p_i$  es la posición del  $i$ -ésimo punto de referencia conocido (por ejemplo, un router Wi-Fi).
- $r$  es el radio de alcance de la señal emitida por cada punto de referencia.
- $\|x - p_i\|$  es la distancia entre la posición  $x$  (posible ubicación del dispositivo) y el punto de referencia  $p_i$ .

La ecuación 3 describe cómo la ubicación del dispositivo se restringe a la intersección de las áreas de cobertura de múltiples señales [1].

## 2) Modelo de respuesta de OpenAI:

En caso de que la pregunta al robot social no tenga ninguna relación con la ubicación del mismo, el modelo de lenguaje genera una respuesta convencional basada en el entrenamiento y conocimientos previos sin necesidad de hacer uso en una función. La respuesta generada por el modelo es enviada desde el servidor de OpenAI hacia el Raspberry Pi 4 y se almacena en una variable de tipo texto [11].

### D. Texto a Voz (TTS, Text To Speech)

En esta fase, el modelo previamente ya generó una respuesta en formato de tipo texto, pero para que el robot social tenga una mejor interacción con el usuario que realizó la pregunta, la respuesta debe reproducirse de forma audible, como se puede evidenciar en la Fig. 10, por lo tanto, el archivo de texto generado anteriormente tiene que ser procesado por los servidores de OpenAI, para utilizar el modelo GPT-4o mini TTS, donde se transforma a voz generada por inteligencia artificial, pero con una voz natural y expresiva. Esta respuesta audible se guarda en formato de audio en el Raspberry Pi 4 y puede personalizarse en aspectos como el tono, ritmo y cadencia [13].

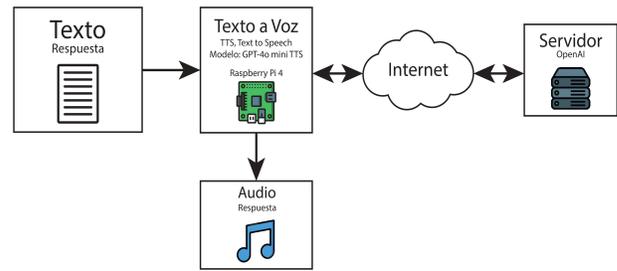


Fig. 10. Diagrama del funcionamiento de la etapa Texto a Voz.

### E. Reproducción

Finalmente, en la Fig. 11 se detalla la etapa que emite el audio sintetizado a través de unos altavoces conectados directamente con el Raspberry Pi 4, donde se garantiza que la respuesta en forma de voz se reproduzca de manera inmediata y con claridad. Aquí se confirma que el usuario que realizó la pregunta al UDABot, puede recibir de forma efectiva la

información procesada en todas las etapas previas en forma de voz, completando la comunicación bidireccional del sistema completo.

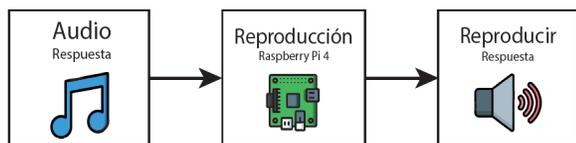


Fig. 11. Diagrama del funcionamiento de la etapa de Reproducción.

### III. RESULTADOS

Se realizaron pruebas de funcionamiento del sistema, donde se obtuvieron los resultados más óptimos en base a las recomendaciones utilizadas de [11] para la definición de funciones.

#### A. Mejores prácticas para definir funciones

1) *Nombrar la función*: Fue necesario especificar los nombres de las funciones, junto con una descripción clara de sus parámetros, los cuales deben tener un propósito definido y un formato que represente adecuadamente la salida esperada. De este modo, se evita que el modelo cometa errores [11].

2) *Mejores prácticas de ingeniería de software*: La principal aplicación de este software consistió en diseñar funciones que fueran obvias e intuitivas. Para lograrlo, se aplicó el principio de mínima sorpresa (POLA, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es mejorar la usabilidad y reducir errores. Este principio indica que el lenguaje de programación debe comportarse de manera coherente con las expectativas del usuario, evitando resultados inesperados o confusos [14].

3) *Aprueba la prueba de becario*: Esta práctica busca responder a la siguiente pregunta: ¿podría un becario (humano) utilizar correctamente la función si se le proporcionara únicamente la misma información que al modelo? Para ello, se realizó una encuesta a estudiantes de la Universidad del Azuay, en la que se les consultó cómo formularían una pregunta a un robot social para determinar su ubicación. El objetivo fue recopilar datos que sirvieran como base para el desarrollo de pruebas de eficiencia [11].

#### B. Pruebas de funcionamiento

Una vez definidas las mejores prácticas para el sistema, se procedió a revisar los resultados de la encuesta, la cual obtuvo un total de 68 respuestas. Posteriormente, se realizó el procesamiento de los datos: en primer lugar, se analizaron las respuestas y se descartaron aquellas que no cumplieran con los criterios establecidos, como las consultas relacionadas con navegación. Luego las respuestas válidas se agruparon de acuerdo con la forma en que los estudiantes plantearon sus preguntas, considerando similitudes en el contenido y la redacción. Esto dio como resultado cinco grupos, los cuales se presentan en la Tabla I, donde se muestra la pregunta representativa y la cantidad de respuestas que contiene cada

uno. Esta información también se muestra gráficamente en la Fig. 12, donde se visualizan los grupos correspondientes.

TABLA I  
TABLA DE GRUPOS DE PREGUNTAS.

Grupo	Cantidad
¿Dónde estoy?	20
¿Dónde estás?	5
¿En dónde me encuentro?	17
Dame mi ubicación	8
Preguntas específicas	5
Preguntas descartadas	13

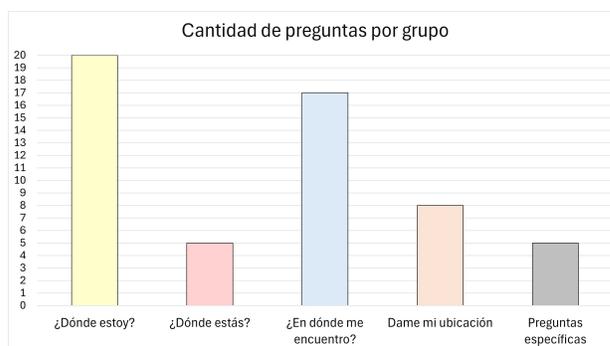


Fig. 12. Gráfico de barras de número de preguntas por grupo.

Después de agrupar las preguntas formuladas por los encuestados, cada una fue ingresada al sistema de manera individual y ejecutada 10 veces para analizar su comportamiento. A cada pregunta se le asignó una calificación máxima según la cantidad de respuestas correctas que el sistema proporcionó. Posteriormente, se calculó el promedio de aciertos por grupo para obtener la efectividad de respuesta del sistema en cada caso. Los resultados se presentan en la Tabla II y también se visualizan de forma gráfica en la Fig. 13, donde se muestra la efectividad correspondiente a cada grupo.

TABLA II  
TABLA DE EFECTIVIDAD DE GRUPOS.

Grupo	Efectividad
¿Dónde estoy?	100%
¿Dónde estás?	100%
¿En dónde me encuentro?	100%
Dame mi ubicación	100%
Preguntas específicas	100%

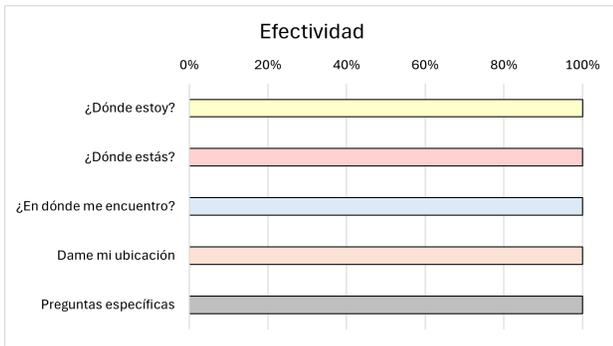


Fig. 13. Gráfico de barras de efectividad por cada grupo de preguntas.

Los autores propusieron una solución que consistió en desarrollar e implementar un programa en lenguaje de programación Python, el cual es el encargado de integrar el procesamiento a través de la API de OpenAI y la identificación de un punto de acceso al que esté conectado el microcontrolador Raspberry Pi. Para este procesamiento se optó por usar el modelo GPT-4o, por temas de rapidez, inteligencia y flexibilidad, respecto a los otros modelos que ofrece la plataforma. Esto con el propósito que la interacción con el usuario sea la más óptima para permitir que el robot social sea autónomo en cuanto a las decisiones que tome y si debe ejecutar ciertas funciones en base al contenido de la pregunta realizada por el usuario, para esto el programa sigue los siguientes pasos.

### C. Función localización

En este paso se define la función denominada *ubicación*, la cual emplea el método de *Detección de Proximidad* para identificar las señales emitidas por los puntos de acceso de la universidad. Con el apoyo de herramientas de Linux, se extrae la dirección MAC del punto de acceso Wi-Fi al que se encuentra conectado el Raspberry Pi. Una vez establecida la conexión, el microprocesador identifica dicha dirección MAC para determinar su ubicación, tal como se observa en la Fig. 14. Cabe señalar que, por motivos de seguridad, se han usado direcciones ficticias como ejemplo.

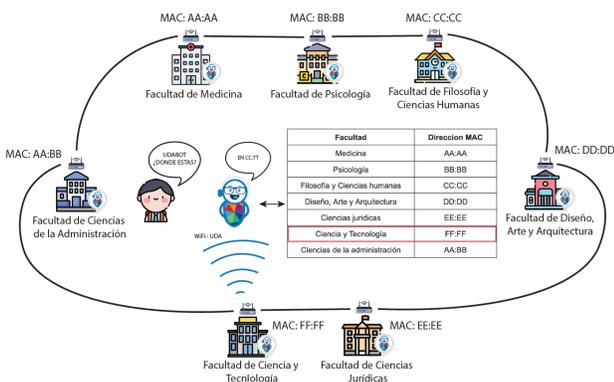


Fig. 14. Diagrama de funcionamiento de obtención de dirección MAC.

Una vez definido el método, se procede al desarrollo del programa, el cual se representa en el diagrama de flujo de la Fig. 15. Como primer paso, se crea un archivo de tipo texto donde se almacenarán las direcciones MAC detectadas. A continuación, se define la función denominada *dirección*, que utiliza el comando *iwconfig*, una herramienta del sistema que permite consultar el estado de las conexiones inalámbricas, proporcionando información relevante como el nombre o identificador de la red (SSID por sus siglas en inglés), la potencia de la señal y la dirección MAC del punto de acceso. En el programa, se ejecuta *iwconfig*, se filtra su salida para obtener únicamente la dirección MAC del punto de acceso al que está conectada la Raspberry Pi, para finalmente mostrar el resultado.

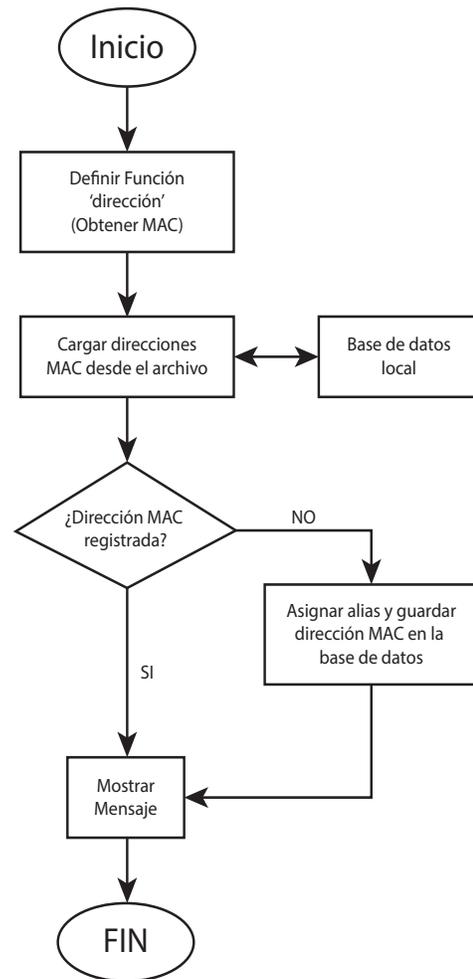


Fig. 15. Diagrama de flujo de obtención de dirección MAC.

Para el segundo punto del programa, se cargan las direcciones desde un archivo de texto que trabaja como una base de datos local, donde cada dirección MAC está asociada a un alias. Una vez cargados los datos, el programa organiza esta información en una lista llamada *mac\_storage*, separando los alias de las direcciones MAC. A continuación, se compara

la dirección MAC obtenida con las registradas en la base de datos. En el último paso, se realiza una verificación mediante una estructura condicional *if*, que recorre la lista en busca de una coincidencia. Si se encuentra la dirección MAC, se devuelve el alias correspondiente y se muestra junto con un mensaje. En caso contrario, se genera un nuevo alias, se guarda la nueva dirección en la lista y se actualiza el archivo de texto.

#### IV. CONCLUSIONES

El presente proyecto se orientó hacia la implementación de un sistema de localización en interiores para un robot social, con el propósito de mejorar las interacciones del mismo con los usuarios dentro del campus universitario. Tras finalizar las pruebas del sistema, se obtuvieron las siguientes conclusiones.

Se analizaron diversas investigaciones y artículos científicos de distintos autores con el fin de realizar una comparación y determinar los principales métodos de localización, los cuales fueron descritos en la metodología de esta investigación. Con base a dicho análisis, se seleccionó el método que mejor se adapta a los objetivos del proyecto. En este caso, se optó por la *Detección de Proximidad*, ya que permitió trabajar de manera más rápida y eficiente, obteniendo resultados óptimos para el desarrollo del sistema.

Se definió e implementó el modelo del sistema con el propósito de realizar pruebas de eficiencia en la localización del robot en entornos interiores. En esta etapa del proyecto, se aplicaron los métodos recomendados por la plataforma OpenAI, los cuales incluyen buenas prácticas orientadas a la evaluación del rendimiento y funcionamiento del sistema. Como parte del proceso de validación, se llevó a cabo una encuesta dirigida a los estudiantes de la Universidad del Azuay, con el objetivo de recopilar información relevante sobre cómo realizarían la consulta de localización al sistema. A partir de los resultados obtenidos y de las recomendaciones proporcionadas por OpenAI, se ejecutaron pruebas de funcionamiento que permitieron evaluar con mayor precisión la eficiencia del sistema e identificar posibles áreas de mejora.

Se analizaron los resultados obtenidos a partir de la experimentación del sistema de localización del robot en entornos interiores, evidenciando un 100% de efectividad en todos los grupos evaluados. Es decir, el sistema respondió correctamente a todas las preguntas formuladas por los estudiantes. Este desempeño se atribuye a la configuración implementada en el programa, específicamente en la sección *Function Calling*, donde se define una función para obtener la ubicación, acompañada de una descripción. En este caso, la descripción asignada fue: *Devuelve la ubicación*. Como resultado, el sistema tiende a invocar esta función cada vez que detecta una pregunta relacionada con la localización. Si bien este enfoque ha demostrado ser eficaz, se considera que su desempeño podría optimizarse mediante una descripción más detallada. Esto permitiría al sistema generar respuestas más precisas y contextualizadas sobre la ubicación del robot social, mejorando su adaptabilidad frente a diferentes tipos de consultas.

#### REFERENCIAS

- [1] M. Werner, *Indoor Location-Based Services: Prerequisites and Foundations*. Springer International Publishing, 2014.
- [2] S. Goswami, *Indoor Location Technologies*. Springer Science+Business Media, 2013.
- [3] M. I. R. . Advisory. (2024) Tamaño del mercado de servicios basados en la ubicación y análisis de participación, tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029). [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/location-based-services-market>
- [4] M. L. Rodrigues, L. F. M. Vieira, and M. F. M. Campos, "Mobile robot localization in indoor environments using multiple wireless technologies," in *2012 Brazilian Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium*, 2012, pp. 79–84.
- [5] L. Cheng, C. d. Wu, and Y. z. Zhang, "Indoor robot localization based on wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 57, no. 3, pp. 1099–1104, 2011.
- [6] L. Niu, Y. Fan, K. Pahlavan, G. Liu, and Y. Geng, "On the accuracy of wi-fi localization using robot and human collected signatures," in *2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2016, pp. 375–378.
- [7] L. Juan, T.-S. Pan, K.-K. Tseng, J.-S. Pan, and J. Zhang, "Indoor water-dispensing robot with two-stage localization," in *2011 First International Conference on Robot, Vision and Signal Processing*, 2011, pp. 303–307.
- [8] T. T. Khanh, T. H. Hai, V. Nguyen, T. D. T. Nguyen, N. T. Thu, and E.-N. Huh, "The practice of cloud-based navigation system for indoor robot," in *2020 14th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, 2020, pp. 1–4.
- [9] E. Carvalho, B. S. Faiçal, G. P. R. Filho, P. A. Vargas, J. Ueyama, and G. Pessin, "Exploiting the use of machine learning in two different sensor network architectures for indoor localization," in *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2016, pp. 652–657.
- [10] OpenAI, "Speech to text guide," 2024, accessed: 2024-04-15. [Online]. Available: <https://platform.openai.com/docs/guides/speech-to-text?lang=cur&page-top>
- [11] OpenAI, "Function calling guide," 2024, accessed: 2024-04-15. [Online]. Available: <https://platform.openai.com/docs/guides/function-calling?api-mode=chat>
- [12] E. Alhamdi and R. Hedjar, "Comparative study of two localization approaches for mobile robots in an indoor environment," *Journal of Robotics*, vol. 2022, pp. 1–12, 2022.
- [13] OpenAI, "Text to speech guide," 2024, accessed: 2024-04-15. [Online]. Available: <https://platform.openai.com/docs/guides/text-to-speechpage-top>
- [14] P. Seebach, "The principle of least astonishment," *The Cranky User, IBM DeveloperWorks*, August 2001, accessed: 2014-01-23. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/developerworks/library/usable-code/index.html>