



**Universidad Veracruzana**

Instituto de Investigaciones en Inteligencia Artificial

**Planificación de búsqueda de personas con un  
robot autónomo móvil basado en el contexto de  
la ocupación del inmueble.**

T E S I S

Como requisito para obtener el grado de

**Maestro en Inteligencia Artificial**

P R E S E N T A

**Francisco Rosas Rebolledo**

Asesor:

**Dr. Antonio Marín Hernández**

Septiembre 2023

# Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mi familia por todo el apoyo que me han brindado en todo este tiempo, siendo la fuerza motriz detrás de todo lo que he podido lograr. A mi madre, Patricia, quien ha sido mi pilar y a la que le tengo un amor incondicional. A mi padre, Francisco, la estrella que me mostró el valor del trabajo y que siempre será mi fuente de inspiración. A mis hermanas, por mostrarme siempre el valor de la familia. Son mi inspiración para seguir adelante.

A mi principessa, Elena, por ser mi mejor acompañante y aliada en los últimos años. Tu amor y presencia han sido mi refugio en los momentos de desafío. Agradecido con la vida de que nuestros caminos se hayan juntado.

A mis compañeros de maestría, especialmente a los de robótica (Jen, Nay, Hermosilla), les agradezco mucho su presencia. Su presencia en el laboratorio siempre alegraba el día. No solo agradezco los momentos de diversión, sino también los momentos de apoyo en los diferentes trabajos que hicimos. Ustedes me hacen recordar el significado de amistad.

Agradezco a mi asesor de tesis, Dr. Antonio Marín Hernández, por su acompañamiento desde el principio del proyecto. La orientación y los conocimientos que me ofreció serán una gran ayuda para mi desarrollo profesional.

En general, agradezco a todos aquellos que de diferentes maneras apoyaron en la realización de este trabajo. La aportación que hicieron tanto en la redacción de este documento, como en la parte de la implementación, fue muy relevante para que este trabajo pudiera ser completado.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación . . . . .	4
1.2. Planteamiento del problema . . . . .	6
1.2.1. Pregunta de investigación . . . . .	6
1.2.2. Hipótesis . . . . .	6
1.3. Objetivos . . . . .	6
1.3.1. Objetivo General . . . . .	7
1.3.2. Objetivos Particulares . . . . .	7
1.4. Alcances y limitaciones . . . . .	7
<b>2. Trabajos relacionados</b>	<b>9</b>
2.1. Robots en operaciones de búsqueda y rescate . . . . .	9
2.2. IoT y redes de sensores para robótica y situaciones de rescate	16
2.3. Técnicas para el conteo de personas en espacios cerrados . . . .	18
<b>3. Marco teórico</b>	<b>24</b>
3.1. Plan de búsqueda . . . . .	24
3.1.1. Problema del agente viajero . . . . .	25
3.1.2. Algoritmo Optimización por Colonia de Hormigas . . . .	26
3.2. Estimación de la ocupación de los espacios . . . . .	29
3.2.1. Módulos contadores . . . . .	30
3.2.2. Módulos de conteo por inferencia . . . . .	34
<b>4. Implementación</b>	<b>42</b>
4.1. Robot móvil autónomo . . . . .	44
4.2. Módulos para el conteo de personas . . . . .	46
4.3. Entorno de pruebas . . . . .	51
4.4. Plan de búsqueda . . . . .	57

<b>5. Resultados</b>	<b>60</b>
5.1. Simulaciones . . . . .	61
5.2. Ambiente del instituto. . . . .	64
5.2.1. Módulos de sensores. . . . .	64
5.2.2. Planificación en el ambiente del instituto. . . . .	71
<b>6. Conclusiones</b>	<b>73</b>

# Índice de figuras

1.1. Robot de rescate del proyecto ICARUS [22] . . . . .	2
2.1. Robot Hector utilizado en competencias de Robocup por la Universidad Técnica de Darmstadt. [14] . . . . .	10
2.2. Generación de rutas entre dos nodos. Comparación entre la ruta más corta y la ruta con mayor ganancia [21]. . . . .	13
2.3. Modelo de búsqueda de personas de acuerdo a una consulta y a las probabilidades de ubicación [40]. . . . .	14
2.4. Comparación de una ruta directa al objetivo vs. una ruta segura para el robot. [10] . . . . .	15
2.5. Interfaz para la visualización de datos y alertas. [51] . . . . .	17
2.6. Técnicas de conteo no invasivas [38] . . . . .	20
2.7. Utilización de sensores infrarrojos múltiples integrados [46] . . . . .	22
2.8. Conteo de personas mostrando la fiabilidad de los sensores [63] . . . . .	23
3.1. Principio de estimación por conteo [42]. . . . .	30
3.2. Detección y estimación de entrada o salida de un lugar [42]. . . . .	30
3.3. Cambios de estado para la detección de entrada o salida de una persona [42]. . . . .	34
3.4. Escenario utilizado para la estimación de la ocupación con el sensor ambiental [44]. . . . .	36
3.5. Principio de funcionamiento del PIR analógico [75]. . . . .	38
3.6. Histogramas referentes a datos del PIR análogo de acuerdo a la cantidad de personas dentro del espacio [19]. . . . .	39
4.1. Diagrama del funcionamiento general del sistema. . . . .	43
4.2. Simulación en Gazebo. . . . .	46
4.3. Módulo ESP32. . . . .	47

4.4.	Sensores para los módulos contadores. En donde: a) sensor PIR HC-SR501 y b) sensor ToF VL53L1X . . . . .	50
4.5.	Sensores para los módulos por inferencia. Los sensores corresponden a a) BME280 y b) AMN21112 . . . . .	51
4.6.	Representación del ambiente del instituto. . . . .	55
4.7.	Mapas a utilizar. . . . .	57
4.8.	Relación distancia - personas con diferentes parámetros de ACO. . . . .	59
5.1.	Simulación en Gazebo en el mapa 4.7b. Secuencia de recorrido del robot de un espacio a otro. . . . .	63
5.2.	Prueba de los módulos contadores en un pasillo del instituto. a) pasillo de prueba y b) prueba de los módulos contadores . . . . .	65
5.3.	Visualización de los datos del sensor ambiental. . . . .	67
5.4.	Matriz de confusión del modelo para el sensor ambiental. . . . .	68
5.5.	Prueba de los módulos de conteo por inferencia. Las figuras corresponden a: a) módulos de sensores colocados en su posición y b) obtención de datos con los módulos. . . . .	69
5.6.	Histogramas para los datos correspondientes a a) 1 persona, b) 2 personas y c) 4 personas. . . . .	70
5.7.	Parámetros de distribución de Laplace en relación con la cantidad de personas. . . . .	71

# Índice de tablas

5.1. Simulación en mapa 4.7a . . . . .	61
5.2. Simulación en mapa 4.7b . . . . .	62
5.3. Simulación en mapa 4.7c . . . . .	62
5.4. Resultados del módulo contador usando PIR digital. . . . .	64
5.5. Resultados del módulo contador usando ToF. . . . .	65
5.6. Espacios con su correspondiente propuesta de módulos a utilizar (referencia de figura 4.6). . . . .	71
5.7. Resultados del ambiente del instituto. . . . .	72

# Resumen

En tareas de búsqueda y rescate el tiempo es vital para la atención de las víctimas. En ambientes como un edificio público, la búsqueda de personas puede complicarse debido a la estructura de los espacios y a la poca información que se puede tener del lugar. En este trabajo se propone utilizar un robot para explorar un espacio interior en busca de personas, basándose en el posible número de personas que puede haber en los diferentes lugares. Conocer esta información ayudaría a generar una planificación adecuada que priorice buscar en los lugares con mayor cantidad de personas, procurando igualmente minimizar la distancia de recorrido del robot. Se planifica la búsqueda de personas utilizando el algoritmo de la colonia de hormigas, el cual determina el orden de visita de los diferentes lugares. Para la medición de ocupación de los espacios se ha considerado una red heterogénea de sensores. La red está compuesta de módulos con distintos sensores, definidos de acuerdo al tipo de espacio en el que se busca saber su nivel de ocupación. Esta red permitiría estimar la cantidad de personas en un espacio de manera alternativa a las técnicas de conteo mediante visión por computadora, evitando así una invasión a la privacidad. La estimación de la ocupación se hace tanto con módulos contadores como con el uso de algoritmos de aprendizaje automático. Se genera la implementación de la red de sensores de manera física, mientras que la exploración de los espacios por parte del robot se hace de manera experimental. Los módulos de sensores lograron precisiones entre el 82 %-90 % en los escenarios de prueba. Se hace discusión de las ventajas y limitantes de las distintas propuestas de estimación de ocupación. Igualmente, se analizan los planes de búsqueda generados y se discute la utilidad del sistema en situaciones reales.

# Capítulo 1

## Introducción

Existen situaciones de riesgo que pueden terminar en desastres. Estos pueden clasificarse de acuerdo a su origen; ya sean naturales (huracanes, terremotos, etc.) u originados por la actividad del hombre (incendios, inseguridad, etc.). Los desastres, particularmente los de índole natural, han ido en aumento debido a la agudización de la crisis climática. De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), del 2000 al 2020 más de 59 millones de personas fueron afectadas por estos fenómenos; y más de 10,000 personas han fallecido por estos hechos. La atención de estos desastres han causado la perdida de casi 600 mil millones de pesos en el mismo periodo[37].

En el momento de que ocurre un desastre, la atención temprana de la situación de riesgo es vital, siendo la prioridad principal la de salvaguardar las vidas de las personas mediante acciones de búsqueda, rescate y atención hospitalaria. Cuando ocurre una situación de riesgo en un edificio, por ejemplo, las personas pudieron haberse refugiado dentro del lugar o quedar atrapadas en lugares donde es complicado que puedan salir; y estas pueden sufrir desde crisis nerviosas, lesiones leves o lesiones graves. El tiempo de respuesta para la atención de las personas es vital debido a que potencialmente pueda ocurrir un derrumbe, explosión o el oxígeno comience a escasear. Se estima que 48 horas posteriores al desastre la tasa de mortalidad aumenta considerablemente para las personas que aún sigan conscientes [15].

Desde hace tiempo existe el interés en el desarrollo de robots o drones que apoyen en estas tareas de búsqueda; principalmente para ser usados en



Figura 1.1: Robot de rescate del proyecto ICARUS [22]

lugares donde la intervención de rescatistas humanos o incluso caninos, sea compleja y riesgosa. Generalmente, este tipo de robots son denominados “robots de rescate” y su utilidad se nota en las acciones de exploración, entrega de víveres, en la identificación de víctimas, potenciales riesgos e identificación de espacios seguros. Estos robots generalmente están equipados con sensores que le dan capacidades para planificar rutas, esquivar obstáculos, y encontrar personas.

Una tarea importante con los robots de rescate es la de obtener información relevante sobre la zona a trabajar, para así planificar mejor una tarea de rescate. Particularmente, las operaciones de búsqueda de personas presentan el reto de generar planes de exploración que permitan encontrar víctimas en el menor tiempo posible. Diversos métodos han sido estudiados para hacer esta tarea, tanto en ambientes donde existe información previa o en los que no se tenga información alguna. Con el tiempo, siendo el recurso más valioso para el éxito de estas operaciones, es importante explorar opciones que mejoren los tiempos de búsqueda de personas para potencialmente salvar vidas en situaciones de riesgo [15] [32] [21].

El manejo de este tipo de robots puede ser de manera remota a través de la tele-operación, permitiendo a los operadores humanos interactuar con entornos peligrosos de manera segura. Sin embargo, la tele-operación puede complicarse en situaciones donde la conectividad es limitada o nula, por lo cual un cierto nivel de autonomía del robot es importante para mejorar la efectividad y el tiempo de respuesta de las posibles tareas.

Por otro lado, bajo el concepto de ciudades inteligentes, en las que tecnologías basadas en Internet de las Cosas o IoT (por sus siglas en inglés, Internet of Things) permitirían obtener mayor información sobre el entorno; es importante explorar soluciones que tomen provecho de esta información. Para las tareas de búsqueda y rescate, la información que puedan proveer diferentes sensores y dispositivos inteligentes sobre el estado actual y anterior del lugar, da una oportunidad para identificar, de manera más rápida, posibles víctimas o posibles zonas de riesgo. Estos datos pueden contribuir a planificar un rescate más seguro; ya sea con robots de rescate o con un equipo de rescatistas. En general permitirían mejorar la logística en las tareas de rescate. Entendiéndose a los dispositivos inteligentes como aquellas herramientas que están conectadas a internet y tienen la capacidad de recopilar, procesar, transmitir datos y, en algunos casos, tomar decisiones y acciones en función de esos datos.

Del mismo modo, la inteligencia artificial puede brindar capacidades adicionales para mejorar la efectividad de las operaciones de búsqueda de personas. Un aporte relevante se encuentra en el análisis de datos como imágenes o lecturas de sensores para la localización de personas. Igualmente, la inteligencia artificial puede ser utilizada para la logística en las operaciones de búsqueda y rescate, considerando factores como la ubicación de los recursos disponibles, las condiciones del terreno y las necesidades de las personas afectadas.

Este trabajo tiene su finalidad el utilizar el conocimiento de los niveles de ocupación, utilizando una red heterogénea de sensores, para generar planes de búsqueda de personas; permitiendo así priorizar buscar en los lugares en donde se encuentren más personas. Esta planificación va acompañada de diversas simulaciones con un robot móvil autónomo que recorrerá los espacios, haciendo la simulación de buscar personas.

La utilidad del proyecto está enfocada en una etapa posterior a un desastre en un edificio, en la que aún no han sido dañadas las estructuras y se requiere el desalojo de las personas en los inmuebles. Para ello, se tienen diversos ambientes de simulación y un ambiente basado en uno de los pisos del Instituto de investigaciones en Inteligencia Artificial de la Universidad Veracruzana. La determinación de la ocupación de los espacios en los ambientes de simulación son determinados de manera aleatoria, mientras que

en el entorno real se evalúa la funcionalidad de las diferentes propuestas de módulos de sensores, desarrolladas en este trabajo.

## 1.1. Justificación

Como se menciona anteriormente, el trabajo se enfoca en situaciones menos alarmantes. Dado un reporte de siniestro, se requiere que los robots pueden apoyar; ya sea para apoyo en labores de evacuación o para la atención de crisis nerviosas. Considerando que, cuando existe información a priori del entorno (tanto del mapa como del estado del inmueble, así como la cantidad de personas dentro de los espacios), las tareas pueden ser agilizadas para así utilizar el menor tiempo posible en una exploración. La utilidad de este trabajo está enfocada, pero no limitada, a trabajar en un escenario en la que hubo una alerta previa de un evento de riesgo y se busca evacuar o encontrar personas en el momento posterior de la alerta.

Bajo el contexto anteriormente mencionado, este trabajo está enfocado a la generación inteligente de planes para la búsqueda de personas con un robot móvil autónomo. El plan de búsqueda definirá, de acuerdo a la ubicación del robot y a información previa de la cantidad de personas en los diferentes lugares, aquellos espacios donde convendría explorar en prioridad. Con esto se busca que el robot pueda, potencialmente, encontrar la mayor cantidad de personas con la menor distancia recorrida posible. Se considera que los ambientes de pruebas son espacios públicos, de los que se tiene un mapa previo.

La labor de búsqueda de personas no queda limitada a situaciones de desastre o riesgo. Este tipo de soluciones son relevantes en el resguardo y la atención a adultos mayores en centros de cuidados o en labores de asistencia en lugares públicos como aeropuertos, museos, oficinas, entre otros.

Dentro de este trabajo, igualmente, se busca analizar y desarrollar maneras para estimar la cantidad de personas en un ambiente cerrado. Conocer la cantidad de personas que hay en un espacio cerrado tiene diversas utilidades como la optimización del uso de energía en edificios, aprovechamiento de dispositivos inteligentes, seguridad pública, así como en tareas de búsqueda

y rescate.

La estimación de personas se hará mediante una red heterogénea de sensores, instalados en el espacio público, los cuales permitirán hacer un conteo aproximado de la cantidad de personas en diversas zonas del lugar. La red se constituye de módulos electrónicos, los cuales se conforman de una tarjeta con conectividad remota, alimentación independiente y los sensores necesarios para la medición de la ocupación. Estos módulos son colocados en diversos puntos estratégicos y trabajan en un entorno de Internet de las Cosas, permitiendo así obtener la información actual de todos los módulos cuando sea necesario utilizarla. Se requiere una red heterogénea debido a que es necesario contemplar las diferentes configuraciones y características que puedan tener los espacios, ya que esto implicaría que algunos métodos para contabilizar personas pueden ser más adecuadas en ciertos espacios que otros.

En múltiples trabajos, el conteo de personas generalmente se realiza mediante el uso de elementos como las técnicas de visión por computadora o con el conteo de dispositivos portátiles personales. Las técnicas de visión por computadora permiten hacer el análisis de la imagen o de un grupo de imágenes, generalmente con algoritmos basados en técnicas de aprendizaje profundo, para determinar la cantidad de personas dentro de la imagen. Estas técnicas generalmente usan cámaras de seguridad en el espacio cerrado. Si bien, este tipo de técnicas resultan no son tan invasivas a la privacidad con respecto a utilizar los dispositivos portátiles personales, existe la posibilidad de identificar, sin previa autorización, la identidad de las personas. La utilización de elementos como cámaras en espacios cerrados; si bien puede justificarse en ciertos casos, puede generar algunos conflictos, que van desde cuestiones de incomodidad por parte de las personas, hasta generar problemas legales por la autorización de las personas de ser grabadas u observadas. Otro problema que presentan los métodos de conteo mediante visión por computadora es la alta cantidad de recursos computacionales necesarios para generar una estimación.

Debido a los dos principales problemas mencionados en las técnicas más comunes para la estimación de la ocupación, tanto la posible invasión a la privacidad como de los altos recursos computacionales necesarios para la estimación, se han diseñado técnicas alternas para generar una aproximación de la ocupación. Estas se enfocan en determinar los cambios en el ambiente

y generar una inferencia sobre el estado actual de ocupación de los espacios. Tomando en cuenta de que se trabaja bajo el contexto de un espacio público, se deben contemplar técnicas alternativas que permitan un mayor respeto a la privacidad.

## **1.2. Planteamiento del problema**

### **1.2.1. Pregunta de investigación**

¿Cómo puede implementarse un sistema que use la información de la ocupación de un ambiente interior para generar una planificación que eficiente la búsqueda de personas en situaciones de riesgo?

### **1.2.2. Hipótesis**

El contexto de la ocupación de los espacios puede apoyar en generar un plan de búsqueda inteligente que reduzca el esfuerzo para la búsqueda de personas con un robot autónomo. Una red compuesta por módulos heterogéneos de sensores puede ser utilizado para obtener los niveles de ocupación. La heterogeneidad del los módulos de sensores permitiría su adaptación en distintos ambientes.

## **1.3. Objetivos**

Los objetivos del trabajo se sintetizan en dos puntos: el primero va hacia la propuesta de un sistema para generar planificaciones inteligentes basadas en información proveniente de la red heterogénea de sensores, para así mejorar el tiempo de respuesta de un robot móvil autónomo en la búsqueda de personas en espacios cerrados; y la segunda está en la implementación de técnicas no invasivas a la privacidad para contabilizar personas en espacios interiores. Este último punto implica el restringir el uso de técnicas de visión por computadora para dicha estimación. La prioridad será que el robot pueda llegar a las zonas de interés con la mayor cantidad de personas en el menor tiempo posible.

### 1.3.1. Objetivo General

Generar planes de búsqueda para un robot móvil autónomo que prioricen los espacios con mayor cantidad de personas mediante la estimación de los niveles de ocupación.

### 1.3.2. Objetivos Particulares

- Revisar trabajos referentes a planificaciones de búsqueda de personas con información a priori.
- Determinar los algoritmos y los sensores a utilizar para el robot móvil.
- Explorar distintas técnicas no invasivas para el conteo aproximado de personas mediante tecnologías basadas en internet de las cosas.
- Evaluar el funcionamiento de los módulos electrónicos y conocer su capacidad para estimar la cantidad de personas en el ambiente.
- Analizar los planes de búsqueda generados por el algoritmo propuesto.

## 1.4. Alcances y limitaciones

La implementación trabaja inicialmente con un único robot autónomo terrestre, al cual le será enviado el plan de búsqueda con el orden de los espacios a visitar. Se contempla que este robot pueda potencialmente auxiliar a las personas en el espacio, sin necesariamente procurar hacer un rescate de las mismas.

No se harán adaptaciones mecánicas al robot para que navegue en terrenos complejos, así como tampoco algún sistema de control que apoye para este tipo de navegación. El trabajo con el robot estará principalmente limitado a que el robot haga la navegación autónoma a los puntos en el orden que el plan de búsqueda le generó. Llegando al punto objetivo, el robot no hará una exploración exhaustiva dentro del lugar para buscar personas en el entorno.

Ante situaciones de desastre existirían intermitencias en la conectividad y en el suministro de electricidad. Estos problemas serán tomados en cuenta en la implementación del sistema de los sensores mediante alimentación independiente. Mientras que la conectividad está contemplada con el uso de redes inalámbricas locales como Wi-Fi para el envío de datos de los módulos al robot, con el motivo de poder hacer el análisis del ambiente y determinar el nivel de la ocupación. Por el momento no se tiene contemplados otros protocolos de comunicación que permitan a los módulos trabajar en caso de problemas de conectividad.

Bajo un contexto en el que se tengan limitaciones en el acceso a recursos computacionales, es importante considerar algoritmos que muestren un balance entre su precisión y los recursos computacionales requeridos. Tanto el robot como los módulos de sensores tienen su alimentación independiente con la que podría operar en el momento que se suscite un evento de riesgo. El objetivo primordial del sistema de sensores es hacer la estimación con pocos módulos de sensores instalados, para cuidar el costo de la implementación. Con el robot se contemplan tener los sensores y algoritmos estrictamente necesarios para una navegación segura. El plan de búsqueda debe dar una solución que no necesariamente sea la óptima, pero que sea funcional.

El contenido de este trabajo se detalla a continuación. En el capítulo II, se establecen los antecedentes referentes al uso de la robótica en tareas de búsqueda de personas y en el uso de sensores distribuidos para el conteo de personas. En el capítulo III, se describen los fundamentos teóricos para los planes de búsqueda y la medición de los niveles de ocupación. Dentro del capítulo IV, se detalla la manera en la que se hace la implementación, describiendo igualmente los ambientes de pruebas a trabajar. Finalmente, el capítulo V muestra algunos planes generados junto con discusiones sobre el funcionamiento de los módulos contadores de personas.

# Capítulo 2

## Trabajos relacionados

### 2.1. Robots en operaciones de búsqueda y rescate

En el campo de la robótica móvil existe un área activa de investigación referente a robots de apoyo en tareas de búsqueda y rescate de personas. Este tema tuvo una especial atención a partir de la tragedia del 11 de septiembre, en el que se utilizaron robots como apoyo para el rescate de víctimas en los escombros de las torres gemelas en Nueva York [1]. Otros ejemplos importantes en donde se utilizaron robots de rescate fueron en desastres como el Huracán Katrina en 2005 o en el terremoto de Japón del 2011. [15].

En el desarrollo de estos robots de rescate, las líneas de estudio están enfocadas tanto en el diseño mecánico del robot como en el software del mismo para su funcionamiento. En la actualidad existen concursos como Robocup, en la que hay una división especial relacionada con robots de rescate. Estos robots deben detectar posibles víctimas y explorar el ambiente de manera segura [14].

En la rama de la inteligencia artificial se han estado desarrollando métodos y algoritmos importantes para el desarrollo de los robots de rescate. Dentro de sus aportaciones están las tareas de mapeo y exploración, detección de personas, detección de peligros, clasificación de objetos, entre otros [56] [4]. El uso de uno o múltiples sensores es de suma importancia para estas tareas, por ejemplo, las diferentes aplicaciones que usan visión artificial



Figura 2.1: Robot Hector utilizado en competencias de Robocup por la Universidad Técnica de Darmstadt. [14]

comúnmente trabajan con el concepto de fusión de sensores, lo cual implica que, se tenga tanto una cámara como otros sensores que complementen la identificación o el mapeo. Por otro lado, existen soluciones basadas en inteligencia artificial que apoyan en el trabajo colaborativo de robots [41].

Al ser un problema enfocado a generar planes de búsqueda de personas, podemos segmentar el problema en diferentes tareas; las cuales serán relevantes para el robot dentro de este rubro:

- Exploración
- Planificación
- Navegación
- Búsqueda

La exploración puede entenderse como las técnicas para conocer el ambiente a trabajar, ya sea mediante la generación de mapas o en la detección de objetos de interés. La planificación define la manera en que el robot debe ejecutar sus tareas, tales como definir los puntos en donde el robot deba explorar. La tarea de navegación se encarga de monitorear la manera en la que el robot procura llevar a cabo su objetivo planificado. Finalmente, la búsqueda implica detectar y encontrar a la persona.

En labores de búsqueda y rescate, la investigación comienza a avanzar en implementaciones con múltiples robots que trabajen de manera coordinada.

Se pueden ver tanto robots móviles de tierra, de aire o incluso acuáticos. Estos pueden ser semi-autónomos o autónomos [41] [5]. Se puede tomar provecho de la coordinación con múltiples robots con la planificación inteligente de tareas basada en las condiciones de la tarea y el robot [48] [5]. En general, varios trabajos definen robots con tareas más específicas, ya sea de exploración o búsqueda, en lugar de usar robots que hagan las múltiples funciones [67] [9] [48] [41].

En las tareas de exploración, se espera obtener un mapa del ambiente de trabajo; por lo que, el problema de exploración se plantea como definir el lugar más indicado para dirigirse, con el objetivo de obtener más información del mapa [59]. Mayormente, este tipo de exploraciones se hacía mediante la técnica de exploración de frontera, en la que las fronteras son espacios de incertidumbre con potencial a explorarse [3]. Esta técnica es ampliamente utilizada para la exploración autónoma, pero con áreas de oportunidad con respecto a la optimización de la exploración [17].

Actualmente, se han estado haciendo uso de técnicas novedosas basadas en aprendizaje por refuerzo profundo, combinado con la exploración de frontera [30] [68][11]. Aunque el aprendizaje profundo puede potencialmente destacar en las tareas de exploración, las técnicas tradicionales siguen teniendo buena efectividad en su implementación real [71]. Igualmente, existen técnicas usadas en robots de rescate para exploración basada en seguidores de pared [14] o métodos basados en un enfoque probabilístico [58] [59] [55]. El mapeo de los lugares explorados se hace generalmente con técnicas de mapeo y localización simultáneo o SLAM (simultaneous localization and mapping, por sus siglas en inglés), con sus respectivas variantes [14] [9]. Mientras se genera el mapa, existen trabajos que añaden elementos al robot para que detecten personas u objetos y puedan marcar la ubicación de los mismos dentro del mapa generado [14].

Para explorar el ambiente y moverse, se deben planificar rutas que le permitan al robot realizar la tarea pedida. Este problema es muy estudiado y existen diversos algoritmos que generan planificaciones para un robot. Actualmente, los algoritmos de planificación se particionan en algoritmos tradicionales y algoritmos basados en aprendizaje máquina o ML (Machine Learning).

Entre los algoritmos clásicos podemos encontrar distintas categorías como: planificaciones basadas en grafos, basadas en muestreo, métodos reactivos, entre otros. Los algoritmos más usados para planificación de rutas son A\* y Dijkstra, los cuales trabajan basados en grafos. De ahí se comenzaron a considerar opciones que permitieran planificar en entornos más inciertos, tales como: árboles aleatorios o RRT (Rapid Random Trees), diagramas de Voronoi, hojas de rutas probabilísticas, campos potenciales, D\*, entre otros [36] [59] [57] [64].

Con respecto a los algoritmos basados en ML, encontramos opciones como las máquinas de soporte vectorial o redes convolucionales [31]. E igualmente se desarrollan algoritmos basados en aprendizaje por refuerzo o RL (Reinforcement Learning) [59]. La importancia de trabajar con algoritmos basados en RL es su versatilidad para trabajar en ambientes de incertidumbre a través del tiempo.

En diversos trabajos se han planteado el utilizar técnicas referentes a planificación de trayectorias de cobertura o CPP (Coverage Path Planning) para situaciones de búsqueda y rescate. Estas técnicas buscan hacer una exploración completa del ambiente y son utilizadas principalmente en robots de limpieza. Este planteamiento implica que el robot deba eventualmente navegar en todo el espacio de trabajo. Este enfoque puede ser trabajado mediante un enfoque geométrico, esto es con la determinación de puntos para resolverse como el problema del agente viajero [66], o incluso mediante técnicas de ML [39]. Aunque tienen los mismos propósitos las técnicas de exploración y las de planificación de trayectorias de cobertura; la diferencia entre ellas radica en que CPP plantea que el robot deba navegar en todo el espacio de trabajo, mientras que la exploración solo plantea la navegación en puntos clave para conocer el ambiente.

Después de haber planificado los objetivos a los que debe llegar el robot, se debe estudiar lo referente a la navegación. En los temas de navegación pueden entrar áreas referentes a control, debido a que es relevante determinar la velocidad y giro del robot mientras se llega al destino [9]. En navegación se encuentran técnicas basadas en RL que dan soporte a la navegación en terrenos complejos no conocidos. Existe mucho campo de estudio en esta área para mejorar la seguridad en la navegación al momento que el modelo esté aprendiendo [72].

Para la búsqueda de personas utilizando robots generalmente se combinan técnicas de exploración junto con métodos para la detección de personas. En [14] se hace referencia a un robot que utiliza la técnica de exploración de frontera y técnicas de visión para identificar a las personas en un mapa que se crea mientras se explora. Por otro lado, en el trabajo de [10] se genera un mapa con un robot en el que se localizan a las personas y posibles peligros, generando después una ruta para llegar a esas personas, evitando las zonas de riesgo.

La búsqueda de personas puede ser planificada basada en información previa. El trabajo de [21] utiliza un robot móvil autónomo para planificar, de acuerdo al nivel de prioridad que tiene cada espacio, una ruta entre dos nodos. Se define un nodo inicial y un nodo final de acuerdo a un nivel de prioridad definido (que es asociado al nivel de ocupación que puede tener ese espacio). Se compara la ruta más corta entre los dos nodos con respecto a la ruta que genere la mejor ganancia, es decir, la ruta en la que se haga menor recorrido y se visiten más puntos prioritarios. Un ejemplo de esto se encuentra en la figura 2.2. Este trabajo es usado en el contexto de la búsqueda y rescate; y resalta la oportunidad de utilizar información a priori para mejorar el esfuerzo de búsqueda de personas.

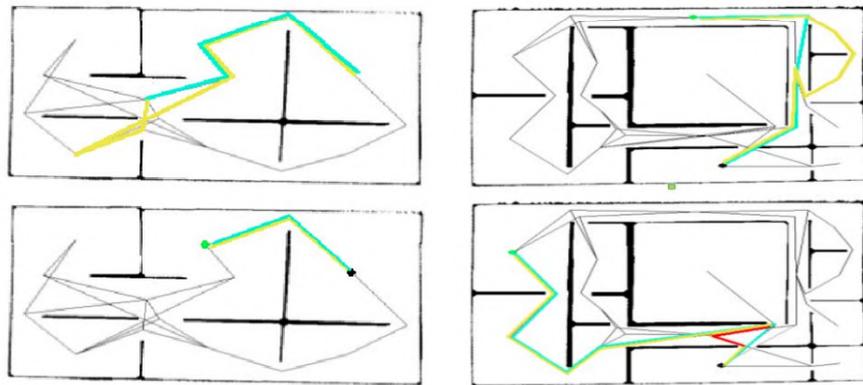


Figura 2.2: Generación de rutas entre dos nodos. Comparación entre la ruta más corta y la ruta con mayor ganancia [21].

Otro ejemplo de un trabajo que utiliza información a priori para planifi-

car es el trabajo de [40], el cual inicia haciendo una petición de búsqueda de ciertos usuarios y tomando la probabilidad de que estos usuarios se encuentren en diversas habitaciones a una cierta hora, genera un plan de búsqueda basada en el Agente Viajero Selectivo u OP (Orienteering Problem). El trabajo de [12] propuso utilizar igualmente el OP para la búsqueda de personas, utilizando las probabilidades a priori de encontrar a los usuarios en ciertas zonas, con la diferencia de hacer la implementación en un espacio abierto. Cuando hay poco conocimiento de la persona o el entorno, el modelo queda en un enfoque probabilístico, utilizando por ejemplo modelos de Monte Carlo [52].

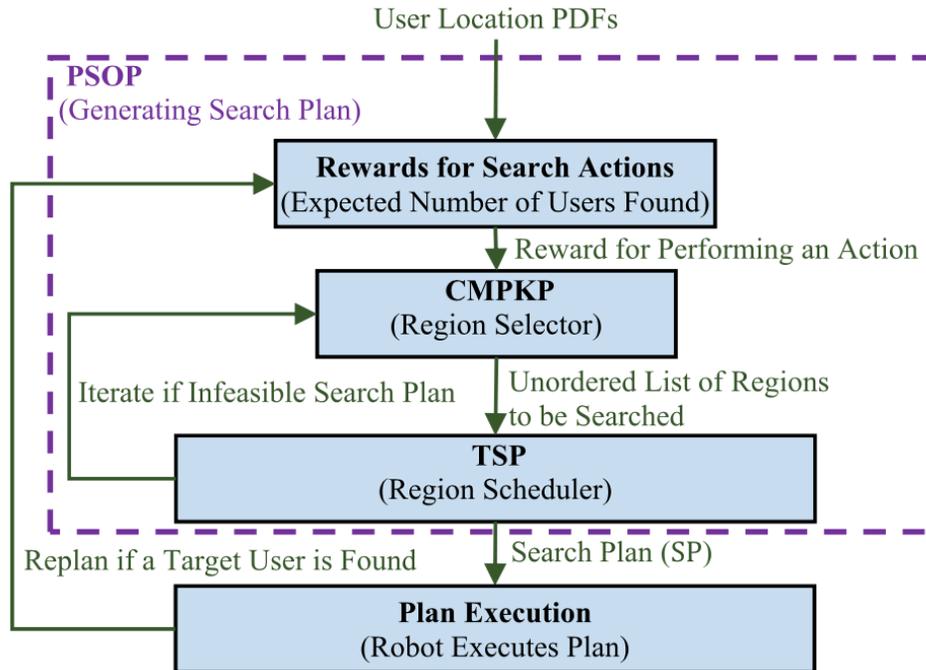


Figura 2.3: Modelo de búsqueda de personas de acuerdo a una consulta y a las probabilidades de ubicación [40].

Directamente en situaciones de búsqueda y rescate, se han desarrollado soluciones basadas en variantes del problema del agente viajero, como el problema de ruta de vehículos. Estos trabajos van buscando solucionar problemas como el definir los mejores lugares para albergues, distribución de

bienes en puntos estratégicos y atención de emergencias [35].

En los robots de rescate, principalmente aquellos enfocados a la exploración y a tareas de apoyo primario a víctimas, tienen instalados sensores visuales para la detección de personas. Los sensores visuales utilizados para detectar personas son variados, desde una cámara RGB-D, sistemas de medición y detección de objetos mediante láser o LiDAR (Light Detection and Ranging), sensores infrarrojos o una fusión de varios sensores. Entre las técnicas más comunes para la detección de personas se encuentran las basadas en redes convolucionales como el algoritmo YOLO (You Only Look Once), máquinas de soporte vectorial o histograma de gradientes [50] [40].

Cuando se encuentra a una persona, los robots pueden tener definida la interacción que podrían tener con las personas. En varios casos esto se limita a notificar e informar de la localización de la persona encontrada, mientras otros proyectos van más allá con sistemas para que la persona pueda interactuar con el robot para conocer más su estado actual [40]. En tareas de búsqueda y rescate, existen robots móviles que al detectar a una persona le colocan una banda que permita monitorear el estado de salud de la víctima [70].



Figura 2.4: Comparación de una ruta directa al objetivo vs. una ruta segura para el robot. [10]

Como último punto, es importante mencionar los desarrollos que se enfo-

can en generar y visualizar información relevante tanto para el robot como para los equipos de rescate. Existen trabajos en los que se generan herramientas para que los rescatistas tengan una mejor visión de la zona de peligro; ya sea con la generación y actualización de los mapas, la localización de víctimas y la identificación de peligros. Esta información puede ser generada tanto por los robots que van navegando, como por sensores externos que alimenten el sistema. Estos desarrollos pueden estar complementados con herramientas que puedan dar sugerencias sobre el actuar de los cuerpos de emergencia, como el dar rutas hacia puntos de interés que permitan evadir ciertos peligros identificados [26] [49] [10].

## 2.2. IoT y redes de sensores para robótica y situaciones de rescate

Siendo el internet de las cosas y las redes inalámbricas de sensores o WSN (Wireless sensor network) conceptos con ciertas similitudes y diferencias; siendo la más relevante el acceso al internet en IoT, coincide que las implementaciones en robótica van enfocadas principalmente en extender su capacidad de conocimiento del ambiente [24] [23]. Para los ambientes inteligentes, existen trabajos que utilizan los sistemas de alarmas en conjunto con los robots de rescate para mejorar su tiempo de respuesta en caso de que haya un desastre como un terremoto [67]. Igualmente, estos sistemas apoyan en dar mayor contexto a una búsqueda de personas en espacios abiertos [47].

Como se menciona, generar un ambiente de trabajo coordinado entre robots y sensores externos permite un campo de tareas interesante. Este modelo de interacción de los robots con sensores pueden ser para tareas de mantenimiento de sensores en un espacio inteligente o transferencia de datos de sensores, para tareas de logística dentro de un almacén, asistencia en casas inteligentes, guía en espacios públicos, misiones militares y tareas de búsqueda y rescate [1] [60] [23].

En este caso, plantear la navegación de un robot a múltiples nodos es una implementación hecha basada en IoT y WSN. Con las tecnologías IoT los nodos representan sensores u objetos equipados con sensores que dan alguna información sobre el contexto, y con eso plantear un plan de navegación. Un

ejemplo de implementación fue con robots recolectores de basura [62]; siendo los botes de basura los nodos que habría que explorar. Cada contenedor de basura tenían sensores que determinaban lo lleno que estuviese, para que así un grupo de robots planificaran el recoger la basura.

En concreto, para situaciones de rescate en las que se trabaja con robots (autónomos o semi-autónomos), ciertas soluciones están basadas en generar una red de dispositivos inalámbricos extendidos en el espacio a trabajar [45]; los cuales pueden ser puestos estratégicamente mediante robots en tareas de exploración [18] [47]. Estos sensores pueden tener la función de apoyo en la comunicación, o para obtener información del entorno mediante sensores. Y de acuerdo a la detección de posibles personas, se replantearían las operaciones de búsqueda [61] [16] [47]. Otra implementación más directa de WSN con robots de rescate es la de planificación de rutas de escape para robots y personas [28]. El principio sigue la misma línea; con los sensores remotos detectando personas o situaciones de peligro para dar aviso de ello y comenzar a planear rutas de escape seguras, tanto para los robots como para las personas.



Figura 2.5: Interfaz para la visualización de datos y alertas. [51]

Otras implementaciones de sensores para labores de búsqueda y rescate van enfocadas a directamente tener instalado múltiples módulos que permitan obtener información sobre la localización de personas y la detección de peligros potenciales[26][49]. Estos proyectos están enfocados en ser una herramienta de apoyo para los equipos de emergencia. Presentan sensores que

permiten detectar peligros como incendios e igualmente generan una estimación de la ocupación del lugar. Se utilizaron herramientas como cámaras, sensores pasivos infrarrojos o PIR (Passive Infrared), medidores de CO<sub>2</sub>, sensores ultrasónicos, entre otros. Se complementaron estos trabajos con una interfaz que permite una visualización sencilla de la información generada [6][51]. Siguiendo con la utilización del concepto de internet de las cosas, dispositivos para la localización y monitoreo de signos vitales de los equipos de respuesta permite el desarrollo de una mejor planificación de búsqueda.

### 2.3. Técnicas para el conteo de personas en espacios cerrados

El conteo y localización de personas es un problema relevante debido a su posible aplicación en diferentes escenarios. Desde soluciones para optimizar la energía de espacios cerrados, casas y edificios inteligentes, seguridad pública, analítica, apoyo en situaciones como la pandemia de COVID-19, para operaciones de búsqueda y rescate, entre muchas otras [53] [38].

Enfocándonos en el conteo de personas en ambientes interiores, podemos clasificar las técnicas de conteo de personas en opciones activas y pasivas. Las técnicas activas para localización y conteo de personas implican que cada persona tenga un dispositivo que lo identifique y localice. Mientras que las técnicas pasivas hacen uso de diferentes sensores para estimar de manera indirecta la cantidad y localización de estas personas. Si bien las técnicas pasivas pueden ser más complicadas de implementar y llegan a ser menos precisas, siguen teniendo mucho campo de aplicación; esto es debido a la dificultad de tener a todas las personas utilizando un dispositivo que los localice, además de que este tipo de dispositivos personales generan cierta inconformidad por una posible invasión a la privacidad [53] [38] [34].

Las técnicas pasivas para el conteo y localización de personas en un ambiente cerrado también se le conocen como “libres de dispositivos” (Device-free). Para el conteo en general, igualmente se pueden dividir las técnicas en tres categorías: binaria, estimada y exacta [38]. Las técnicas binarias buscan determinar simplemente si existen personas en un lugar o no, sin importar la cantidad. La estimada determina un rango aproximado de personas que

pueden estar en ese espacio. Finalmente, las exactas serán para obtener un número preciso de ocupantes.

Actualmente, las técnicas de visión por computadora junto con inteligencia artificial (particularmente redes neuronales convolucionales) han llegado a generar estimaciones muy precisas [54] [34]. Aunque utilizando visión ha ayudado de manera importante a las tareas de conteo de personas, existen casos en los que, puede no ser la opción más recomendada. En el caso del problema de la estimación de la cantidad de personas en un ambiente cerrado, usar visión para hacer el cálculo puede dar pie a problemas referentes a la privacidad (como las opciones activas de conteo), e igualmente los recursos computacionales disponibles puedan ser insuficientes al usar elementos de visión con redes neuronales [38]. Existen alternativas para aprovechar el uso de algoritmos basados en visión computacional, pero cuidando la privacidad. Estas opciones utilizan sensores de profundidad [20] o sensores infrarrojos.

Dentro de las opciones para conteo “libres de dispositivos” podemos encontrar técnicas basadas en radiofrecuencia y técnicas basadas en sensores. Entre las técnicas más utilizadas encontramos:

- Led.
- Infrarrojo.
- Gases (CO<sub>2</sub>).
- Acústicos.
- LiDAR.
- Señales inalámbricas (radiofrecuencia).
- Fusión de sensores.

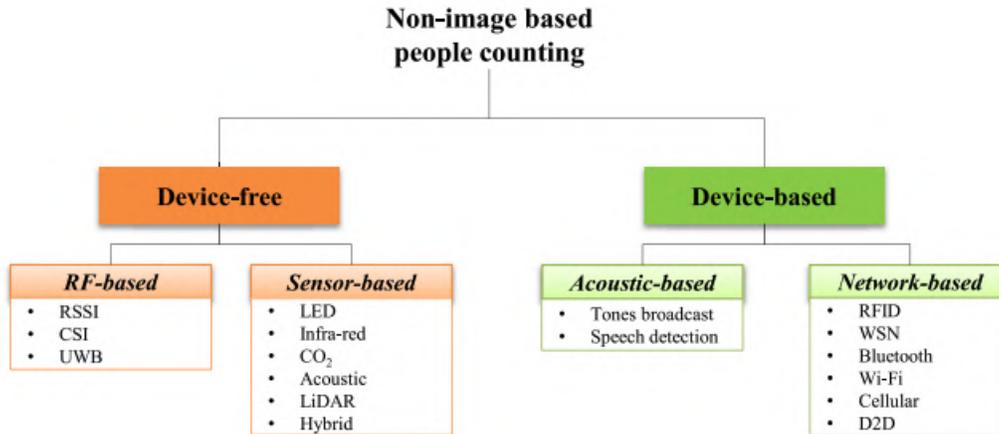


Figura 2.6: Técnicas de conteo no invasivas [38]

Las soluciones con luces tipo Leds generalmente utilizan emisores (fuente de luz) y receptores (foto-diodos) que midan la recepción de la señal proveniente del emisor, ya que la interferencia que se genera es lo que puede ayudar en estimar la ocupación [25]. Un principio similar existe en la que la fuente emisora es el sonido (ultrasonidos). Ambas opciones tienen buenos resultados en espacios pequeños y con cantidades bajas de personas. Adicionalmente, ambos sistemas requieren de un emisor de una señal y un receptor para hacer una inferencia sobre la diferencia de señal de llegada y salida [38].

Con un principio similar, en el que se emite una señal y se mide con un receptor la intensidad de la señal, existen trabajos que utilizan señales inalámbricas (radiofrecuencia) [65]. Igualmente con las señales Wi-Fi es posible tomar referencia de los dispositivos conectados para hacer la estimación. Este tipo de tecnologías ayudan para tareas de estimación y localización.

Utilizar sensores que midan los niveles de ciertos gases o sensores infrarrojos tienen una medición más directa sobre la presencia de personas. Algunos sensores de gases permiten medir los niveles de CO<sub>2</sub>, dando así una estimación de la cantidad de personas. Se encuentran principalmente en espacios cerrados donde generalmente sistemas de aire acondicionado están funcionando, debido a que este tipo de mediciones serían muy sensibles a que el ambiente estuviera ventilado [38].

En el método de sensores infrarrojos destacan los PIR. Estos sensores son utilizados ampliamente en situaciones de automatización de hogares o sistemas de seguridad. Generalmente, las implementaciones se componen de uno o más sensores PIR estratégicamente colocados para detectar la presencia de personas. Como tal, estos sensores de manera unitaria son utilizados para estimaciones binarias de presencia de personas; pero mediante inferencias, enfoques probabilísticos, fusión de sensores o múltiples PIR, se puede lograr una estimación de la cantidad de personas en un espacio cerrado [38] [43] [19]. Usar los PIR tienen el reto de definir correctamente la posición del sensor para que las personas puedan ser detectadas.

Un tipo de sensores que igualmente se utilizan son los dispositivos con múltiples sensores infrarrojos montados de manera integrada, los cuales tienen mejor respuesta al cambio y en general un mejor rendimiento en precisión. Así como los sensores PIR, estos mismos sensores pueden pasar por un procesamiento para generar una inferencia. En ambos casos se han trabajado con modelos ocultos de Markov para generar la inferencia y mejorar la precisión ante la respuesta dinámica que puede tener una habitación [46] [19].

Entre las técnicas que se encuentran podemos encontrar aplicaciones que contabilizan el paso de personas en un punto. Ya sea en la puerta de una habitación o un pasillo. Esta solución puede definir si una persona entra o sale utilizando sensores en dos puntos estratégicos y, dependiendo de que punto pase primero la persona, se define la entrada o salida [7]. Los sensores que generalmente son utilizados son los PIR, sensores infrarrojos, ultrasónicos y sensores de tiempo de vuelo. Como punto de atención, estos métodos tienen la dificultad de definir si la detección fue provista por un humano o algún otro objeto.

Igualmente, se encuentran opciones con múltiples sensores térmicos infrarrojos, acomodados de forma estratégica para la estimación de personas mediante inferencias o máquinas de soporte vectorial en la salida del grupo de sensores [69] [38]. Estos sensores pueden llegar a ser costosos, sobre todo cuando se requiere una mejor resolución para hacer una estimación más precisa.

Entre las opciones de sensores mostradas, las opciones LiDAR y de fusión de sensores son las que tienen más precisión con respecto a las otras opcio-

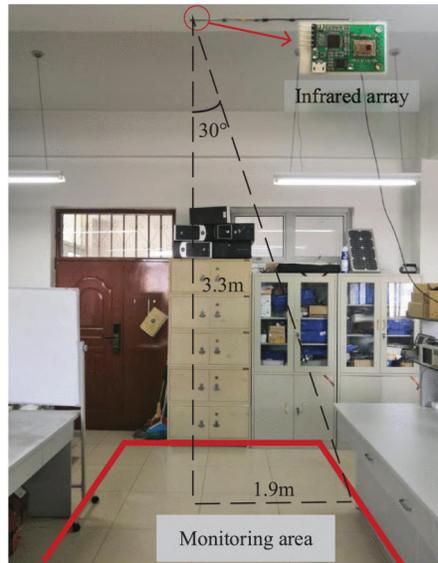


Figura 2.7: Utilización de sensores infrarrojos múltiples integrados [46]

nes. El problema está en el costo asociado de implementar estas opciones en edificios o centros de trabajo [38].

La inteligencia artificial puede ayudar en definir la cantidad de personas mediante la medición de cambios en el ambiente y generación de inferencias basadas en esas mediciones. Las variables que pueden medirse pueden ser referentes a la humedad relativa, presión atmosférica, temperatura, medición de algunos gases como  $CO_2$ , entre otros [44]. Otra manera es utilizar sensores PIR análogos que permita no solo medir la presencia de personas sino la posible cantidad de las mismas [19]. En ambos casos, se etiquetaron de antemano los datos y se utilizaron técnicas de Aprendizaje Máquina para generar la inferencia. Estas técnicas pueden estar limitadas a cambios muy repentinos de aforo o a errores de medición en aforos muy grandes, además de ser sensibles a posibles ruidos de las condiciones del ambiente.

En otro tipo de trabajos se desarrollan soluciones que están relacionadas directamente con el concepto de estimación de la ocupación de manera no visual y labores de búsqueda y rescate. En particular, se desarrolló una aplicación en la que se toma en cuenta la fiabilidad de los sensores junto con información pasada y la heterogeneidad de los mismos para visualizar y esti-

mar la ocupación de personas. Se genera un mapa que muestra el porcentaje de fiabilidad junto con la cantidad estimada de personas y si las puertas dan posibilidad de acceso al lugar [63].

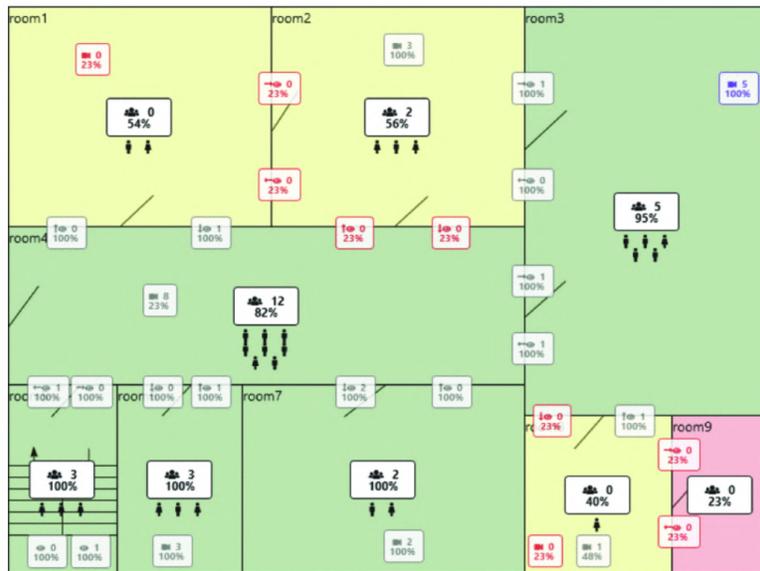


Figura 2.8: Conteo de personas mostrando la fiabilidad de los sensores [63]

Después de haber revisado los trabajos relacionados, en el siguiente capítulo se establecerán las bases teóricas para generar planes de búsqueda de personas que den prioridad a explorar, con un robot móvil autónomo, los espacios con mayores niveles de ocupación; la cual está basada en el trabajo de [40] y [21]. De la misma forma; se discuten diversos métodos para que, mediante sensores remotos de bajo costo, se estime la cantidad de personas dentro de un espacio cerrado.

# Capítulo 3

## Marco teórico

En esta sección se definirán los conceptos clave para llevar a cabo el trabajo. El plan de búsqueda está basado en la resolución del problema del agente viajero con ganancias; mientras que los módulos que realizan la estimación de personas lo harán mediante técnicas por conteo, así como mediante inferencias basadas en los datos del sensor.

### 3.1. Plan de búsqueda

El plan de búsqueda que se generará para el robot consistirá de una serie de objetivos ordenados, que el robot deberá visitar en ese orden. Para la generación del orden del plan de búsqueda se planteará el problema de manera similar al problema del agente viajero con ganancias o TSPP (por sus siglas en inglés, Travel Salesman Problem with Profits).

Al definir el plan de búsqueda como un problema del agente viajero; se va a definir un grafo representativo del ambiente. En el que los nodos hacen referencia a la representación de los diversos espacios, mientras que las aristas representan la conexión que hay entre los espacios. Cada arista tiene un peso o costo asociado, el cual representa la distancia entre cada uno de los espacios. De igual manera se hace una representación de la ganancia, la cual estará dada por la información de la ocupación de cada espacio. En el problema del agente viajero se debe definir el orden para visitar todos los nodos cumpliendo ciertas condiciones de maximización o minimización.

### 3.1.1. Problema del agente viajero

El problema del agente viajero es un planteamiento hecho en 1954 por George Dantzig, Ray Fulkerson y Selmer Johnson, en el que, teniendo un cúmulo de ciudades y un peso asociado para viajar a cada ciudad, se debe encontrar una propuesta para visitar todas las ciudades bajo condiciones y restricciones definidas. El problema es denominado NP-completo, debido a la dificultad de encontrar la mejor ruta a medida que se agregan ciudades. En síntesis, el problema es fácil de formular, pero difícil de resolver [13]. La investigación sobre el problema del agente viajero no se limita a fines académicos, ya que en sectores productivos es importante obtener un plan que permita pasar por todos los puntos de una manera óptima o cercana a lo óptimo.

En el planteamiento original del TSP se deciden la cantidad de ciudades a visitar que serán denominadas nodos. Estos nodos están unidos los unos a los otros mediante aristas o arcos que representan la vía para llegar de un nodo a otro. Cada arista tiene un peso asociado, el cual puede representar, por ejemplo, la distancia a recorrer de una ciudad a otra. Con esto contemplado, el objetivo principal es recorrer todas las ciudades solo una vez recorriendo la menor distancia posible.

Si bien el planteamiento original puede servir para muchas aplicaciones, algunas otras implementaciones pueden no estar acopladas a este planteamiento, necesitando algunas variaciones al problema para darle utilidad. Estas variaciones pueden estar dadas en forma de restricciones como el tiempo o distancia; plantear recompensas en el recorrido; definiendo restricciones de movilidad; entre otros. Incluso pueden cambiarse algunos planteamientos del problema como no necesariamente visitar todas las ciudades solo una vez [13].

Los algoritmos que se utilizan para solucionar este problema se clasifican principalmente en enfoques exactos y enfoques heurísticos. Los enfoques exactos buscan llegar a una solución ideal, pero pueden llegar a ser computacionalmente costosos. Mientras que los algoritmos con enfoque heurístico busca generar una solución aceptable en menor tiempo. En la mayoría de los casos se asume que las ganancias de los nodos son fijas, aunque se han hecho alternativas con pesos dinámicos [33].

### 3.1.2. Algoritmo Optimización por Colonia de Hormigas

El algoritmo de optimización por colonia de hormigas o ACO (por sus siglas en inglés, Ant Colony Optimization) es escogido para la generación del plan de búsqueda debido a su facilidad de implementación, facilidad de modificación para agregar restricciones, facilidad para lidiar con diversos escenarios, y su costo bajo de recursos computacionales con respecto a otras soluciones. Debido a su enfoque heurístico, con ACO se puede tener menor precisión para encontrar una ruta óptima, pero permite obtener soluciones funcionales [2].

El algoritmo ACO se basa en la cooperación entre las hormigas, que son agentes virtuales. Cada hormiga artificial construye una solución en forma de camino, y deja una señal de feromona en los caminos recorridos. Las hormigas futuras tienen más probabilidades de seguir los caminos con mayor cantidad de feromonas, lo que implica que las soluciones prometedoras son más exploradas y reforzadas. A medida que las hormigas avanzan, las feromonas se evaporan gradualmente, lo que permite que el algoritmo busque mejores soluciones en el espacio de búsqueda. Con el tiempo, se espera que las hormigas encuentren el camino más corto.

En el problema del agente viajero con ganancias se busca minimizar la distancia a recorrer maximizando la ganancia. Por lo tanto, cada hormiga realiza un recorrido de acuerdo con una función de probabilidad que considera tanto la distancia como la ganancia. La feromona depositada por cada hormiga se actualiza en función del beneficio obtenido en cada ciudad visitada. Al final de cada iteración, las feromonas son actualizadas para reflejar el mejor camino encontrado hasta ese momento. El proceso se repite hasta que se alcanza el límite de iteraciones [2].

Los parámetros principales para modular el comportamiento del algoritmo son:

- $N_h$ . La cantidad de hormigas a utilizar. Cada hormiga construirá una posible solución.
- $\alpha$ . El nivel de importancia del rastro de la feromona cuando la hormiga escoja el siguiente nodo a visitar.

- $\beta$ . El nivel de importancia de la heurística (en este caso, la ganancia de cada nodo) cuando la hormiga escoja el siguiente nodo a visitar.
- $\rho$ . El factor en el que se evapora la feromona entre iteraciones.
- $N_i$ . El número de iteraciones en las que se ejecutará el algoritmo.

El algoritmo 1 explica a nivel general la implementación de ACO para resolver el problema del agente viajero con ganancias.

```

Data: Cantidad de individuos en cada nodo
Result: Ruta con el orden a visitar de los nodos
Inicializar feromonas en las aristas del grafo;
for  $i \leftarrow 0$  to  $N_i$  do
  for  $j \leftarrow 1$  to  $N_h$  do
    Inicializar la hormiga en un nodo inicial;
    while la hormiga no haya visitado todos los nodos do
      Calcular las probabilidades de transición a los nodos no
      visitados;
      Seleccionar el siguiente nodo basado en las probabilidades;
      Actualizar la ruta de la hormiga y registrar la ganancia
      acumulada;
    end
  end
  Actualizar las feromonas en las aristas basado en las rutas y
  ganancias de las hormigas;
end
Seleccionar la mejor ruta encontrada basada en la mayor ganancia
acumulada;

```

**Algoritmo 1:** Algoritmo ACO

Para seleccionar la ciudad a visitar se utiliza la función de distribución de probabilidad. Esta asigna una probabilidad a cada ciudad vecina en función de la cantidad de feromonas depositadas en el arco que conecta la ciudad actual con la ciudad vecina, así como del beneficio asociado a la ciudad vecina. La idea principal es que las hormigas seleccionen las ciudades vecinas con una mayor probabilidad, si estas tienen una mayor cantidad de feromonas y un mayor beneficio asociado. Esto permite que las hormigas exploren las mejores opciones de acuerdo con las feromonas y los beneficios.

Para obtener la probabilidad de selección de una ciudad vecina se puede usar una función ponderada de las feromonas y el beneficio. Puede usarse una fórmula como:

$$P_{ij} = (T_{ij}^{\alpha}) * (B_{ij}^{\beta}) \quad (3.1)$$

donde  $P_{ij}$  es la probabilidad de seleccionar la ciudad  $j$  desde la ciudad  $i$ ,  $T_{ij}$  es la cantidad de feromonas en el arco  $(i, j)$ ,  $B_{ij}$  es el beneficio asociado a la ciudad  $j$ , y  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros anteriormente mencionados que modulan el nivel de importancia de la heurística y del rastro de feromonas.

La actualización de las feromonas se realiza tanto con base a la información local de cada hormiga, como con base a la información global obtenida de la mejor solución encontrada hasta el momento. En cada iteración, las feromonas depositadas en los arcos se evaporan parcialmente para evitar una acumulación excesiva y garantizar una exploración continua del espacio de búsqueda. La evaporación de feromonas se realiza multiplicando la cantidad actual de feromonas en cada arco por su factor de evaporación. La deposición de feromonas se realiza por cada hormiga en función de la calidad de la solución que construyen. La idea principal detrás de la actualización de las feromonas en ACO es que las hormigas depositen más feromonas en los arcos que forman parte de soluciones de alta calidad, lo que permite que las mejores soluciones sean más atractivas para las hormigas en las siguientes iteraciones del algoritmo.

Los valores de los parámetros de ACO son importantes, ya que define la manera en la que la solución se generará. Por ejemplo, un número de hormigas bajo puede causar que no se exploren suficientes rutas de solución, mientras que una cantidad alta de hormigas aumentaría el costo computacional. Un  $\rho$  muy alto tendería a generar soluciones subóptimas, mientras que uno muy bajo puede no converger en una solución. Tanto  $\alpha$  como  $\beta$  controlan la importancia de la feromona y la heurística a la hora de seleccionar el siguiente nodo a visitar. Con un  $\alpha$  alto y un  $\beta$  bajo se prioriza el valor de la feromona dado por las rutas ya creadas, mientras que un  $\beta$  alto y un  $\alpha$  bajo enfatizará a la heurística (en este caso, buscará visitar los nodos con mayores ganancias). En general, los parámetros que pueden dar un buen rendimiento que se recomiendan son: un  $\alpha$  de 1, un  $\beta$  entre 2 a 5 y un  $\rho$  de 0.1 hasta 0.5 [2]. Es importante mencionar que cada implementación requerirá diferentes con-

figuraciones que permitan mejorar las soluciones generadas por ACO, pero los parámetros anteriormente mencionados funcionan de manera razonable en diversos contextos.

## 3.2. Estimación de la ocupación de los espacios

Los módulos de conteo de personas para espacios cerrados son de utilidad en muchas situaciones que van desde apoyo en el uso eficiente de energía de edificios (como con el control de los sistemas de aire acondicionado), estudios de mercado en plazas comerciales, salud (e.g. COVID-19), seguridad y logística en situaciones de emergencia.

Para estimar la cantidad de personas en un espacio, las técnicas de visión por computadora y las técnicas basadas en dispositivos personales logran tener una muy buena precisión en la estimación. Sin embargo, estos métodos tienen sus desventajas relevantes. En ambos métodos, existe la posibilidad de no solo estimar la cantidad de personas, sino de obtener la identidad de las mismas. Si bien esto puede ser útil en situaciones de seguridad y vigilancia, obtener la identidad de las personas puede generar conflictos sobre la invasión a la privacidad, pudiendo llegar a implicaciones legales al respecto. Como segundo punto, particularmente en las técnicas de visión por computadora, una buena precisión va relacionada con un modelo más robusto y computacionalmente costoso.

Es por esto que líneas de trabajo procuran utilizar sensores que logren una buena precisión en la estimación y permitan el respeto a la privacidad, haciendo difícil la identificación de la identidad de las personas. Estas estimaciones pueden ser refinadas mediante técnicas de filtrado de señales, aprendizaje automático y fusión de sensores.

Para esta implementación se definen dos métodos principales para generar la estimación de la ocupación. Uno va enfocado a hacer la estimación mediante la detección y conteo de personas que pasan por un cierto punto. El segundo método procura usar sensores que midan las condiciones y cambios en el ambiente para generar una inferencia mediante técnicas de aprendizaje automático como K-vecinos más cercanos y un modelo lineal generalizado.

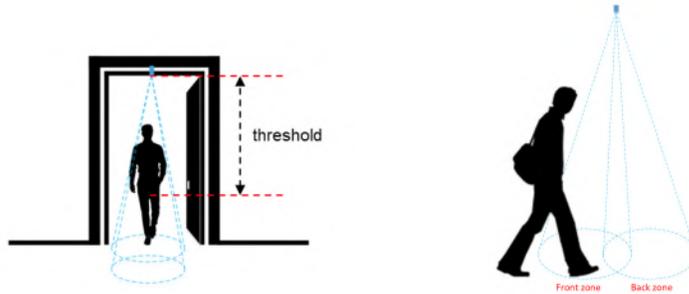


Figura 3.1: Principio de estimación por conteo [42].

### 3.2.1. Módulos contadores

En los módulos contadores, el principio básico para generar el conteo es el mismo. Se tienen dos sensores instalados en dos puntos estratégicos donde las personas deben pasar obligadamente; por ejemplo, cerca de una entrada, un pasillo o en una puerta. Ambos sensores deberán detectar la presencia de una persona pasando por el punto de detección. Y de acuerdo a que punto de detección reconoce primero la presencia de una persona, es posible determinar si la persona se dirige hacia un lado o hacia otro, dando así la manera de determinar si una persona entra o sale del lugar. Este principio se ilustra en la figura 3.1, en la que se muestra la determinación de las zonas de detección. Mientras que la figura 3.2 da referencia a la determinación de si una persona entra o sale de un lugar, dependiendo de qué zona de detección se activa primero.

Este principio de conteo se genera con diferentes tipos de sensores. Entre los principales se encuentran los sensores pasivos infrarrojos, ultrasónicos, sensores láser, sensores de presión y en general los sensores que permitan definir distancias.

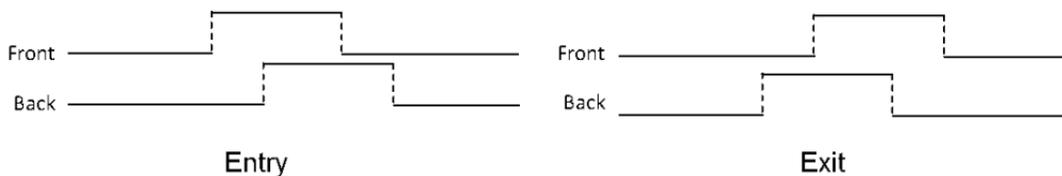


Figura 3.2: Detección y estimación de entrada o salida de un lugar [42].

Una primera propuesta que se contempla consiste en utilizar sensores PIR digitales para detectar la presencia de personas. Un sensor PIR digital detecta la presencia de personas mediante la detección de su radiación infrarroja. Estos sensores son utilizados en sistemas de seguridad, domótica y otras aplicaciones que requieren detectar movimientos. El funcionamiento básico de un PIR digital es el siguiente:

- Detección de radiación infrarroja. El PIR tiene un sensor piroeléctrico que permite detectar cambios en una radiación infrarroja recibida. Cuando se detecta un cambio, se emite una señal eléctrica.
- Detección amplificada. Mediante un lente de Fresnel es posible ampliar el campo de visión y dirigir mejor los cambios de radiación hacia el sensor para una mejor detección.
- Salida digital. La salida del sensor PIR digital es en forma de una señal digital, generalmente un nivel alto (1) o bajo (0). Cuando se detecta movimiento, la salida digital cambia de estado.

Estos sensores pueden tener opciones adicionales, como ajustes de sensibilidad, tiempo de retardo y rango de detección, según los requisitos específicos de la aplicación.

Para la primera propuesta de módulo se colocan los dos sensores PIR a utilizar cerca de la entrada. A diferencia de algunos trabajos, en los que los sensores tienen la orientación de detección de manera vertical (arriba hacia abajo); en esta propuesta se orientarán los sensores con su campo de detección de manera horizontal. Esta forma de direccionamiento permite mitigar posibles puntos ciegos del rango de detección del sensor, en caso de que la zona definida para la detección sea lo suficientemente amplia.

Basado en el trabajo de [7], hay dos formas de hacer el conteo de personas. Una manera es mediante la detección de movimiento en bruto de los sensores PIR, en la que de acuerdo a cuál de los dos sensores detecta primero el movimiento, se define si la persona entró o salió del lugar. Si bien la implementación de esta primera opción tiene un buen nivel de precisión, el método es susceptible a errores, principalmente basados en la respuesta del sensor PIR. Al detectar una persona, el sensor PIR tiene un cierto tiempo

en el que se queda dando respuesta de detección, haciéndolo vulnerable a no detectar un nuevo movimiento cuando el PIR aún no regresa al estado de no detección. Un ejemplo claro de esto es, si una persona pasara por el espacio de detección inmediatamente después de haber pasado otra persona. Es por eso que una segunda propuesta del trabajo se utiliza un enfoque probabilístico, basado en la premisa de que las personas generalmente pasan de una habitación a otra. La desventaja de este otro método es la complejidad computacional que puede tener. De acuerdo a los alcances de este trabajo, se utilizará el primer método propuesto en el trabajo mencionado anteriormente.

La segunda propuesta del módulo para contabilizar personas utiliza un sensor de tiempo de vuelo o ToF (Time of Flight). Los sensores ToF son conocidos por su capacidad de medir con precisión la distancia de un objeto o superficie utilizando tecnología láser. Este tipo de sensor se utiliza en aplicaciones como detección de proximidad, navegación de robots, sistemas de seguridad, monitorización de inventario, entre otros. Sus características principales son:

- Tiempo de vuelo. El sensor utiliza la tecnología de tiempo de vuelo para calcular la distancia a un obstáculo. Emite un pulso láser y mide el tiempo que tarda en reflejarse en el objeto y regresar al sensor.
- Alcance y precisión. Dependiendo del fabricante, generalmente pueden llegar a tener un alcance de entre 4 y 10 metros, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren mediciones precisas de corto alcance. Pueden ofrecer una resolución de hasta  $1mm$ .
- Detección de movimiento rápido. El sensor tiene una capacidad de detección de movimiento rápido, lo que significa que puede realizar mediciones rápidas y precisas incluso cuando los objetos están en movimiento.
- Baja potencia y tamaño compacto. El sensor está diseñado para ser eficiente en cuanto al consumo de energía.

Basado en el trabajo de [42], este trabajo sigue el principio básico de definir dos zonas de detección. De acuerdo a la zona que detecte primero la presencia de personas, y si la otra zona eventualmente también detecta la

presencia de personas, se define si una persona entra o sale de un lugar.

Para hacerlo se necesita un único sensor ToF, el cual puede ser colocado cerca de una puerta o en un pasillo. Se parte en dos el campo de visión del sensor, para así emular el principio de conteo con dos sensores. El sensor es colocado de manera similar a la propuesta 1, es decir, orientado de manera horizontal. La idea general es definir primero un umbral de distancia que sea el estado cero del sistema, es decir, un estado en donde no haya ningún obstáculo. El umbral de distancia será el mismo para las dos zonas de detección. Este umbral puede ser definido de manera directa o puede actualizarse mediante el análisis del histograma de distancias bajo las condiciones de no haber obstáculos. Si la lectura del sensor en una de las zonas detecta una reducción de la distancia con respecto al umbral, se determina que un objeto o persona ha pasado por la zona de detección del sensor. Esta detección genera un cambio de estado en el sistema.

Dependiendo de la zona que haya detectado, es como se determina el nuevo estado del sistema; es decir, si se determina que la zona 1 hay un obstáculo, mientras la medición de la zona 2 está dentro del rango del umbral, se determina que el sistema está en el estado 1. El mismo principio aplicaría para un estado 2, pero con la zona 2 detectando un obstáculo y la zona 1 con valores similares al umbral. Un estado 3 significaría que ambas zonas detectan un objeto. De acuerdo con el orden en que se hagan los cambios de estado, es como se determina la dirección en la que la persona se ha dirigido; por ende, se puede determinar si la persona entró o salió del lugar. Con esta información, es posible hacer el conteo de la cantidad de personas en el espacio. Este principio se ejemplifica en la figura 3.3, en la que se nota los cambios de estados a medida que una de las zonas detecta un obstáculo.

Este método tiene ventajas y algunas desventajas. Una de las ventajas es igualmente una rápida implementación con un consumo de batería relativamente bajo, debido a la simplicidad del mismo. Uno de sus puntos fuertes con respecto a la primera propuesta es su mayor capacidad de lidiar con la rapidez del movimiento de las personas, debido a su rápida respuesta al cambio de estados.

Entre sus puntos débiles se encuentra la poca capacidad para lidiar con el conteo, en el caso de que múltiples personas pasan al mismo tiempo en

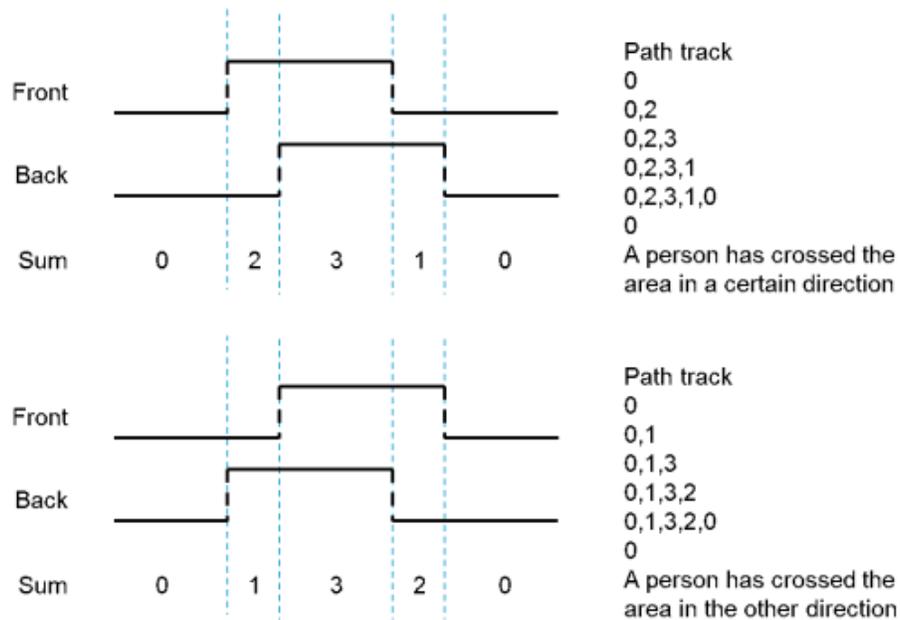


Figura 3.3: Cambios de estado para la detección de entrada o salida de una persona [42].

diferentes direcciones, así como si una persona entra, pero no pasa por el segundo punto de detección. El sensor también puede ser susceptible a conteos falsos, ya que puede que pase un objeto que no necesariamente sea una persona y poder contarse como tal, debido a que no es posible determinar qué tipo de objeto es el que está pasando. Igualmente, el sensor tiene problemas de detección de distancias con algunos colores de pelo, particularmente con los tonos oscuros. El problema consiste en que al regresar la señal, el pelo negro puede absorber fotones de luz y hacer que en la detección sea incorrecta.

### 3.2.2. Módulos de conteo por inferencia

Otra vertiente posible para generar una estimación de la cantidad de personas en un espacio. Esta utiliza sensores que miden los cambios o las condiciones del ambiente, y de acuerdo con estos datos se genera una inferencia con el uso de un modelo de aprendizaje automático. Esto implica que anteriormente se tuvo que haber generado una serie de datos con personas

reales en un espacio definido, en la que se etiquetan los datos de acuerdo a la cantidad de personas registradas en el espacio. Al igual que en los módulos contadores, se procuran utilizar mecanismos que puedan generar una estimación aceptable utilizando pocos recursos computacionales.

La tercera propuesta presenta un enfoque para estimar los niveles de ocupación en espacios cerrados mediante variables ambientales [44], trabajando en escenarios reales como un gimnasio y una sala de estar, se midieron variables como la temperatura, la humedad y  $CO_2$ . La figura 3.4 muestra uno de los escenarios donde se utilizó este método.

Primero, el trabajo generó una serie de datos correspondientes a los dos escenarios en condiciones reales, se anotó la cantidad de personas que había en el momento para generar la etiqueta de los datos. Los niveles de ocupación fueron etiquetados por nivel de ocupación (vacío, bajo, medio, alto). A partir de estos datos, se utilizaron algoritmos de aprendizaje automático para generar una estimación. Para la validación, se enviaron los datos mediante Wi-Fi para que los algoritmos puedan evaluar. Al graficar los datos de temperatura, presión y humedad del ambiente se detectó una correlación entre los datos y la ocupación. Se utilizaron 3 algoritmos de aprendizaje automático: K-vecinos más cercanos o k-NN (por sus siglas en inglés, k-nearest neighbors), árboles de decisión y Máquinas de Soporte Vectorial o SVM (support vector machine) para estimar los niveles de ocupación. También se utilizaron técnicas de selección de características, como la Eliminación Recursiva de Características, y validación cruzada para mejorar la precisión.

El trabajo llegó a obtener hasta un 97% de precisión en la estimación de la ocupación utilizando K-vecinos más cercanos. Para la implementación, se utilizará este algoritmo, ya que en los resultados obtuvo la mayor precisión.

El algoritmo del k-NN es un método de aprendizaje automático supervisado utilizado para clasificación y regresión. Es un clasificador basado en el concepto de similitud. El algoritmo calcula la distancia entre la instancia de entrada y todas las instancias del conjunto de entrenamiento, y selecciona los k vecinos más cercanos según la distancia. Luego, utiliza las etiquetas o los valores de destino de estos vecinos para clasificar o estimar el valor de la instancia de entrada. Para la configuración del algoritmo es importante definir el número de vecinos o "k" la manera en la que se mide la distancia

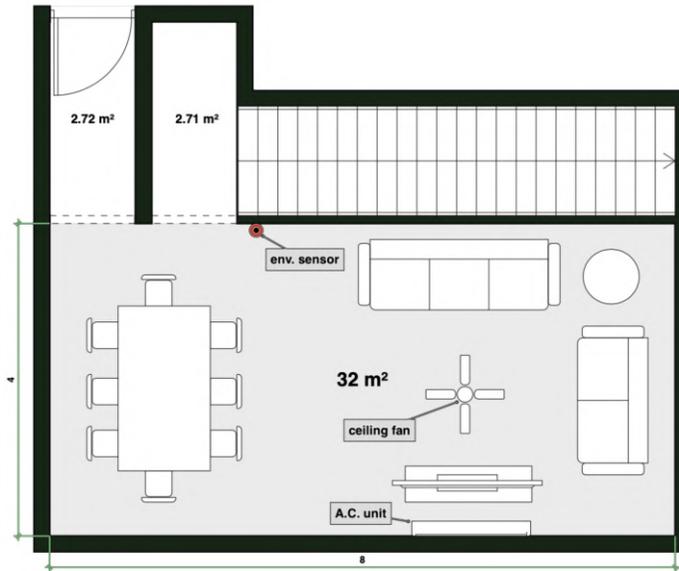


Figura 3.4: Escenario utilizado para la estimación de la ocupación con el sensor ambiental [44].

entre los vecinos. Un valor pequeño de  $k$  puede hacer que el modelo sea más sensible a los puntos atípicos, teniendo un bajo sesgo con una varianza alta; mientras que un valor grande reduciría la varianza y aumentaría el sesgo. Para determinar la distancia entre los vecinos se encuentran principalmente métricas como la distancia euclidiana, distancia Manhattan, distancia min-kowski y distancia de Hamming.

En las configuraciones de  $k$ -NN se utiliza el algoritmo "ball tree", el cual es una técnica para la búsqueda de vecinos más cercanos en espacios de alta dimensionalidad. Este se basa en la idea de dividir el espacio de características en regiones (bolas o esferas) que contienen un conjunto de puntos de datos. Cada región se representa por un "centro" (un punto dentro de la región) y un radio que define la distancia máxima desde el centro a cualquier punto dentro de la región. Las regiones se organizan en un árbol binario, donde cada nodo del árbol representa una región que se divide en dos subregiones más pequeñas.

En general la propuesta de [44] tiene algunas ventajas e inconvenientes.

Una de sus ventajas está en generar una buena precisión en los escenarios de los que se obtuvieron los datos, además de que esta predicción tiene un relativo bajo costo computacional. Como inconvenientes hay algunos puntos importantes. Uno de ellos es que los modelos generados solo pueden trabajar en los escenarios en los que se trabajó, por lo que es complejo hacer un modelo único para estimación que funcione en todos los diferentes tipos de espacios. Igualmente, este método puede tener problemas con mediciones incorrectas debido a que sería sensible a cambios externos del ambiente. El sistema en general es lento ante la detección de la ocupación, ya que se debe esperar a que las personas generen una influencia en las variables del entorno. Particularmente, se mencionan posibles problemas si cambian las condiciones de ventilación del espacio. Debido a esto, este método será útil en espacios cerrados en los que los cambios externos del ambiente sean más controlados, como por ejemplo salones sin sistemas de ventilación.

La cuarta propuesta es utilizar un PIR análogo para un espacio cerrado, esto basado en el trabajo de [19]. El funcionamiento del PIR análogo es similar a su versión digital descrita anteriormente en algunos puntos; como por ejemplo en usar un sensor piroeléctrico que mide la radiación infrarroja y con un lente de Fresnel se amplifica y se dirigen esos cambios para mejorar la sensibilidad del sensor.

La diferencia importante radica en la respuesta que genera el sensor. Cuando no se detecta movimiento alguno, la señal de salida se mantiene en un voltaje casi estable, debido a que en realidad hay unas oscilaciones con una baja amplitud y una frecuencia estable. Al detectar una persona, el sensor comienza a generar una oscilación más amplia a una frecuencia menor. A diferencia de un PIR digital en la que la respuesta del sensor es si hay presencia o no, el PIR análogo puede tener variaciones de acuerdo a la cantidad de personas dentro de su rango de detección. explicación de la respuesta en la salida se muestra en la figura 3.5.

A diferencia de un PIR digital, en el que la salida está condicionada a una detección de presencia o no, el PIR análogo es capaz de reaccionar de manera distinta de acuerdo a la cantidad de personas que haya en el espacio. Igualmente, la respuesta del sensor análogo al detectar una persona es más rápida que la de un PIR digital, en la que existe un periodo de inactividad al encontrar un movimiento.

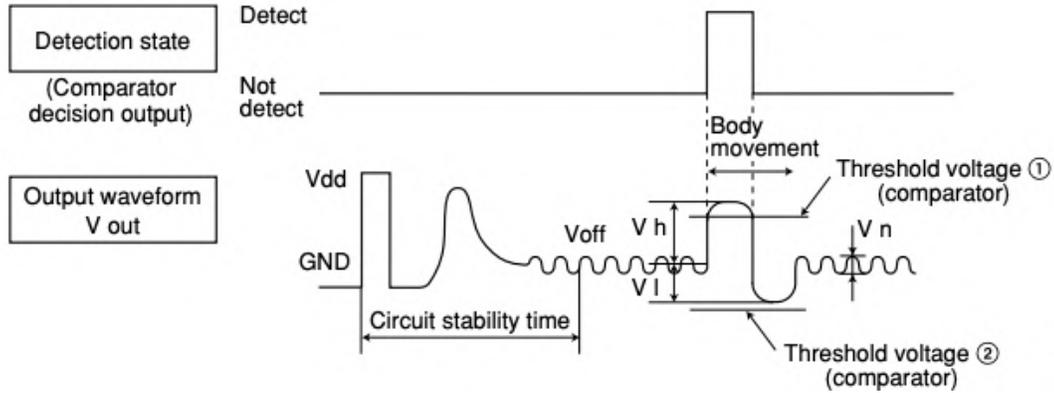


Figura 3.5: Principio de funcionamiento del PIR analógico [75].

Para tomar provecho de las propiedades del PIR analógico, se genera un histograma que recolecta la respuesta del sensor en un periodo de tiempo definido y una cierta cantidad de personas dentro del rango de detección del sensor. Al ser una señal analógica, esta tiene variaciones de voltaje que hay que digitalizar por medio de un conversor analógico-digital o ADC (por sus siglas en inglés, analog-digital converter), en la que, dependiendo de la capacidad del conversor, se tendrán valores más específicos. Las personas pueden estar haciendo actividades cotidianas; en el caso del experimento, se usaron escenarios como juntas de negocios para la recolección y validación del método.

La figura 3.6 muestra como los histogramas, dentro de un mismo periodo de tiempo, tienen variaciones en la distribución de datos de acuerdo a la cantidad de personas que pueda haber. Con esto en mente, se hace un análisis del histograma. La forma de hacerlo es mediante la obtención de sus parámetros de distribución de Laplace.

La distribución de Laplace es una distribución de probabilidad continua que tiene forma de campana. A diferencia de la distribución normal, la distribución de Laplace se utiliza cuando los datos tienen una distribución con colas más pesadas o presentan valores atípicos. Es particularmente útil en situaciones donde se requiere un modelo de datos más robusto y resistente

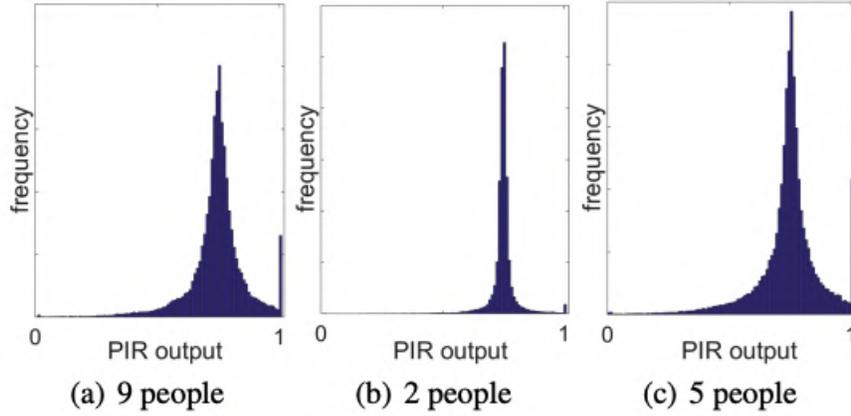


Figura 3.6: Histogramas referentes a datos del PIR análogo de acuerdo a la cantidad de personas dentro del espacio [19].

a valores extremos. La distribución de Laplace tiene la siguiente función de densidad de probabilidad:

$$f(x; \mu, b) = \frac{1}{2b} \exp\left(-\frac{|x - \mu|}{b}\right) \quad (3.2)$$

Esta distribución tiene dos parámetros relevantes: la ubicación  $\mu$  y la escala  $b$ . La ubicación (ecuación 3.3) determina el centro de la distribución y la escala (ecuación 3.4) muestra el nivel de dispersión de los datos alrededor de la ubicación

$$\mu_j = \text{mediana}(x_j) \quad (3.3)$$

$$b_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i: x_i \in x_j} |x_i - \mu_j| \quad (3.4)$$

en donde  $x_j$  hace referencia a los datos del sensor PIR provenientes del ambiente  $j$ .  $N_j$  se refiere a la cantidad de datos del sensor en el ambiente  $j$ .  $x_i$  representa un dato del sensor PIR.

Cuando se ajusta una distribución de Laplace a un histograma, los parámetros de ubicación y escala se estiman a partir de los datos del histograma. La ubicación se puede interpretar como el valor central de la distribución y la escala como una medida de la dispersión de los datos. Estimar los parámetros

de distribución de Laplace a partir de un histograma implica encontrar los valores de ubicación y escala que mejor se ajusten a los datos observados. Esto se puede hacer utilizando métodos estadísticos, como la maximización de la verosimilitud o la minimización del error cuadrático.

Al obtener los datos de distribución  $\mu$  y  $b$ , se encuentra una correlación entre los valores de los parámetros y la cantidad de personas detectadas. Esta correlación es más notoria en  $\mu$ . Con esto en mente, se utiliza un modelo lineal generalizado o GLM (Generalized Linear Model). Un modelo lineal generalizado es una extensión del modelo lineal clásico que puede manejar variables de respuesta que no siguen una distribución normal. Los componentes básicos de un GLM son:

- **Predictor lineal.** El predictor lineal es una combinación lineal de las variables independientes, ponderadas por los coeficientes del modelo.
- **Función de enlace.** La función de enlace es una función que relaciona la media de la distribución de la variable de respuesta con el predictor lineal. Ejemplos comunes de funciones de enlace son la función *logit*, la función logaritmo, la función inversa y la función identidad.
- **Función de distribución.** La función de distribución especifica la forma de la distribución de probabilidad de la variable de respuesta. Puede ser: una distribución Gaussiana (normal) para variables continuas, una distribución de Poisson para variables discretas, una distribución binomial para variables binarias, entre otras.

El modelo lineal generalizado, como se mencionó anteriormente, utiliza un predictor lineal, que es una combinación lineal de las variables independientes. Esto implica que la variable de respuesta se asume como una función lineal de las variables independientes. Además, el modelo lineal generalizado utiliza una función de enlace para transformar el predictor lineal en una escala de probabilidades. Esto es necesario porque la variable de respuesta no siempre representa directamente una probabilidad.

En [19] se utilizan tanto un GLM de distribución Gaussiana como una distribución de Poisson. Al procurar estimar máximo 8 personas, se puede

utilizar un GLM de distribución Gaussiana. Al buscar predecir más de 8 ocupantes, se utilizó un GLM de distribución de Poisson.

Después de que se generó el modelo con los parámetros de distribución de Laplace, se tiene que hacer la evaluación del mismo. Para esto, se coloca el sensor PIR en medio del espacio y se toman todas las mediciones digitalizadas que el sensor genere. Después de tomar una serie de datos en un intervalo de tiempo definido (2 minutos), se genera su histograma de los datos y se obtienen los parámetros de distribución de Laplace. Finalmente, los parámetros son pasados al modelo de predicción que estimará la ocupación.

Entre los puntos fuertes de esta propuesta para estimar personas se encuentra la capacidad de adaptación a diferentes espacios; ya que, a diferencia de las otras propuestas, su implementación no requiere condiciones muy específicas sobre el espacio. Además, es menos sensible a lecturas falsas generadas por objetos que no sean personas. Igualmente, esta propuesta no es computacionalmente costosa, debido a que fue pensada para su implementación en un microcontrolador. Como punto débil de la implementación es que la generación de un resultado, así como la propuesta anterior, toma más tiempo en generar una estimación que los módulos contadores. Otro problema es la dificultad de usar una implementación similar en espacios grandes como un auditorio, ya que se depende completamente del campo de visión que tenga el sensor.

En esta sección, se ha proporcionado una base conceptual y teórica para el desarrollo de este trabajo. Se han definido los principios para la generación de planes de búsqueda, así como los métodos propuestos para medir la cantidad de personas en un espacio cerrado. Ahora, en la siguiente sección, se presenta en detalle la manera en que el fundamento teórico es llevado a la implementación. Se definen tanto las características de los ambientes de prueba como las herramientas a utilizar para el desarrollo, tanto del algoritmo para generar los planes de búsqueda como los módulos de sensores.

# Capítulo 4

## Implementación

Para la realización de los experimentos se contemplan 4 escenarios, cada uno de ellos con sus respectivos mapas, así como una experimentación en un ambiente similar a uno de los pisos del edificio del instituto. Para la búsqueda de personas en situaciones de riesgo, este proyecto asume algunos puntos importantes sobre el ambiente a trabajar:

- Se asume que el suelo en el que el robot navegará es plano y firme.
- Existe un mapa previo definido del ambiente a trabajar.
- Cada habitación o espacio está representada como un nodo de un grafo.

El funcionamiento del sistema está dividido en 3 elementos importantes: los módulos de sensores, el algoritmo ACO y el robot. Los módulos de sensores utilizan el módulo ESP32, el cual tendrá a cargo el envío de la lectura de los sensores. Dentro del algoritmo ACO se reciben primero los datos de ocupación provenientes de los módulos de sensores para después definir el plan de prioridad de búsqueda. El plan de búsqueda será generado en forma de una lista, en la que el primer elemento de la lista será el nodo prioritario a visitar, y sucesivamente los nodos menos significativos. Por último, se tiene al robot que utilizará un algoritmo que gestione la visita de los nodos de manera autónoma.

Recordando que para los módulos de sensores existen 2 tipos, módulos contadores y módulos de conteo por inferencia, en ambos casos se hace el envío directo de los datos proveniente del sensor vía MQTT para que otros

algoritmos procesen la información. Para los módulos de conteo por inferencia, se requiere una recopilación previa de datos etiquetados con sus niveles de ocupación para poder generar un modelo de inferencia. Al obtener finalmente los datos del nivel de ocupación, la información es pasada al algoritmo ACO.

Del algoritmo ACO se obtiene una lista en la que se muestra el orden de prioridad de visita de los nodos. Esta lista es pasada al algoritmo que controlará el movimiento del robot hacia los diversos objetivos. En el algoritmo que controlará el movimiento del robot, todos los nodos están referenciados como un punto definido en el mapa. El algoritmo leerá la lista por cada valor, y en cada iteración se enviará el punto objetivo al que el robot debe llegar. De acuerdo al plan de búsqueda generado, se define el orden de visita de los nodos para el robot.

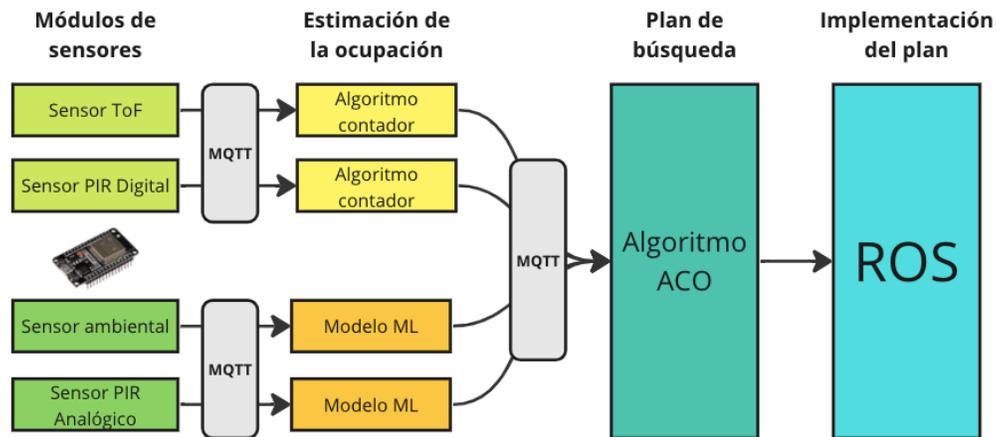


Figura 4.1: Diagrama del funcionamiento general del sistema.

Recordando que se tomó un planteamiento similar al TSP, se deben considerar estos dos puntos para cada ambiente a trabajar: la cantidad de nodos que tendrá el grafo representativo del ambiente y la forma en la que estos nodos van a representar los espacios de interés. En la mayoría de los casos una habitación representará un nodo, aunque existirán casos que, debido a su complejidad o que la representación de una parte del espacio pueda promover una posible invasión a la privacidad, varios espacios tendrían que

ser fusionados dentro de un mismo nodo.

Se utilizaron dos equipos de cómputo para esta implementación; uno enfocado en generar y entrenar los modelos de inferencia para la estimación de la ocupación, mientras que el otro equipo se encargará de la gestión de la información recibida por los nodos, la generación de los planes de búsqueda y el control de movimiento del robot. El equipo para la generación de los modelos de inferencia es una computadora Macbook Pro, integrado con un procesador Intel Core i7 2.3 GHz, con 16 GB RAM. Con respecto al segundo equipo de cómputo; se utilizó uno con el sistema operativo Ubuntu 16.04, con un procesador Intel Xeon X3430 2.4 GHz, 16GB RAM y una tarjeta gráfica NVIDIA GeForce GT 440.

## 4.1. Robot móvil autónomo

Para los ejercicios de simulación se tiene el modelo del robot llamado Patrolbot, el cual trabaja con una plataforma móvil diferencial. El robot debe visitar los nodos de manera ordenada de acuerdo al plan de búsqueda que se haya generado.

Para una navegación autónoma y segura en el ambiente real, el robot está dotado de sensores láser y tiene integrada técnicas de planificación local para esquivar obstáculos. La localización está dada por el método de localización de Monte Carlo.

Aunque el contexto sea sobre búsqueda en situaciones de riesgo, no se contempló hacer adaptaciones mecánicas al robot para que navegue en terrenos sinuosos o rugosos, así como tampoco algún sistema de control que apoye para este tipo de navegación. Igualmente, la interacción con las personas estará limitada a evitar colisiones con las personas.

Para que el robot llegue a los objetivos se necesitan de algoritmos planificadores. El planificador que decide el objetivo del robot se le conoce como un planificador global. El planificador global se basa en un conocimiento completo del ambiente; como el tamaño del robot, orientación del robot, posición actual de robot, posición del objetivo y conocimiento de obstáculos fijos. El planificador local, por otro lado, es responsable de tomar decisiones en tiempo

real y a corto plazo para guiar al robot a su objetivo, definido previamente con el planificador global. Este tipo de planificador se enfoca en resolver problemas tácticos y reaccionar a cambios rápidos y locales en el entorno. Utiliza información sensorial en tiempo real para evaluar el estado actual del mundo y decide qué acción debe realizar el robot en el próximo paso. Un planificador local tiene un enfoque reactivo ante el poco conocimiento que tiene del entorno a medida que navega en él [36].

En este sentido, se definirá principalmente un planificador global que defina el camino que el robot deberá recorrer para llegar a cada espacio. El enfoque que se trabajará con el planificador es basado en grafos; entre los que encontramos técnicas, por mencionar algunas, como Dijkstra,  $A^*$  o  $D^*$  [57]. Diversos trabajos utilizan  $A^*$  como su método de planificación de trayectorias para robots de rescate [8] [10]. Este método tiene buen rendimiento en encontrar un camino corto y utilizando bajos recursos computacionales a comparación de técnicas como RRT [29].

El algoritmo  $A^*$  es una técnica muy popular para la planificación de trayectorias para robots móviles. Parte del hecho de representar el mapa como un grafo. El algoritmo toma componentes del algoritmo de Dijkstra que favorece el recorrido a los nodos más cercanos del inicio, junto con el algoritmo de búsqueda primero el mejor (Best First Search) que toma la heurística que favorece las celdas más cercanas a la meta. En cada paso el algoritmo  $A^*$  escoge el nodo que represente el menor costo sucesivamente hasta llegar a la meta [29] [27].

Existen variantes del algoritmo  $A^*$  que buscan mejorar el rendimiento computacional, principalmente al querer utilizarse en ambientes dinámicos. Entre los algoritmos que destacan está  $D^*$  y  $D^*$ -Lite. El cambio relevante es utilizar cálculos previos para hacer el cálculo de los costos cuando se necesite replanificar una ruta [57].

Se utiliza Gazebo, el cual es un simulador de robótica en 3D de código abierto, que permite simular el comportamiento de robots y ambientes en tiempo real. Trabaja con ROS (por sus siglas en inglés, Robot Operating System) y se utiliza para probar implementaciones con robots en un entorno seguro y controlado.



Figura 4.2: Simulación en Gazebo.

Se plantean en Gazebo tanto los escenarios de simulación como el escenario basado en el ambiente real, correspondiente a uno de los pisos de nuestro instituto. Se utiliza ROS para trabajar lo referente a las paqueterías de navegación autónoma del robot.

Para que el robot pueda navegar hacia los puntos objetivo, se requiere del paquete “goal\_navigation”. Este paquete permite que los diferentes componentes del sistema, como la planificación de trayectorias y el control de motores, trabajen juntos para lograr una navegación exitosa hacia el objetivo especificado.

## 4.2. Módulos para el conteo de personas

Los módulos físicos para el conteo de personas se componen de estos elementos básicos:

- Módulo Wi-Fi ESP32.
- Batería de litio con sistema de recarga mediante USB.
- Regulador de voltaje.
- Sensores.

El módulo Wi-Fi ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y bajo consumo de energía basada en el chip ESP32, el cual combina un procesador de doble núcleo, conectividad Wi-Fi y Bluetooth a nivel general.

El ESP32 es muy popular en el ámbito de la electrónica y los proyectos relacionados con IoT debido a su versatilidad y potencia. Es capaz de ejecutar programas y realizar tareas complejas, como conectarse a redes Wi-Fi, enviar y recibir datos, interactuar con sensores y actuadores, así como realizar cálculos. A nivel general, tiene un mejor rendimiento que placas similares como la ESP8266.



Figura 4.3: Módulo ESP32.

Algunas características clave del ESP32 son:

- Procesador de doble núcleo. El ESP32 cuenta con dos núcleos de procesamiento, lo que le permite ejecutar múltiples tareas simultáneamente y mejorar el rendimiento.
- Conectividad Wi-Fi. El ESP32 puede conectarse a redes Wi-Fi, lo que le permite enviar y recibir datos a través de Internet y comunicarse con otros dispositivos conectados en la red.
- Conectividad Bluetooth. Además del Wi-Fi, el ESP32 también soporta Bluetooth, lo que le permite interactuar con dispositivos compatibles con esta tecnología, como teléfonos móviles, tabletas y otros dispositivos.
- Periféricos. El ESP32 cuenta con una amplia gama de periféricos integrados, como puertos GPIO, UART, SPI, I2C, ADC, DAC, entre otros,

lo que facilita la conexión y el control de múltiples sensores, actuadores y otros dispositivos electrónicos.

- Bajo consumo de energía. El ESP32 está diseñado para ser eficiente en términos de consumo de energía, lo que lo hace ideal para aplicaciones con restricciones energéticas, como sensores y dispositivos portátiles.

Además de las características anteriormente mencionadas, las placas ESP32 tienen la capacidad de comunicarse entre ellas mediante un protocolo especial denominado ESPNOW. Este protocolo no necesita comunicación mediante internet. Tiene un alcance de hasta 500 metros y es posible enviar hasta 250 Bytes por mensaje. Este protocolo puede ser ideal para implementaciones con diferentes topologías, además de permitir mejorar el rendimiento de la batería en caso de tener alimentación independiente.

Para la alimentación independiente de los sensores se contempla una batería de litio con un voltaje de  $3.7V$ , junto con un módulo de carga TP4056. El módulo TP4056 es un módulo de carga de batería diseñado para cargar baterías de litio de un solo celda, como las baterías de litio de  $3.7V$  o  $3.6V$ . El TP4056 tiene una entrada microUSB para que pueda cargarse la batería, además incluye protección contra sobrecarga, sobredescarga, cortocircuitos y protección contra sobrecorriente. Aunado a esto, se utiliza un circuito regulador de voltaje Step-Up HS4106-5V; capaz de convertir un voltaje de entre  $2.6V$  y  $4.5V$  a  $5V$  estables.

En la implementación se contempla que los sensores envíen la información de los sensores. Esto se hace mediante internet y el protocolo MQTT (por sus siglas en inglés, Message Queuing Telemetry Transport). MQTT es un protocolo de mensajería ligero y de código abierto diseñado para la comunicación eficiente entre dispositivos conectados a través de redes con ancho de banda limitado o inestable. Es ampliamente utilizado en aplicaciones IoT por ser un protocolo ligero y eficiente. MQTT sigue un modelo de publicación/suscripción, donde los dispositivos pueden publicar mensajes en un tópico y suscribirse a uno o varios tópicos para recibir los mensajes requeridos.

Para utilizar el protocolo MQTT es importante contemplar un broker. El broker actúa como intermediario entre los dispositivos que publican y suscriben mensajes. El broker MQTT es responsable de recibir los mensajes

publicados por los dispositivos, almacenarlos temporalmente y entregarlos a los dispositivos suscritos interesados en esos mensajes. Proporciona una plataforma para la comunicación bidireccional y asíncrona entre los dispositivos, permitiendo la transmisión eficiente de datos en redes con ancho de banda limitado o con alta restricción de energía.

Como broker se contempla utilizar Mosquitto. Mosquitto es un broker de código abierto que fue desarrollado por Eclipse. Este se puede ejecutar en una variedad de plataformas, como Linux, Windows, macOS, Raspberry Pi, entre otras. Cuenta con una API que permite la integración con aplicaciones y sistemas existentes.

La programación de los módulos se hace con el entorno de desarrollo de Arduino, el cual permite una gestión fácil de las diferentes bibliotecas necesarias para el funcionamiento de los sensores y del módulo ESP32. Además de tener una vasta documentación para su uso.

Con los módulos contadores se contemplan dos sensores PIR digitales para la primera propuesta, y un sensor ToF para la segunda propuesta. El PIR digital es el HC-SR501, mientras que el sensor ToF es el VL53L1X. Los sensores pueden ser visualizados en la figura 4.4

El sensor HC-SR501 detecta el movimiento de objetos o personas utilizando la detección de infrarrojos pasiva. Utiliza un sensor de infrarrojos y una lente para detectar cambios en el nivel de radiación infrarroja en su campo de visión. La salida digital es el estado lógico de bajo cuando no hay movimiento, y el estado lógico alto cuando se detecta movimiento. El sensor HC-SR501 tiene un rango de detección de hasta 7 metros y un ángulo de detección de 120 grados.

El sensor HC-SR501 tiene dos potenciómetros integrados que permiten ajustar la sensibilidad y el tiempo de retardo. Estos ajustes se pueden utilizar para adaptar la respuesta del sensor a diferentes condiciones y requisitos del proyecto. Para esta implementación se tiene una sensibilidad baja y un tiempo de retardo de 3 segundos, el cual es el más bajo. El tiempo de retardo se refiere al tiempo que el sensor va a mantener el estado alto al haber hecho una detección de movimiento.

El sensor VL53L1X es un sensor ToF de alta precisión y largo alcance fabricado por STMicroelectronics. El sensor VL53L1X utiliza la tecnología de tiempo de vuelo para medir la distancia entre el sensor y el objeto. Emite pulsos de luz infrarroja y mide el tiempo que tarda la luz en reflejarse en el objeto y regresar al sensor, lo cual permite calcular con precisión la distancia. El VL53L1X tiene un rango de medición de hasta 4 metros en condiciones óptimas. El sensor ofrece una precisión de medición de hasta  $\pm 1mm$ . La comunicación del sensor con el módulo ESP32 es mediante SPI.

En ambos sensores, se contempla que se guarde una variable contadora que aumente o disminuya de valor si una persona entra o sale. Cualquier actualización de los valores será enviada mediante el protocolo MQTT para poder ser utilizada eventualmente en el algoritmo de planificación.

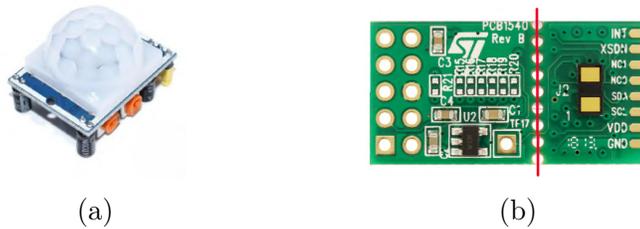


Figura 4.4: Sensores para los módulos contadores. En donde: a) sensor PIR HC-SR501 y b) sensor ToF VL53L1X

Para los módulos de conteo por inferencia se requiere un módulo que mida las variables del ambiente y un PIR analógico. El módulo de inferencia mediante datos ambientales trabaja con el sensor BME280. El PIR análogo a utilizar para la última propuesta es el AMN21112. Estos sensores se muestran en la figura 4.5

El sensor BME280 es un sensor ambiental que combina la medición de temperatura, humedad y presión atmosférica en un solo dispositivo. El sensor BME280 puede medir la temperatura ambiente con una precisión de hasta  $\pm 1^{\circ}C$ . Puede medir la humedad relativa del aire con una precisión de hasta  $\pm 3\%$ . La presión atmosférica tiene una precisión de hasta  $\pm 1hPa$ . El sensor BME280 está diseñado para operar con bajo consumo de energía. La comunicación con el sensor y el ESP32 es mediante SPI.

El AMN21112 es un PIR de Panasonic. Es un sensor digital que emite una señal modulada de ancho de pulso o PWM (por sus siglas en inglés, Pulse Width Modulation) cuando detecta movimiento. La señal PWM es proporcional a la cantidad de movimiento detectado. El AMN21112 tiene un alcance de hasta 5 metros. Puesto a dos metros de distancia del suelo y direccionado hacia abajo, es capaz de tener un rango de detección en forma de un cuadrado de  $8 \times 8$  metros. Por su bajo consumo, es posible utilizarlo en aplicaciones con alimentación independiente.



(a)



(b)

Figura 4.5: Sensores para los módulos por inferencia. Los sensores corresponden a a) BME280 y b) AMN21112

### 4.3. Entorno de pruebas

La experimentación tiene dos vertientes relevantes: probar los módulos contadores y hacer pruebas sobre el algoritmo ACO que genera el plan de búsqueda.

Tanto los módulos contadores como los módulos de conteo por inferencia deben tener una fase de pruebas para validar su funcionamiento. Los módulos contadores serán puestos a prueba directamente para verificar la cantidad de personas que logra contar y la sensibilidad que puede tener ante escenarios reales de conteo. Mientras que los módulos de conteo por inferencia tendrán que primero pasar por una fase de generación de datos con su respectiva etiqueta, para así generar el modelo de inferencia y después pasar a la fase de validación.

Las pruebas necesarias para los módulos contadores son hechas en la zona de cubículos del instituto. Esta zona está representada en la figura 4.6, en el nodo 2. Esta tiene la particularidad de tener una única entrada en forma de pasillo, en la que todos deben de pasar para llegar así a los cubículos. Es por eso que los módulos contadores son colocados en la entrada de la zona.

La posición de los sensores es de manera horizontal. Generalmente, los trabajos que utilizan módulos contadores posicionan los sensores de manera vertical, con los sensores mirando al suelo. Una posición vertical puede tener el problema de que haya puntos ciegos en las mediciones, principalmente con el sensor ToF. Se asume que con una orientación horizontal este problema pueda ser mitigado.

Para las pruebas de los contadores, se definen 3 experimentos controlados. Cada escenario consiste en que las personas entren y salgan de la zona para así medir el funcionamiento de los módulos. Lo que se anota en cada experimentación es la capacidad de respuesta de los sensores. Estos escenarios son los siguientes:

1. Entren 5 personas al lugar, una por una cada 10 segundos. Salgan igualmente 5 personas, una por una cada 10 segundos.
2. Entren 3 personas al lugar, una por una cada 10 segundos. Después que salgan 2 personas, una por una cada 10 segundos. Entre 1 persona al lugar. Finalmente que salgan las 2 personas restantes, una por una cada 10 segundos.
3. Entren 2 personas, una por una cada 10 segundos. Que entren 2 personas más, la segunda entre inmediatamente después de la primera. Que salgan 3 personas, que las dos restantes salgan inmediatamente después de la primera, una por una. Que entren 2 personas, una por una cada 10 segundos. Que salgan las 3 personas restantes, una por una inmediatamente de la otra persona que sale.

Para finalizar las pruebas, se hará otra prueba del funcionamiento de los módulos contadores de manera no controlada, en la que se tomará registro de los movimientos reales dentro del espacio a evaluar. Esto nos permitirá

reconocer la capacidad de trabajo de los sensores en un día normal de trabajo.

Los módulos de conteo por inferencia, por otra parte, deben primero pasar por una fase de obtención de datos. Ambos sensores son colocados al centro de un salón en la parte superior y estos deben mirar hacia abajo. Para la generación de datos se comienza tomando mediciones por 5 minutos del salón vacío. Después se coloca una persona dentro del salón, se hace una espera de 2 minutos y se toman otros 5 minutos de mediciones. Posteriormente, se agrega otra persona más y se tiene el mismo proceso hasta llegar a tener 5 personas en el escenario. En cada momento se hacen anotaciones de la ocupación real del espacio para poder hacer el etiquetado de datos de manera correcta.

Para el módulo que mide las variables ambientales, se envía un dato cada segundo. Este dato es enviado mediante internet a una hoja de cálculo, para etiquetar los datos de acuerdo a las anotaciones hechas. Posteriormente, se hace uso del algoritmo k-NN para generar el modelo de inferencia. En la implementación de k-NN se utilizaron los siguientes parámetros, basado en [44]:

- $k$ : 1
- Distancia: Minkowski ( $p = 2$ )

El módulo del PIR analógico genera un aproximado de 30 datos por segundo, los cuales son enviados mediante el puerto serial para su uso. En el caso de los datos del PIR, se genera un histograma de los datos que se obtuvieron. El histograma se compone de aproximadamente dos minutos de datos que tengan la misma etiqueta. Teniéndolo, se obtienen los valores de distribución de Laplace, los cuales serán utilizados para la inferencia con un modelo lineal generalizado con distribución Gaussiana.

En la generación del modelo de inferencia se deben obtener sus rendimientos en el entrenamiento. Después del entrenamiento se tomarán datos para la validación del modelo. Se parten los datos en 80% para un set de entrenamiento y 20% para un set de prueba. Después se hace la evaluación del mismo obteniendo un nuevo set de datos con 0 personas y con un grupo de 3 personas que estén 5 minutos en el espacio de prueba para verificar si

los modelos son capaces de contabilizarlas.

Para el plan de búsqueda, se contempla una serie de simulaciones mediante 4 mapas con diseños distintos entre sí para validar la utilidad que puede dar el plan de búsqueda. Los primeros 3 mapas son tomados como referencia de mapas de museos y escuelas, los tipos de espacios públicos en los que esta implementación tiene una potencial utilidad [74] [73] [76]. El último ambiente tiene como referencia uno de los pisos de nuestro instituto de investigaciones.

Se definen para cada mapa las zonas de interés y la distancia que puede haber entre los puntos, para así construir un grafo representativo de cada ambiente. Se generaron representaciones de todos los escenarios a trabajar en Gazebo para la simulación. La representación abarcó las paredes y entradas que se definen en los mapas. Para cada mapa se define el camino por el cual un robot pueda navegar para llegar a los nodos.

La figura 4.6 muestra el planteamiento inicial del grafo representativo del piso 4 del Instituto de Investigaciones en Inteligencia Artificial. Las líneas rojas representan los trayectos entre espacios en las que el robot se puede mover, ya que por su diseño no es capaz de moverse en escaleras. Los nodos están posicionados al centro de cada espacio representativo o salón y el peso asociado inicial entre nodos está dado por la distancia entre los nodos. Los números en negro representan la medición de las líneas roja en metros. Un mapa representativo del piso 4 fue generado mediante Gazebo.

En la definición de los espacios de interés se contemplaron los salones individualmente; mientras que espacios más grandes como el centro de cómputo o la zona de cubículos se toman como uno solo, para así reducir la complejidad del análisis. En el caso de la zona de cubículos, teniendo énfasis que uno de los objetivos del proyecto es el respeto a la privacidad, agrupar toda la zona como un solo punto de interés ayuda a preservar la privacidad de los profesores en sus espacios de trabajo.

En los mapas se puede notar esta referencia, tanto en la figura 4.7 para los ambientes de simulación, como en 4.6 para el entorno real. Los mapas tienen dibujadas líneas que conectan a los nodos, estas líneas fueron usadas como referencia para estimar la posible distancia entre los nodos.

Para cada mapa se tiene una matriz que define las distancias que hay entre cada nodo. En el mapa representativo del ambiente real, las distancias fueron tomadas de medidas reales. Mientras que los mapas artificiales tienen distancias aproximadas de acuerdo a una escala definida.

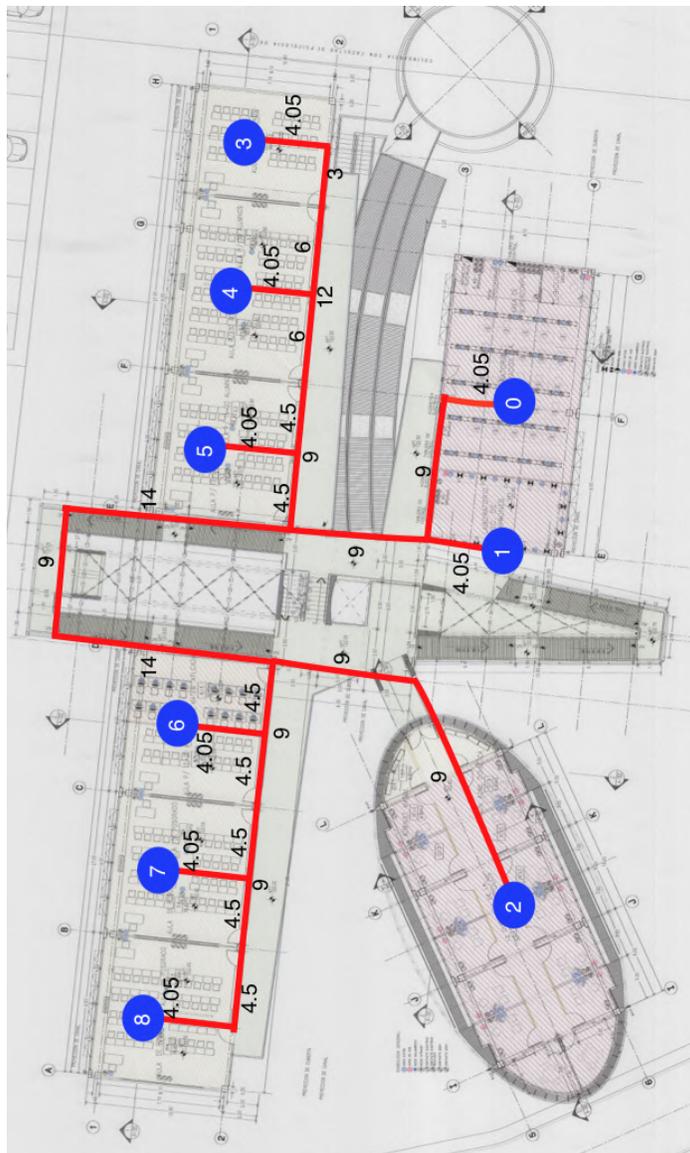
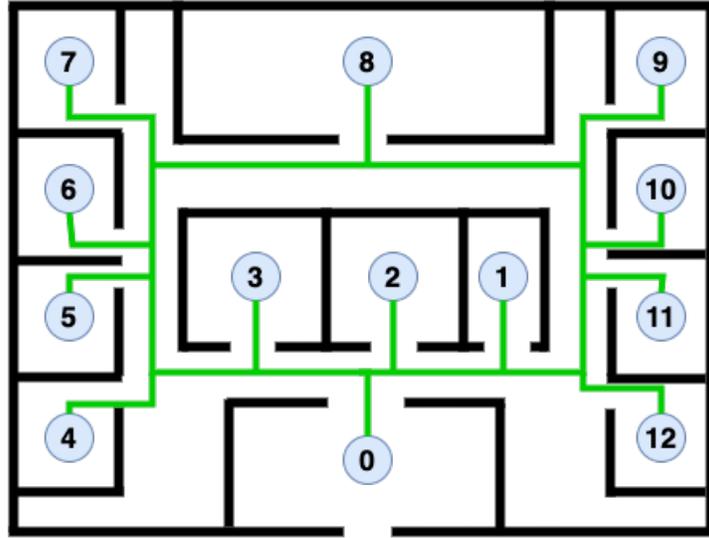
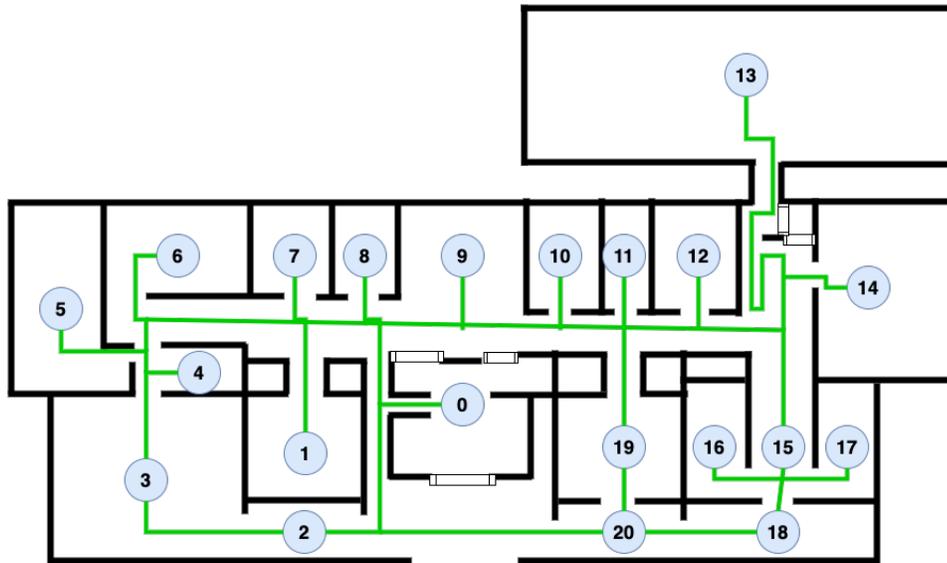


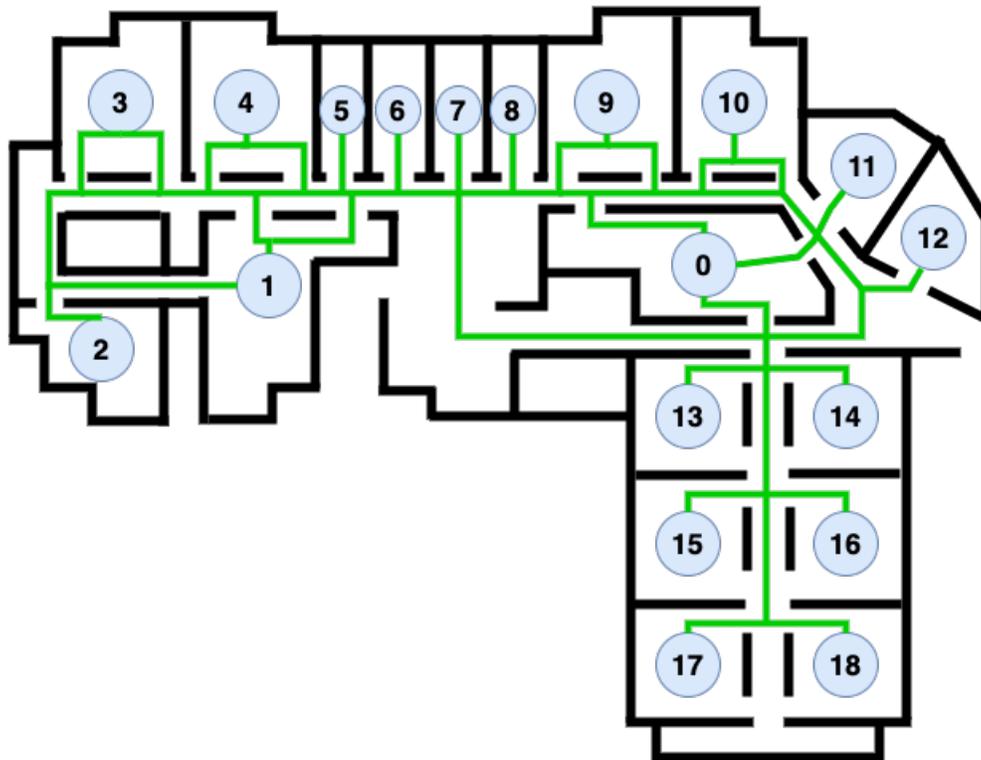
Figura 4.6: Representación del ambiente del instituto.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7: Mapas a utilizar.

#### 4.4. Plan de búsqueda

El plan de búsqueda será hecho basándose en el algoritmo Ant Colony Optimization para resolver el problema del agente viajero con ganancias. El código para la toma de decisiones fue programado en Python y está basado en el pseudocódigo mostrado anteriormente. Para ello, se considera que se tienen definidas las distancias entre los nodos, al igual que se tiene una lista con las ganancias asociadas a cada nodo, siendo estas la representación de la cantidad de personas que se estiman dentro de la habitación. El resultado del algoritmo deberá de ser otra lista que muestre el orden a visitar de los nodos.

Es importante mencionar que el nodo inicial se define de forma arbitraria, ya que en un trabajo futuro se procurará tomar la posición del robot para que el sistema comience a explorar la habitación en la que se encuentre.

El algoritmo tendrá como entrada el nodo en donde debería comenzar el plan de búsqueda, la matriz de las distancias entre nodos, la lista con la cantidad de personas en cada nodo y los parámetros de ACO. La salida representa una lista en la que se ordena el orden de visita de las habitaciones sugerida para el robot. Se tiene como entrada del algoritmo el nodo inicial debido a que se buscan simular al menos 3 escenarios en donde se deba planificar una búsqueda basada en la posible ubicación actual del robot.

Para las simulaciones se tienen las siguientes configuraciones:

- $N_h$ : igual a la cantidad de nodos de cada mapa.
- $N_i$ : 1000
- $\alpha$ : 2
- $\beta$ : 3
- $\rho$ : 0.1

Estos parámetros de ACO permiten tener un balance entre dar prioridad a los lugares con más cantidad de personas y buscar rutas más cortas para explorar todos los espacios. Los parámetros en todos los escenarios se mantienen iguales.

Con los parámetros sugeridos por [2] existe el problema de que las rutas generadas podían tener una tendencia voraz o "greedy", es decir, que la ruta siempre buscaba visitar primero los nodos con mayor ganancia, sin tomar en cuenta la distancia que podría haber entre los nodos. Aumentando  $\alpha$  a 2, los planes de búsqueda logran tener un mejor balance. Esto se muestra en la figura 4.8 en la que se analizan dos planes de búsqueda generados tanto con los parámetros recomendados como los parámetros ajustados. Se utilizaron dos escenarios para hacer la muestra. La gráfica muestra una relación entre la distancia acumulada que recorre el robot con respecto a la cantidad de personas que pudo haber contactado después de haber visitado un nodo. La

línea roja muestra la relación con los parámetros recomendados, mientras que la línea azul es referente a la relación con un  $\alpha$  igual a 2. Se logra apreciar como en la figura 4.8a el plan de búsqueda graficado con línea azul lograría llegar a contactar a más personas con menos distancia recorrida. En la figura 4.8b se nota que los cambios de parámetros logran una mejoría mínima en la relación distancia-personas.

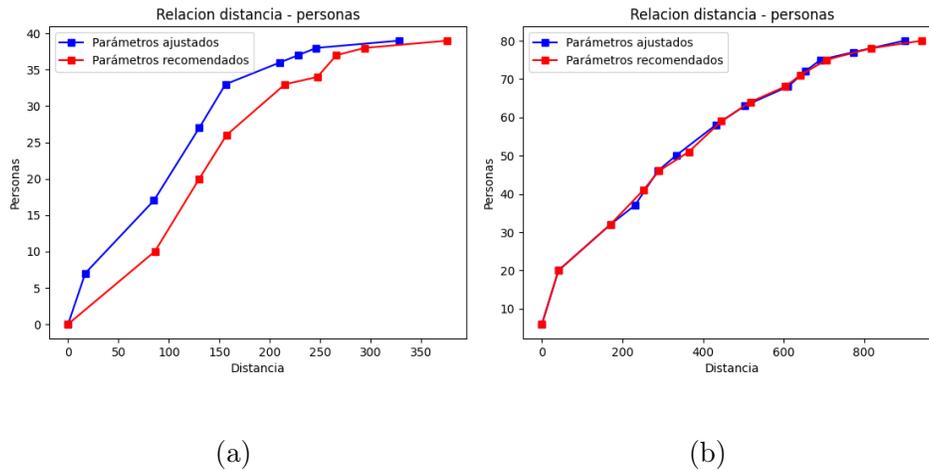


Figura 4.8: Relación distancia - personas con diferentes parámetros de ACO.

Este capítulo detalló las herramientas que permiten, junto con el fundamento teórico, implementar la propuesta. La siguiente sección se muestran los resultados. Se muestran los planes de búsqueda generados para cada ambiente, mientras que se discute el funcionamiento de los módulos contadores de personas, tanto su rendimiento como su utilidad.

# Capítulo 5

## Resultados

Los resultados de este trabajo están enfocados en mostrar tanto el funcionamiento potencial de los módulos de sensores, así como la interpretación de los planes de búsqueda hechos por el algoritmo ACO.

La experimentación debe comenzar con la definición de los niveles de ocupación para cada espacio de interés de los distintos ambientes de trabajo. Para esta información, se generaron números aleatorios; esto con la finalidad de visualizar la utilidad de la implementación. Para el mapa basado en nuestro instituto, se generaron planes de búsqueda basados tanto con información de la ocupación generada de manera aleatoria como con información de ocupación basada en cierta información real. Con esto se busca poner a prueba el trabajo de la toma de decisiones con la información que los módulos de sensores puedan proveer.

Se generaron entre 5 y 8 planes de búsqueda con diferentes valores de niveles de ocupación. Para cada valor de los niveles de ocupación, se genera un plan de búsqueda que debe comenzar por un nodo inicial 0. Después, se genera con los mismos niveles de ocupación uno o dos nuevos planes de búsqueda, el cual deberá iniciar desde un nodo aleatorio distinto de cero. Esto se hace para que, en un trabajo futuro en la que se tome provecho de la información de la localización del robot, el plan de búsqueda pueda comenzar desde el nodo más cercano al robot; mostrando así los diferentes cambios de prioridades del plan de búsqueda de acuerdo a su ubicación.

Para cada mapa se muestra una tabla, la cual se compone de dos seccio-

nes: lista de ganancias y ruta de nodos. En la sección lista de ganancias se muestra una lista que hace alusión a las ganancias de cada nodo, simulando que esta sea la cantidad de personas que hay en la habitación. Esta lista está ordenada representando la ocupación desde el nodo 0. Por otro lado, en la sección “Ruta de nodos” se muestra una lista que proporciona el orden de visita de los nodos sugerido por el algoritmo. La numeración a la que se hace referencia en la ruta de nodos está dada por la representación del espacio a visitar.

En la figura 5.1 se pueden apreciar un ejemplo de las simulaciones hechas en Gazebo, en la que se tiene el modelo del robot recorriendo los objetivos. Particularmente la figura muestra al robot recorriendo el mapa 4.7b, en la que se nota la secuencia de pasos para llegar de un espacio a otro.

## 5.1. Simulaciones

Tabla 5.1: Simulación en mapa 4.7a

Lista de ganancias	Ruta de nodos
[11 3 14 11 6 6 5 4 8 5 7 8 9]	0, 2, 3, 12, 11, 10, 9, 8, 5, 4, 6, 7, 1
[11 3 14 11 6 6 5 4 8 5 7 8 9]	10, 2, 0, 3, 12, 11, 8, 5, 4, 6, 7, 9, 1
[3 9 5 4 3 14 6 5 8 12 2 5 4]	0, 5, 7, 9, 1, 8, 6, 3, 2, 11, 12, 4, 10
[3 9 5 4 3 14 6 5 8 12 2 5 4]	6, 5, 9, 11, 1, 12, 8, 7, 2, 3, 0, 10, 4
[3 9 5 4 3 14 6 5 8 12 2 5 4]	1, 9, 8, 5, 6, 7, 2, 11, 12, 3, 0, 4, 10

Tabla 5.2: Simulación en mapa 4.7b

Lista de ganancias	Ruta de nodos
<b>[1 9 0 9 2 8 9 8 4 5 1 4 4 2 5 4 14 2 6 4 2]</b>	0, 16, 18, 14, 5, 3, 8, 1, 7, 6, 9, 11, 19, 12, 15, 17, 20, 4, 13, 10, 2
<b>[1 9 0 9 2 8 9 8 4 5 1 4 4 2 5 4 14 2 6 4 2]</b>	11, 16, 14, 1, 7, 6, 3, 9, 5, 4, 18, 15, 12, 19, 10, 8, 20, 0, 17, 13, 2
<b>[1 14 6 11 13 9 11 10 7 10 13 12 13 14 2 14 9 11 12 11 9]</b>	0, 1, 4, 3, 6, 5, 10, 11, 20, 15, 12, 9, 19, 18, 17, 13, 16, 7, 8, 2, 14
<b>[1 14 6 11 13 9 11 10 7 10 13 12 13 14 2 14 9 11 12 11 9]</b>	16, 15, 17, 19, 11, 10, 20, 18, 12, 13, 1, 5, 4, 3, 6, 7, 9, 8, 2, 14, 0
<b>[1 14 6 11 13 9 11 10 7 10 13 12 13 14 2 14 9 11 12 11 9]</b>	2, 3, 4, 1, 7, 10, 11, 12, 15, 18, 17, 13, 19, 20, 16, 9, 5, 8, 6, 14, 0

Tabla 5.3: Simulación en mapa 4.7c

Lista de ganancias	Ruta de nodos
<b>[11 13 10 7 11 14 13 0 0 12 3 6 14 9 8 8 11 11 1]</b>	0, 9, 5, 6, 1, 4, 12, 14, 16, 17, 13, 15, 2, 3, 11, 10, 18, 7, 8
<b>[11 13 10 7 11 14 13 0 0 12 3 6 14 9 8 8 11 11 1]</b>	7, 1, 5, 6, 16, 14, 12, 17, 0, 9, 4, 2, 3, 13, 15, 11, 10, 18, 8
<b>[4 1 0 4 11 9 13 6 13 13 4 10 8 5 14 10 6 5 1]</b>	0, 14, 8, 9, 6, 4, 7, 5, 11, 12, 15, 16, 13, 17, 10, 3, 1, 18, 2
<b>[4 1 0 4 11 9 13 6 13 13 4 10 8 5 14 10 6 5 1]</b>	5, 6, 8, 9, 14, 15, 11, 12, 4, 7, 16, 13, 0, 17, 10, 3, 1, 18, 2
<b>[4 1 0 4 11 9 13 6 13 13 4 10 8 5 14 10 6 5 1]</b>	13, 14, 9, 8, 6, 4, 5, 11, 12, 15, 16, 17, 7, 0, 10, 3, 1, 18, 2

Los planes de búsqueda generados para el mapa de la figura 4.7a se exhiben en la tabla 5.1, mientras que para el mapa de la figura 4.7b se presentan en la tabla 5.2 y para el mapa de la figura 4.7c se detallan en la tabla 5.3.

Como se puede notar, la ruta propuesta da prioridad a ir a los nodos con mayor ganancia, aun si el recorrido pueda no ser óptimo. Los parámetros definidos para el ACO tienen un balance prioritario para buscar los nodos

con mayor ganancia, pero sin dejar atrás el factor de la distancia. Es por eso que, generalmente, si el nodo con la mayor ganancia está relativamente cerca, el algoritmo buscará ir a ese nodo desde el principio. Sin embargo, como se puede observar en la tabla 5.3 con el caso 4, después del nodo inicial 5 el algoritmo procura buscar en nodos más cercanos con una buena cantidad de ganancias en lugar de buscar en el nodo 14, el cual es el que tiene la mayor ganancia. Este mismo fenómeno se presentan en distintos casos mostrados.

Aun con la observación previa, en todos los casos existe un cierto nivel de coincidencia entre los primeros nodos que el algoritmo toma como prioritarios y los nodos que se dejan hasta el final del plan. Es más notoria esta coincidencia con los nodos que están al fondo de la lista.

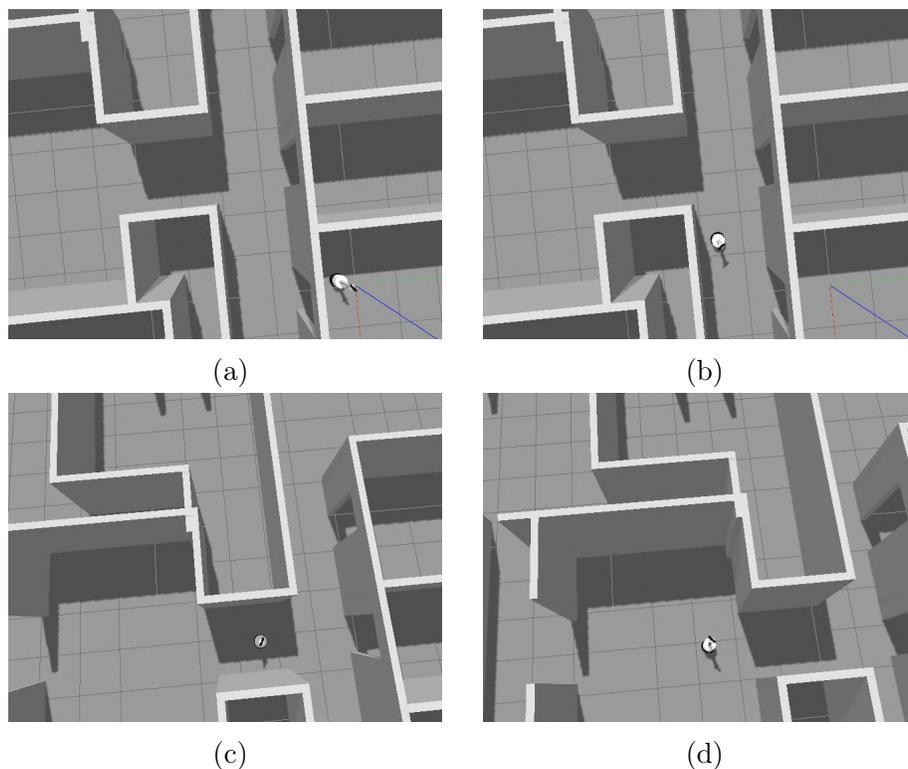


Figura 5.1: Simulación en Gazebo en el mapa 4.7b. Secuencia de recorrido del robot de un espacio a otro.

## 5.2. Ambiente del instituto.

En los resultados del ambiente del instituto se muestra el funcionamiento de los módulos de sensores. Se hace discusión sobre su precisión para generar una estimación de la ocupación. Para el plan de búsqueda, se utilizarán los datos referentes al espacio a trabajar para así hacer la discusión de los planes de búsqueda generados.

### 5.2.1. Módulos de sensores.

Primero se muestran los resultados del rendimiento de los módulos contadores. Este rendimiento estará dado por la cantidad de detecciones correctas de la entrada o salida de personas. Las tablas 5.4 y 5.5 muestran el resumen de los resultados de la experimentación dentro de los 3 escenarios propuestos en la implementación y la prueba en un ambiente no controlado. La columna “total de movimientos” corresponde a la cantidad de entradas y salidas totales que hay en cada escenario, mientras que la columna “movimientos detectados” muestra cuantos de esos movimientos fueron capturados correctamente por los sensores. La última columna “falsos conteos” da a conocer algún falso positivo que se haya generado.

La prueba no controlada consistió en dejar que las personas pasaran libremente sin restricciones dentro del espacio. En total se contabilizaron 5 entradas a la zona, 7 salidas. De las salidas, 2 personas salieron juntas. Y una persona entro y salió inmediatamente.

Tabla 5.4: Resultados del módulo contador usando PIR digital.

Escenario	Total movimientos	Movs. detectados correctamente	Falsos conteos
1	10	10	0
2	8	8	1
3	10	8	1
No controlado	12	10	1



(a)

(b)

Figura 5.2: Prueba de los módulos contadores en un pasillo del instituto. a) pasillo de prueba y b) prueba de los módulos contadores

Tabla 5.5: Resultados del módulo contador usando ToF.

Escenario	Total movimientos	Movs. detectados correctamente	Falsos conteos
1	10	10	0
2	8	8	0
3	10	9	0
No controlado	12	9	0

De acuerdo a los resultados, varios puntos se pueden discutir al respecto sobre el funcionamiento de los contadores. En general tuvieron un rendimiento aceptable en la detección, haciendo que 90% de los movimientos de entrada o salida fueran detectados.

El módulo que usó los sensores PIR digitales tuvo problemas al lidiar con momentos en los que las personas entraban o salían casi de manera instantánea una de otra. Esto debido al retardo que tiene el PIR digital, en la que

al detectar un movimiento, toma un cierto tiempo en el que regresa al estado de no detección. En general, era lenta la actualización de los valores del conteo, por la misma razón del retardo antes mencionado. Igualmente, este módulo resulto más sensible al ruido; debido a su ángulo amplio de detección.

El módulo que utilizó el sensor ToF no tuvo menos problemas con los falsos positivos. Hubo algunos movimientos no detectados por el ToF, principalmente aquellos movimientos que hayan sido inmediatos de uno anterior. El sensor en general comenzaba a tener imprecisiones si había un rango más grande de distancia en el pasillo. Igualmente, tuvo problemas para contar personas que pasaran muy rápido. Este problema está asociado al el tiempo de respuesta del sensor.

Para el módulo basado en variables ambientales, primero se grafican los datos obtenidos en la fase de generación de datos, en la que se muestra la posible correlación que hay entre las 3 variables y la ocupación. La figura 5.3 muestra esa relación. Se puede apreciar que existe una cierta tendencia a medida que cambia el nivel de ocupación. Es notoria la diferencia de los parámetros cuando no hay personas y hay 3 personas o más. También se aprecia un cierto nivel de agrupación de datos entre la detección de presencia de 1 y 2 personas.

Utilizando la técnica de K-vecinos más cercanos, se obtuvo una precisión de 82.31 %. Teniendo un conjunto de datos para prueba, se generó una matriz de confusión. En esta matriz se muestra la manera en la que el modelo pudo clasificar diversas mediciones. Dichos datos se visualizan en la figura 5.4.

Como se aprecia en la matriz de confusión, las mediciones de entre 0 y 2 personas fueron las que tuvieron mayor problema, debido al nivel de agrupamiento que tienen los datos. Para predicciones de ocupación de 3 y 4 personas, las mediciones incorrectas se redujeron. Para el modelo es notoria la diferencia en los niveles de ocupación.

Después de generar el modelo, se hizo uso del mismo para realizar una predicción en un caso real. Como primer escenario es hacer una inferencia con 0 personas en el espacio y posteriormente 3 personas entran al espacio y se quedan por un lapso de 5 minutos. Para esto se utilizó el mismo módulo con el sensor ambiental para que recolecte información del entorno, y basado

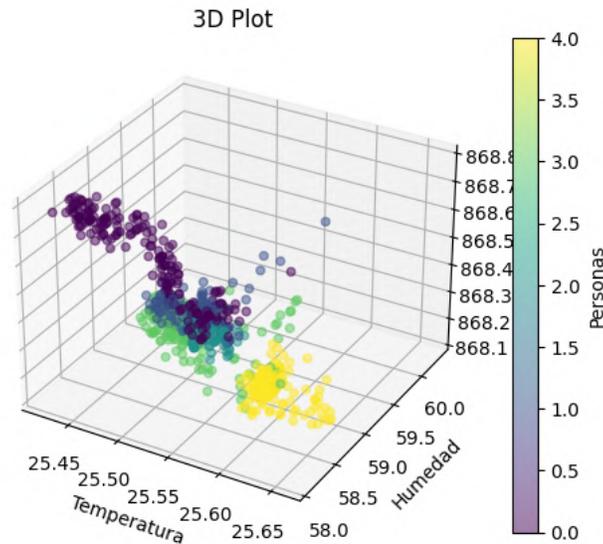


Figura 5.3: Visualización de los datos del sensor ambiental.

en ello, utilice el modelo generado para que procure predecir la presencia de personas y la cantidad de ellas. Como resultado se obtuvo que al no haber personas, los valores oscilaban entre 0 y 1. Al estar las 3 personas, y haber pasado los 5 minutos, las predicciones variaban entre 3 a 4 personas.

Como se observó en las pruebas, el módulo junto con el modelo de inferencia logran diferenciar la poca o nula presencia de personas, además de poder estimar una presencia mayor a 3 personas al pasar 5 minutos. Si bien existen problemas para especificar correctamente la cantidad de personas, se logra hacer una aproximación interesante.

Finalmente, se muestra el trabajo hecho con el sensor PIR analógico. Después de obtener los datos, se generó el histograma correspondiente a cada nivel de ocupación, con un muestreo de 2 minutos por histograma. Los histogramas alusivos al nivel de ocupación se aprecian en la figura 5.6.

Es clara la manera en la se distribuyen los valores que genera el PIR analógico. Una medición con pocas personas tenderá a tener valores de distribución de Laplace más bajos, debido a que el PIR no tendría por qué generar oscilaciones. Cuando hay más gente, los movimientos que generan

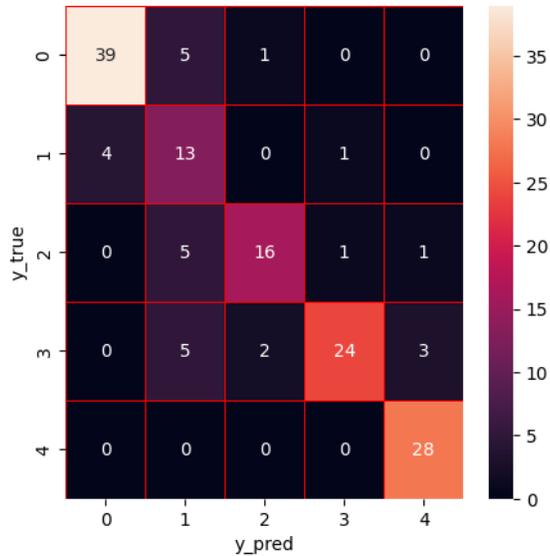
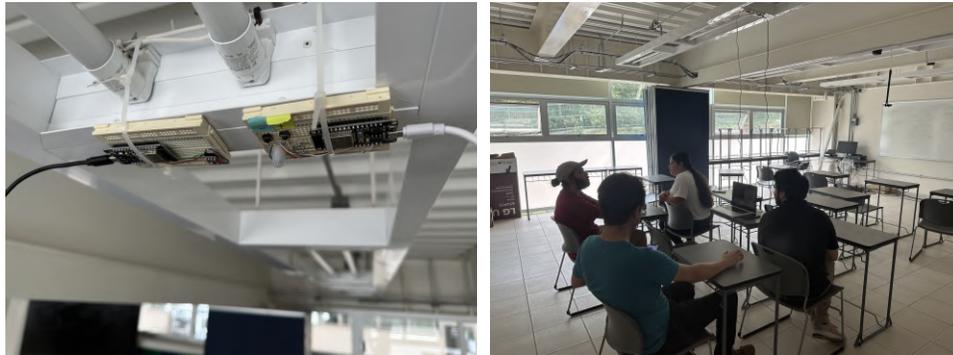


Figura 5.4: Matriz de confusión del modelo para el sensor ambiental.

hacen que el histograma se vea más disperso. Los valores de distribución de Laplace, junto con el valor de la ocupación, son mostrados en la figura 5.7. En la gráfica es clara la tendencia de que, a mayor valor de distribución, mayor cantidad de personas en el espacio. Después de la obtención de datos, se procede a utilizar el modelo lineal generalizado para hacer la inferencia.

Al módulo del PIR analógico se le hizo la misma prueba que al sensor ambiental, en la que primero se hace un análisis de la predicción con 0 personas en el espacio y eventualmente con 3 personas. Para esto se debe recolectar 2 minutos de datos del sensor PIR, para generar su histograma y obtener los parámetros de distribución de Laplace. Teniendo esos parámetros de distribución, se utilizó el modelo para hacer la predicción.

El módulo con el PIR analógico logró exitosamente diferenciar la nula presencia y la presencia de aproximadamente 2 - 3 personas. Una diferencia importante con el módulo con el sensor ambiental es que tiene mejor capacidad para acercarse a la estimación correcta con menos tiempo, por lo que puede lidiar mejor con escenarios más dinámicos. Su limitante principal es el intervalo de 2 minutos que se toma para análisis, en la que si entran o salen



(a)

(b)

Figura 5.5: Prueba de los módulos de conteo por inferencia. Las figuras corresponden a: a) módulos de sensores colocados en su posición y b) obtención de datos con los módulos.

muchas personas en ese momento, puede generar estimaciones incorrectas. Un intervalo más pequeño puede darle mayor inmediatez a la predicción, pero con el riesgo de ser más susceptible a ruidos.

Habiendo generado la discusión sobre el comportamiento de la red heterogénea de sensores; es posible determinar, para cada espacio del ambiente real, el tipo de módulos de sensores que podrían ser instalados. Esto, de acuerdo a la estructura de cada espacio y a los alcances y limitaciones que tiene cada módulo.

Los espacios en los que existe una zona de paso obligado para llegar a ellos, quedan mejor acoplados con los módulos contadores. Ya sea que el espacio tenga una única entrada, o que para llegar al espacio haya que transitar por un pasillo, los módulos contadores podrían estar colocados en esos lugares. En el caso particular del módulo con el PIR digital, se debe tomar en cuenta que la posición que se coloque no sea susceptible a detectar movimientos que no correspondan a la entrada y salida de personas, ya que esto implicaría obtener mediciones incorrectas.

Con respecto a los módulos de conteo por inferencia, estos pueden trabajar en espacios más complejos en los que existan diversas formas de entrar a

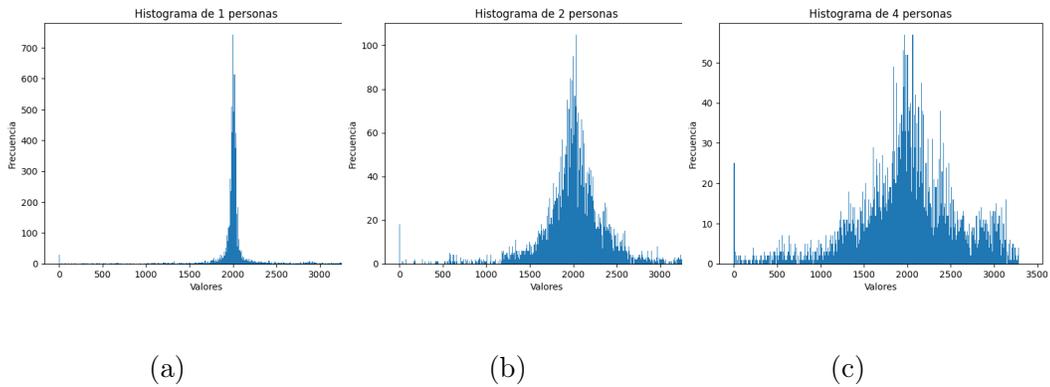


Figura 5.6: Histogramas para los datos correspondientes a a) 1 persona, b) 2 personas y c) 4 personas.

los espacios. Para lugares que tengan cierto nivel de control en variables como la ventilación, pueden utilizar el módulo de inferencia por sensor ambiental. Para los espacios restantes, en los que este nivel de control de entrada y del ambiente es complicado, es más recomendable utilizar los módulos que trabajan con el PIR analógico.

La tabla 5.6 muestra un resumen de la discusión sobre la asignación de los diferentes tipos de módulos de acuerdo a ciertas características de los espacios.

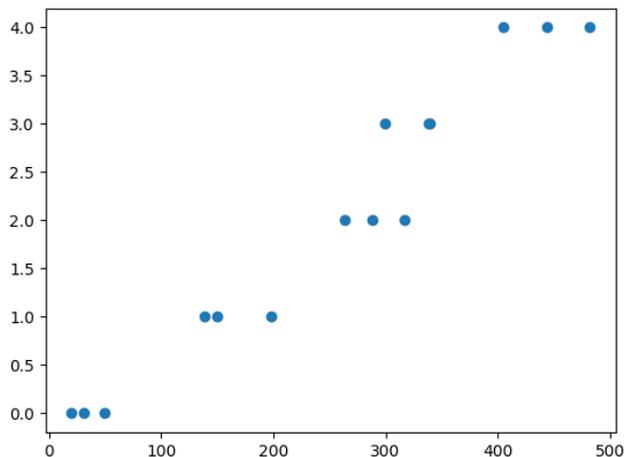


Figura 5.7: Parámetros de distribución de Laplace en relación con la cantidad de personas.

Tabla 5.6: Espacios con su correspondiente propuesta de módulos a utilizar (referencia de figura 4.6).

Num. espacio	Tipo de módulo a utilizar	Razones para la colocación
0, 3	Contador ToF	Existen zonas de paso único a estos espacios.
2	Contador PIR	Mejor reacción a los movimientos, menor posibilidad de falsos conteos.
1	Inferencia ambiental	Espacio con variables ambientales controladas.
4, 5, 6, 7, 8	Inferencia PIR análogo	Espacios con mayor complejidad.

### 5.2.2. Planificación en el ambiente del instituto.

Para tener el entorno listo se genera una lista con la descripción de la cantidad de personas que hay en cada nodo. Con la lista hecha se genera el plan de búsqueda y se estará mandando los puntos objetivo al robot para

que visite los espacios, simulando así una búsqueda. La tabla 5.7 muestra los planes de búsqueda referentes al ambiente real, representado en la figura 4.6.

Tabla 5.7: Resultados del ambiente del instituto.

Lista de ganancias	Ruta de nodos
<b>[0 7 10 1 1 3 6 1 10]</b>	0, 1, 2, 8, 6, 5, 4, 3, 7
<b>[10 8 1 11 12 6 13 2 13]</b>	0, 4, 3, 6, 8, 1, 5, 7, 2
<b>[10 8 1 11 12 6 13 2 13]</b>	5, 4, 3, 6, 8, 0, 1, 7, 2
<b>[5 13 9 5 11 4 1 14 5]</b>	0, 1, 7, 4, 3, 2, 8, 6, 5
<b>[5 13 9 5 11 4 1 14 5]</b>	2, 7, 1, 4, 3, 5, 0, 8, 6
<b>[5 13 9 5 11 4 1 14 5]</b>	3, 4, 0, 1, 7, 2, 6, 8, 5
<b>[1 0 6 4 11 4 0 0 0]</b>	1, 4, 3, 2, 5, 0, 6, 7, 8
<b>[1 0 6 4 11 4 0 0 0]</b>	4, 3, 2, 5, 0, 1, 6, 7, 8

Tanto en los entornos de simulación como en este ambiente se observan fenómenos similares en los planes de búsqueda. Independientemente del diseño distintivo de cada espacio, se logra ver que el plan de búsqueda prioriza los espacios con mayor cantidad de personas. En los últimos dos casos de la tabla, la información de la ocupación se tomó tanto de una observación real de la ocupación, como la información de algunos módulos de sensores.

# Capítulo 6

## Conclusiones

En trabajo se desarrolló un sistema que, mediante la información de la cantidad de personas presentes en diversos espacios de un ambiente, permite la exploración para la búsqueda de personas en situaciones de riesgo. Esta exploración se hace con un robot móvil autónomo. La implementación de sensores para generar la información de la cantidad de personas en un ambiente interior, junto con el uso de un robot móvil autónomo para ejecutar el plan de búsqueda, permite visualizar aplicaciones potenciales en tareas de búsqueda y rescate. El sistema utilizó tecnologías basadas en el concepto de Internet de las Cosas.

La implementación del algoritmo ACO para resolver el problema del agente viajero con ganancias resulta útil para generar una planificación de rutas inteligente, en la que se priorice buscar en los espacios donde haya la mayor cantidad de personas procurando una distancia de recorrido baja. Aumentando el parámetro  $\alpha$  de ACO, con respecto a la recomendación de la literatura, permitió que con menos distancia recorrida el robot pudiera potencialmente atender a más personas.

Tener una red heterogénea de sensores mediante técnicas alternativas a la visión por computadora permite que la implementación pueda adaptarse a los diferentes tipos de espacios y lidiar con sus complejidades, además de evitar invadir la privacidad de las personas. La utilidad de los sensores permite hacer una aproximación con precisiones entre el 82 % al 90 % en el nivel de ocupación de los espacios, logrando diferenciar correctamente entre una baja ocupación y una relativamente alta ocupación. El uso de este ti-

po de módulos de sensores puede ser ideal para el manejo de situaciones de atención temprana de una crisis, o para complementar la tarea de rescatistas.

Como trabajo futuro se plantean algunas propuestas que podrían incrementar el alcance de la implementación. Un primer trabajo futuro va referente a mejorar el acoplamiento que tienen los diferentes elementos del sistema, encaminándolo a darle mayor autonomía en su funcionamiento. Una de ellas es referente a evaluar más métodos de conteo de personas y hacer una combinación de las mismas para mejorar la precisión. Otro punto de mejora es referente a una replanificación reactiva de acuerdo a las mediciones de los sensores y las condiciones que se tengan, para así actuar con mayor inmediatez ante cambios en los niveles de ocupación. Igualmente, será relevante tomar en consideración otras diferentes características de los espacios para ayudar a determinar su prioridad en la búsqueda. Con respecto al robot, se propone agregar técnicas de exploración e interacción con personas para su atención y auxilio en las situaciones de crisis.

# Bibliografía

- [1] A. Davids. «Urban search and rescue robots: from tragedy to technology». En: *IEEE Intelligent Systems* 17.2 (2002), págs. 81-83.
- [2] Marco Dorigo y Thomas Stützle. *Ant Colony Optimization*. The MIT Press, 2004.
- [3] Stephan Wirth y Johannes Pellenz. «Exploration Transform: A stable exploring algorithm for robots in rescue environments». En: *2007 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*. 2007, págs. 1-5.
- [4] Bruno Siciliano y Oussama Khatib. *Springer Handbook of Robotics*. 1st. Springer Berlin, 2008.
- [5] Barzin Doroodgar et al. «The search for survivors: Cooperative human-robot interaction in search and rescue environments using semiautonomous robots». En: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2010, págs. 2858-2863.
- [6] Robert Tomastik et al. «Model-Based Real-Time Estimation of Building Occupancy During Emergency Egress». En: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Ed. por Wolfram W. F. Klingsch et al. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, págs. 215-224.
- [7] F. Wahl, M. Milenkovic y O. Amft. «A Distributed PIR-based Approach for Estimating People Count in Office Environments». En: *2012 IEEE 15th International Conference on Computational Science and Engineering*. 2012, págs. 640-647.
- [8] Francis Colas et al. «3D path planning and execution for search and rescue ground robots». En: *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013, págs. 722-727.

- [9] Yugang Liu y Goldie Nejat. «Robotic Urban Search and Rescue: A Survey from the Control Perspective». En: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 72.2 (2013), págs. 147-165.
- [10] Alexander Bock et al. «An interactive visualization system for urban search & rescue mission planning». En: *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (2014)*. 2014, págs. 1-7.
- [11] Barzin Doroodgar, Yugang Liu y Goldie Nejat. «A Learning-Based Semi-Autonomous Controller for Robotic Exploration of Unknown Disaster Scenes While Searching for Victims». En: *IEEE Transactions on Cybernetics* 44.12 (2014), págs. 2719-2732.
- [12] Adel Guitouni y Hatem Masri. «An orienteering model for the search and rescue problem». En: *Computational Management Science* 11.4 (2014), págs. 459-473.
- [13] K. Ilavarasi y K. Suresh Joseph. «Variants of travelling salesman problem: A survey». En: *International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014)*. 2014, págs. 1-7.
- [14] Stefan Kohlbrecher et al. «Hector Open Source Modules for Autonomous Mapping and Navigation with Rescue Robots». En: *RoboCup 2013: Robot World Cup XVII*. Springer Berlin Heidelberg, 2014, págs. 624-631.
- [15] R.R. Murphy. *Disaster Robotics*. Intelligent Robotics and Autonomous Agents series. MIT Press, 2014.
- [16] Gurkan Tuna, V. Cagri Gungor y Kayhan Gulez. «An autonomous wireless sensor network deployment system using mobile robots for human existence detection in case of disasters». En: *Ad Hoc Networks* 13 (2014), págs. 54-68.
- [17] Stefan Oßwald et al. «Speeding-Up Robot Exploration by Exploiting Background Information». En: *IEEE Robotics and Automation Letters* 1.2 (2016), págs. 716-723.
- [18] Zendai Kashino, Goldie Nejat y Beno Benhabib. «A multi-robot sensor-delivery planning strategy for static-sensor networks». En: *2017 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2017, págs. 6640-6647.

- [19] Charles Leech et al. «Real-time room occupancy estimation with Bayesian machine learning using a single PIR sensor and microcontroller». En: *2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. 2017, págs. 1-6.
- [20] Sirajum Munir et al. «Real-Time Fine Grained Occupancy Estimation Using Depth Sensors on ARM Embedded Platforms». En: *2017 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*. 2017, págs. 295-306.
- [21] Arturo G. Roa-Borbolla et al. «Priority exploration by mobile robots for search and rescue situations». En: *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*. 2017, págs. 1-6.
- [22] *Search and Rescue Robotics - From Theory to Practice*. Rijeka: IntechOpen, ago. de 2017.
- [23] Ranbir Singh Batth, Anand Nayyar y Amandeep Nagpal. «Internet of Robotic Things: Driving Intelligent Robotics of Future - Concept, Architecture, Applications and Technologies». En: *2018 4th International Conference on Computing Sciences (ICCS)*. 2018, págs. 151-160.
- [24] Douglas G. Macharet y Mario F. M. Campos. «A survey on routing problems and robotic systems». En: *Robotica* 36.12 (2018), págs. 1781-1803.
- [25] Viet Nguyen et al. «Eyelight: Light-and-Shadow-Based Occupancy Estimation and Room Activity Recognition». En: *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications*. 2018, págs. 351-359.
- [26] Brendan O'Flynn et al. «First Responders Occupancy, Activity and Vital Signs Monitoring - SAFESSENS». En: *International Journal on Advances in Networks and Services* 11.1-2 (2018), págs. 22-32.
- [27] Christian Zammit y Erik-Jan Van Kampen. «Comparison between A\* and RRT Algorithms for UAV Path Planning». En: *Proceedings of the 2018 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Ene. de 2018.
- [28] Huibo Bi y Erol Gelenbe. «A Survey of Algorithms and Systems for Evacuating People in Confined Spaces». En: *Electronics* 8.6 (2019).

- [29] João Braun et al. «A Comparison of A\* and RRT\* Algorithms with Dynamic and Real Time Constraint Scenarios for Mobile Robots». En: ene. de 2019, págs. 398-405.
- [30] Farzad Niroui et al. «Deep Reinforcement Learning Robot for Search and Rescue Applications: Exploration in Unknown Cluttered Environments». En: *IEEE Robotics and Automation Letters* 4.2 (2019), págs. 610-617.
- [31] Kevin Osanlou et al. «Optimal Solving of Constrained Path-Planning Problems with Graph Convolutional Networks and Optimized Tree Search». En: *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2019, págs. 3519-3525.
- [32] S. Tadokoro. *Disaster Robotics: Results from the ImPACT Tough Robotics Challenge*. Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer International Publishing, 2019.
- [33] Pieter Vansteenwegen y Aldy Gunawan. *Orienteering Problems: Models and Algorithms for Vehicle Routing Problems with Profits*. 1st. Ene. de 2019.
- [34] Mohamed Abdou y Abdelkarim Erradi. «Crowd Counting: A Survey of Machine Learning Approaches». En: *2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIOT)*. 2020, págs. 48-54.
- [35] A. E. Baxter, H. E. Wilborn Lagerman y P. Keskinocak. «Quantitative modeling in disaster management: A literature review». En: *IBM Journal of Research and Development* 64.1/2 (2020), 3:1-3:13.
- [36] Sean Campbell et al. «Path Planning Techniques for Mobile Robots A Review». En: *2020 6th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*. 2020, págs. 12-16.
- [37] Centro de Estudios de la Auditoría Superior de la Federación, ed. *La agenda internacional y las acciones de México ante el cambio climático*. 2020. URL: [https://www.asf.gob.mx/uploads/6485\\_Centro\\_de\\_Estudios\\_de\\_la\\_ASF/ESTUDIO\\_CAMBIO\\_CLIMATICO\\_PUBLICADO.pdf](https://www.asf.gob.mx/uploads/6485_Centro_de_Estudios_de_la_ASF/ESTUDIO_CAMBIO_CLIMATICO_PUBLICADO.pdf). (acceso: 04.01.2023).
- [38] Sylvia T. Kouyoumdjieva, Peter Danielis y Gunnar Karlsson. «Survey of Non-Image-Based Approaches for Counting People». En: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.2 (2020), págs. 1305-1336.

- [39] Phone Thiha Kyaw et al. «Coverage Path Planning for Decomposition Reconfigurable Grid-Maps Using Deep Reinforcement Learning Based Travelling Salesman Problem». En: *IEEE Access* 8 (2020), págs. 225945-225956.
- [40] Sharaf C. Mohamed et al. «Person Finding: An Autonomous Robot Search Method for Finding Multiple Dynamic Users in Human-Centered Environments». En: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 17.1 (2020), págs. 433-449.
- [41] Jorge Peña Queralta et al. «Collaborative Multi-Robot Search and Rescue: Planning, Coordination, Perception, and Active Vision». En: *IEEE Access* 8 (2020), págs. 191617-191643.
- [42] STMicroelectronics, ed. *Counting people with the VL53L1X long-distance ranging Time-of-Flight sensor*. 2020. URL: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00626942-counting-people-with-the-vl53l1x-longdistance-ranging-timeofflight-sensor-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00626942-counting-people-with-the-vl53l1x-longdistance-ranging-timeofflight-sensor-stmicroelectronics.pdf). (acceso: 04.05.2023).
- [43] Peng-Rong Tsou et al. «Counting People by Using Convolutional Neural Network and A PIR Array». En: *2020 21st IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*. 2020, págs. 342-347.
- [44] Andree Vela et al. «Estimating Occupancy Levels in Enclosed Spaces Using Environmental Variables: A Fitness Gym and Living Room as Evaluation Scenarios». En: *Sensors* 20.22 (2020).
- [45] Jianwen Xu, Kaoru Ota y Mianxiong Dong. «Fast Networking for Disaster Recovery». En: *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* 8.3 (2020), págs. 845-854.
- [46] Yazhou Yuan et al. «Occupancy Estimation in Buildings Based on Infrared Array Sensors Detection». En: *IEEE Sensors Journal* 20.2 (2020), págs. 1043-1053.
- [47] Harshil Bhatt et al. «Wireless Sensor Networks for Optimisation of Search and Rescue Management in Floods». En: *2021 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*. 2021, págs. 1-6.
- [48] Huibo Bi y Erol Gelenbe. «Searching and Rescuing Victims in Emergency: A Comprehensive Survey». En: dic. de 2021.

- [49] Anastasios Dimou et al. «FASTER: First Responder Advanced Technologies for Safe and Efficient Emergency Response». En: ed. por Babak Akhgar, Dimitrios Kavallieros y Evangelos Sdongos. Cham: Springer International Publishing, 2021, págs. 447-460.
- [50] Jiong Dong, Kaoru Ota y Mianxiong Dong. «UAV-Based Real-Time Survivor Detection System in Post-Disaster Search and Rescue Operations». En: *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems* 2.4 (2021), págs. 209-219.
- [51] Sever Filip et al. «Building situation tool: indoor disaster scene overview». En: *SafeGreece Conference Proceedings* (2021), págs. 186-189.
- [52] Larkin Heintzman et al. «Anticipatory Planning and Dynamic Lost Person Models for Human-Robot Search and Rescue». En: *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2021, págs. 8252-8258.
- [53] Yuan Jin et al. «Building occupancy forecasting: A systematical and critical review». En: *Energy and Buildings* 251 (2021), pág. 111345.
- [54] Bo Li et al. «Approaches on crowd counting and density estimation: a review». En: *Pattern Analysis and Applications* 24.3 (2021), págs. 853-874.
- [55] Björn Lindqvist, Ali-Akbar Agha-Mohammadi y George Nikolakopoulos. «Exploration-RRT: A multi-objective Path Planning and Exploration Framework for Unknown and Unstructured Environments». En: *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2021, págs. 3429-3435.
- [56] Stuart Russell y Peter Norvig. *Artificial Intelligence, A Modern Approach*. 4th. Pearson Education, 2021.
- [57] José Ricardo Sánchez-Ibáñez, Carlos J. Pérez-del-Pulgar y Alfonso García Cerezo. «Path Planning for Autonomous Mobile Robots: A Review». En: *Sensors* 21.23 (2021).
- [58] Marco Steinbrink et al. «Rapidly-Exploring Random Graph Next-Best View Exploration for Ground Vehicles». En: *CoRR* abs/2108.01012 (2021).

- [59] Chee Sheng Tan, Rosmiwati Mohd-Mokhtar y Mohd Rizal Arshad. «A Comprehensive Review of Coverage Path Planning in Robotics Using Classical and Heuristic Algorithms». En: *IEEE Access* 9 (2021), págs. 119310-119342.
- [60] Guobin Chen et al. «The Application of Internet of Things in Robot Route Planning Based on Multisource Information Fusion». En: *Computational Intelligence and Neuroscience* (2022).
- [61] Lu Chuan-Yen et al. «Application of Path Planning and Image Processing for Rescue Robots». En: *Sensors and Materials* 34.1 (2022), págs. 65-80.
- [62] Abhishek Gupta et al. «Intelligent Route Planning for Autonomous Service Robots using Communicating Smart Dustbins». En: *ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications*. 2022, págs. 1202-1207.
- [63] Jan Haase. «Emergency situations in public buildings: How to know where persons are to be rescued». En: *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2022, págs. 1-6.
- [64] Bhaavin K. Jogeshwar y K. Lochan. «Algorithms for Path Planning on Mobile Robots». En: *IFAC-PapersOnLine* 55.1 (2022). 7th International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems ACODS 2022, págs. 94-100.
- [65] Danista Khan e Ivan Wang-Hei Ho. «CrossCount: Efficient Device-free Crowd Counting by Leveraging Transfer Learning». En: *IEEE Internet of Things Journal* (2022), págs. 1-1.
- [66] Minkyu Kim, Ryan Gupta y Luis Sentis. «CONCERTS: Coverage Competency Based Target Search for Heterogeneous Robot Teams». En: *Applied Sciences* 12.17 (2022).
- [67] Tzu-Hsuan Lin, Jing-Ting Huang y Alan Putranto. «Integrated smart robot with earthquake early warning system for automated inspection and emergency response». En: *Natural Hazards* 110.1 (2022), págs. 765-786.
- [68] Max Lodel et al. «Where to Look Next: Learning Viewpoint Recommendations for Informative Trajectory Planning». En: *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2022, págs. 4466-4472.

- [69] Abdallah Naser, Ahmad Lotfi y Junpei Zhong. «Multiple Thermal Sensor Array Fusion Toward Enabling Privacy-Preserving Human Monitoring Applications». En: *IEEE Internet of Things Journal* 9.17 (2022), págs. 16677-16688.
- [70] Francisco Pastor et al. «Autonomous Wristband Placement in a Moving Hand for Victims in Search and Rescue Scenarios With a Mobile Manipulator». En: *IEEE Robotics and Automation Letters* 7.4 (2022), págs. 11871-11878.
- [71] Yuanfan Xu et al. «Explore-Bench: Data Sets, Metrics and Evaluations for Frontier-based and Deep-reinforcement-learning-based Autonomous Exploration». En: *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2022, págs. 6225-6231.
- [72] Zhiyuan Zhang Ying-Ming Shi. «Research on Path Planning Strategy of Rescue Robot Based on Reinforcement Learning». En: *Journal of Computers* 33.3 (2022), págs. 187-194.
- [73] EdrawMax, ed. *Free Editable School Layouts*. 2023. URL: <https://www.edrawmax.com/article/school-layout.html>. (acceso: 10.03.2023).
- [74] Museo Nacional de Bellas Artes, ed. *Visita al Museo Nacional de Bellas Artes*. URL: <https://www.bellasartes.gob.ar/paginas/planea-tu-visita/>. (acceso: 10.03.2023).
- [75] Panasonic, ed. *MP Motion Sensor (AMN1,2,4)*. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/3178242.pdf>. (acceso: 10.05.2023).
- [76] wikiHow, ed. *How to Make a School Map (for a Class Project)*. URL: [https://www.wikihow.com/Make-a-School-Map-\(for-a-Class-Project\)](https://www.wikihow.com/Make-a-School-Map-(for-a-Class-Project)). (acceso: 11.03.2023).