



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: “IMPLEMENTACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE
ALGORITMOS DE BÚSQUEDA DE FUENTES DE OLOR
BASADOS EN ROBÓTICA COOPERATIVA”**

AUTORES:

LÓPEZ GOYEZ, JUAN PABLO

SANDOVAL VIZUETE, PATRICIO JAVIER

DIRECTOR: ARCENALES VITERI, ANDRES RICARDO

SANGOLQUÍ

2017

CERTIFICACIÓN TRABAJO DE TITULACIÓN



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*IMPLEMENTACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE ALGORITMOS DE BÚSQUEDA DE FUENTES DE OLOR BASADOS EN ROBÓTICA COOPERATIVA*”, realizado por los señores Juan Pablo López Goyez y Patricio Javier Sandoval Vizuite, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a el señor Juan Pablo López Goyez y al señor Patricio Javier Sandoval Vizuite, para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, noviembre 2017

Atentamente:

Dr. Arcentales Viteri Andrés Ricardo

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, López Goyez Juan Pablo, con cédula de identidad N° 040143769-4 y Sandoval Vizuite Patricio Javier con cédula de identidad N° 172147025-8, declaramos que este trabajo de titulación *“IMPLEMENTACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE ALGORITMOS DE BÚSQUEDA DE FUENTES DE OLOR BASADOS EN ROBÓTICA COOPERATIVA”* ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, noviembre 2017

Juan Pablo López Goyez

C.C. 0401437694

Patricio Javier Sandoval Vizuite

C.C. 1721470258

AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

AUTORIZACIÓN

Nosotros, López Goyez Juan Pablo y Sandoval Vizuet Patricio Javier, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación *"IMPLEMENTACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE ALGORITMOS DE BÚSQUEDA DE FUENTES DE OLOR BASADOS EN ROBÓTICA COOPERATIVA"* cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, noviembre 2017

Juan Pablo López Goyez

C.C. 0401437694

Patricio Javier Sandoval Vizuet

C.C. 1721470258

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, ser forjador de mi camino, de mi destino. Por estar conmigo ayudándome a aprender de mis errores, por su infinito amor y perdón. Por acompañarme en todos mis éxitos, fracasos y tristezas; por ser la lumbrera de la esperanza en muchas etapas difíciles en mi vida.

El presente trabajo también lo dedico a mis padres, Esthelita y José, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy. Por darme su amor, sacrificio y entrega incondicional. Por saberme guiar por el camino de la verdad y permitirme cumplir esta meta tan anhelada. También agradecerle a mi tío Telmo quien supo brindarme sus enseñanzas y cariño en mi etapa de niñez y juventud. Muchos de mis logros se los debo a ustedes, ya que siempre me forjaron apegado a las reglas y me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos. Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

A mi hermano, Miguel, por ser mi amigo y confidente incondicional por cuidar de mí a pesar de la distancia, por creer en mí, como yo lo hago en él, y por sobretodo brindarme su amor y apoyo en los buenos y malos momentos que se nos han presentado en nuestras vidas.

Juan P. López G.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico primeramente a Dios, por permitirme cumplir esta fase de mi vida, por el amor y la sabiduría con que me cubrió en aquellos momentos en que todo parecía que se iba a desplomar.

A mis padres, Marlene y Patricio por ser una fuente de inspiración siempre, por el ejemplo de superación y trabajo constante que debo tener para ser un ente productivo de la sociedad, por el amor que me han dado y en el cual siempre encontraba fortaleza para continuar mi camino.

A mi hermano Leonardo por ser el mejor hermano, en el cual he encontrado un amigo, al que le puedo contar desde mis problemas hasta mis victorias, demostrándome un apoyo incondicional. Espero haberte demostrado ser un gran hermano mayor y que pueda ser un ejemplo del cual aprendas mucho.

A mi tía Otilia por brindarme su apoyo incondicional siempre, por ser mi segunda mamá que siempre estuvo ahí en los momentos duros para darme un consejo.

A mis abuelitos Antonio y María, por ser el ejemplo de lucha constante, por enseñarme que el ensuciarme las manos al realizar una tarea manual no significa que sea menos que otras personas. Siempre los llevo en mi corazón por ser mi ejemplo de superación y valentía ante toda situación que se presente.

Al resto de mis familiares porque ellos me dieron el ejemplo de seguir estudiando y nunca quedarme atrás ni dejarme pisotear de otras personas.

A mis amigos Johann, Juan Pablo, Katherine, Jenny, Grace, Valeria y Celena; por mostrarme que una amistad sincera es uno de los regalos más hermosos que se puede tener en la vida, por todas las risas y llantos que tuvimos, por el apoyo y exigencia durante la elaboración de la tesis.

Patricio J. Sandoval V.

AGRADECIMIENTOS

Al Creador, por darme la constancia y perseverancia durante mi vida universitaria y por permitirme alcanzar mi carrera profesional en tan prestigiosa casona del saber, por brindarme las oportunidades que me han permitido superarme personal y profesionalmente.

A mis padres, por el esfuerzo realizado en brindarme una educación académica de excelencia y por enseñarme los valores, costumbres y principios que forman parte en mi estilo de vida. Gracias totales.

A mi hermano, Miguel, agradecerte por tantas risas, momentos de alegría, enojo y tristeza, ya que a pesar de la distancia y de nuestras diferencias hemos consolidado una gran amistad y una total cercanía que nos ha permitido superarnos.

A mis familiares, quienes me han brindado su apoyo y siempre han creído en mí. Gracias por compartir conmigo tantos bellos momentos y por darme su mano amiga cuando más lo necesite.

A mis amigos del colegio y de la universidad quienes los considero amigos de la vida, gracias porque ante todo siempre he sentido su apoyo y amistad en los buenos y por sobre todo en los malos momentos.

A mi compañero de tesis, quien a lo largo de mi vida universitaria ha demostrado ser un amigo leal, responsable y un modelo de ejemplo que me ha permitido superarme continuamente.

A mis profesores de mi Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE por compartir sus conocimientos y experiencias en el día a día, las cuales han contribuido en mi formación personal y profesional.

Al Ing. Andrés Arcentales y a la Ing. Anita Guamán, por compartir sus conocimientos, por su paciencia y orientación durante mi etapa estudiantil y durante la realización de este proyecto de investigación. Agradecerles también por su alta calidez humana y por su excelencia en la educación, realmente llevó presentes muchos buenos recuerdos de sus enseñanzas.

Juan P. López G.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación me gustaría agradecer a Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, por darme lo mejor siempre, porque durante todo este tiempo estuviste ahí y me permitiste terminar y cumplir el sueño de ser un ingeniero.

A los ingenieros Andrés Arcentales y Ana Guamán, por ser un apoyo en todo este proceso de ejecución de la tesis, dando sus ideas y consejos para que el trabajo de investigación salga de la mejor manera. Por su ejemplo de desempeño tanto académico como personal, mostrándome el camino que debo seguir para obtener buenos resultados en mi vida profesional y en el aspecto personal, por lo cual siempre les estaré agradecido.

A mi madre por brindarme su apoyo para tener una educación superior, por la experiencia que me ha compartido para continuar en este arduo camino llamado vida, alentándome siempre en todo momento en que sentía flaquear, mostrándome que con esfuerzo y dedicación se puede cumplir todo.

A mi tía por ser uno de los pilares que me han permitido formarme durante toda mi vida académica, apoyándome y ayudándome en todo lo que podía, amaneciéndose en algunas ocasiones por hacerme compañía y no dejarme solo. Por mostrarme que pese a las limitaciones que uno pueda tener, siempre se puede seguir adelante y ser la mejor versión de persona que podemos ser.

A mi compañero de tesis por su apoyo durante todo este trabajo, por ser la persona que durante el periodo de tiempo que lo conozco me ha demostrado ser una buena persona, que busca siempre dar lo mejor de sí en todo lo que hace para obtener los mejores resultados, lo cual me ha permitido encontrar en él un gran ejemplo de persona a seguir.

Patricio J. Sandoval V.

INDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
INDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
RESUMEN	xxii
ABSTRACT	xxiii
CAPITULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e importancia	3
1.3 Alcance del proyecto	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos Específicos	5
1.5 Descripción del proyecto de investigación.....	6
1.5.1 Capítulo I - Introducción	8
1.5.2 Capítulo II - Estado del arte.....	9
1.5.3 Capítulo III - Obtención de patrones de dispersión en ambientes controlados	9

1.5.4	Capítulo IV - Implementación de algoritmos de búsqueda en entornos simulados	10
1.5.5	Capítulo V - Implementación de algoritmos de búsqueda en robots móviles	11
1.5.6	Capítulo VI – Conclusiones y recomendaciones.....	11
2	CAPITULO II	12
	ESTADO DEL ARTE	12
2.1	Introducción	12
2.2	Dispersión de fuentes de olor producidos por sustancias químicas	13
2.2.1	Modelamiento de plumas de olor a partir de la dispersión de sustancias	13
2.2.2	Adquisición de señales para la obtención del patrón de dispersión	15
2.3	Robótica móvil cooperativa.....	19
2.3.1	Control en robótica cooperativa.....	21
2.3.1.1	Control centralizado.....	21
2.3.1.2	Control distribuido.....	22
2.4	Robótica móvil aplicada en la búsqueda y detección de fuentes de olor	22
2.4.1	Algoritmos de búsqueda de fuentes de olor bioinspirados	24
2.4.1.1	Algoritmo zigzag	25
2.4.1.2	Algoritmo espiral	26
2.4.1.3	Algoritmo firefly.....	27
2.4.2	Algoritmos de búsqueda basados en la planificación de trayectorias	28
2.4.2.1	Algoritmo basado en el filtrado de partículas.....	29
2.4.2.2	Algoritmo BSA.....	30
2.4.2.3	El algoritmo SLAM	31
2.4.2.4	Algoritmos basados en concentraciones.....	32
3	CAPITULO III.....	34
	OBTENCIÓN DE PATRONES DE DISPERSIÓN EN AMBIENTES CONTROLADOS	34
3.1	Condiciones establecidas para el ambiente controlado	35
3.1.1	Concentración de sustancia.....	35
3.1.2	Temperatura	35
3.1.3	Humedad	35
3.1.4	Flujo de aire en el medio	36
3.2	Adquisición de señales para la obtención de patrones de dispersión.....	36
3.2.1	Resolución de bits	36

3.2.2	Tiempo de conversión y frecuencia de muestreo	37
3.2.3	Rango de trabajo.....	37
3.2.4	Voltaje de referencia.....	37
3.3	Sensores químicos para la detección de alcohol	38
3.3.1	Detección de alcohol empleando sensores MQ-3 y MQ-135	38
3.3.2	Pruebas experimentales empleando sensores MQ-3 Y MQ-135	40
3.4	Caracterización de sensores químicos MQ-3	45
3.4.1	Determinación de línea base de sensores químicos MQ-3	46
3.4.2	Determinación de rango de distancias de detección.....	47
3.4.2.1	Distancia mínima	47
3.4.2.2	Distancia máxima	48
3.5	Diseño de la plataforma robótica móvil para levantamiento de mapas.....	54
3.5.1	Características de la plataforma robótica	54
3.5.2	Selección de la plataforma robótica	55
3.6	Implementación del robot móvil para el levantamiento de mapas de dispersión	56
3.7	Implementación de hardware para el robot de levantamiento de mapas	58
3.7.1	Sistema de adquisición	58
3.7.1.1	Sensor químico MQ-3.....	59
3.7.1.2	Sensor ultrasónico HC-SR04	59
3.7.2	Sistema de control	60
3.7.2.1	Arduino MEGA ADK 2560.....	61
3.7.3	Sistema de potencia	61
3.7.3.1	Driver L298N	62
3.7.3.2	Motores.....	62
3.7.3.3	Batería tipo Li-ON.....	63
3.7.4	Sistema de comunicación	64
3.7.4.1	Módulo Bluetooth HC-05	64
3.8	Análisis de autonomía de uso de la batería del robot móvil de mapeo	65
3.9	Implementación del software para el robot móvil de mapeo.....	66
3.9.1	Desarrollo de aplicación móvil para Android para el robot móvil de mapeo	66
3.9.2	Programa de control para robot móvil de mapeo	69
3.9.3	Procedimiento de operación del robot móvil	70
3.10	Generación de mapas de dispersión de alcohol y colonia	71
3.10.1	Dimensiones del espacio de trabajo	71
3.10.2	Procedimiento para la obtención de mapas de dispersión.....	73
3.10.3	Mapas de dispersión obtenidos en las experimentaciones	77
3.10.3.1	Mapa 1 - 1 fuente de olor de 5 ml de Alcohol- Presencia de obstáculos	78
3.10.3.2	Mapa 2 - 1 fuente de olor de 5 ml de alcohol- Sin presencia de obstáculos	78
3.10.3.3	Mapa 3 - 2 fuentes de olor de 5 ml de alcohol- Presencia de obstáculos	79

3.10.3.4	Mapa 4 - 2 fuentes de olor de 5 ml de alcohol- Sin presencia de obstáculos	79
3.10.3.5	Mapa 5 - 3 fuentes de olor de 3, 5 y 10 ml de alcohol- Presencia de obstáculos	80
3.10.3.6	Mapa 6 - 3 fuentes de olor de 3, 5 y 10 ml de alcohol- Sin presencia de obstáculos.....	80
3.10.3.7	Mapa 7 - 3 fuentes de olor de 5 ml de alcohol- Presencia de obstáculos	81
3.10.3.8	Mapa 8 - 3 fuentes de olor de 5 ml de alcohol- Sin presencia de obstáculos	81
3.10.3.9	Mapa 9 - 3 fuentes de olor de 3, 5 y 10 ml de colonia- Presencia de obstáculos	82
3.10.3.10	Mapa 10 - 3 fuentes de olor de 3, 5 y 10 ml de colonia- Sin presencia de obstáculos.....	82
3.10.3.11	Mapa 11 - 1 fuente de olor de 5ml de alcohol y 1 fuente de olor de 5 ml de colonia - Presencia de obstáculos	83
3.10.3.12	Mapa 12 - 1 fuente de olor de 5ml de alcohol y 1 fuente de olor de 5 ml de colonia- Sin presencia de obstáculos	83
3.10.3.13	Mapa 13 - fuente de olor de 20 ml de alcohol - Sin presencia de obstáculos- Perturbación generada por ventilador.....	84
4	CAPITULO IV	85
	IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE BÚSQUEDA EN ENTORNOS SIMULADOS	85
4.1	Simulación de entornos controlados en V-REP	86
4.1.1	Plataforma virtual para experimentación con Robots (V-REP).....	86
4.1.2	Desarrollo de Plataformas Robóticas	87
4.1.3	Simulación de mapas de dispersión	94
4.1.4	Comunicación de V-REP con IDE para Python.....	96
4.2	Algoritmos de búsqueda de fuentes de olor	97
4.2.1	Algoritmo Zigzag	97
4.2.1.1	Funcionamiento	97
4.2.1.2	Diagrama de flujo	98
4.2.2	Algoritmo aleatorio	99
4.2.2.1	Funcionamiento	100
4.2.2.2	Diagrama de flujo	100
4.2.3	Algoritmo Guiado (Odor Tracking 2WD)	101
4.2.3.1	Funcionamiento	102
4.2.3.2	Diagrama de flujo	103
4.3	Pruebas realizadas a los algoritmos en entornos simulados	105
4.3.1	Simulación mapa 1- 5ml de alcohol-Presencia de obstáculos	107
4.3.2	Simulación mapa 2 - 5ml de alcohol-Sin presencia de obstáculos	108

4.3.3 Simulación mapa 3 - 2 fuentes de 5ml de alcohol- Presencia de obstáculos.....	109
4.3.4 Simulación mapa 4 - 2 fuentes de 5ml de alcohol- Sin presencia de obstáculos.....	111
4.3.5 Simulación mapa 5- 3 fuentes de 3, 5 y 10 ml de alcohol- Presencia de obstáculos	112
4.3.6 Simulación mapa 6 - 3 fuentes de alcohol - Sin presencia de obstáculos	113
4.3.7 Simulación mapa 13 - 20ml de alcohol - perturbación - sin presencia de obstáculos	115
5 CAPITULO V	116
IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE BÚSQUEDA Y DETECCIÓN EN ROBOTS MÓVILES	116
5.1 Implementación de robots móviles para búsqueda de fuentes de olor.....	117
5.2 Implementación de hardware para el robot de búsqueda de fuentes de olor	120
5.2.1 Sensor optointerruptor FC-03 (Encoder)	120
5.2.2 Sensor Shield V5	121
5.2.3 Tarjeta microprocesada (SBC) Raspberry PI 3	121
5.2.4 Regulador de voltaje.....	122
5.3 Análisis de autonomía del uso de la batería	123
5.4 Caracterización de sensores químicos MQ-3	124
5.5 Desarrollo de sistema de adquisición.....	127
5.5.1 Configuración Arduino Mega 2560	127
5.5.2 Comunicación serial para Arduino Mega 2560.....	127
5.5.3 Adquisición de datos de sensores	128
5.5.3.1 Sensores de Proximidad HC-SR04.....	129
5.5.3.2 Sensores químicos MQ-3	130
5.5.3.3 Encoder FC-03.....	130
5.5.4 Control de Actuadores	132
5.6 Desarrollo de sistema de procesamiento	133
5.6.1 Configuración Raspberry PI 3	133
5.6.2 Comunicación serial para Raspberry PI 3	135
5.6.3 Procesamiento de datos obtenidos de los sensores MQ-3	136
5.6.3.1 Eliminación Línea base sensores MQ-3	136
5.6.3.2 Funcionamiento de los algoritmos de búsqueda en base a los datos obtenidos de los sensores MQ-3.....	137
5.6.4 Procesamiento de datos obtenidos de los sensores ultrasónicos	139
5.7 Control distribuido para robótica móvil cooperativa.....	139
5.7.1 Tareas de cooperación entre los robots móviles de búsqueda	140
5.7.2 Desarrollo de interfaz de comunicación para robots móviles.....	141

5.7.2.1 Comunicación Cliente-Servidor.....	142
5.7.3 Tareas de coordinación entre los robots móviles de búsqueda.....	143
5.8 Implementación de algoritmos de búsqueda y detección de fuentes de olor en entornos reales.....	144
5.9 Pruebas realizadas a los algoritmos de búsqueda en entornos reales.....	144
5.9.1 Ambiente controlado 5	145
5.9.1 Ambiente controlado 6	146
5.9.2 Ambiente controlado 13	147
5.10 Comparación de resultados de algoritmos de búsqueda y detección de fuentes de olor obtenidos en entornos simulados y reales.....	148
6 CAPITULO VI.....	151
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	151
6.1 Conclusiones y recomendaciones	151
6.1.1 Obtención de patrones de dispersión en ambientes controlados.....	151
6.1.2 Implementación de algoritmos de búsqueda en entornos simulados	154
6.1.3 Implementación de algoritmos de búsqueda y detección en robots móviles	156
6.2 Trabajos Futuros.....	159
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de sensores químicos a distancia de 2.5cm.....	41
Tabla 2. Comparación de sensores químicos a distancia de 16.5 cm.....	43
Tabla 3. Análisis de autonomía para el robot de mapeo	65
Tabla 4. Nomenclatura Robots Simulados	93
Tabla 5. Rangos de detección sensores de visión para los robots simulados	106
Tabla 6. Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas en V-REP en el Mapa 1 con presencia de obstáculos.....	108
Tabla 7. Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas para el Mapa 2	109
Tabla 8. Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas en V-REP en el Mapa 3 con presencia de obstáculos.....	110
Tabla 9. Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas en V-REP en el Mapa 4 sin presencia de obstáculos.....	112
Tabla 10. Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas en V-REP en el Mapa 5 con presencia de obstáculos.....	113
Tabla 11. Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas en V-REP en el Mapa 6 sin presencia de obstáculos.....	114
Tabla 12. Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas en V-REP en el Mapa 13 con presencia de perturbación.....	115
Tabla 13. Elementos utilizados en cada robot móvil	118
Tabla 14. Características técnicas Raspberry PI 3.....	122
Tabla 15. Elementos del regulador LM7805.....	123
Tabla 16. Elementos finales de la estructura robótica	123
Tabla 17. Valores de línea base y de saturación de sensores MQ-3	126
Tabla 18. Cálculo de pulsos requeridos para generar trayectorias rectilíneas.....	131
Tabla 19. Cálculo de pulsos requeridos para generar giros	132
Tabla 20. Configuración de señales enviadas a pines del driver L298N.....	133
Tabla 21. Librerías usadas en los algoritmos	134
Tabla 22. Módulos usados en los algoritmos	134
Tabla 23. Rangos de detección sensores de MQ-3	138
Tabla 24. Resultados obtenidos para 10 pruebas realizadas en un entorno real para la configuración del ambiente controlado 5 con presencia de obstáculos.....	146
Tabla 25. Resultados obtenidos para 10 pruebas realizadas en un entorno real para la configuración del ambiente controlado 6 con presencia de obstáculos.....	147
Tabla 26. Resultados obtenidos para 10 pruebas realizadas en un entorno real para la configuración del ambiente controlado 13 con presencia de perturbación.....	148

Tabla 27. Comparación de los resultados obtenidos para las pruebas del algoritmo aleatorio en entornos reales y simulados con 3 fuentes de olor.....	149
Tabla 28. Comparación de los resultados obtenidos para las pruebas del algoritmo Odor Tracking 2WD en entornos reales y simulados con tres fuentes de olor.....	149
Tabla 29. Comparación de los resultados obtenidos de pruebas del algoritmo Odor Tracking 2WD en un entornos real y simulado con perturbación	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Definición del área de trabajo para los robots móviles.....	8
Figura 2. Plumas de olor de la dispersión de gas sobre un canal con presencia de turbulencias a diferentes velocidades.....	14
Figura 3. Simulación del patrón de dispersión de una pluma cuyo comportamiento es modelado en base a distribución gaussiana	14
Figura 4. Simulación de la dispersión de ácido sulfhídrico (H ₂ S) en un tiempo de T=268 segundos bajo condiciones de un ambiente virtual.....	15
Figura 5. Túnel de viento empleado para realizar experimentaciones con fuentes de olor a condiciones específicas	15
Figura 6. Diagrama básico de un sensor de óxido	17
Figura 7. Procedimientos para la localización de sustancias químicas	18
Figura 8. Sensor MQ-3 para detección de alcohol y benceno.....	19
Figura 9. Acción de cooperación para dos robots cuyo objetivo es transportar un objeto de una posición hacia un área de destino empleando dos robots.....	19
Figura 10. Enjambre robótico móvil desarrollado para exploración.....	20
Figura 11. Seguimiento pluma de olor, desde una posición inicial del robot hacia la fuente localizada de olor.	24
Figura 12. Seguimiento de la pluma de olor por un robot en base a trayectorias en zigzag generada por el algoritmo Geotrupes stercorarius	25
Figura 13. Contraste de algoritmos zigzag: a) algoritmo de búsqueda	26
Figura 14. Optimización de trayectorias de las colonias de hormigas: a) búsqueda de alimento, b) exploración del entorno entre el nido y la fuente de alimento, c) retorno y selección de la ruta más corta.....	27
Figura 15. Simulación algoritmo firefly: a) posición inicial de 20 luciérnagas para detección de un patrón de dispersión, b) posición final de las 20 luciérnagas al detectar fuente de olor	28
Figura 16. Algoritmo de localización basado en el filtrado de partículas: a) diagrama de flujo, b) simulación trayectoria generada por el algoritmo empleando un robot y una fuente de olor	30
Figura 17. Exploración de espacios singulares mediante	31
Figura 18. Ejemplo de navegación del algoritmo BSA	31
Figura 19. Detección de fuentes de olor empleando algoritmo SLAM.....	32
Figura 20. Prueba de seguimiento de fuentes de olor: a) distribución de la concentración de olor en un área experimental, b) seguimiento de la pluma de olor con un robot.....	33
Figura 21. Curva de sensibilidad sensor MQ-3 para diferentes sustancias y gases.....	38

Figura 22. Curva característica del sensor MQ-3 para C ₂ H ₅ OH.....	39
Figura 23. Curva de sensibilidad sensor MQ-135 para diferentes sustancias	40
Figura 24. Medición de fuente de olor a 2,5 cm.....	41
Figura 25. Medición de alcohol a una distancia de 2.5 cm.....	42
Figura 26 Mediciones con sensores MQ-3 para varios volúmenes de alcohol	42
Figura 27. Medición de fuente de olor a 16,5 cm.....	43
Figura 28. Medición de alcohol a una distancia de 16.5 cm: a) 1 ml, b) 2 ml, c) 3 ml, d) 4 ml y e) 5 ml	44
Figura 29. Curva característica obtenida para los sensores	45
Figura 30. Línea base para sensores MQ-3 a T=23 °C:.....	46
Figura 31. Altura y posición del sensor para detección de alcohol a 0 cm	47
Figura 32. Detección de muestras de alcohol de 0.2 ml, 1 ml, 5 ml y 10 ml a una distancia de 0 cm entre el sensor y la fuente de olor	48
Figura 33. Detección de 5 ml de alcohol a distancias de 10, 15, 20 y 25 cm	49
Figura 34. Definición de distancias máximas para detección de olor	50
Figura 35. Detección de muestra de alcohol de 5 ml a distancias de: 10 cm,	51
Figura 36. Detección de muestra de alcohol de 10 ml a distancias de 10 cm,	52
Figura 37. Comparación entre los resultados obtenidos en la detección de 5 ml y 10 ml de alcohol a distancias de 10, 20, 30 y 40 cm	52
Figura 38. Curva característica sensores MQ-3 para 1 ml de alcohol.....	53
Figura 39. Plataforma Robot car chasis 2WD.....	55
Figura 40. Dimensiones plataforma Robot car chasis 2WD	56
Figura 41. Robot móvil para levantamiento de mapas de dispersión.....	56
Figura 42. Vista superior del robot móvil para mapeo	57
Figura 43. Vista inferior del robot móvil para mapeo	57
Figura 44. Esquema del circuito electrónico del robot de mapeo	58
Figura 45. Sensor MQ-3	59
Figura 46. Sensor ultrasónico HC-SR04	60
Figura 47. Arduino MEGA ADK 2560.....	61
Figura 48. Driver L298N	62
Figura 49. Motorreductor DG01D-A130	63
Figura 50. Batería Li-ON 7.4 V y 1200mAh.....	63
Figura 51. Módulo Bluetooth HC-05	64
Figura 52. Diagrama de flujo de la aplicación de mapeo	68
Figura 53. Aplicación desarrollada para control de robot móvil de mapeo:	68
Figura 54. Diagrama de flujo algoritmo de mapeo.....	70
Figura 55. Diagrama de bloques de adquisición del patrón de dispersión	71
Figura 56. Cuadrantes principales y secundarios para el espacio de trabajo.....	72
Figura 57. Trayectoria del robot para el levantamiento de mapa de dispersión.....	72

Figura 58. Disposición de sensores MQ-3 en robot móvil	73
Figura 59. Ambiente controlado con obstáculos- 5 ml de alcohol.....	74
Figura 60. Representación gráfica de una matriz de datos en MATLAB	75
Figura 61. Matrices de resolución 9x9 obtenidas para un ambiente con 5 ml de alcohol y con presencia de obstáculos	75
Figura 62. Matriz de resolución 9x27 obtenida para un ambiente con 5 ml de alcohol y con presencia de obstáculos	76
Figura 63. Matriz de difusión 9x27 obtenida para un ambiente con 5 ml de alcohol y con presencia de obstáculos	77
Figura 64. Mapa 1: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27,	78
Figura 65. Mapa 2: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27,	78
Figura 66. Mapa 3: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27,	79
Figura 67. Mapa 4: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27,	79
Figura 68. Mapa 5: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27,	80
Figura 69. Mapa 6: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27,	80
Figura 70. Mapa 7: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27,	81
Figura 71. Mapa 8: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27,	81
Figura 72. Mapa 9: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27	82
Figura 73. Mapa 10: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27,	82
Figura 74. Mapa 11: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27,	83
Figura 75. Mapa 12: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27,	83
Figura 76. Mapa 13: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27,	84
Figura 77. Diseño CAD del robot de detección de fuentes de olor.....	87
Figura 78. Modelo robot móvil generado para el entorno V-REP	88
Figura 79. Escena con presencia de distintos modelos importados	89
Figura 80. Configuración de objetos en V-REP: a) propiedades cinemáticas y dinámicas, b) propiedades de objetos en el entorno	90
Figura 81. Configuración sensor de proximidad: a) propiedades para la escena, b) parámetros de detección, c) características del funcionamiento del sensor.....	91
Figura 82. Configuración de propiedades para el sensor de visión.....	92
Figura 83. a) Ubicación de articulaciones rotacionales, b) configuración de propiedades dinámicas de las articulaciones rotacionales.....	92
Figura 84. Modelo final de los robots para la simulación.....	93
Figura 85. Ubicación inicial de los robots en el entorno V-REP	94
Figura 86. Entorno de simulación en V-REP	94
Figura 87. Configuración de mapa de dispersión en el entorno de V-REP.....	95
Figura 88. Entorno de simulación desarrollado en V-REP	95
Figura 89. Comunicación cliente-servidor para V-REP	96
Figura 90. Trayectoria zigzag planificada	98
Figura 91. Diagrama de flujo algoritmo Zigzag	99
Figura 92. Trayectoria aleatoria planificada.....	100
Figura 93. Diagrama de flujo algoritmo aleatorio	101

Figura 94. Trayectoria Odor Tracking 2WD planificada.....	102
Figura 95. Diagrama de flujo algoritmo Odor Tracking 2WD	103
Figura 96. Diagrama de flujo subrutina Odor Tracking 2WD	104
Figura 97. Simulación del Mapa 1: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor,	107
Figura 98. Simulación del Mapa 2: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor,	109
Figura 99. Simulación del Mapa 3: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor, d) localización de 2 fuentes de olor	110
Figura 100. Simulación del Mapa 4: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor, d) localización de 2 fuentes de olor	111
Figura 101. Simulación del Mapa 5: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor, d) localización de 3 fuentes de olor	113
Figura 102. Simulación del Mapa 6: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor, d) localización de 3 fuentes de olor	114
Figura 103. Simulación del Mapa 13: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor	115
Figura 104. Plataforma Robótica Final	117
Figura 105. Robots móviles implementados para robótica cooperativa.....	117
Figura 106. Distribución Parte Superior: (1) Batería LIPO, (2) Raspberry PI 3, (3) Arduino Mega 2560, (4) Sensores Ultrasónicos	119
Figura 107. Distribución Parte Inferior: (1) Sensores Químicos MQ-3, (2) Motor CC y llanta, (3) Driver L298N, (4) Sensor FC-03, (5) Regulador de Voltaje	119
Figura 108. Circuito electrónico: (1) driver L298N y motores CC, (2) encoder FC-03, (3) sensores MQ-3, (4) Arduino Mega, (5) regulador de Voltaje,.....	120
Figura 109. Pines del sensor FC-03	120
Figura 110. Sensor Shield V5	121
Figura 111. Regulador de voltaje 5 [V].....	122
Figura 112. Curvas características de los sensores MQ-3 para el Robot 0	125
Figura 113 Curvas características de los sensores MQ-3 para el Robot 1	125
Figura 114. Curvas características de los sensores MQ-3 para el Robot 2	126
Figura 115. Diagrama de Flujo: comunicación serial Arduino MEGA	128
Figura 116. Configuración y funcionamiento sensor HC-SR04	129
Figura 117. Configuración y funcionamiento del sensor MQ-3	130
Figura 118. Pines para el control de sentido de giro.....	132
Figura 119. Comunicación serial Raspberry PI 3	135

Figura 120. Control distribuido para robótica cooperativa	140
Figura 121. a) Diseño de la red inalámbrica, b) dispositivos conectados en la red visualizados desde un dispositivo móvil	141
Figura 122. Software utilizado para la comunicación SSH	142
Figura 123. Ventana de comunicación y envío de comando para ejecutar el algoritmo.....	143
Figura 124. Información mostrada del estado del algoritmo al usuario	143
Figura 125. Ambiente controlado 5 - Configuración con tres fuentes de olor	145
Figura 126. Ambiente controlado 6 - Configuración con tres fuentes de olor	146
Figura 127. Área de experimentación -Configuración con perturbación	147

RESUMEN

El presente trabajo está enmarcado en la búsqueda y detección de sustancias químicas como: alcohol y colonia mediante la simulación e implementación de algoritmos de búsqueda de fuentes de olor en robots móviles cooperativos mediante un sistema de control distribuido. Los robots fueron equipados con sensores químicos MQ-3 que realizaban la detección de químicos presentes en el ambiente y de sensores de proximidad ultrasónicos que permitieron realizar navegación autónoma. Para conocer la dispersión de los volátiles propuestos se realizó un levantamiento de 13 mapas de dispersión obtenidos mediante la construcción de un robot móvil de mapeo ubicado en diferentes entornos controlados bajo condiciones de temperatura y humedad constantes. Con los mapas obtenidos se desarrollaron entornos en el software V-REP, en donde se simuló la búsqueda y detección de fuentes de olor empleando robots móviles, en los cuales se implementó 3 algoritmos de búsqueda que son: zigzag, aleatorio y guiado realizados en lenguaje Python. Se evaluó parámetros de cada algoritmo en los entornos simulados propuestos que permitieron determinar el de mejor desempeño. Además, se implementó los algoritmos de búsqueda: aleatorio y guiado en robots móviles reales, para lo cual se diseñó y construyó 3 robots móviles de búsqueda que realizaban la adquisición de datos de los sensores mediante la tarjeta Arduino MEGA, el procesamiento de datos y ejecución de algoritmos mediante la tarjeta Raspberry PI 3. Finalmente se evaluó el desempeño de los algoritmos de búsqueda, realizándose una comparativa de los resultados obtenidos en entornos simulados y en entornos reales.

PALABRAS CLAVE

- CARACTERIZACIÓN
- ALGORITMO
- V-REP
- MAPEO
- COOPERATIVA

ABSTRACT

The present work is framed in the search and detection of chemical substances such as: alcohol and cologne through the simulation and implementation of search algorithms for odor sources with cooperative mobile robots through a distributed control system. For this the robots were equipped with chemical sensors MQ-3 that perform the detection of chemicals present in the environment and of proximity sensors ultrasonic that allow an autonomous navigation. In order to know the dispersion of the proposed volatiles, 13 dispersion maps were obtained by constructing a mobile mapping robot in different controlled environments under conditions of constant temperature and humidity. With the maps obtained, environments were developed in the software V-REP, where the search and detection of odor sources were simulated using mobile robots, in which 3 search algorithms were implemented: zigzag, random and guided in Python language. Parameters of each algorithm were evaluated in the proposed simulated environments that allowed to determine the one of better performance. In addition, search algorithms were implemented: random and guided in real mobile robots, for which we designed and built 3 mobile search robots that performed the acquisition of sensor data using the Arduino MEGA and data processing plus execution of algorithms using the Raspberry PI 3. Finally, the performance of the search algorithms was evaluated, comparing the results obtained in simulated environments and in real environments.

KEYWORDS

- CHARACTERIZATION
- ALGORITHM
- V-REP
- MAPPING
- COOPERATIVE

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La detección e identificación de sustancias químicas es requerida en diversas aplicaciones tales como: supervisión, control y monitoreo de ambientes, detección de drogas y explosivos, exploración de áreas donde se ha dispersado sustancias tóxicas, operaciones de búsqueda y rescate, entre otras (Pomareda Sesé & Marco Colás, 2013). En muchos de estos escenarios las muestras de las sustancias químicas se toman de forma manual y son llevadas a evaluaciones en laboratorios, lo cual no permite realizar una detección instantánea de la sustancia, además que los tiempos de muestreo se incrementan (A. J. Lilienthal, Loutfi, & Duckett, 2006).

La dispersión de la fuente de olor depende de las condiciones del medio siendo influenciada por factores como: presión atmosférica, dirección de flujo y velocidad de propagación del fluido en el medio, cambios de temperatura y presencia de humedad (Montes, Letheren, Villa, & Gonzalez, 2014). Esto representa una gran complejidad al momento de la obtención de mediciones a partir de la adquisición de datos del medio. Adicional, la dispersión de la fuente de olor también depende de las condiciones propias del químico aumentando aún más la complejidad de la detección y mapeo de la dispersión de los olores (Jatmiko, Ikemoto, Matsuno, Fukuda, & Sekiyama, 2005).

Existen diversos estudios para determinar el comportamiento de sustancias volátiles como: alcohol, etanol, metanol y su propagación en los medios, por tal razón existen técnicas de obtención de patrones de dispersión que representan el comportamiento de la dispersión de la fuente de olor (Lino Marques, Nuses Urbano, & Almeida, 2002). Entre las técnicas más utilizadas se tiene: mediciones empíricas realizadas de forma manual, mediciones empleando narices electrónicas, mediciones a partir de la detección de olores con sensores químicos, y métodos de simulación matemáticos.

En los últimos años la investigación sobre plataformas robóticas móviles adquirió un gran desarrollo e importancia (Y. Zhang et al., 2011). Esto se debe a la flexibilidad que presentan estos robots respecto a la adquisición de hardware, la navegación de forma guiada o autónoma en diversos medios y la capacidad de realizar diversas tareas y búsqueda de objetivos a través del equipamiento de sensores y sistemas de control que les permiten cumplir el objetivo para el cual fueron diseñados (Liu & Lu, 2008).

La localización de las fuentes de olor responde a la capacidad de encontrar químicos volátiles en el ambiente, para esto se desarrollan algoritmos centrados en la búsqueda y navegación de plataformas robóticas en un medio conocido o desconocido (Liu, 2010). A partir de los algoritmos se generan mapas de dispersión que permiten obtener una estimación gráfica de la pluma de olor, la cual representa el comportamiento de la dispersión del químico (Montes et al., 2014).

La utilización de robots móviles en la detección de fuentes de olor ha sido un tema de investigación en los últimos años (Ishida, Nakayama, & Nakamoto, 2005), y existen estudios referentes al mapeo y búsqueda de fuentes de olor con la ayuda de algoritmos de planificación de trayectorias implementados en robots singulares y la cooperación entre ellos (Y. Zhang et al., 2011).

Los algoritmos de localización y búsqueda responden a diversos factores, entre ellos el patrón de dispersión del volátil, la trayectoria, tiempo de búsqueda y técnicas de navegación para su desarrollo en entornos conocidos y desconocidos (Pomareda Sesé & Marco Colás, 2013). La tendencia del desarrollo de los algoritmos se centra en el comportamiento de insectos, como en el caso de abejas o los gusanos de seda, que realizan la búsqueda de otros insectos a través de la detección de feromonas liberadas en la naturaleza y en algoritmos que ya han sido desarrollados en anteriores investigaciones (Soldan, Bonow, & Kroll, 2012).

El método SLAM, referente a la localización y mapeado simultáneo de un entorno, es desarrollado para la obtención de mapas en ambientes desconocidos mientras un robot navega sobre estos, permitiendo el desarrollo de algoritmos de localización para enjambres de robots enfocados en campos de investigación para la localización y navegación en espacios desconocidos. (Soldan et al., 2012).

La búsqueda y localización de fuentes de olor es eficiente si se emplea robótica cooperativa o con el uso de enjambres robóticos debido a que existe una reducción del nivel de complejidad en la ejecución de tareas y en los tiempos de búsqueda del objetivo (Q. Lu & Han, 2011b). Sin embargo, se debe definir las necesidades y requerimientos, para conocer si es necesario emplear varios robots en una tarea.

Los robots móviles en su configuración tanto a nivel de hardware como de software deben disponer de los elementos necesarios que permitan un adecuado desenvolvimiento en la tarea de detección y ubicación de las fuentes de olor (Meng, Li, Li, & Zeng, 2006), pudiendo mencionar como elementos básicos: sensores de olor, sensores de posición, controladores adecuados que permitan procesar la información y el algoritmo de búsqueda implementado en el robot (Mediavilla & Gaibor, 2016). Bajo este contexto, se ha recurrido al tema de la robótica cooperativa, debido a los beneficios que presenta y los mencionados anteriormente (Liu, 2010).

1.2 Justificación e importancia

La idea fundamental de utilizar robótica cooperativa en la detección de fuentes de olor radica en la utilización de robots dispuestos a cooperar en tareas especializadas como lo es la búsqueda y detección de fuentes de olor. Es por eso que la realización de la presente investigación se sustenta en trabajos previos presentes en la literatura, en las cuales se han obtenido diversos resultados en la temática de detección de fuentes de olor de sustancias químicas utilizando plataformas robóticas (Pomareda Sesé & Marco Colás, 2013). Por tal motivo es necesario tomar las investigaciones realizadas y dar continuidad a este tipo de estudios y su desarrollo.

La detección de fuentes de olor mediante la utilización de la robótica puede ser aplicada en un gran número de sectores, tales como: militar, donde se pueda localizar explosivos o drogas; sector alimenticio y farmacéutico, para mejoras de la calidad de los productos (Cao, Fukunaga, Kahng, & Meng, 1997); entre otros. Esto contribuirá a la seguridad de las personas y procesos en los distintos ambientes y actividades.

Existen estudios relacionados con el uso de robots singulares y el uso de múltiples robots, donde se ha comprobado que la robótica cooperativa para estas aplicaciones presenta menores tiempos de desarrollo y mayor eficiencia (Pomareda Sesé & Marco

Colás, 2013). Esto ha generado estudios sobre la efectividad de grupos multi-robots comparada con versiones de robots singulares, teniendo aspectos a ser determinados por la variedad de enfoques disponibles dentro de localización, mapeo, detección, entre otras.

La robótica cooperativa es empleada actualmente en la ejecución de varias investigaciones debido a la facilidad para trabajar con varios robots, los cuales son coordinados para la detección de fuentes de olor reduciendo tiempos de búsqueda (Q. Lu & Han, 2011a). Desarrollándose además diversos sistemas de control, arquitecturas de comunicación que permiten disponer al conjunto de robots configuraciones centralizadas o distribuidas (Senanayake et al., 2014).

1.3 Alcance del proyecto

Mediante el presente proyecto, se plantea realizar el levantamiento de mapas de dispersión en un ambiente controlado para disponer de modelos de patrones de dispersión de fuentes de olor que serán empleadas para desarrollar y optimizar algoritmos de búsqueda que permitan determinar una fuente de olor específica en un ambiente controlado a partir del uso de robots móviles los cuales se comunican y coordinan en base a principios de control para robótica cooperativa.

Inicialmente se desea obtener datos y resultados propios de la utilización de robots móviles en un entorno controlado que es un espacio físico delimitado con condiciones de temperatura y humedades adecuadas para realizar la adquisición de datos de la fuente de olor. Los robots estarán equipados con sensores químicos y de proximidad que les permitirá realizar la detección y la navegación autónoma en el medio, de tal manera que la configuración inicial de los robots permitirá realizar el modelado del entorno de navegación en base a un mapeo en 2D del mismo, considerando fuentes de olor, fronteras de decisión y obstáculos (a. Lilienthal, Zell, Wandel, & Weimar, 2001); lo cual permitirá el levantamiento del mapa y de la pluma de dispersión que estarán basados en dos tipos de sustancias químicas presentes en el medio: alcohol y colonia; que son sustancias volátiles de fácil adquisición que se colocarán en el ambiente controlado.

Se reproducirán los robots y el entorno controlado en el software VREP para realizar la simulación de los algoritmos de búsqueda desarrollados a partir de la dispersión de los aromas en el ambiente y de las trayectorias efectivas que deben recorrer los robots, verificando el desempeño de los algoritmos probados (Meng et al., 2006). Terminada la etapa de simulación se implementarán los diferentes algoritmos de búsqueda en los robots móviles, evaluando el desempeño de los mismos para la detección de las sustancias propuestas.

La identificación y optimización de los algoritmos investigados, así como la simulación en el entorno VREP y su comparación con la implementación de los mismos en los robots móviles, permitirá obtener al final un adecuado resultado de las mejores alternativas para conseguir la detección de la fuente de olor considerando tiempos y trayectorias óptimas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar algoritmos de búsqueda para la detección de fuentes de olor en un ambiente controlado mediante la utilización de robótica cooperativa.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Implementar en robots móviles los dispositivos necesarios que permitan realizar el mapeo de fuentes de olor de forma automática.
- Generar un mapa de dispersión en base a la adquisición de datos con sensores químicos que permita obtener un patrón de dispersión de las fuentes de olor.
- Evaluar algoritmos de búsqueda de fuentes de olor para robots móviles en entornos simulados en base a los patrones de dispersión obtenidos identificando su desempeño.
- Evaluar los resultados obtenidos de los algoritmos de búsqueda en el entorno simulado con los del funcionamiento del robot en un entorno físico.

1.5 Descripción del proyecto de investigación

El presente proyecto de investigación forma parte del proyecto ESPE-PIC-2016-009 denominado “SmellRobSense”, dirigido por la Dra. Ana Guamán y el Dr. Andrés Arcentales. El proyecto está enmarcado en la detección de sustancias químicas, especialmente explosivos en ambientes controlados mediante la utilización de narices electrónicas, y sensores químicos en robótica móvil cooperativa.

El objetivo del proyecto de investigación es la implementación y optimización de algoritmos de búsqueda para la detección de fuentes de olor por medio de robótica móvil cooperativa. Estos algoritmos serán probados en entornos simulados con la finalidad de evaluar tiempos de exploración y planificación de trayectorias en la búsqueda de olores, y su posterior implementación en robots móviles en entornos controlados reales.

Los diferentes agentes robóticos que realizan tareas de búsqueda y detección de olores fueron equipados con sensores químicos MQ-3 y disponen de una navegación autónoma. Los robots móviles disponen de una comunicación inalámbrica empleando tecnología WIFI bajo una arquitectura de control distribuida, la lógica de control permite que los robots cooperen entre sí, para realizar la búsqueda de olores en entornos controlados en los que existe presencia de alcohol y colonia.

Previo al diseño de los robots es necesario realizar la caracterización de los sensores químicos MQ-3 respecto a las concentraciones y a las distancias de detección, de esta forma se pudo conocer el comportamiento de estos. Se efectuaron varias experimentaciones y se dispuso diferentes muestras de alcohol para determinar las curvas características que representa el comportamiento de los sensores bajo condiciones similares de temperatura y humedad.

La caracterización permitió la determinación de curvas características de los sensores MQ-3 se obtuvo parámetros como: línea base, tiempo de respuesta, rango de distancia de detección y sensibilidad. Los parámetros permitieron definir las condiciones necesarias para la realización del levantamiento de mapas de dispersión en un entorno controlado.

Para el levantamiento de mapas de dispersión se dispuso de un ambiente controlado bajo condiciones de temperatura, flujo de aire y humedad constantes. Se determinaron configuraciones de varios escenarios con y sin presencia de obstáculos en los que se colocó diferentes muestras de alcohol y colonia. Además, se definió tiempos de experimentación para obtener los modelos de dispersión de la pluma de olor de las sustancias de prueba.

Los parámetros definidos en las experimentaciones permitieron realizar la adquisición de datos para la obtención de los mapas de dispersión empleando un robot móvil. El robot móvil disponía de sensores MQ-3 los cuales recolectaban datos del ambiente controlado para luego ser almacenados en memoria. Se recolectó una cantidad de 2430 muestras de cada escenario propuesto, las mismas que fueron utilizadas para modelar el patrón de dispersión de alcohol y colonia.

Los mapas de dispersión fueron generados mediante matrices de difusión, que consiste en la representación gráfica de datos por medio de colores. Para esto el ambiente controlado fue representado por una matriz de resolución que contenía los datos obtenidos en experimentación por el robot. Los mapas generados para cada uno de los escenarios propuestos fueron implementados en el entorno de simulación V-REP para realizar el entrenamiento de los algoritmos de búsqueda de fuentes de olor.

En el entorno de simulación se cargaron los mapas de dispersión obtenidos de sustancias con base en alcohol y colonia. Para esto se emplearon modelos de robots móviles en el entorno de simulación, los cuales a través de algoritmos de búsqueda de olores planificaban sus trayectorias en la búsqueda de fuentes de olor.

Se realizaron varias simulaciones con diferentes escenarios empleando robots móviles, estos permitieron entrenar los algoritmos de búsqueda de fuentes de olor sobre los escenarios de dispersión seleccionados. Además, se evaluó su desempeño considerando tiempos de exploración, distancias de detección y efectividad en la detección de las sustancias de prueba bajo los parámetros mencionados, se determinó la eficiencia de los algoritmos previo a su implementación en entornos reales.

En base a los datos obtenidos en la simulación se replicó en la vida real los algoritmos de búsqueda en entornos reales. Para esto se construyeron 3 robots móviles

los cuales planificaban sus trayectorias en función del algoritmo de búsqueda probados en simulación, Sobre las pruebas realizadas se determinó nuevamente parámetros como: tiempos de exploración, distancias de detección y efectividad en la detección de las sustancias de prueba.

Posteriormente se realizó un contraste de los resultados obtenidos de los algoritmos de búsqueda en entornos de simulación y en entornos reales, para determinar el algoritmo de mayor desempeño que permitió detectar las fuentes de olor y optimizar los tiempos de exploración en un ambiente controlado. A manera de ejemplo, en la Figura 1 se presenta el funcionamiento de un robot que se encuentra realizando tareas de búsqueda de fuentes de olor en un entorno con presencia de obstáculos. Para esto, el robot planifica sus trayectorias, evitando obstáculos y explorando el entorno hasta localizar la fuente de olor, en base a su algoritmo de búsqueda implementado.

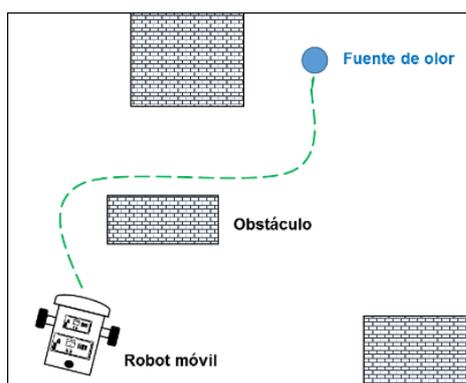


Figura 1. Definición del área de trabajo para los robots móviles

El desarrollo de este proyecto de investigación está enmarcado en los capítulos que se muestran a continuación:

1.5.1 Capítulo I - Introducción

En este capítulo se presenta la descripción de la problemática relacionada con la detección de sustancias químicas en diversas aplicaciones como: monitoreo y supervisión de ambientes con presencia de gases, así como la detección de explosivos, drogas y agroquímicos. Se presenta también una descripción general del proyecto de investigación, en donde se presenta el trabajo realizado previo a la implementación de algoritmos de búsqueda de fuentes de olor empleando robótica móvil cooperativa.

1.5.2 Capítulo II - Estado del arte

El capítulo II presenta el estudio realizado a investigaciones enmarcadas en la detección de olores empleando robótica móvil cooperativa. Se presenta el estado del arte relacionado a la detección de plumas de olor, generación de patrones de dispersión y a técnicas de adquisición de señales de olor. Además, se muestran estudios en los que se han desarrollado algoritmos de búsqueda bioinspirados y algoritmos en base a parámetros de planificación de trayectorias para exploración.

1.5.3 Capítulo III - Obtención de patrones de dispersión en ambientes controlados

En este capítulo se presentan los procedimientos realizados para la obtención de los mapas de dispersión en ambientes con presencia de alcohol y colonia. Para esto, se caracterizaron los sensores químicos MQ-3 que permiten la detección de sustancias con base de alcohol. La caracterización se realizó mediante experimentaciones, que permitieron determinar las distancias y tiempos de detección de los sensores, así como la determinación de línea base, parámetros empleados en el mapeo de las plumas de olor.

En base a los datos obtenidos de la caracterización, se diseñó e implementó un robot equipado con 3 sensores MQ-3 para el levantamiento de mapas de dispersión del alcohol y colonia. Este robot opera semiautomáticamente ya que es controlado por mando empleando tecnología Bluetooth. El robot fue programado para levantar los mapas de dispersión en diferentes configuraciones con y sin obstáculos.

Los mapas de dispersión obtenidos por el robot móvil fueron representados mediante matrices de resolución RGB, que corresponde a relacionar la matriz de datos obtenida por el robot con una matriz de difusión, para esto es necesario definir un rango de colores que permita representar el rango de valores de las señales de voltaje obtenidas en la adquisición con sensores MQ-3. Se presentan los mapas obtenidos para cada una de las experimentaciones en los que se observa el comportamiento de la pluma de olor de alcohol y colonia.

1.5.4 Capítulo IV - Implementación de algoritmos de búsqueda en entornos simulados

El capítulo IV presenta el entorno de simulación V-REP empleado para el desarrollo de algoritmos de búsqueda. El entorno permite crear las condiciones necesarias para disponer de escenarios simulados similares a un entorno real. Los mapas de dispersión obtenidos fueron implementados en la plataforma virtual, y sobre ellos se realizó la implementación de los algoritmos de búsqueda.

Los escenarios fueron diseñados empleando formas y figuras propias de V-REP, se ajustaron las dimensiones del área del entorno de simulación con las del espacio de trabajo para conocer los tiempos requeridos por los robots para localizar fuentes de olor. El diseño de los robots móviles fue realizado a través de modelado CAD empleando la herramienta SOLIDWORKS-2016, los modelos obtenidos fueron importados y cargados en los escenarios para la realización de simulaciones.

Previo al diseño de los robots móviles y de los entornos controlados en el entorno de simulación V-REP se seleccionó 3 algoritmos de búsqueda, los cuales fueron desarrollados en lenguaje Python bajo una programación orientada a objetos propios de V-REP. Los algoritmos planificaban trayectorias propuestas para el análisis de parámetros que determinen su rendimiento. Las trayectorias implementadas son: aleatorias, en zigzag y trayectorias rectilíneas guiadas por la dispersión de una pluma de olor.

Se emplearon sensores de visión propios del entorno de simulación, los cuales fueron utilizados para simular a los sensores químicos, gracias a los mapas obtenidos la relación fue lineal, y consistía en relacionar de forma lineal los valores de voltaje de los sensores químicos reales con valores de los sensores de visión propios del software V-REP.

La implementación de los algoritmos de búsqueda en los escenarios creados en el entorno de V-REP, se realizó mediante la utilización de una interfaz de programación de aplicaciones (API), que permite comunicar los elementos simulados con la programación de los algoritmos. Los algoritmos fueron entrenados y evaluados en base

a los patrones de dispersión obtenidos. Se evaluaron parámetros como: tiempos de exploración, distancia de detección y efectividad en la detección de fuentes de olor.

1.5.5 Capítulo V - Implementación de algoritmos de búsqueda en robots móviles

Para la implementación de los algoritmos de búsqueda en los 3 robots móviles se emplearon tarjetas microprocesadas Raspberry PI 3, las cuales ejecutaban cada uno de los algoritmos que fueron probados, además, se empleó una tarjeta microcontrolada Arduino Mega 2560 que permitía realizar la adquisición de datos de los sensores de los robots. Se realizaron experimentaciones similares a las realizadas en simulación para evaluar el desempeño de los algoritmos de búsqueda y generar una comparativa de los resultados obtenidos para entornos virtuales y reales.

1.5.6 Capítulo VI – Conclusiones y recomendaciones

El capítulo presenta las conclusiones obtenidas como resultado del estudio realizado en la investigación, las recomendaciones futuras a problemas encontrados en el desarrollo e implementación de los algoritmos de búsqueda y los trabajos futuros que permitirán impulsar la detección de fuentes de olor por medio de robótica cooperativa.

CAPITULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

Las actividades realizadas por los seres humanos en ambientes con presencia de gases y sustancias volátiles en muchas de las ocasiones requieren el contacto directo con químicos como: monóxido de carbono, etanol, metanol, agroquímicos, entre otros. En muchas de las ocasiones el trabajo constante frente a este tipo de sustancias provoca severas afectaciones en la salud, especialmente provocando daños en el sistema respiratorio (Soldan et al., 2012).

Para evitar este tipo de complicaciones, se desarrollan mecanismos y técnicas de detección de sustancias químicas en los ambientes. Las técnicas empleadas en la detección de fuentes de olor utilizan diversos mecanismos, los cuales son implementados en ambientes en los que se requiere detectar químicos. Uno de los mecanismos comúnmente empleado para realizar la detección de sustancias químicas en el ambiente se basa en sensores químicos, debido a su bajo costo y fácil implementación (Lino Marques et al., 2002).

Varios estudios (Pomareda Sesé & Marco Colás, 2013) han propuesto formas de detección de fuentes de olor en el ambiente, entre ellas se tiene la obtención de patrones de dispersión de forma experimental o a través del modelamiento matemático. Las técnicas de adquisición y detección son implementadas en robots móviles, los cuales tienen la capacidad de explorar y navegar por diferentes escenarios para encontrar las fuentes de olor.

La localización y búsqueda de fuentes de olor empleando robótica móvil requiere del desarrollo de algoritmos eficientes que permitan realizar una navegación autónoma y la detección efectiva de sustancias químicas presentes en ambientes. La búsqueda de olores se realiza de mejor manera con la utilización de varios robots, y que bajo acciones de cooperación y comunicación mutua se ejecutan diversas tareas que permiten encontrar sustancias en el menor tiempo posible.

2.2 Dispersión de fuentes de olor producidos por sustancias químicas

Los olores producidos por concentraciones de sustancias químicas se presentan en diferentes entornos. Por ejemplo, en la naturaleza los animales emplean las feromonas que son dispersadas por aire para localizar a otros y comunicarse entre ellos (Belanger & Willis, 1998). De igual manera, en la industria la presencia de olores puede indicar fuga de gases tóxicos que provocan contaminación ambiental. Existen otros entornos donde se presentan las fuentes de olor, en el campo de la agricultura se realiza el control de cultivos mediante agroquímicos, además hay entornos en los que se dispersan explosivos generando zonas peligrosas (Marco et al., 2014).

En el ámbito militar se emplean diferentes mecanismos para la detección de gases explosivos, lo que permite identificar minas no exploradas por medio de sistemas de detección (Genqun Cui, Kun Ren, Chunshu Li, & Zhen Wang, 2011). La dispersión de sustancias también se presenta en los controles antinarcoóticos, ya que muchas drogas lícitas e ilícitas se dispersan en el medio, para su detección se entrenan canes que presentan la capacidad de detectar estas sustancias a través del olfato (Liu, 2010).

2.2.1 Modelamiento de plumas de olor a partir de la dispersión de sustancias

La dispersión de sustancias químicas es representada por plumas de olor. Esta pluma muestra el comportamiento cinemático de las partículas de una sustancia al desplazarse través de un fluido que puede ser aire o agua (Crimaldi, Koehl, & Koseff, 2002), la propagación se produce por la volatilidad de la sustancia y por turbulencias que determinan la dirección de propagación (L. Marques, Almeida, & Almeida, 2003).

La dispersión de volátiles es afectada por diversas condiciones como: estabilidad atmosférica, dirección y velocidad de flujo (Farkas & Shorey, 1972), temperatura, humedad, concentración de sustancia (a. Lilienthal et al., 2001). Dependiendo de estas condiciones, se puede modelar el comportamiento de la pluma de olor (Webster & Weissburg, 2001).

A manera de ejemplo, en Figura 2 se presenta un experimento que muestra las plumas de olor generadas por la dispersión de una solución de Rodamina 6G en bajas concentraciones de etanol, la propagación y dirección del flujo de las plumas se

producen por turbulencias generadas a diferentes velocidades, permitiendo obtener capturas en imagen para cada experimentación.

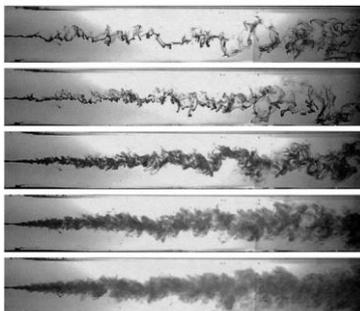


Figura 2. Plumas de olor de la dispersión de gas sobre un canal con presencia de turbulencias a diferentes velocidades

Fuente: (Webster & Weissburg, 2001)

La pluma de olor puede ser modelada a través de patrones de dispersión. El modelamiento de la pluma de olor puede ser realizado matemáticamente a través de simulaciones. En entornos de simulación, se representa la dispersión de sustancias empleando distribuciones de partículas en función de la concentración y del tiempo. Los modelos obtenidos permiten simular el comportamiento de la pluma de olor frente a la presencia de perturbaciones (Trincavelli, Coradeschi, & Loutfi, 2009).

La obtención de modelos de dispersión requieren una carga computacional muy alta (de Croon, O'Connor, Nicol, & Izzo, 2013), sin embargo, se puede simular y predecir el comportamiento de la pluma de olor de una sustancia. A manera de ejemplo, en la Figura 3 se muestra el resultado la simulación del algoritmo de Holzbecher (Holzbecher, 2007, citado en Montes et al., 2014) que genera un modelado de una pluma de olor en base a una distribución gaussiana. El algoritmo simula el movimiento de las partículas y representa una aproximación del movimiento cinemático de una pluma generada aleatoriamente en función del tiempo.

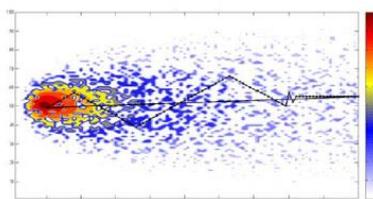


Figura 3. Simulación del patrón de dispersión de una pluma cuyo comportamiento es modelado en base a distribución gaussiana

Fuente: (Montes et al., 2014)

En la Figura 4 se observa una simulación de la dispersión de ácido sulfhídrico (H_2S) al transcurrir un tiempo de 268 segundos de haber iniciado el experimento. En la simulación la sustancia se dispersa producto de una perturbación de flujo de aire que genera turbulencias, provocando que la fuente de olor se propague en el medio distribuyendo su concentración en un área mayor.

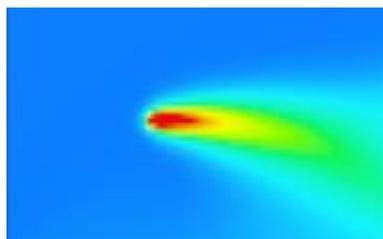


Figura 4. Simulación de la dispersión de ácido sulfhídrico (H_2S) en un tiempo de $T=268$ segundos bajo condiciones de un ambiente virtual

Fuente: (Liu, 2010)

Otro de los métodos de obtención de plumas de olor se basa en la detección de sustancias químicas de forma experimental, para la obtención de patrones de dispersión, se establecen ambientes controlados y condiciones ambientales que permitan dispersar a una sustancia. En la Figura 5 se presenta un escenario de pruebas sobre el cual se colocan muestras de volátiles que se dispersan por medio de turbulencias, mediante técnicas de adquisición se obtiene el patrón de dispersión.



Figura 5. Túnel de viento empleado para realizar experimentaciones con fuentes de olor a condiciones específicas

Fuente: (Soares, Aguiar, Pascoal, & Martinoli, 2015)

2.2.2 Adquisición de señales para la obtención del patrón de dispersión

La adquisición de señales es motivo de interés en investigaciones dedicadas al modelado de patrones de dispersión, en donde se realizan diversas experimentaciones en las que las sustancias son sometidas a diferentes condiciones ambientales (T. F. Lu,

2013). Se evalúan en ambientes controlados parámetros como: concentración de sustancia, temperatura ambiente, humedad, tipo de sustancia; que son características propias de las plumas de olor (A. J. Lilienthal et al., 2006).

En la década de los años 90, el estudio relacionado con sistemas de detección y localización de fuentes de olor se intensificó debido a la implementación de mecanismos de detección y al desarrollo de algoritmos, los métodos de búsqueda de olores a través de la exploración y detección en diversos entornos fueron adquiriendo mayor aceptación. (Ishida, Nakamoto, & Moriizumi, 1997).

Algunos métodos de detección se basan en la observación del comportamiento animal y en fenómenos que suceden en la naturaleza, los sistemas de búsqueda e identificación de olores son denominados bioinspirados (Kiatweerasakul & Stonham, 2002), y se desarrollan considerando tareas que realizan algunos insectos o mamíferos tales como: organización, cooperación, reproducción y comunicación que les permite interactuar entre ellos (Kowadlq & Russell, 2004).

En la naturaleza los insectos poseen la capacidad de identificar sustancias químicas y hacer un seguimiento de su pluma de olor empleando receptores olfativos. Este comportamiento es utilizado en el desarrollo de mecanismos de detección. Los modelos de detección bioinspirados se centran en el análisis de la concentración de sustancias y en la dispersión que puede darse en diferentes ambientes, para esto se desarrollan técnicas de adquisición que permitan obtener datos del medio.(Selangor & Willis, 1998).

Otros modelos de detección de olores utilizan tecnologías desarrolladas en base a principios físicos, entre las tecnologías se tiene: espectrometría de movilidad iónica (IMS) que caracteriza una sustancia en base a la velocidad iónica de propagación sobre un campo eléctrico, analizador de movilidad diferencial (DMA), foto-detectores de ionización (PID) o utilización de sensores químicos de óxidos metálicos (MOX) que se emplean en la detección de químicos (Pomareda Sesé & Marco Colás, 2013).

Los sistemas de detección de olores empleando sensores químicos son utilizados debido a su fácil implementación, bajo costo, alta sensibilidad, bajos tiempos de respuesta, los sensores químicos no son específicos por lo que pueden ser utilizados

en varias aplicaciones en las que se requiere realizar la selección e identificación de diferentes gases o sustancias volátiles (X. Zhang & Zhang, 2008).

Los sensores químicos se fabrican con materiales semiconductores en base a una composición de un óxido metálico que puede ser: SnO_2 , In_2O_3 , ITO, entre otros y son conocidos como sensores de gas (MOX) (Zhou et al., 2017). Estos sensores se emplean en aplicaciones de detección de gases como: alcohol, benceno, etanol, y otras sustancias de carácter explosivo presentes en el ambiente (Vancouver, Centre, Jatmiko, Sekiyama, & Fukuda, 2006).

La detección de gases empleando sensores MOX se realiza por medio de reacciones químicas, donde el óxido metálico como elemento activo del sensor al entrar en contacto con una sustancia química genera cambios de resistencia eléctrica (Nakamoto, Ishida, & Moriizumi, 1996), la variación de resistencia puede ser tratada por medio de circuitos de acondicionamiento y disponer de una señal eléctrica que se relacione con la concentración de sustancia(Ishida et al., 1997). A manera de ejemplo, en la Figura 6 se presenta un diagrama de funcionamiento de un sensor químico.

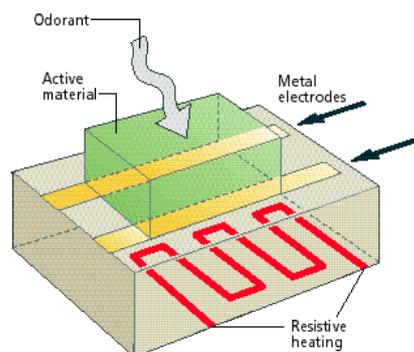


Figura 6. Diagrama básico de un sensor de óxido

Fuente:(Neagle, Schiffman, & Gutierrez-Osuna, 1998)

Existen procedimientos que permiten utilizar diferentes sensores químicos para determinar e identificar sustancias dispersas en un ambiente, para esto se desarrollan diferentes sistemas de adquisición y procesamiento de datos que permiten caracterizar los olores a través de selectividad que se disponga en el sistema de adquisición para diferenciar los umbrales de detección de las sustancias (Persaud & Dodd, 1982, citado de Haddad, Carmel, Sobel, & Harel, 2008).

En la Figura 7 se presenta un esquema del procedimiento de localización e identificación de olores, el cual consiste en la detección, identificación y una localización de una sustancia química mediante la cuantificación. Para esto es necesario que los sistemas de detección tengan la capacidad de determinar los tipos de sustancias presentes en el medio.

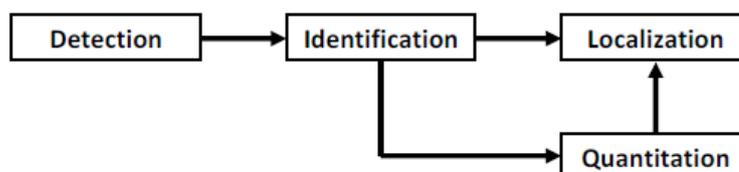


Figura 7. Procedimientos para la localización de sustancias químicas

Fuente: (Pomareda Sesé & Marco Colás, 2013)

La variedad de los sensores químicos ha permitido que sean utilizados en aplicaciones como: de detección de gases tóxicos resultado de la contaminación industrial (Morsi, 2008), determinación del grado de limpieza de ambientes, diseño de narices electrónicas, alcoholímetros (Blit, Juwita, Suprijanto, & Nugraha, 2015), análisis de calidad de productos agrícolas (Manuel, Eduardo, & Mariela, 2014), detección de explosivos y drogas (Jiu, Pang, Li, & Han, 2014), entre otras.

En la detección de sustancias como: etanol, benceno, metano o alcohol, uno de los sensores químicos empleados en la detección es el modelo MQ-3, este shield presenta un acondicionamiento resistivo para tratar la señal del sensor químico cuyo material activo de detección es el dióxido de estaño (SnO_2). El sensor presenta alta sensibilidad en la detección de alcohol y etanol (sparkfun, 2015).

El sensor de gas MQ-3, presenta baja sensibilidad en presencia de aire limpio y alta sensibilidad en presencia de concentraciones químicas, es decir la sensibilidad depende de los cambios de concentración de una sustancia que se dispersa en el aire (Hanwei Electronics, 2002), además, los tiempos de reacción del sensor son bajos permitiendo realizar una rápida detección de olor (Saeed, Abbas, & Gopal, 2009). En la Figura 8 se muestra el sensor MQ-3 con el circuito acondicionador resistivo para tratar la señal del dióxido de estaño.



Figura 8. Sensor MQ-3 para detección de alcohol y benceno

Fuente: (Hanwei Electronics, 2002)

2.3 Robótica móvil cooperativa

La robótica cooperativa consiste en la utilización de varios robots móviles para la realización de tareas mediante la comunicación y coordinación entre ellos. El uso de sistemas robotizados cooperativos permite disponer de flexibilidad, eficiencia y simplicidad en la ejecución de tareas para solucionar determinados problemas (Inglett & Rodríguez-Seda, 2017). A diferencia de emplear un robot, las tareas se realizan en menor tiempo y se presenta una facilidad en la resolución de problemas (Khan, Rinner, & Cavallaro, 2016).

La realización de tareas empleando robótica cooperativa ha tenido un crecimiento importante en la industria y en la academia, debido a los beneficios que presenta la utilización de varios agentes robóticos que distribuyen sus tareas para cumplir un objetivo optimizando el uso de recursos. (Urrea & Barbosa, 2015). A manera de ejemplo, en la Figura 9 se representa una acción de cooperación, la acción consiste en el transporte de un objeto realizada por dos agentes. La tarea resulta más sencilla si dos robots transportan el objeto a diferencia de un solo robot, debido a que este requerirá mayor consumo de energía en dicha acción.

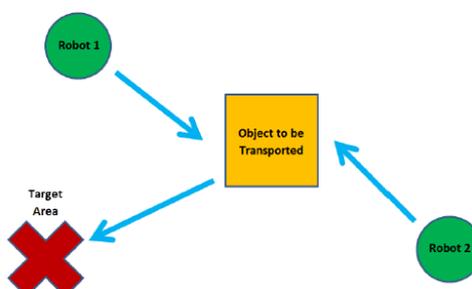


Figura 9. Acción de cooperación para dos robots cuyo objetivo es transportar un objeto de una posición hacia un área de destino empleando dos robots

Fuente: (Inglett & Rodríguez-Seda, 2017)

La robótica móvil cooperativa ha tenido un importante desarrollo gracias a las nuevas tecnologías desarrolladas para hardware, además de mejoras mecánicas que permiten a los robots móviles desplazarse por diferentes entornos (Craver, 2014). El uso de la robótica móvil se basa principalmente en resolver problemas de locomoción, transporte, navegación, entre otras (Gaibor & Mediavilla, 2016).

En los sistemas cooperativos se presentan dos elementos importantes: el entorno y los agentes robotizados, los cuales interactúan entre ellos. El entorno es el medio sobre el cual un agente robotizado se desenvuelve y adquiere experiencia, que le permite ejecutar acciones en base al conocimiento adquirido. Generalmente los entornos son conocidos permitiendo a los agentes trabajar sobre estos de acuerdo a la experiencia o a un entrenamiento previo (Clark & Robinson, 2015).

Los agentes robotizados son aquellos capaces de percibir el entorno que lo rodea a través de sensores y ejecutar acciones por medio de actuadores. La toma de decisiones de los agentes se relaciona con las condiciones y características determinadas del entorno (Hirokawa et al., 2016). Además de características de autonomía, aprendizaje o inteligencia artificial de las que dispone un robot móvil (Maidens & Li, 2013).

El conjunto de múltiples robots es conocido como enjambre robótico, en donde todos los agentes son coordinados y comunicados dependiendo de arquitecturas de control que les permiten relacionarse de forma centralizada, distribuida o ambas. En la Figura 10 se muestra un enjambre de 50 robots móviles encargados de realizar tareas de exploración y mapeo en un entorno con presencia de fronteras y límites en los que los agentes cooperan entre sí para obtener el resultado común.



Figura 10. Enjambre robótico móvil desarrollado para exploración y mapeo de escenarios desconocidos mediante cooperativismo

Fuente: (Soldan et al., 2012)

2.3.1 Control en robótica cooperativa

La utilización de múltiples robots para la solución de problemas se basa en la coordinación, comunicación y control de los agentes de forma centralizada o distribuida (Marino & Chiacchio, 2016), dependiendo de la complejidad y eficiencia del sistema de control, los robots móviles pueden tomar decisiones, comunicarse e interactuar con el entorno. (Cai, Fukuda, & Arai, 1997).

La implementación de sistemas de control en robótica móvil depende de factores como: diseño del sistemas de adquisición y procesamiento de datos, ordenadores que permitan almacenar información y de tecnologías de comunicación (Yamaguchi, 1998). Las características mencionadas anteriormente son determinantes en la elección de sistemas de control centralizados o distribuidos (Stoian & Bobasu, 1998).

2.3.1.1 Control centralizado

Los sistemas de control centralizados para robótica cooperativa se desarrollan en base a estrategias de supervisión y dependencia, es decir un grupo de robots depende de una unidad de control central que se encarga de tomar decisiones para el enjambre robótico (De la Cruz & Carelli, 2006). La unidad centralizada recopila toda la información necesaria de los robots para asignar tareas a cada agente.

El principal inconveniente de este tipo de control es la necesidad de disponer de una unidad de control más especializada que los robots, el manejo de una gran cantidad de información requiere de una mayor capacidad de almacenamiento y procesamiento propia de una unidad centralizada, sin embargo en caso de presentar alguna falla en la unidad se puede presentar un fallo completo en el sistema provocando que los agentes no puedan interactuar en el entorno (Montemayor & Wen, 2005).

La implementación de sistemas de control centralizado resulta compleja debido a que se necesita controlar la navegación, coordinación y comunicación de los robots dentro de un entorno, además los robots necesitan ser especializados y disponer del hardware necesario para entregar al controlador central la información para efectuar acciones de control. (Pane, Fuady, & Mutijarsa, 2013; Zhou et al., 2017).

2.3.1.2 Control distribuido

Los sistemas de control distribuidos permiten que cada robot disponga de la capacidad de tomar decisiones sin la necesidad de recibir órdenes de un agente central o de alguna entidad de control centralizada (Guo, Wen, Mao, Chen, & Song, 2015). Además, la arquitectura de control se basa en el paralelismo, flexibilidad y escalabilidad permitiendo a cada agente tomar decisiones de forma singular sin afectar la interacción de los demás en el entorno (Soumya & Guruprasad, 2015).

Los sistemas distribuidos generalmente no necesitan de un gran almacenamiento de información del entorno para la toma de decisiones, debido a que cada agente dispone de un controlador propio que ejecuta acciones de control en base a los datos adquiridos del medio. Además, la utilización de varios agentes robóticos genera una mayor probabilidad de éxito en el cumplimiento de objetivos que al disponer de una sola unidad singular robotizada (Mashood, Mohammed, et al. , 2016).

La complejidad en el desarrollo de algoritmos para sistemas distribuidos depende de la comunicación y el grado de interacción que existe entre los robots, debido a que cada agente tiene la necesidad de realizar múltiples tareas y sus acciones pueden interferir con las de los demás. El desarrollo de sistemas de comunicación permite reducir estos problemas y el uso de tecnologías permite que los robots manejen la información de forma ordenada y segura (Ahmed, Cortés, & Martínez, 2016).

La implementación de tecnologías de comunicación en robots móviles son evaluadas con la finalidad de conocer la efectividad en el control y coordinación de robots (Bhattacharya & Agrawal, 2017), las tecnologías más utilizadas son: los sistemas de posicionamiento global, WIFI, redes celulares, radiofrecuencia, XBee, entre otras que son de bajo costo y que pueden ser implementadas en los agentes fácilmente (Ahmed et al., 2016).

2.4 Robótica móvil aplicada en la búsqueda y detección de fuentes de olor

A finales de la década de los 90, la implementación de sistemas de detección de olores en robots móviles tuvo un gran crecimiento debido a la necesidad de exploración y detección de olores en diferentes entornos empleando robótica móvil

(Trincavelli et al., 2009), por lo que se han generado mecanismos de navegación autónoma en base a sistemas de adquisición y algoritmos de búsqueda que permitan a los agentes planificar trayectorias y localizar las sustancias químicas (Villarreal, Olague, & Gordillo, 2016).

Las estrategias de detección implementadas en los robots móviles dependen de la capacidad de los sistemas de detección, enfocados a la identificación de sustancias químicas en el medio. Los sistemas de detección dependen de un conjunto de sensores, que miden variables como: temperatura, humedad, presión atmosférica, que son variables requeridas para realizar la reconstrucción de la pluma de olor. Una de las estrategias de detección es la utilización de sensores químicos (Jiu et al., 2014).

Los sistemas de detección con base a sensores químicos implementados en robots móviles son empleados en la detección de diferentes agentes químicos como: etanol, alcohol, benceno, incluso aromas de frutas (Kowadlo & Russell, 2008). La detección de olores requiere de una caracterización de los sensores químicos, para definir parámetros y tiempos de respuesta que permitan el desarrollo de algoritmos de búsqueda de fuentes de olor y navegación de los robots móviles en entornos (Li, Meng, Wang, & Zeng, 2011).

Los algoritmos de búsqueda de fuentes de olor implementados en sistemas robóticos móviles se enfocan en la planificación de mejores trayectorias de navegación para realizar el seguimiento de plumas (Senanayake et al., 2014). Los algoritmos permiten que los agentes puedan explorar zonas conocidas o desconocidas y localizar sustancias químicas. Dependiendo de la base de desarrollo se presentan: bioinspirados relacionados con el comportamiento animal (Belanger & Willis, 1998) y algoritmos de exploración de entornos enfocados a la detección de olores (Cai et al., 1997).

A manera de ejemplo, en el estudio de (Gaibor & Mediavilla, 2016) los autores desarrollaron un algoritmo de localización de fuentes de olor que permite al robot navegar en un ambiente controlado e identificar concentraciones de acetona y alcohol. En la Figura 11 se observa el funcionamiento del robot implementado para esta investigación.



Figura 11. Seguimiento plumo de olor, desde una posición inicial del robot hacia la fuente localizada de olor.

Fuente: (Gaibor & Mediavilla, 2016)

2.4.1 Algoritmos de búsqueda de fuentes de olor bioinspirados

Los algoritmos bioinspirados se desarrollan en base al comportamiento animal y a fenómenos que suceden en la naturaleza. La quimiotaxis es uno de los fenómenos que consiste en observar las reacciones de orientación que tienen los insectos frente a estímulos químicos en el ambiente (Kowadlq & Russell, 2004). Este comportamiento permite que los insectos determinen acciones de comunicación, orientación o reproducción a través de la emisión de feromonas que se dispersan en el medio y que pueden ser detectadas.

Los insectos para localizar las fuentes de olor generan diferentes trayectorias de seguimiento que pueden ser en espiral, zigzag, rectilíneas, entre otras (Montes et al., 2014). La navegación realizada dependerá de la presencia de flujos de aire, cambios en la concentración de sustancias, temperatura, humedad, entre otras. Estas condiciones determinan las diferentes trayectorias que realizan los insectos para realizar el seguimiento de las plumas de olor (Belanger & Willis, 1998).

La navegación realizada por los insectos es modelada e implementada en robots móviles mediante el desarrollo de algoritmos. Para esto se diseñan sistemas de detección que permitan localizar fuentes de olor mediante el uso de sensores o tecnologías de detección. (A. J. Lilienthal et al., 2006). A continuación, se presentan algunos algoritmos bioinspirados que han sido implementados en robots móviles para la detección de sustancias químicas.

2.4.1.1 Algoritmo zigzag

El algoritmo se basa en el comportamiento de los escarabajos, los cuales realizan el seguimiento constante de la dispersión de un olor mediante trayectorias en zigzag producidas por el cambio constante de dirección en sus movimientos (Kowadlo & Russell, 2008). En la mayoría de casos estos insectos generan trayectorias en zigzag más cortas que las iniciales, esto dependerá del nivel de concentración de sustancia que detecten a través de sus receptores olfativos. (Senanayake et al., 2014).

Este comportamiento es modelado e implementado en robots móviles, los cuales dependiendo de su configuración mecánica ejecutan con facilidad desplazamientos que requieren cambios de orientación continuos, Las trayectorias en zigzag dependerán del nivel de concentración, configuración del robot móvil, fricción, entre otras (A. J. Lilienthal et al., 2006).

A manera de ejemplo en la Figura 12 se observa el funcionamiento del algoritmo que fue implementado en un robot con configuración diferencial, el cual realiza un seguimiento transversal a la pluma de olor mediante trayectorias en zigzag, cuando el filamento de la pluma es mayor, se planifican trayectorias amplias y dependiendo de la concentración detectada se incrementarán o disminuirán los cambios de orientación generando así trayectorias en zigzag.

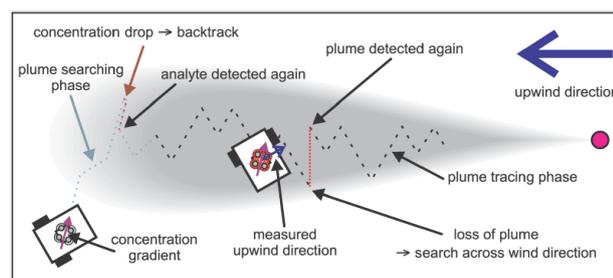


Figura 12. Seguimiento de la pluma de olor por un robot en base a trayectorias en zigzag generada por el algoritmo *Geotrupes stercorarius*

Fuente: (A. J. Lilienthal et al., 2006)

En la Figura 13 se presenta el contraste de dos algoritmos de búsqueda con trayectoria zigzag, para el seguimiento de plumas de olor mediante diagramas de flujo. Para la Figura 13 a) se describe un algoritmo basado en la adquisición y procesamiento de datos del entorno de forma continua cada vez que es inicializado, para esto se

generan trayectorias aleatorias de búsqueda en un robot para la obtención de datos, si la información obtenida es referente a la detección de un patrón de dispersión, se ajusta una nueva trayectoria de búsqueda en zigzag que permita encontrar la fuente de olor (Montes et al., 2014).

En la Figura 13 b) se muestra el diagrama de flujo de un segundo algoritmo de búsqueda. La detección de una fuente de olor inicia con la generación de trayectorias en zigzag realizadas por un robot hasta determinar la presencia de un patrón de dispersión. El seguimiento de la pluma de olor se realiza a través de validaciones que precisan la búsqueda de una sustancia a través de ajustes en la trayectoria que permitan evadir obstáculos (Jiu et al., 2014).

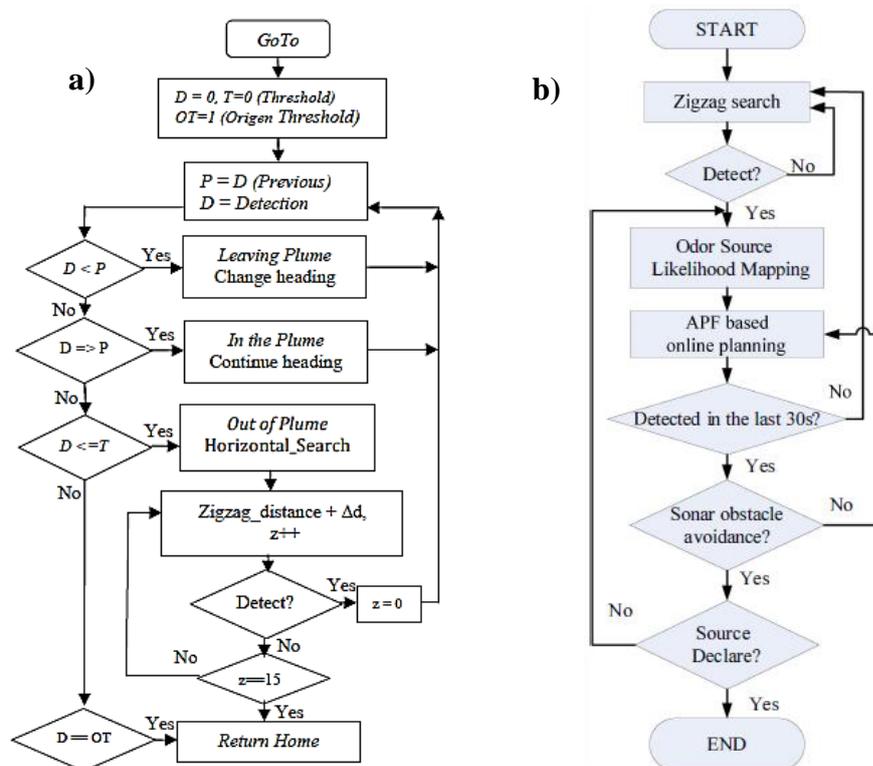


Figura 13. Contraste de algoritmos zigzag: a) algoritmo de búsqueda basado en memoria y comparación, b) algoritmo basado en el rastreo y seguimiento de la pluma de olor

2.4.1.2 Algoritmo espiral

El algoritmo se basa en el mecanismo que permite alimentar a las colmenas de abejas, el mecanismo se basa en la exploración y búsqueda de alimentos por parte de abejas especializadas, las cuales se encargan de explorar entornos desconocidos

liberando feromonas para guiarse y navegar de forma asistida en la búsqueda de alimentos (Senanayake et al., 2014). El mismo comportamiento se presenta en las polillas de gusano de seda, las cuales recorren grandes distancias para localizar a los de su especie guiándose por la pluma de olor generada (Hayes, Martinoli, & Goodman, 2001). Las exploraciones realizadas por estos insectos se realizan por medio de trayectorias en zigzag. El comportamiento de estos insectos es modelado para desarrollar el algoritmo de espiral que permite a los robots navegar con trayectorias espirales (Zecchin et al., 2006).

Los algoritmos inspirados en el comportamiento de las hormigas se desarrollan en base al tipo de comunicación entre los agentes, por tal razón la comunicación y coordinación son prioridades (Chu, Lin, Liu, & Sung, 2008). La implementación de estos algoritmos permite que los robots móviles puedan decidir lugares de exploración y trazar trayectorias de búsqueda con distancias cortas (Senanayake et al., 2014). En la Figura 14 se muestra la planificación y optimización de trayectoria realizada por las hormigas en la búsqueda de alimentos.

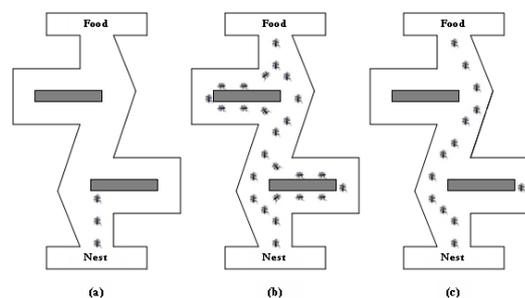


Figura 14. Optimización de trayectorias de las colonias de hormigas:
a) búsqueda de alimento, b) exploración del entorno entre el nido y la fuente de alimento, c) retorno y selección de la ruta más corta

Fuente: (Bachir, Ali, & Abdellah, 2012)

2.4.1.3 Algoritmo firefly

El algoritmo firefly o de luciérnaga fue presentado por el investigador Xin-She Yang, y se basa en el comportamiento de exploración de las luciérnagas a través de su luz, las cuales se agrupan sobre un objetivo de interés y determinan puntos focales permitiendo a otros de su especie encontrar zonas ya exploradas, conocer la posición

actual y desplazarse a manera de enjambre por medio de la luminosidad presente en el ambiente (X. Yang, 2010).

Mediante simulaciones se modela el comportamiento de estos insectos, en donde se distribuyen partículas de forma aleatoria que representan a las luciérnagas, las cuales interactúan con un entorno simulado para agruparse y localizar objetivos mediante distribuciones de probabilidad. Para esto se definen posiciones aleatorias para cada partícula, las cuales al encontrar el objetivo de búsqueda se agrupan (X. Yang, 2010).

El comportamiento es adoptado e implementado en enjambres robóticos para realizar la búsqueda y detección de olores, en donde cada robot determinará una señal resultado de la posible detección de un olor y comunicará al enjambre la posibilidad de encontrar la fuente de olor en la zona donde se encuentra o en la zona donde exista mayor agrupación de robots que detectaron una sustancia (Cardé & Willis, 2008).

A manera de ejemplo en la Figura 15 a) se observa una simulación del algoritmo de búsqueda, en donde se coloca una muestra de 20 robots representada por puntos que fueron localizadas en una posición aleatoria en el entorno y también una fuente de olor, al transcurrir 23 iteraciones los robots se posicionan sobre la muestra de olor como se observa en la Figura 15 b) localizando así la fuente de olor.

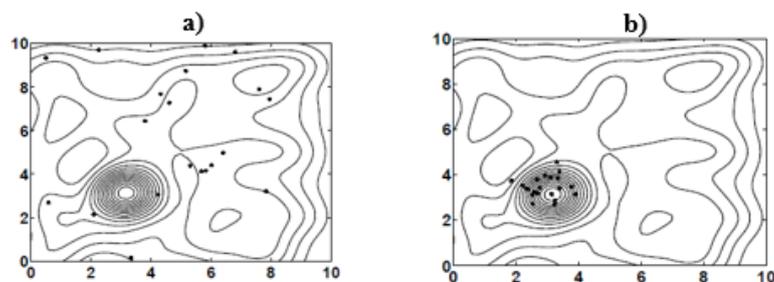


Figura 15. Simulación algoritmo firefly: a) posición inicial de 20 luciérnagas para detección de un patrón de dispersión, b) posición final de las 20 luciérnagas al detectar fuente de olor

Fuente: (X.-S. Yang, 2010)

2.4.2 Algoritmos de búsqueda basados en la planificación de trayectorias

El desarrollo de algoritmos que permitan a robots móviles realizar tareas de detección y búsqueda de fuentes de olor está ganando atención por diversas áreas de investigación. Las tareas de búsqueda realizadas por robots móviles depende de la

planificación de trayectorias que depende de factores como: proximidad, visión, navegación asistida, que permiten a los agentes navegar de forma autónoma en diversos entornos(Lino Marques et al., 2002).

Los sistemas de navegación autónoma en robots dependen de las tecnologías de adquisición y del procesamiento de datos que se implementan en robots móviles (Rozas, Morales, & Vage, 1991), para esto se planifican trayectorias que permitan realizar una exploración y búsqueda evadiendo obstáculos y considerando fronteras de decisión (Aniketh, Manohar, Yazwa, Nithya, & Rashmi, 2017). A continuación, se presentan algoritmos de búsqueda basados en la planificación de trayectorias.

2.4.2.1 Algoritmo basado en el filtrado de partículas

El algoritmo se basa en el conocimiento de los posibles acontecimientos que pueden darse al momento de la dispersión de un olor, y consiste en dar un seguimiento a las partículas de una sustancia a lo largo del tiempo, si existe una agrupación de partículas existe mayor concentración de las sustancias permitiendo a los robots móviles localizar una fuente de olor (Senanayake et al., 2014).

El algoritmo se fundamenta en dos procesos, la detección de una fuente de olor y la estrategia para rastrearlo, por tal razón inicialmente se estima la localización de la fuente de olor y se genera una distribución de la misma por medio de un conjunto de partículas que representa la dispersión, por lo que cada partícula tiene definida su ubicación en el espacio y se le asigna un peso de identificación, para proceder al rastreo de la pluma de olor(A. Lilienthal & Duckett, 2004).

Si la estimación de la fuente de olor es satisfactoria se finaliza el rastreo de la pluma de olor, caso contrario las partículas se re-muestran mientras el robot realiza una inspección del entorno, el funcionamiento de este algoritmo se puede evidenciar en la Figura 16 a) mediante el diagrama de flujo (Li et al., 2011) y en la Figura 16 b) se muestran los resultados de la exploración del robot desde un punto inicial hasta la detección de una fuente de olor, en donde se evidencia la distribución de partículas que presentan la fuente de olor.

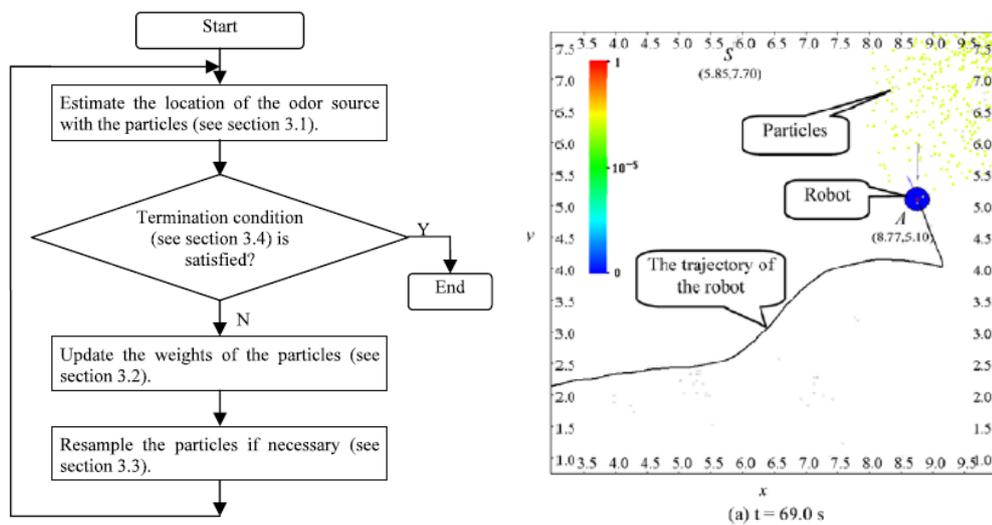


Figura 16. Algoritmo de localización basado en el filtrado de partículas:
a) diagrama de flujo, b) simulación trayectoria generada por el algoritmo
empleando un robot y una fuente de olor

Fuente: (Li et al., 2011)

2.4.2.2 Algoritmo BSA

El algoritmo BSA, es conocido como algoritmo de barrido de superficies y fue introducido por (Gonzalez, Alarcon, Aristiziibal, & Parra, 2003) consiste en el modelado del área de trabajo en función de las dimensión del agente robótico, a partir de esto se divide el entorno en cuadrículas denominadas celdas que permiten al robot generar mecanismos de navegación simétricos.

El algoritmo combina soluciones de planificación de trayectorias que se enfocan en definir el área de trabajo y el objetivo de búsqueda en ambientes conocidos o desconocidos (Park et al., 2010), para su desarrollo se define el área de trabajo y sus límites para poder determinar las distancias relativas que permitan a los robots identificar su posición en el espacio. Adicional el algoritmo debe generar trayectorias de navegación libres de colisión con obstáculos (González, Álvarez, Díaz, Parra, & Bustacara, 2005).

La navegación autónoma de los robots se genera a través de trayectorias en espiral que cubren regiones simples del entorno, la particularidad de este tipo de navegación es la planificación de trayectorias que dependen de fronteras de decisión y de la presencia de obstáculos que permitan referenciar al robot e identificar zonas ya

exploradas, en la Figura 17 se especifica la referencia de espacios singulares en los que el robot determina las zonas exploradas y pondera regiones que pueden presentarse en su navegación (E. Gonzalez & Gerlein, 2009). En la Figura 17 a) se observa el reconocimiento de zonas sin la presencia de obstáculos y en la Figura 17 b) se aprecia el reconocimiento de zonas con obstáculos.

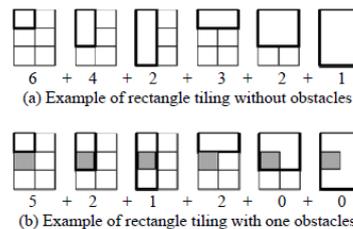


Figura 17. Exploración de espacios singulares mediante Algoritmo BSA: a) espacios sin presencia de obstáculos, b) espacios con presencia de obstáculos

Fuente: (Park et al., 2010)

La planificación de trayectoria dependerá del espacio de trabajo y fronteras presentes en el área de trabajo, en la Figura 18 se muestra un entorno en el cual se han planificado 3 trayectorias de barrido en espiral diferente, que pueden ser recorridas por uno o varios agentes robotizados, la navegación se hace desde las fronteras del área de trabajo hacia el interior del mismo, permitiendo explorar gran parte del espacio y localizar los objetivos de búsqueda (E. Gonzalez & Gerlein, 2009).

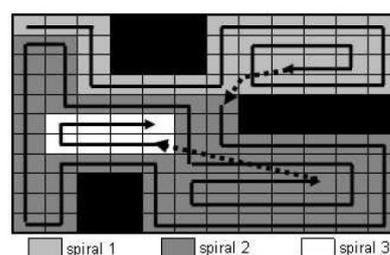


Figura 18. Ejemplo de navegación del algoritmo BSA

Fuente: (E. Gonzalez & Gerlein, 2009)

2.4.2.3 El algoritmo SLAM

El algoritmo de localización y mapeado simultáneo es usado en diversas aplicaciones con robótica móvil por los beneficios que presenta al modelar y construir mapas de entornos desconocidos (Yeon et al., 2015), obteniendo información

cualitativa y cuantitativa del ambiente y poder determinar sus características (Brink & Pebesma, 2014). Esta información es procesada permitiendo a los agentes navegar de forma autónoma y así poder localizar objetivos (Marjovi & Marques, 2011).

La navegación SLAM es empleada en la detección de fuentes de olor con el propósito de explorar zonas en donde se puede encontrar dispersión de olor (Penders & Cervera, 2007), sin embargo dependiendo de la concentración y volatilidad de la sustancia se pueden dejar zonas sin explorar provocando que se pierda el rastro de la pluma de olor, para esto se emplean enjambres de robots que permitan cubrir todas las regiones de exploración y tener una detección acertada de la fuente de olor (Wada, Trincavelli, Fukazawa, & Ishida, 2010).

A manera de ejemplo, en la Figura 19 se muestra un escenario con cinco robots los cuales exploran un área desconocida en la que se ha colocado fronteras de decisión, al realizar el mapeo del área se determinan las regiones en las que existe posibilidad de detección de una fuente de olor, posteriormente se generan trayectorias que permitan localizar el olor dentro de los límites ya explorados (Marjovi & Marques, 2011).

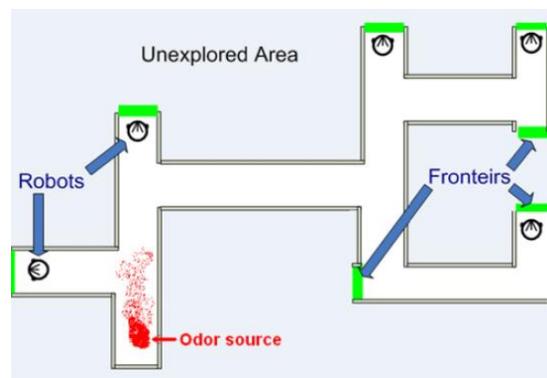


Figura 19. Detección de fuentes de olor empleando algoritmo SLAM

Fuente:(Marjovi & Marques, 2011)

2.4.2.4 Algoritmos basados en concentraciones

El algoritmo se basa en el estudio y determinación del comportamiento de una pluma de olor, por lo que se requiere conocer la información del modelo de dispersión, las características del ambiente y las concentraciones de sustancias para determinar la

planificación de trayectorias que permitan a los agentes localizar fuentes de olor en el medio. (Gao & Acar, 2016).

A partir de simulaciones se obtienen modelos específicos que representen el comportamiento de la pluma de olor por medio del movimiento de partículas en el espacio de trabajo simulado (Marjovi & Marques, 2013), y se crean matrices de difusión que representen el nivel de concentración de partículas en puntos específicos del área de trabajo (Aniketh et al., 2017).

En la Figura 20 a) se observa una matriz de difusión que representa un espacio de trabajo de 2m x 2m y que fue dividido en secciones horizontales y verticales, el algoritmo genera puntos en cada sección que representan los niveles de concentración permitiendo al robot conocer los puntos mayores por los que puede navegar. En la Figura 20 b) se muestra la trayectoria generada por el robot al realizar el seguimiento de la pluma de olor por la matriz de difusión creada (Song, Liu, & Wang, 2011) .

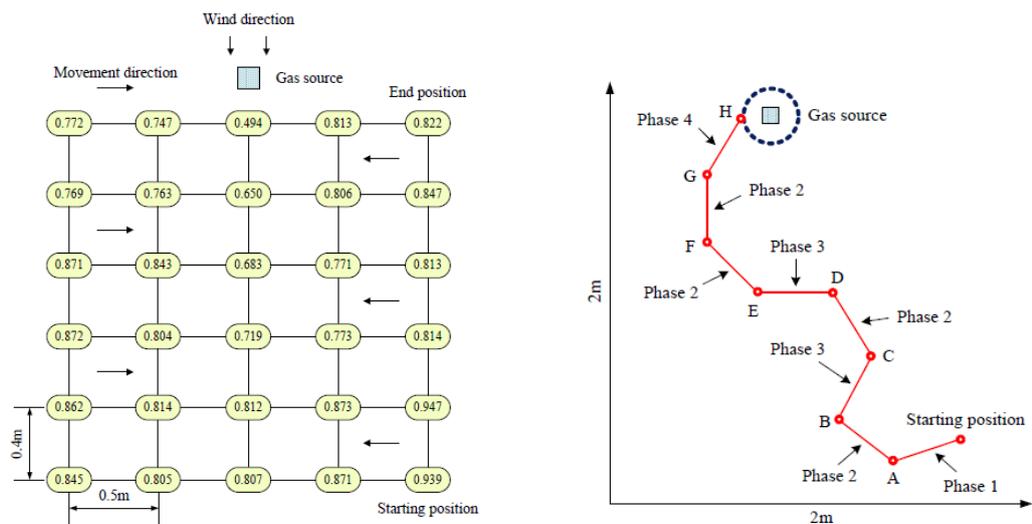


Figura 20. Prueba de seguimiento de fuentes de olor: a) distribución de la concentración de olor en un área experimental, b) seguimiento de la pluma de olor con un robot

Fuente: (Song et al., 2011)

CAPITULO III

OBTENCIÓN DE PATRONES DE DISPERSIÓN EN AMBIENTES CONTROLADOS

En el desarrollo de este capítulo se presenta los procedimientos experimentales para la caracterización de los sensores químicos MQ-3 y la posterior obtención de mapas de dispersión en ambientes controlados. La caracterización de los sensores permitió obtener datos referentes a tiempos de respuesta, curva característica y distancias de detección frente a la presencia de las plumas de olor de alcohol y colonia en los diferentes escenarios.

Con los datos obtenidos en la caracterización, se implementó un robot móvil equipado con 3 sensores MQ-3. El robot realizó el levantamiento de mapas de dispersión en diferentes entornos controlados con y sin presencia de obstáculos. Para esto se definió un espacio de trabajo que fue dividido en 81 cuadrículas, de cada una se obtuvo 10 datos por cada sensor. La adquisición de datos fue realizada por un robot móvil, las muestras obtenidas se almacenaron en memoria como matrices para ser empleados en la reconstrucción de los patrones de dispersión.

Los mapas de dispersión representan los niveles de concentración de alcohol y colonia obtenidos para cada una de las cuadrículas, cada uno de estos niveles fue representado por una escala de colores mediante una matriz de colores que permite visualizar el patrón de dispersión de las sustancias. Se consiguió un total de 13 mapas que fueron obtenidos bajo diferentes configuraciones de ambientes controlados.

Previo a la obtención de los mapas de dispersión se definieron las condiciones de trabajo para el ambiente controlado, entre estas: temperatura, humedad, concentración de sustancia y flujo de aire. Bajo estas variables se realizaron las experimentaciones que permitieron la caracterización de los sensores químicos MQ-3 para la adquisición de señales de las plumas de las sustancias de prueba mencionadas anteriormente. Las condiciones definidas se presentan a continuación.

3.1 Condiciones establecidas para el ambiente controlado

Las experimentaciones se realizaron en los laboratorios del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE localizada en Sangolquí-Ecuador, en donde se dispuso las condiciones necesarias para mantener un ambiente controlado que permita obtener los modelos de dispersión para diferentes escenarios. Las condiciones consideradas se describen a continuación.

3.1.1 Concentración de sustancia

La sensibilidad de los sensores químicos MQ-3 varía en función del grado de concentración de una sustancia. Para la obtención de los mapas de dispersión se empleó alcohol antiséptico de 72 °GL y agua de colonia de 60 °GL. De esta forma se dispone de dos sustancias con concentraciones diferentes, de las cuales se obtendrá su patrón de dispersión de forma experimental.

3.1.2 Temperatura

Para las experimentaciones realizadas para la obtención de patrones de dispersión y la caracterización de los sensores químicos MQ-3 se trabajó en un rango de temperatura de 20 °C a 23 °C. Bajo este rango los sensores químicos presentan una respuesta adecuada frente a la detección de sustancias químicas como etanol o alcohol. Por tal motivo se definió una franja horaria de trabajo de 09h00 a 16h00, tiempo en el que el rango de temperatura no varía considerablemente.

3.1.3 Humedad

La sensibilidad de los sensores MQ-3 varía frente a cambios de humedad en el lugar, lo que puede provocar variaciones en las experimentaciones para la obtención de plumas de olor. La humedad relativa en Sangolquí se especifica en 60 a 78% para los meses de junio a julio. Por tal razón, los experimentos se realizaron en días en los cuales no existían precipitaciones y se mantenía este porcentaje de humedad de acuerdo a registros de la página web del Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología de Ecuador (INAMHI, 2017).

3.1.4 Flujo de aire en el medio

El flujo de aire presente en un entorno controlado provoca que los sensores químicos MQ-3 no realicen una adecuada detección. El laboratorio dispone de una infraestructura cerrada, y no permite el ingreso de aire que puede provocar la presencia de turbulencias y cambios de dirección en la dispersión de las sustancias químicas. Por tal razón, en las experimentaciones no se considera la presencia de flujos de aire. Una vez definidas las condiciones del ambiente controlado se presenta la adquisición de señales de las plumas de olor.

3.2 Adquisición de señales para la obtención de patrones de dispersión

Los sensores químicos MQ-3 entregan una señal analógica en voltaje, que representa el nivel de concentración de una sustancia, por tal razón para la adquisición de esta señal se empleó la shield Arduino Mega ADK 2560, que dispone de un conversor Análogo-Digital (ADC) que permite obtener una señal digital. Para la adquisición de las señales se consideraron características como: resolución de bits, tiempo de conversión, rango de trabajo, voltaje de referencia y disponibilidad de puertos analógicos y digitales.

3.2.1 Resolución de bits

La conversión de una señal analógica a una señal digital requiere de la cuantificación, es decir, la cantidad de valores discretos con los que será representada la señal analógica, y que dependerá de la resolución en bits del conversor ADC. La tarjeta Arduino MEGA 2560 tiene una resolución de 10 bits para cada uno de los 10 ADC de los que dispone, por tal motivo para realizar la adquisición de las señales de olor se tienen 1024 valores discretos, rango que se obtiene a partir de la Ecuación 1.

$$\text{Valores Discretos} = 2^{\text{resolución de bits}} \quad (1)$$

Al remplazar la resolución de bits de la tarjeta de adquisición se tiene la siguiente resolución:

$$\text{Valores Discretos} = 2^{10} = 1024$$

3.2.2 Tiempo de conversión y frecuencia de muestreo

Los procesos de conversión análogo-digital están limitados por el tiempo de conversión de la señal, el microcontrolador Atmega2560 de la tarjeta Arduino MEGA presenta un tiempo de conversión que se encuentra en el rango de $13 \mu s$ y $260 \mu s$ (Arduino, 2017), rango adecuado para la realización de las distintas pruebas con sensores químicos MQ-3, debido a que estos presentan un tiempo de respuesta que varía de 1 a 3 segundos frente a la detección de sustancias químicas.

Se definieron dos frecuencias de muestreo: la primera de 1 Hz se empleó para las primeras pruebas experimentales de los sensores químicos, con la finalidad de determinar su comportamiento frente a cambios de concentración y distancias con la fuente de olor. La segunda frecuencia de muestreo de 2 Hz se empleó para realizar el muestreo y adquisición de datos para la obtención de los mapas de dispersión.

3.2.3 Rango de trabajo

Los sensores MQ-3 operan en condiciones normales con un voltaje de alimentación de $5 V \pm 0.1$ en corriente continua. La señal entregada por el sensor varía en un rango de 0 a 5 V, dependiendo de las condiciones del ambiente y de los niveles de concentración de la sustancia. Dicha señal puede ser tratada por el conversor ADC de la tarjeta Arduino MEGA que presenta el mismo rango de operación en voltaje.

3.2.4 Voltaje de referencia

La tarjeta Arduino MEGA presenta dos valores de referencia para el conversor ADC, el primero hace referencia al voltaje de alimentación que es de 5 V y el segundo a una fuente externa que no supere dicho voltaje de alimentación. Para la adquisición de datos se empleó el voltaje de alimentación como referencia por lo que se puede obtener la siguiente resolución:

$$\frac{5 \text{ voltios}}{1024} \approx 0.005 \approx 5 \text{ mV} \quad (2)$$

3.3 Sensores químicos para la detección de alcohol

Para la detección de alcohol y colonia se revisó las hojas técnicas de los sensores de la familia MQ Gas Sensor, que se especializan en la detección de gases explosivos y alcohol. Al analizar las especificaciones técnicas de los sensores se determinó que los modelos idóneos para la realización de las experimentaciones son los modelos MQ-3 y MQ-135.

3.3.1 Detección de alcohol empleando sensores MQ-3 y MQ-135

Para la adquisición de señales de las plumas de olor de alcohol se consideraron dos sensores químicos: MQ-3 y MQ-135, los cuales son específicos en la detección de benceno y alcohol. Al analizar las curvas de sensibilidad de estos sensores se conoce el comportamiento de los mismos y definir los procedimientos para realizar las experimentaciones que permitan obtener los patrones de dispersión.

En la Figura 21 se visualizan diferentes respuestas del sensor MQ-3 dadas por el fabricante, frente a la detección de sustancias químicas tales como: alcohol, benceno, metano (CH_4), petróleo, monóxido de carbono (CO), gas licuado de petróleo (GLP) y aire. Estas respuestas son representadas por curvas que fueron obtenidas bajo condiciones de temperatura de $20\text{ }^\circ\text{C}$ y humedad de 65%, en donde la mejor respuesta del sensor se da para sustancias como CH_4 , GLP y CO . Estas curvas muestran la relación Resistencia relativa – Concentración [ppm], y se muestran a continuación.

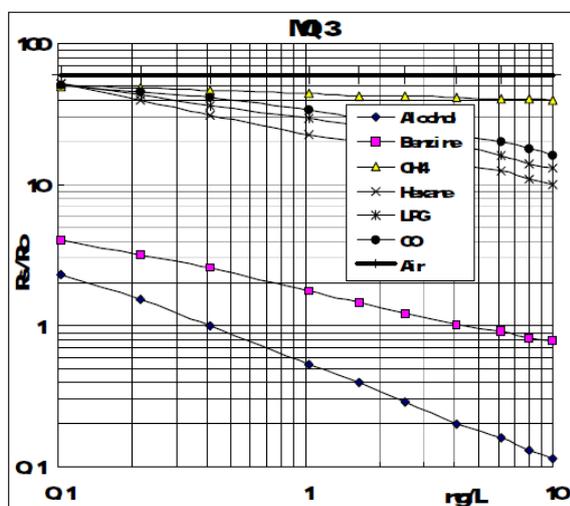


Figura 21. Curva de sensibilidad sensor MQ-3 para diferentes sustancias y gases

Fuente: (Hanwei Electronics, 2002)

Debido a la temperatura, humedad, concentración de sustancia los sensores presentan una línea base en su señal de voltaje, En la Figura 22 se presenta la respuesta del sensor MQ-3 frente a la detección de C_2H_5OH (etanol y se puede apreciar que para el intervalo de tiempo de 0 a 10 segundos(s) existe presencia de línea base. Una vez estimulado el sensor con etanol se presenta una variación de la señal de voltaje de sensor que va desde el valor de línea base hasta el valor pico en el intervalo de tiempo [10-20](s), para el intervalo de tiempo de [20-40](s) la señal del sensor se estabiliza en el valor pico. Al retirar el estímulo al sensor MQ-3, su señal de voltaje disminuye hasta alcanzar la línea base en el intervalo de [40-70] (s).

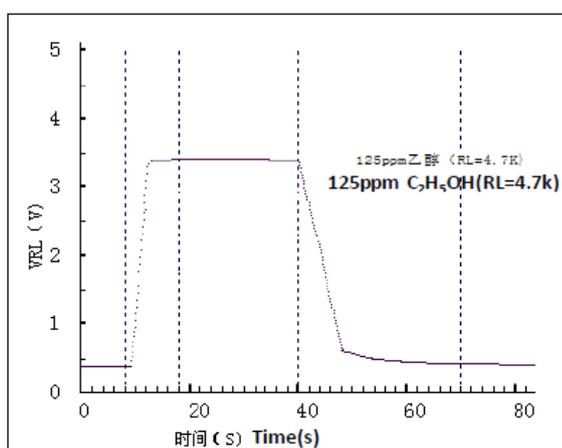


Figura 22. Curva característica del sensor MQ-3 para C_2H_5OH

Fuente:(sparkfun, 2015)

Otro sensor específico en la detección de alcohol es el sensor MQ-135, el cual presenta un comportamiento similar frente a la detección de alcohol o monóxido de carbono. En la Figura 23 se presentan las curvas de sensibilidad del sensor MQ-135 frente a la detección de: dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y Amoníaco (NH_4). Para esto las curvas fueron obtenidas bajo condiciones de temperatura de $20\text{ }^\circ\text{C}$, humedad de 65% y una concentración de oxígeno del 21%. Se visualiza que la mejor respuesta del sensor se da para sustancias como aire y CO, debido a que la característica principal del sensor es la medición de la calidad de aire en ambientes sin embargo puede ser empleado para la utilización de detección de distancias químicas como benceno, etanol y alcohol.

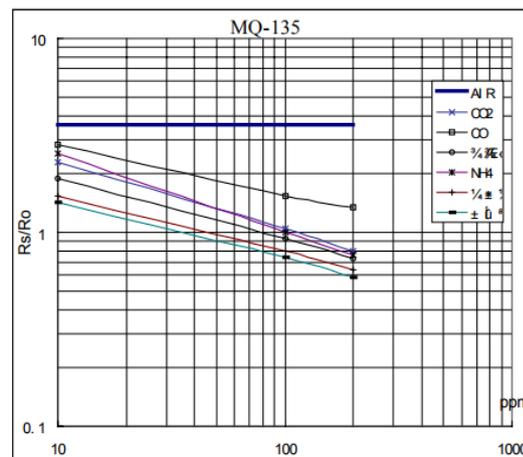


Figura 23. Curva de sensibilidad sensor MQ-135 para diferentes sustancias

Fuente:(Winseng, 2015)

Al definir las características del ambiente controlado, los parámetros que definen la tarjeta de adquisición Arduino MEGA y el comportamiento y tiempos de respuesta de los sensores MQ-3 y MQ-135 obtenidos de las hojas técnicas y de las curvas de sensibilidad, se realizó una comparativa de los dos sensores para determinar el que mejor se ajuste a la detección de alcohol. Para esto se realizó una serie de experimentaciones, en las que se colocó diferentes muestras de alcohol y se propusieron distancias de detección con la finalidad de definir el alcance de los sensores para detectar la dispersión de dicha sustancia.

3.3.2 Pruebas experimentales empleando sensores MQ-3 Y MQ-135

Las pruebas experimentales realizadas para comparar los sensores MQ-3 y MQ-135 se realizaron bajo condiciones de temperatura y humedad similares. En la comparación se consideraron los siguientes aspectos: capacidad de detección de alcohol a distancias, línea base característica, tiempos de respuesta, voltaje umbral y tiempo de retorno a línea base.

En las primeras experimentaciones se colocó los sensores MQ-3 y MQ-135 a una distancia de 2,5 cm de la fuente de olor, tal como se muestra en la Figura 24, con la finalidad de conocer la capacidad del sensor para detectar bajas concentraciones de alcohol ligeramente distanciadas. Las mediciones se realizaron bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura: 20 °C
- Humedad: 69%
- Concentración alcohol: 72 °GL
- Localización del sensor: 3 cm de altura desde el piso
- Periodo de muestreo: 1 (s)

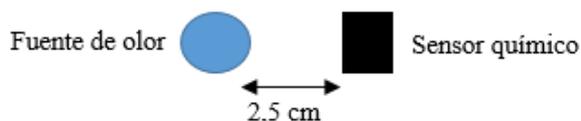


Figura 24. Medición de fuente de olor a 2,5 cm

Se realizaron mediciones para muestras de alcohol de 1 ml, 2 ml y 3 ml con los dos sensores, encontrándose una mayor efectividad en la detección para el sensor químico MQ-3, debido a que el sensor MQ-135 presentó una respuesta lenta y poca fiabilidad en la detección de concentraciones mínimas de alcohol. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1, en donde se aprecian los tiempos determinados para cada experimento para que los sensores se estabilicen su señal en su respectivo valor de voltaje pico, mostrándose que el sensor MQ-3 tenía un valor pico de voltaje mayor que el sensor MQ-135.

Tabla 1

Comparación de sensores químicos a distancia de 2.5cm

Volumen alcohol	Voltaje pico sensor MQ-3	Voltaje sensor MQ-135	Tiempo experimentación
1 ml	mayor	menor	90 s
2 ml	igual	igual	80 s
3 ml	mayor	menor	100 s

Las curvas obtenidas para cada una de las mediciones de la Tabla 1 se muestran en la Figura 25, en la cual se observan las curvas Voltaje (V) en función del Tiempo (s) obtenidas para los sensores: MQ-3 y MQ-135, en donde se puede observar que el sensor MQ-3 presentó una mejor respuesta y una señal de voltaje pico mayor para las muestras de alcohol de 1 ml y 3 ml que el sensor MQ-135, mientras que para 2 ml de alcohol la respuesta de los sensores fue similar, todas estas mediciones se realizaron colocando la fuente de olor distancia de 2.5 cm de los sensores.

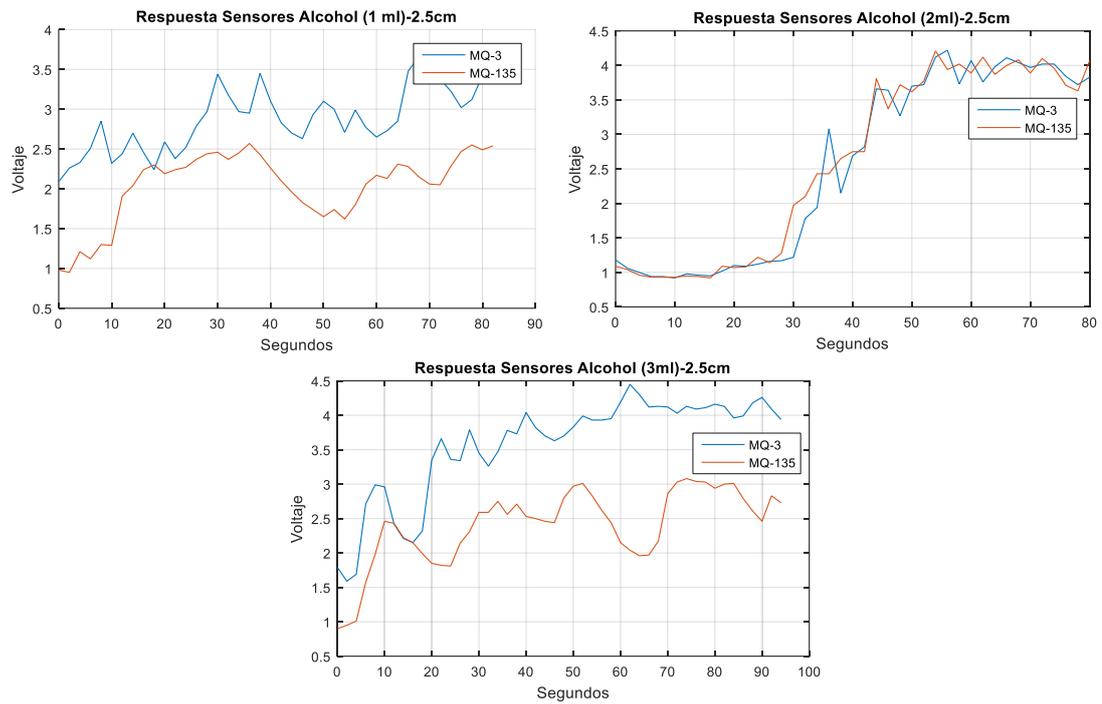


Figura 25. Medición de alcohol a una distancia de 2.5 cm

Adicional, en la Figura 26, se presenta una comparación de las curvas obtenidas para 1 ml, 2 ml y 3 ml para el sensor MQ-3, observándose el comportamiento del mismo frente a la detección de varios volúmenes de alcohol. Para los experimentos realizados para los 3 casos existió una detección de alcohol ya que los sensores variaron su señal de voltaje desde la línea base hasta el valor pico de voltaje.

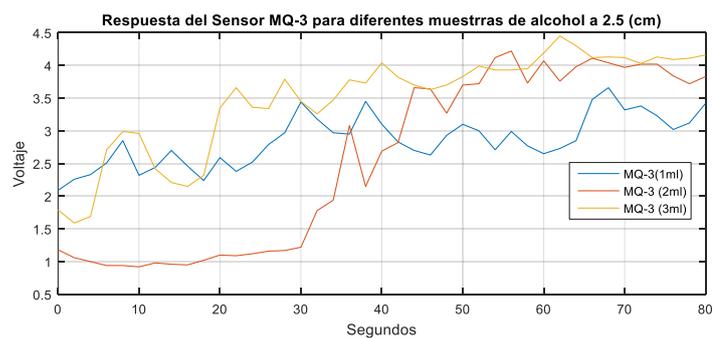


Figura 26 Mediciones con sensores MQ-3 para varios volúmenes de alcohol

Posteriormente, se realizaron experimentaciones en las que se definió una distancia de 16,5 cm entre la fuente de olor y los sensores químicos MQ-3 y MQ-135 tal como se muestra en la Figura 27. Los experimentos permitieron determinar la capacidad de

detección de los sensores a distancias alejadas de la fuente de olor, la adquisición de datos se realizó bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura: 20 °C y humedad: 69%
- Concentración alcohol: 72 °GL
- Localización del sensor: 3 cm de altura desde el piso
- Periodo de muestreo: 1 (s)



Figura 27. Medición de fuente de olor a 16,5 cm

Se realizaron mediciones para muestras de alcohol desde 1 ml hasta 5 ml con los dos sensores químicos. El sensor MQ-3 presentó una mayor detección para las muestras de la sustancia que el sensor MQ-135. Para la mayoría de experimentaciones el sensor MQ-135 mantuvo su señal de voltaje en la línea base, mientras que el sensor MQ-3 al recibir el estímulo varió sus valores hasta alcanzar el voltaje pico. Los resultados de las mediciones se muestran en la Tabla 2, en la cual se aprecia los tiempos de experimentación para la detección de las diferentes muestras de alcohol y una ponderación cualitativa de las señales de voltaje pico obtenidas para las mediciones realizadas de los dos sensores.

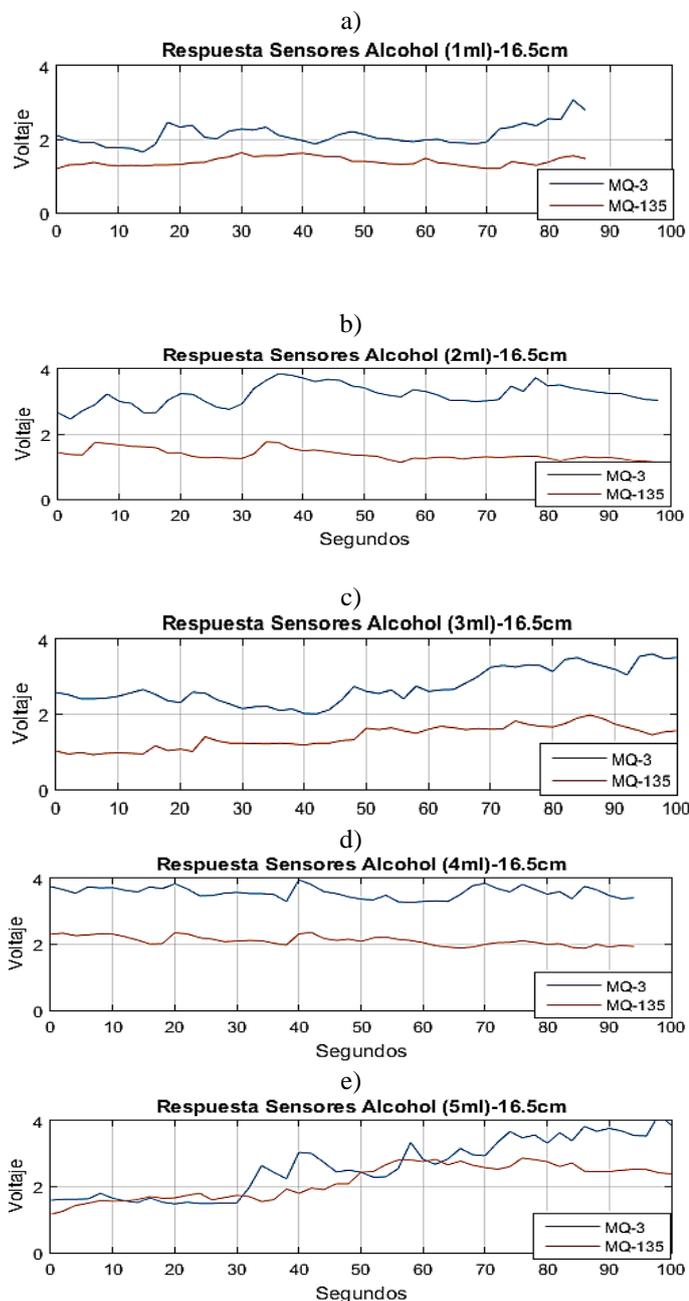
Tabla 2

Comparación de sensores químicos a distancia de 16.5 cm

Volumen alcohol	Voltaje pico sensor MQ-3	Voltaje pico sensor MQ-135	Tiempo experimentación
1 ml	mayor	menor	100 s
2 ml	mayor	menor	100 s
3 ml	mayor	menor	100 s
4 ml	mayor	menor	100 s
5 ml	mayor	menor	100 s

Las curvas obtenidas para cada una de las mediciones de la Tabla 2 se muestran en la Figura 28, y se aprecia el comportamiento de los sensores a lo largo del tiempo en las cuales la curva del sensor MQ-3 para cada caso presenta una mayor detección de

la fuente de olor que el sensor MQ-135, y esto se evidencia en el voltaje pico de detección que se presenta para cada caso.



**Figura 28. Medición de alcohol a una distancia de 16.5 cm:
a) 1 ml, b) 2 ml, c) 3 ml, d) 4 ml y e) 5 ml**

Para las experimentaciones finales se colocó los sensores MQ-3 Y MQ-135 a una distancia de 2,5 cm de la fuente de olor y se varió el volumen de alcohol progresivamente desde 0 ml hasta 10 ml. Este experimento permitió determinar el comportamiento de los sensores frente a la variación continua del volumen de la

muestra de alcohol. A manera de ejemplo, una de las curvas obtenidas en los experimentos se presentan en la Figura 29, en la que se aprecia que para los primeros 30 (s) existe presencia de línea base, en el intervalo de tiempo de [30-600] (s) los sensores son estimulados y varían su señal de voltaje hasta un valor pico, siendo mayor la señal del sensor MQ-3, en el intervalo entre [600-1000] (s) el estímulo es retirado y los sensores varían su señal de voltaje hasta alcanzar la línea base.

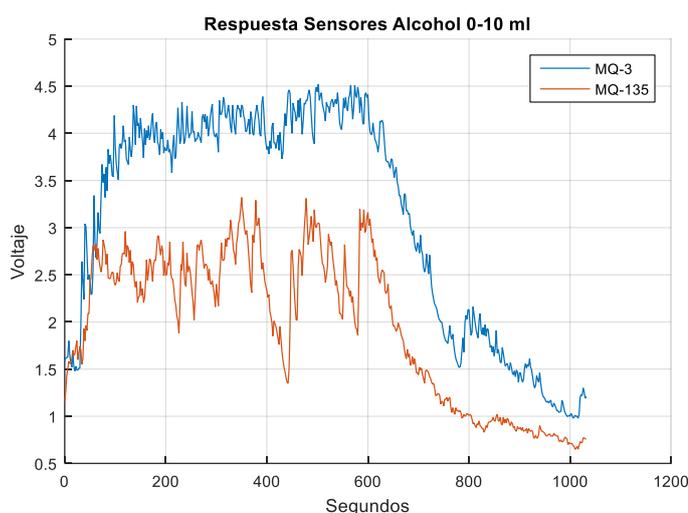


Figura 29. Curva característica obtenida para los sensores MQ-3 y MQ-135 a una distancia de 2.5 cm

Las mediciones realizadas con los sensores MQ-3 y MQ-135 para la detección de alcohol a distancias cortas y largas permitieron determinar que el sensor MQ-3 se ajusta a las necesidades de detección de alcohol, debido a que presenta mejores tiempos de respuesta, mayor detección a distancia de la sustancia, mayor valor de voltaje pico y una mejor estabilización de la línea base. Por tanto, se decidió trabajar con el sensor MQ-3.

3.4 Caracterización de sensores químicos MQ-3

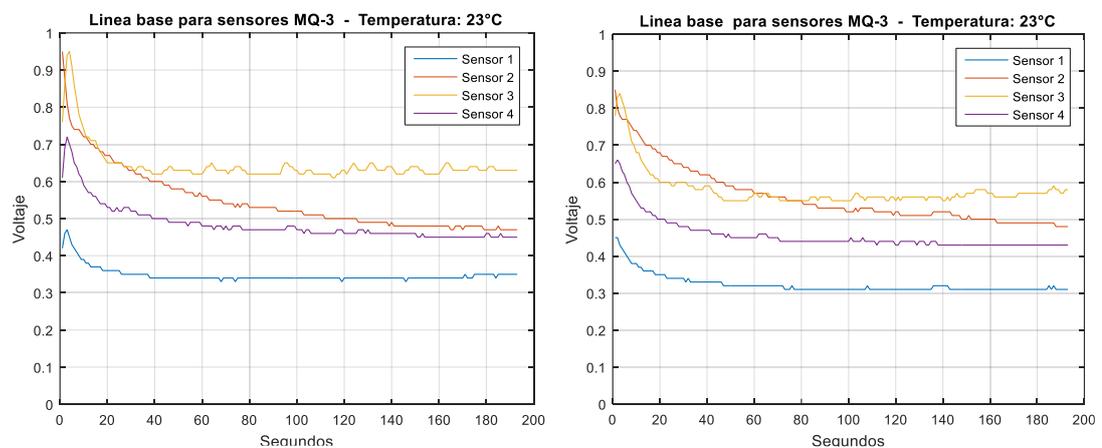
La caracterización de los sensores químicos MQ-3 se realizó mediante experimentaciones bajo condiciones de temperatura y humedad similares. Para cada una de las mediciones realizadas se determinaron los siguientes parámetros: línea base, tiempos de respuesta, distancia máxima y mínima de detección. A continuación, se presentan los parámetros obtenidos.

3.4.1 Determinación de línea base de sensores químicos MQ-3

Los sensores químicos MQ-3 presentan un offset en su señal de voltaje al ser energizados, conocido también como línea base, esto sin mantener contacto con sustancias químicas. El valor del offset dependerá de las características del medio, principalmente debido a la temperatura y humedad. Para la obtención de la línea base se emplearon 4 sensores MQ-3, los cuales fueron energizados en el mismo instante de tiempo sin presencia de ningún químico. Se realizaron 10 experimentaciones con la finalidad de determinar una respetabilidad en los valores offset. Para la adquisición se empleó la tarjeta Arduino MEGA y se trabajó con las siguientes condiciones:

- Temperatura: 23 °C y humedad: 70%
- Tiempo de muestro: 200 (s) y periodo de muestreo: 1 (s)

Las líneas base obtenidas para el primer y quinto experimento se aprecian en las Figura 30 a) y Figura 30 b) respectivamente, y se puede observar que existe la presencia de un pico en las señales de los sensores en el instante en el que son energizados, esto se debe a que inicialmente necesitan calentarse para trabajar en sus condiciones normales de funcionamiento y requieren de mayor consumo de corriente, posteriormente después de 120 (s) la señal de cada sensor se estabiliza en su respectiva línea base. La línea base se mantiene constante durante un tiempo, pasado periodos largos de tiempo o por variación en las condiciones ambientales puede existir una variación en la misma.



**Figura 30. Línea base para sensores MQ-3 a T=23 °C:
a) primera experimentación, b) quinta experimentación**

3.4.2 Determinación de rango de distancias de detección

Las distancias de detección: máxima y mínima, permitieron determinar el rango de detección de los sensores químicos MQ-3. Para esto se realizaron varias experimentaciones en las que se colocaron los sensores a distancias cercanas y alejadas de la fuente de olor, y de esta manera conocer su comportamiento frente a la detección de alcohol y colonia.

Además, los experimentos permitieron determinar las distancias: mínima y máxima, en las que los sensores pueden detectar una dispersión de alcohol. Se definió la distancia máxima de detección en 10 cm y la distancia mínima en 0 cm; estas distancias fueron empleadas posteriormente en los algoritmos de mapeo y búsqueda de fuentes de olores implementados en los robots móviles, las experimentaciones realizadas se presentan a continuación.

3.4.2.1 Distancia mínima

La mínima distancia considerada para la detección de alcohol y colonia es 0 cm, y es a esta distancia donde los sensores presentan una mayor detección. En la Figura 31 se muestra la disposición del sensor con la muestra de olor, se especifica una altura de 1 cm con respecto al plano para evitar que el sensor tenga contacto directo con la sustancia.

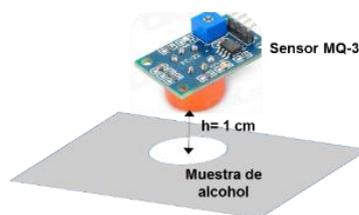


Figura 31. Altura y posición del sensor para detección de alcohol a 0 cm

Con base a la disposición de la Figura 31, se realizaron varios experimentos para conocer el comportamiento del sensor, para esto se trabajó bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura: 20 °C y humedad 69%

- Concentración alcohol: 72 °GL
- Localización del sensor: 1 cm de altura desde el piso
- Tiempo de muestro: 600 (s)
- Periodo de muestreo: 1 (s)

En las experimentaciones se colocó muestras de 0.2 ml, 1 ml, 5 ml y 10 ml y se realizó la adquisición de datos del sensor MQ-3 para obtener las curvas características correspondientes del sensor y conocer el comportamiento del mismo frente a la detección de volúmenes mínimos de alcohol. Los resultados obtenidos de las mediciones se muestran en la Figura 32, donde se aprecia que la detección para diferentes volúmenes de una sustancia es similar a pesar de que se colocó una muestra de 0,2 ml y una muestra 50 veces mayor de 10 ml.

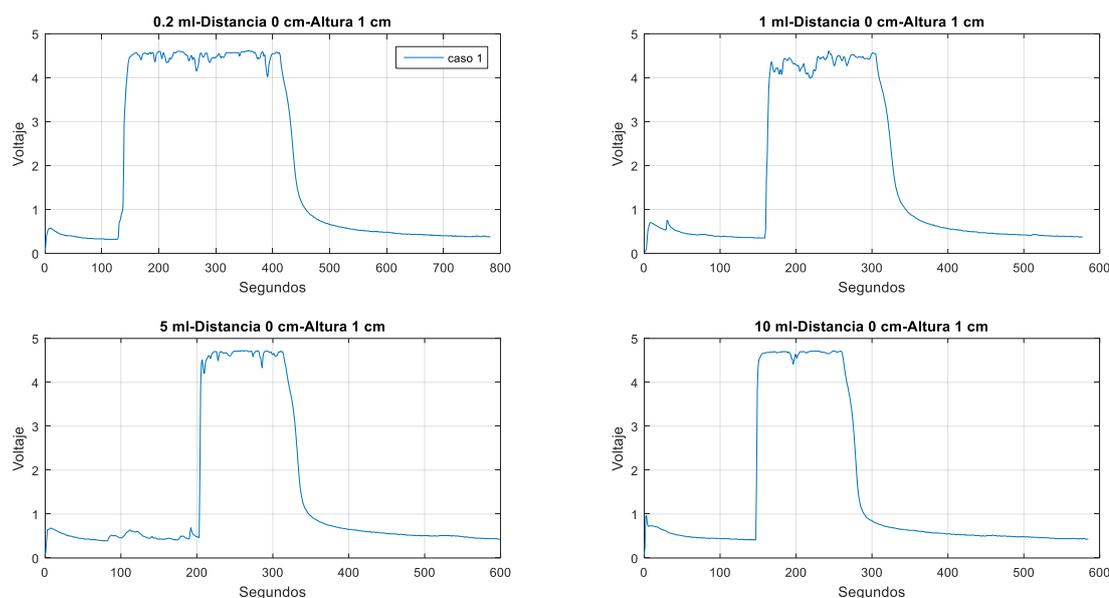


Figura 32. Detección de muestras de alcohol de 0.2 ml, 1 ml, 5 ml y 10 ml a una distancia de 0 cm entre el sensor y la fuente de olor

3.4.2.2 Distancia máxima

La determinación de la distancia máxima de detección en la que los sensores presentan una respuesta adecuada requirió de la realización de varios experimentos, debido a que los sensores MQ-3 no presentan cambios en la señal de voltaje y los tiempos de respuesta son grandes. Se dispuso diferentes distancias y volúmenes de alcohol con la finalidad de conocer la respuesta de los sensores MQ-3. Se hizo pruebas

de detección para diferentes sustancias empleando un sensor MQ-3 y empleando un array de 4 sensores MQ-3. Los experimentos realizados para cada caso se muestran a continuación.

Experimento #1 – Distancias de: 10, 15, 20 y 25 cm - 5 ml de alcohol

Para el experimento 1 se realizaron mediciones empleando un sensor MQ-3. Para esto se obtuvo los datos de la señal de voltaje del sensor para cada una de las distancias de 10 cm, 15 cm, 20 cm y 25 cm utilizando un volumen de 5 ml de alcohol. Se trabajó con las siguientes condiciones:

- Temperatura: 21 °C y humedad: 69%
- Localización del sensor: 3 cm de altura desde el piso
- Tiempo de muestro: 600 (s)
- Periodo de muestreo: 1 (s)

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 33 en la que se aprecian las curvas de Voltaje (V)-Tiempo (s) obtenidas para cada distancia. Se observa que existe una mejor detección de los 5 ml a una distancia de 10 cm, debido a que la señal de voltaje del sensor intenta estabilizarse en el valor umbral, sin embargo, se presentan picos de detección. Para distancias de 15, 20 y 25 cm existe menor detección de alcohol, debido a que las señales del sensor MQ-3 son bajas con respecto al umbral de detección.

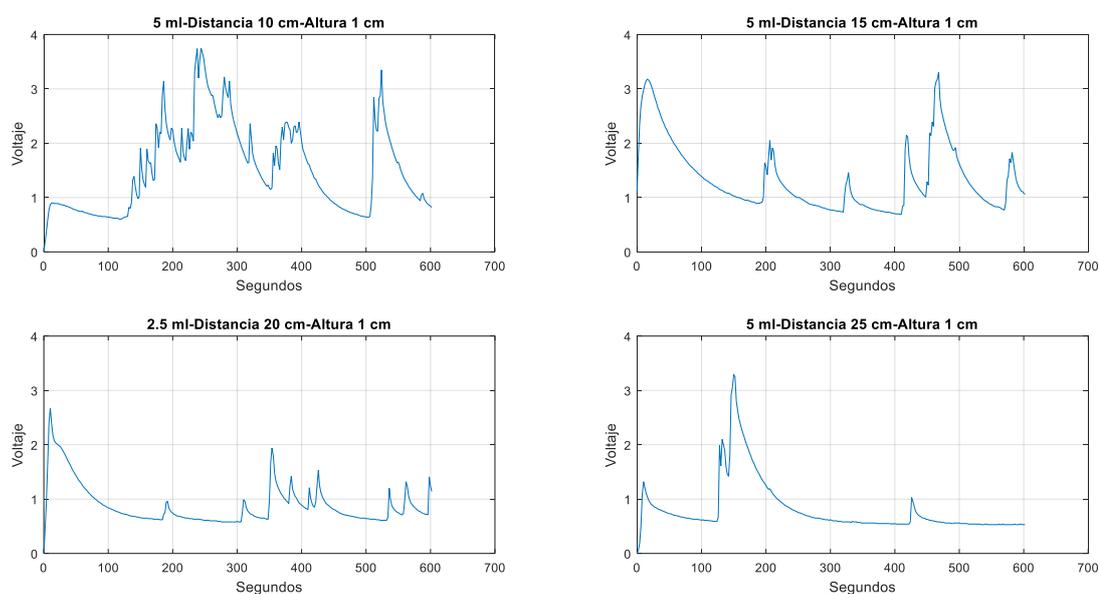


Figura 33. Detección de 5 ml de alcohol a distancias de 10, 15, 20 y 25 cm

Posteriormente, se realizaron mediciones empleando 4 sensores MQ-3 diferentes, los cuales se colocaron a una altura de 1 cm desde el piso hacia un soporte y se localizaron los mismos a distancias de 10 cm, 20 cm, 30 cm y 40 cm de la fuente de olor. En la Figura 34 se presenta la disposición de los sensores y de la fuente de olor, sobre esta disposición se realizaron mediciones para 5 ml y 10 ml de alcohol.

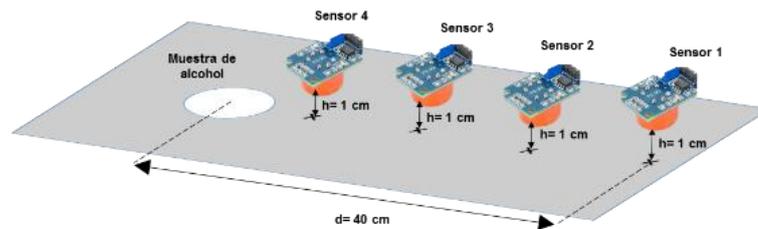


Figura 34. Definición de distancias máximas para detección de olor

Experimentación #2 – Distancias de 10, 20, 30 y 40 cm - 5 ml de alcohol

En base a la distribución de la Figura 34, se realizaron varios experimentos para conocer la capacidad de detección de los sensores MQ-3. Se colocó una muestra de alcohol de 5 ml y se realizó la adquisición de datos en el tiempo. Para las mediciones se establecieron las siguientes condiciones:

- Temperatura: 21 °C
- Humedad: 69%
- Concentración alcohol: 72 °GL
- Localización del sensor: 1 cm de altura desde el piso
- Tiempo de muestro: 1600 (s)
- Periodo de muestreo: 1 (s)

Los resultados obtenidos en las experimentaciones de detección de 5 ml de alcohol se presentan en la Figura 35, en la que se aprecia que la señal obtenida por el sensor 4 situado a 10 cm de la fuente de olor presenta mayor detección que los demás sensores, mientras que para los sensores situados en el rango de distancia de 20 cm a 40 cm presentan pequeñas variaciones en su señal que se mantiene en el orden de la línea base de cada uno.

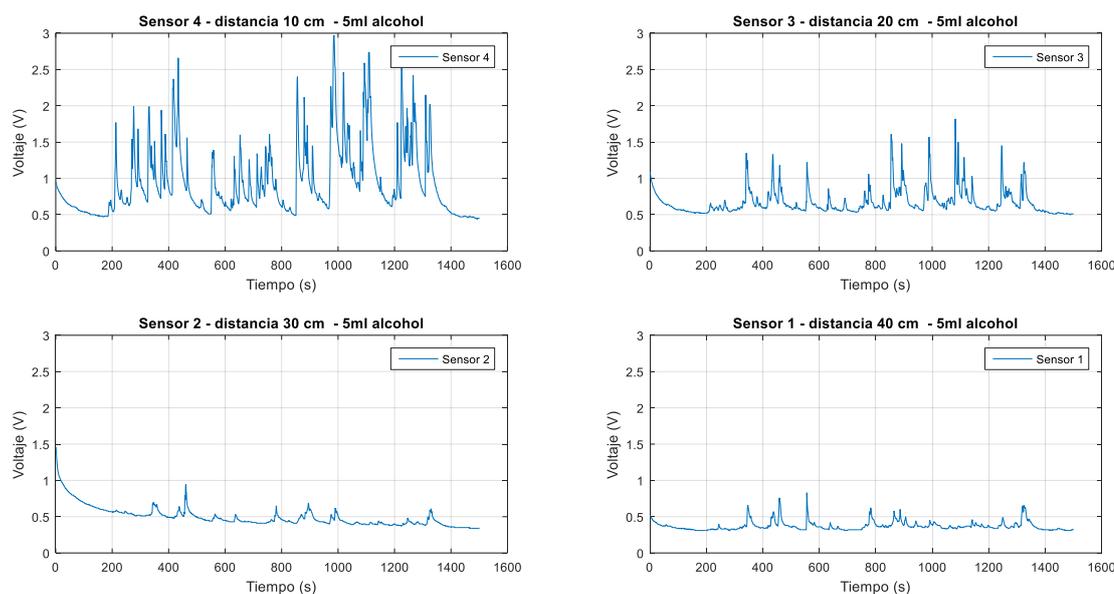


Figura 35. Detección de muestra de alcohol de 5 ml a distancias de: 10 cm, 20 cm, 30 cm y 40 cm entre la fuente de olor y el sensor

Experimentación #3 – Distancias de 10, 20, 30 y 40 cm - 10 ml de alcohol

En base a la distribución de la Figura 34, se utilizó un array de 4 sensores MQ-3 y se realizaron varios experimentos que permitan conocer la capacidad de detección de los sensores MQ-3 a grandes distancias. Se colocó una muestra de alcohol de 10 ml y se realizó la adquisición de datos en el tiempo. Para estos experimentos se establecieron las siguientes condiciones de trabajo:

- Temperatura: 21 °C y humedad: 69%
- Concentración alcohol: 72 °GL
- Localización del sensor: 1 cm de altura desde el piso
- Tiempo de muestreo: 1600 (s)
- Periodo de muestreo: 1 (s)

Los resultados obtenidos de las mediciones para la muestra de alcohol de 10 ml se muestran en la Figura 36, y se aprecia que la señal obtenida por el sensor 4 situado a 10 cm y la señal del sensor 3 situado a 20 cm de la fuente de olor presentan mayor detección que los sensores situados a distancias de 30 cm y 40 cm, sin embargo, la mejor detección de la sustancia se realizó a 10 cm.

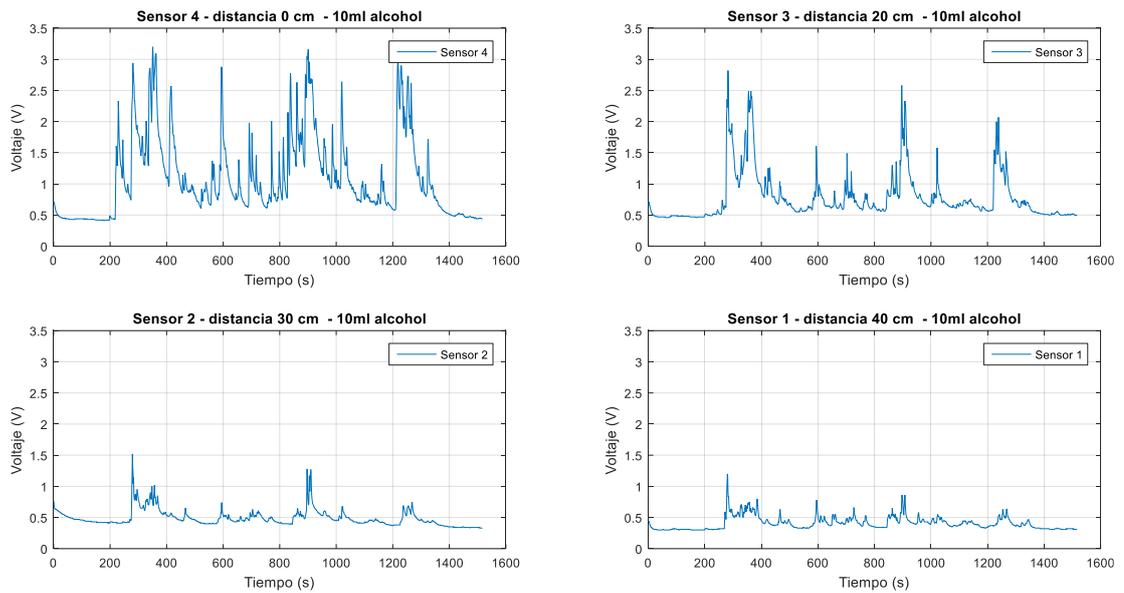


Figura 36. Detección de muestra de alcohol de 10 ml a distancias de 10 cm, 20 cm, 30 cm y 40 cm entre la fuente de olor y el sensor

En la Figura 37 se muestra un contraste de las curvas obtenidas en las experimentaciones de detección de 5 ml y 10 ml de alcohol a distancias de 10, 20, 30 y 40 cm, y se aprecia que la respuesta de los sensores es similar para diferentes volúmenes de la sustancia y que a una distancia de 10 cm el sensor realiza una mejor detección de la fuente de olor.

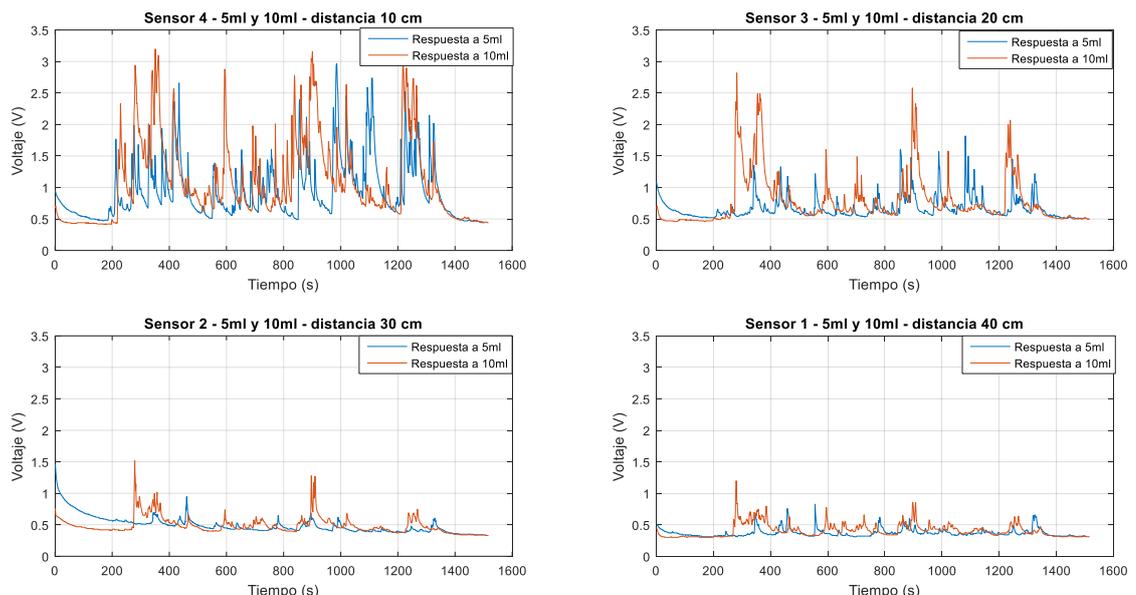


Figura 37. Comparación entre los resultados obtenidos en la detección de 5 ml y 10 ml de alcohol a distancias de 10, 20, 30 y 40 cm

Experimentación #4 – Distancias de 10cm - 1 ml de alcohol

Finalmente se obtuvo la caracterización de los 4 sensores MQ-3 mediante experimentaciones repetitivas para conocer el comportamiento de los mismos frente a la detección de 1 ml alcohol a una distancia de 10 cm. Para estas mediciones se consideraron las siguientes condiciones.

- Temperatura: 21°C y humedad: 69%
- Volumen sustancia: 1 ml de alcohol
- Tiempo de muestro: 600 (s) y periodo de muestreo: 1 (s)

Los resultados obtenidos de las mediciones se muestran en la Figura 38, y se puede observar la presencia de línea base en el intervalo de tiempo de [0-200] (s), para el intervalo de tiempo de [200-500] (s) el sensor alcanza su valor pico de voltaje hasta lograr estabilizarse frente a la presencia de un estímulo, finalmente en el intervalo de [500-600] (s) la señal de los sensores retorna a la línea base debido a que se retiró el estímulo químico a los 4 sensores MQ-3.

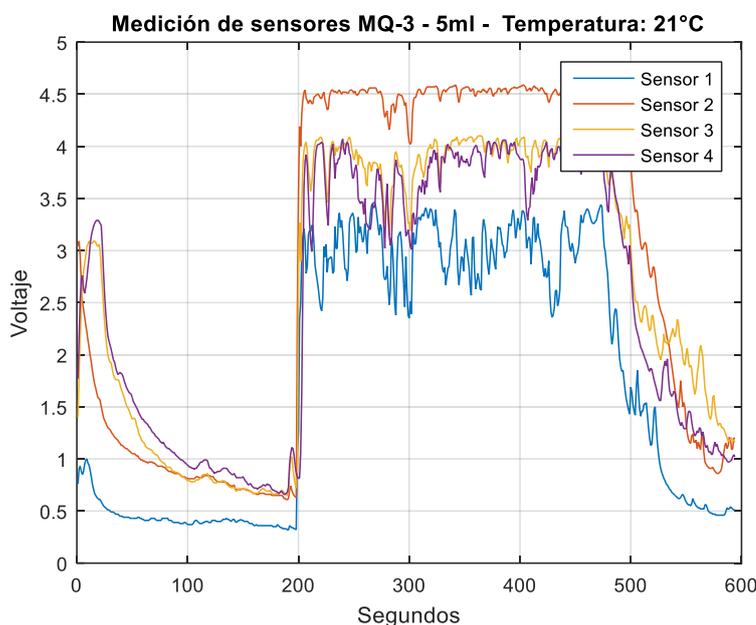


Figura 38. Curva característica sensores MQ-3 para 1 ml de alcohol

La realización de las anteriores experimentaciones permitió establecer una distancia máxima de detección de 10 cm, y así poder definir la capacidad de detección de los robots dentro del entorno en un rango de 0 cm hasta 10 cm, ya que a estas distancias los sensores detectaron muestras de alcohol desde 0.2 ml hasta 10 ml.

3.5 Diseño de la plataforma robótica móvil para levantamiento de mapas

La utilización de una plataforma robótica permitió realizar un escaneo del espacio de trabajo sobre el cual se desea efectuar la adquisición de datos y posterior levantamiento de los mapas de dispersión. Para esto se montaron 3 sensores MQ-3 en el robot móvil operado de forma semiautomática y se obtuvo diversos mapas de dispersión. Por tal razón, es necesario establecer las características de la plataforma y el diseño del robot móvil de mapeo.

El diseño de la plataforma robótica para la adquisición de información del ambiente controlado se realizó tomando consideraciones como: dimensión, estabilidad, maniobrabilidad y configuración mecánica, con la finalidad de disponer de un robot móvil capaz de navegar por el entorno y levantar los mapas de dispersión de las muestras de alcohol y colonia que se encuentran en el ambiente.

3.5.1 Características de la plataforma robótica

Es importante definir las principales características de la plataforma robótica para disponer de un modelo base del robot móvil que será empleada para transportar los sensores por el entorno controlado y adquirir datos de la dispersión de la pluma de olor de las sustancias (Merino, Capitan, & Ollero, 2009). A continuación, se describen cada una de las características.

- **Montaje:** la plataforma robótica móvil debe tener un diseño mecánico simple, disponer de acoples para sujeción de los elementos de adquisición de señales y actuadores. Debe ser de fácil armado y ser muy pesada ya que los robots móviles en robótica cooperativa son poco especializados.
- **Estabilidad y maniobrabilidad:** la plataforma debe disponer de puntos de apoyo para alcanzar el equilibrio y de una maniobrabilidad para cambiar de posición y evadir obstáculos sin dificultad.
- **Configuración del robot móvil:** existen varias configuraciones para robótica móvil las cuales cumplen fines específicos entre ellas se presentan: diferencial, Ackerman, triciclo y sincronizado. Cada una de estas presenta características

como estabilidad y grados de libertad para la realización de cambios de giro y de orientación en robots móviles.

- Costo: La robótica cooperativa implica trabajar con varios agentes, elevando así el costo de la implementación de esta investigación, por tal razón se debe seleccionar una plataforma robótica económica y que se ajuste a los requerimientos planteados.

3.5.2 Selección de la plataforma robótica

El modelo diferencial es una configuración para robots móviles que permite el cambio de giro y de orientación con facilidad, debido a que presenta una configuración en forma de triángulo que brinda tres puntos de apoyo (Marin, 2011). Estas características permiten que el robot pueda realizar trayectorias que involucran cambios repentinos de dirección, lo cual es fundamental para poder realizar un seguimiento de plumas de olor y evasión de obstáculos (Kim & Kim, 2017).

Por tal razón se seleccionó una plataforma Robot car chassis 2WD que presenta un modelo diferencial en su mecánica, es de bajo costo ya que es comercializado y distribuido principalmente en tiendas de electrónica, además de presentar un fácil montaje y construcción. El modelo seleccionado se muestra a continuación en la Figura 39.



Figura 39. Plataforma Robot car chassis 2WD

La plataforma presenta características importantes como estabilidad y maniobrabilidad, además de disponer 2 motores DC con caja reductora que permite generar más torque para las ruedas de caucho y una tercera rueda pivotante que sirve

de apoyo para brindar estabilidad al chasis. Las dimensiones de la plataforma robótica son: 21 cm x 15 cm x 4 cm, las cuales se pueden apreciar en la Figura 40.

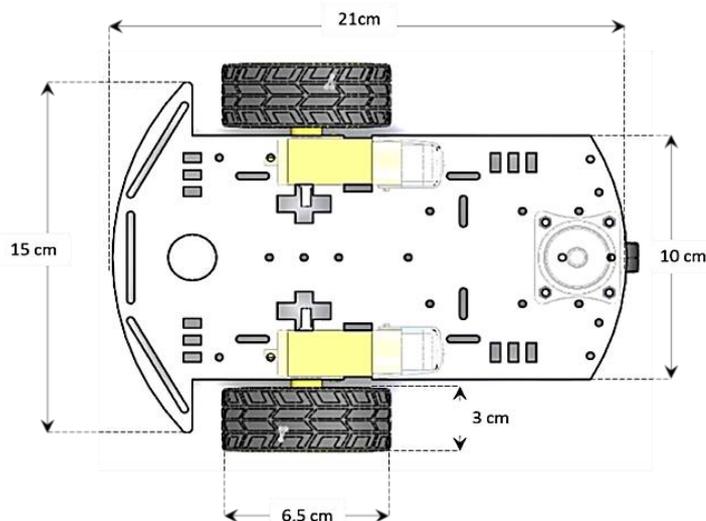


Figura 40. Dimensiones plataforma Robot car chassis 2WD

3.6 Implementación del robot móvil para el levantamiento de mapas de dispersión

La disposición final del robot móvil se muestra en la Figura 41, en la que se puede apreciar una vista isométrica de la implementación final del robot, y la disposición final de los elementos empleados para realizar tareas de navegación y adquisición de datos de las fuentes de olor. Para la adquisición de datos de los diferentes mapas de dispersión se emplearon 3 sensores MQ-3, los cuales fueron localizados en la parte frontal del robot, conjuntamente con los sensores de proximidad ultrasónicos.

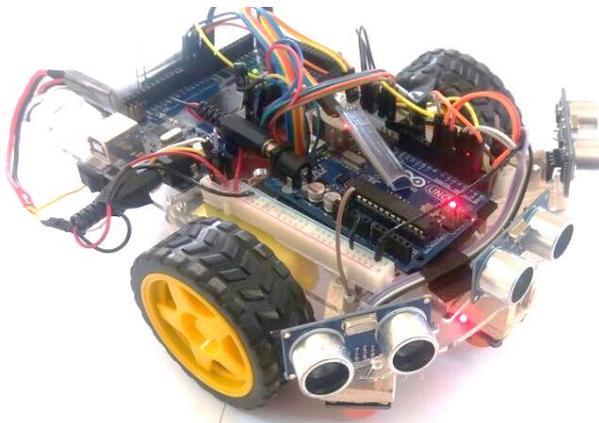


Figura 41. Robot móvil para levantamiento de mapas de dispersión

En la Figura 42, se presenta la vista superior del robot móvil, y se aprecia los elementos que fueron implementados, tales como: tarjeta de adquisición Arduino MEGA, sensores de proximidad, módulo de comunicación Bluetooth y una batería como fuente de alimentación. La distribución de estos elementos y su modelo se muestra a continuación.

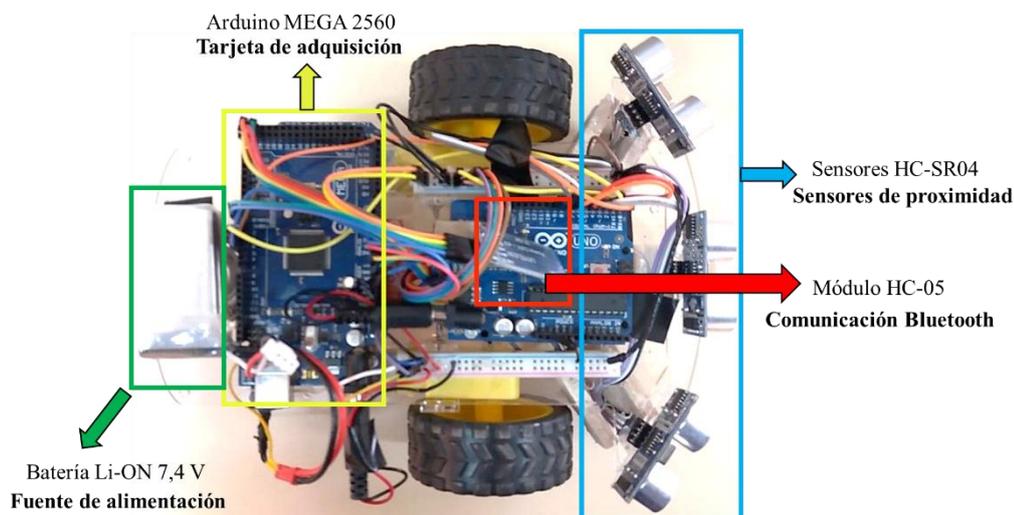


Figura 42. Vista superior del robot móvil para mapeo

En la Figura 43, se presenta la vista inferior del robot móvil, y se aprecia los elementos que fueron implementados, tales como: sensores para la detección de alcohol, puente H, motores DC que permiten el desplazamiento de la plataforma robótica. La distribución de estos elementos y su modelo se muestra a continuación.

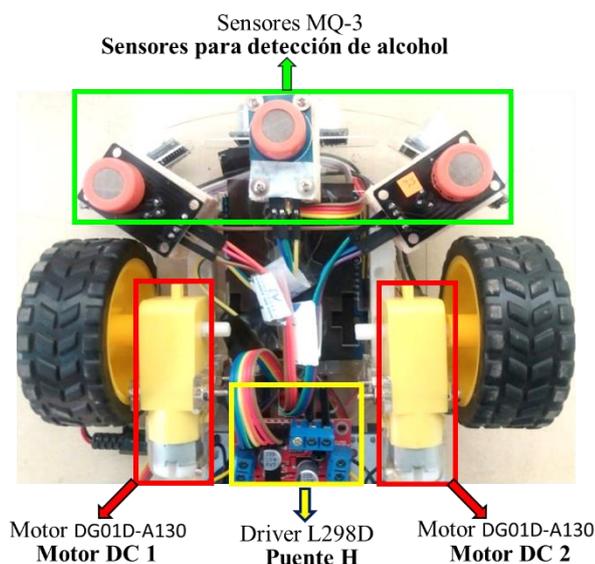


Figura 43. Vista inferior del robot móvil para mapeo

En la Figura 44 se presenta el esquema electrónico del robot móvil de mapeo. Se puede apreciar las conexiones requeridas para el funcionamiento de: sensores de proximidad (HC-SR04), sensores de detección de alcohol (MQ-3), módulo de comunicación (HC-05) y actuadores (L298N y motores DC) con la tarjeta Arduino MEGA y con la fuente de alimentación.

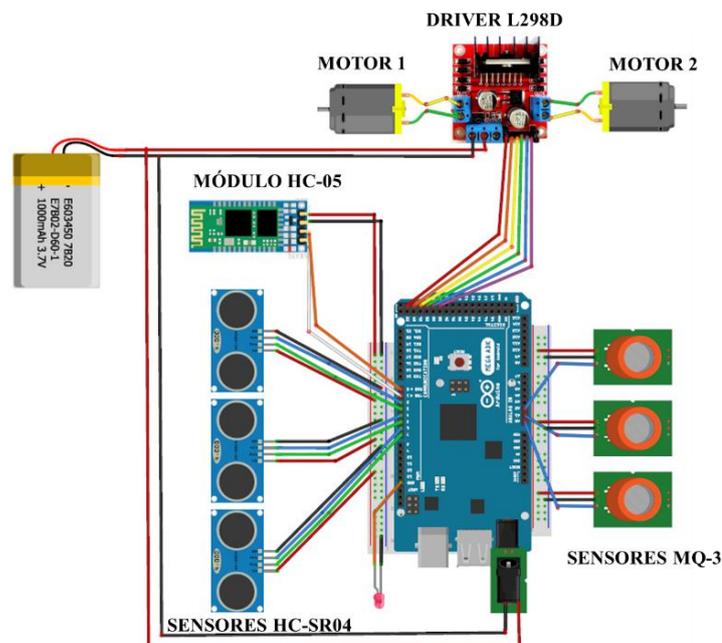


Figura 44. Esquema del circuito electrónico del robot de mapeo

3.7 Implementación de hardware para el robot de levantamiento de mapas

Acorde a la Figura 44 se realizará una descripción de los elementos de hardware requerido en la implementación del robot móvil para el levantamiento de mapas de dispersión. Para la implementación del hardware requerido para el robot de levantamiento de mapas de dispersión se definieron 4 sistemas. Los sistemas involucran tareas como: adquisición de datos mediante sensores, control, potencia y la comunicación inalámbrica. Para cada uno de los sistemas se muestra a continuación los elementos requeridos y sus especificaciones.

3.7.1 Sistema de adquisición

Para el sistema de adquisición de la plataforma robótica se empleó: 3 sensores para la detección de alcohol MQ-3 y 3 sensores de proximidad tipo ultrasónicos HC-SR04.

La adquisición de datos se realizó empleando una tarjeta Arduino MEGA 2560, los datos de los 3 sensores MQ-3 se almacenaban en memoria para ser procesados posteriormente y obtener los mapas de dispersión. A continuación, se presenta las especificaciones de estos elementos.

3.7.1.1 Sensor químico MQ-3

Para la detección de fuentes de olor y levantamiento de mapas de dispersión se montó 3 sensores MQ-3 en el robot móvil de los cuales se realizó la caracterización para conocer su comportamiento. Cada sensor entrega una señal analógica la misma que fue tratada por medio del ADC de la tarjeta Arduino MEGA 2560. El sensor se fabrica con materiales cuya composición es SnO_2 , y se alimenta con un voltaje de 5 V en DC (sparkfun, 2015). En la Figura 45 se muestra el modelo del sensor.

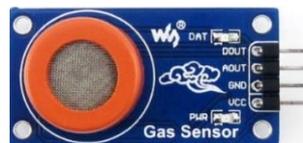


Figura 45. Sensor MQ-3

Los parámetros técnicos se muestran a continuación:

- Encapsulado: Plástico
- Rango de detección: 25-500 ppm de alcohol
- Voltaje del circuito (V_C): $5\text{ V} \pm 0.1$ (AC o DC)
- Consumo del calentador: 750 mW
- Temperatura de trabajo $-10\text{ }^\circ\text{C}$ hasta $50\text{ }^\circ\text{C}$
- Condiciones estándar de detección: Temperatura $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2$, Humedad: 65%

3.7.1.2 Sensor ultrasónico HC-SR04

En el robot móvil se implementó sensores de proximidad para la evasión de obstáculos y tareas de navegación. Se empleó el sensor ultrasónico modelo HC-SR04, el cual funciona en base a la transmisión y recepción de señales ultrasónicas. Para esto el sensor emite y recibe una señal ultrasónica la cual se refleja con un objeto, se determina

el tiempo de viaje de la misma y posteriormente la distancia que existe entre el sensor y el objeto (Freaks, 2011). En la Figura 46 se muestra el modelo de sensor empleado.



Figura 46. Sensor ultrasónico HC-SR04

Los parámetros técnicos del sensor se describen a continuación:

- Voltaje de alimentación (V_c): 5 V \pm 0.1 (DC)
- Consumo de corriente: 15 mA
- Rango de detección: 2 cm - 400 cm
- Angulo de medición: 15 grados
- Duración del pulso de disparo: 10 μ s, (PULSO TTL)
- Duración del pulso ECO de salida: 100-25000 μ s (PULSO TTL)

3.7.2 Sistema de control

Para el sistema de control de la plataforma robótica móvil se empleó una tarjeta Arduino MEGA 2560, la misma que se encarga de realizar la adquisición de datos de los sensores: MQ-3 y HC-SR04 y accionar el driver L298N que controla los 2 motores del robot. Los datos obtenidos son guardados en la memoria EEPROM de la tarjeta, para posteriormente ser enviados a un ordenador por medio de una comunicación UART.

Adicional, la tarjeta se comunica con un módulo Bluetooth para ejecutar órdenes de navegación y de adquisición de datos de los mapas de dispersión. Para esto se diseñó una aplicación móvil para Android que permite al usuario controlar al robot dentro del entorno controlado. A continuación, se muestra las especificaciones técnicas de la tarjeta Arduino MEGA 2560.

3.7.2.1 Arduino MEGA ADK 2560

La tarjeta Arduino MEGA se basa en el microcontrolador ATmega2560, que dispone de: 54 pines digitales (entradas y salidas, y salidas PWM), 16 entradas analógicas y 4 puertos UART para comunicación serial. El microcontrolador presenta un oscilador de cristal de 16 MHz y conexión USB, el modelo se muestra a continuación en la Figura 47.

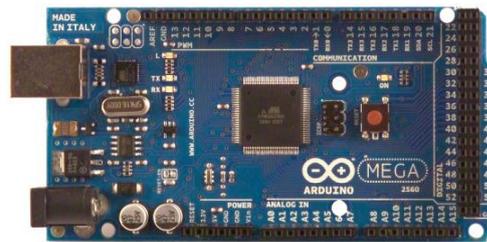


Figura 47. Arduino MEGA ADK 2560

Las especificaciones técnicas se muestran a continuación:

- Voltaje de operación (V_{op}): 5 V (DC)
- Voltaje de entrada para regulación: 7-12 V (DC)
- GPIO: 54 pines digitales, 16 entradas analógicas
- Corriente por pin: 40 mA (5VDC), 50 mA (3.3. VDC)
- Memoria flash: 256KB, memoria EEPROM: 4KB, Memoria SRAM:8 KB
- Velocidad de reloj: 16 MHz
- Consumo promedio: 100 mA
- Botón Reset: pull-up

3.7.3 Sistema de potencia

Para el sistema de potencia de la plataforma robótica móvil se empleó un driver L298N, el cual permite el accionamiento y control de 2 motores DC. Por medio de las características del driver se programaron los giros y velocidades del robot móvil para realizar las tareas de mapeo. Adicional se empleó una batería tipo Li-ON, la cual alimentaba todo el circuito electrónico del robot. A continuación, se describe, cada uno de los elementos empleados para este sistema.

3.7.3.1 Driver L298N

El driver L298N fue empleado para controlar los 2 motores DC del robot móvil debido a que presenta en su configuración un controlador doble, de esta forma se planificó las velocidades y giros de avance que son ordenados desde la aplicación móvil que controla al robot en general.

El driver cuenta con dos canales de potencia, cada uno de hasta 2 A, y está diseñado especialmente para controlar cargas inductivas e impulsarlas como motores de corriente continua, solenoides, relés; el control de motores (Sparkfun, 2000), A continuación, en la Figura 48 se presenta el modelo del Driver L298N.

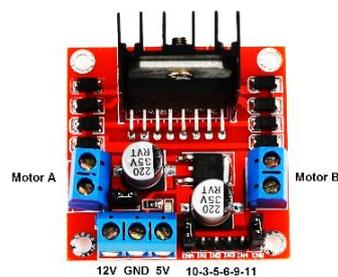


Figura 48. Driver L298N

Las especificaciones técnicas se muestran a continuación:

- Voltaje de operación (V_{op}): 4-35 V (DC)
- Corriente máxima por canal: 2 A
- Corriente total soportada: 4 A
- Voltaje alimentación lógica: 5 V
- Potencia máxima: 25 W
- Pines de entrada PWM: 2
- Temperatura de trabajo: -25 °C]hasta 135 °C
- Tamaño: 55mm x 60 mm x 30 mm

3.7.3.2 Motores

Los motores empleados en la implementación del robot móvil disponen de una caja de engranajes que permite generar más torque en las ruedas y facilitar el

desplazamiento. Los motores con caja de reducción empleados son del modelo DG01D-A130 (Electronics DAGU Hi-Tech, 2009), los cuales tienen una caja de engranajes con relación de velocidad-torque de 1:48 (ElectronicsOsaka, 2016). El modelo del motor se muestra en la Figura 49.



Figura 49. Motorreductor DG01D-A130

Las especificaciones técnicas se muestran a continuación:

- Voltaje de operación (V_{op}): 3-9 V (DC)
- Corriente máxima: 250 mA
- Torque: 0,8 Kgf.cm
- Razón de reducción: 1 a 48, mediante un eje biaxial
- Dimensiones: 65 mm x 18 mm x 22 mm

3.7.3.3 Batería tipo Li-ON

Se utilizó una batería de polímeros de iones de litio de 7.4 V, la misma que alimenta todos los elementos del circuito, tales como: 3 sensores MQ-3, 3 sensores HC-SR04, módulo Bluetooth HC-05, 1 led verde, driver L298N y a la tarjeta Arduino MEGA. Por tal razón se realizó un análisis de autonomía del consumo de la batería para determinar el tiempo de operación. A continuación, en la Figura 50 se presenta el modelo de la batería empleada.

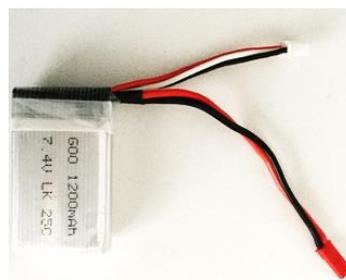


Figura 50. Batería Li-ON 7.4 V y 1200mAh

Las especificaciones técnicas de la batería se muestran a continuación:

- Voltaje: 7.4 V
- Capacidad: 1200 mAh
- Protección contra sobretensiones carga
- Conector hembra para conexión

3.7.4 Sistema de comunicación

Para el sistema de comunicación de la plataforma robótica móvil se empleó un módulo para crear una comunicación Bluetooth. La comunicación se realizó entre el robot móvil y la aplicación móvil para Android instalada en un smartphone. Se estableció el estándar IEEE 802.15 que define las características de una red de conexión personal inalámbrica (WPAN), lo que permitió relacionar los dispositivos mencionados en un área de alcance corta. A continuación, se describe el módulo Bluetooth HC-05 utilizado el sistema de comunicación.

3.7.4.1 Módulo Bluetooth HC-05

Es un módulo diseñado bajo el protocolo de puerto serial (SPP) que permite tener una interfaz de comunicación serial para transferencia de información, y está desarrollado para configurar una conexión Bluetooth, presenta una modulación entre el transmisor-receptor y trabaja en la banda base de radio completa a 2.4 GHz (ITead Studio, 2010), el modelo del módulo se muestra en la Figura 51.



Figura 51. Módulo Bluetooth HC-05

Las especificaciones técnicas se muestran a continuación:

- Version Bluetooth 2.0 + EDR a 2.4 GHz (Enhanced Data Rate)

- Alcance: 5 a 10 m
- Modulación: GFSK ()
- Velocidad para transmisión serial: 9600 baudios
- Seguridad: Autenticación y encriptación mediante clave
- Consumo de corriente: 50 mA
- Voltaje de alimentación: 3.6 V a 6 V

3.8 Análisis de autonomía de uso de la batería del robot móvil de mapeo

Para determinar la autonomía del uso de la batería se tomó en consideración los valores máximos de consumo de corriente de todos los elementos implementados en el robot móvil. El objetivo del análisis es determinar el tiempo de operación del robot dentro del entorno de navegación, y así planificar las trayectorias y tiempos de adquisición de datos que permitan realizar el levantamiento de mapas de dispersión.

En la Tabla 3 se muestra el resumen del análisis de autonomía del uso de la batería, en la cual se presenta cada uno de los elementos del robot con su respectivo voltaje de operación y consumo de corriente. Adicional, con el consumo total de corriente se determinó el tiempo de autonomía disponible para la operación del robot en base a la capacidad de la batería empleada.

Tabla 3
Análisis de autonomía para el robot de mapeo

Cantidad	Hardware	Voltaje de operación	Consumo de corriente
3	SensorMQ-3	5V \pm 0.1	450 mA
3	Sensores HC-SR04	5V	45 mA
1	Arduino MEGA 2560	7-12V	100 mA
1	Driver L298N	5-35V	450 mA
2	Motorreductores DG01D-A130	3-9V	500 mA
1	Bluetooth HC-05	3.6-5V	50 mA
1	Led verde	2.1V	20 mA

El consumo de energía de los elementos implementados es 1615 mA y para determinar el tiempo de autonomía se emplea en la Ecuación 3.

$$\text{Tiempo de autonomía} = \frac{\text{Capacidad batería}}{\text{Consumo carga}} \quad (3)$$

Reemplazando el consumo de carga determinado del análisis de autonomía encontrado de 1615 mA y el valor de la capacidad de la batería de 1200 mA se tiene.

$$\text{Tiempo de autonomía} = \frac{1200 \text{ mAh}}{1615 \text{ mA}} = 0.74 \text{ h}$$

Calculando el tiempo de autonomía de horas a minutos, se tiene lo siguiente:

$$\text{Tiempo de autonomía} = 0.74 \text{ h} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 44 \text{ min}$$

En base al análisis del tiempo de autonomía el robot móvil puede operar en un tiempo aproximado de 44 minutos. Bajo este tiempo se desarrolló el algoritmo de mapeo para el robot móvil y se determinó el tiempo de experimentación necesario para que el robot móvil pueda explorar el ambiente controlado y obtener el patrón de dispersión.

3.9 Implementación del software para el robot móvil de mapeo

Para la implementación del software requerido para el funcionamiento del robot de levantamiento de mapas de dispersión se desarrolló un algoritmo en la Interfaz de Arduino IDE, la cual dispone de un monitor serial para la transmisión de datos obtenidos por el robot hacia un ordenador. Adicional, se desarrolló una aplicación móvil para Android, la cual controla al robot móvil de mapeo.

3.9.1 Desarrollo de aplicación móvil para Android para el robot móvil de mapeo

El desarrollo de la aplicación móvil para el control del robot por mando se realizó en el entorno de programación MIT App Inventor que permite diseñar aplicaciones para Android a través de bloques y funciones simples. La aplicación desarrollada permite vincular un dispositivo móvil con el módulo HC-05 del robot y crear una red WPAN mediante el estándar 802.15 que establece una comunicación Bluetooth.

La aplicación móvil dispone de 10 botones los cuales permiten las siguientes funcionalidades: navegación del robot, conexión y desconexión con dispositivos Bluetooth, adquisición de datos, transferencia de datos y una opción para salir de la aplicación. Las funciones de navegación se realizan mediante botones que indican desplazamientos del robot hacia adelante, hacia la izquierda, hacia la derecha, atrás y detener su marcha, en la Figura 53 se puede apreciar a detalle estas funciones.

Adicional, el botón de conexión permite abrir una nueva pantalla que muestra los posibles dispositivos a los que puede acceder el robot y crear una red WPAN, para el caso estricto de funcionamiento se estableció el nombre de “*Arduino 1*” como dispositivo de conexión predeterminado. El botón de adquisición denominado AUTO permite obtener 30 muestras de los 3 sensores MQ-3 desde el instante de ser pulsado.

El botón que realiza la transferencia de datos denominado PARAR se pulsa en el instante en que termine el levantamiento del mapa de dispersión, para esto se requiere que la tarjeta de adquisición Arduino MEGA 2560 se encuentre conectado a un ordenador mediante cable USB para establecer una comunicación serial y transferir los datos obtenidos para los 3 sensores MQ-3.

Las órdenes de navegación, adquisición y transferencia de datos son enviadas desde la aplicación móvil al robot móvil de mapeo. Por tal razón para la realización del programa de la aplicación móvil y del algoritmo de mapeo se define el envío de valores numéricos entre los dos programas y así poder ejecutar cada una de las órdenes. Para esto se desarrolló el diagrama de flujo de la aplicación móvil, que se muestra en la Figura 52.

El diseño de la aplicación móvil desarrollada se muestra en la Figura 53 a), en la que se aprecian los botones que permiten ejecutar la navegación, adquisición y transferencia de datos. En la Figura 53 b) se aprecian los dispositivos vinculados al smartphone, y el dispositivo predeterminado BT-MOBILE para la comunicación con el robot y la aplicación móvil.

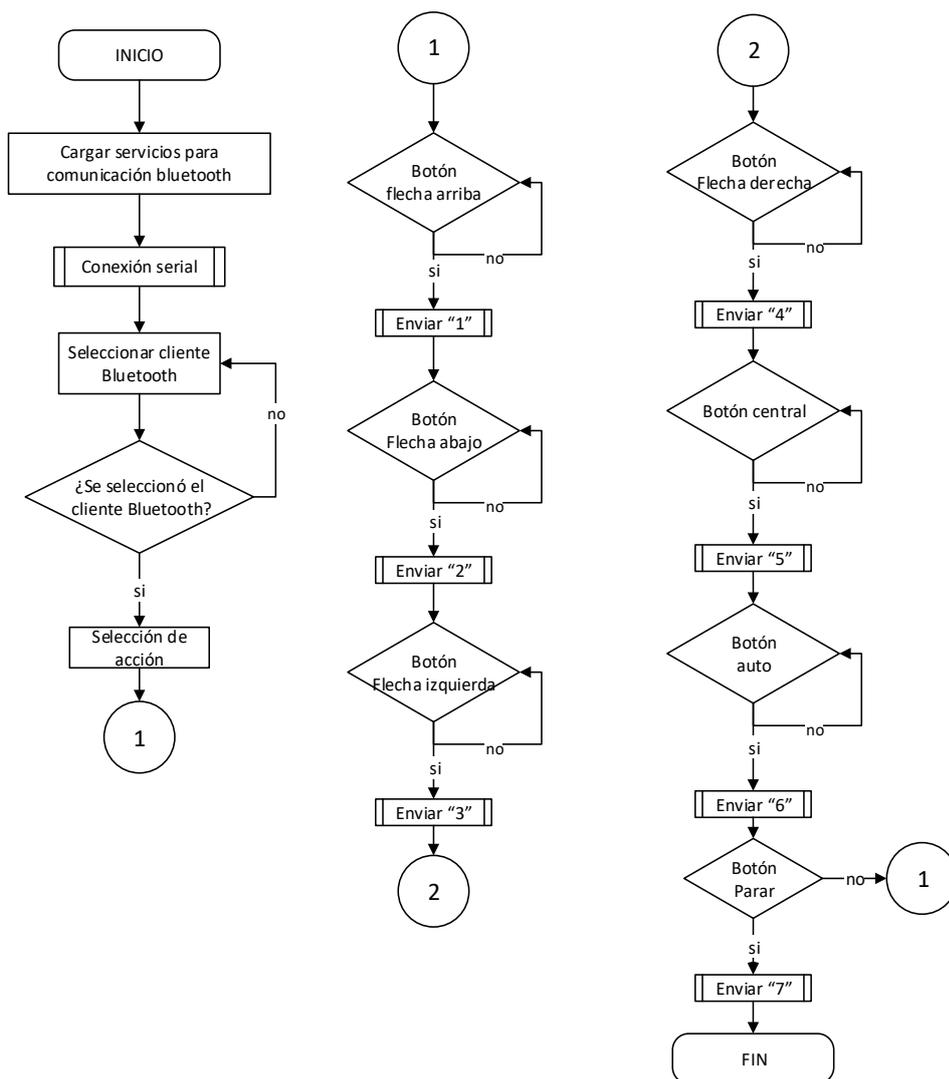


Figura 52. Diagrama de flujo de la aplicación de mapeo

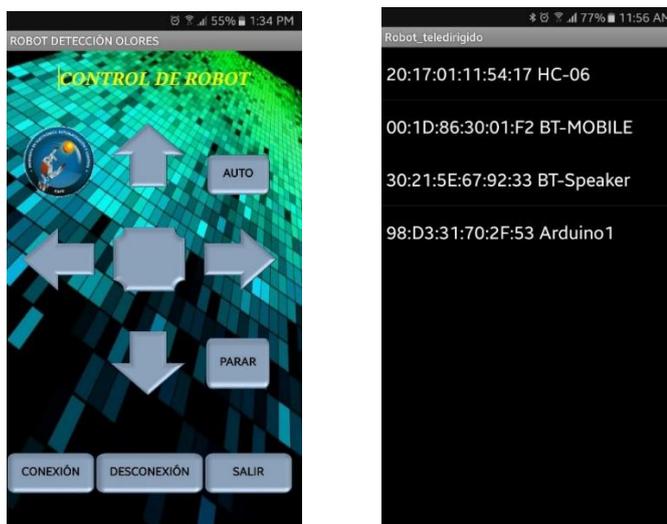


Figura 53. Aplicación desarrollada para control de robot móvil de mapeo: a) ventana de entorno de inicio, b) ventana de conexión Bluetooth

3.9.2 Programa de control para robot móvil de mapeo

El algoritmo de mapeo para el robot móvil se realizó considerando los resultados obtenidos en la caracterización de los sensores químicos MQ-3 tales como: tiempo de estabilización de línea base, tiempos de respuesta del sensor. El programa inicia con la verificación de la comunicación serial entre el módulo Bluetooth y el microcontrolador de la tarjeta Arduino, y se da paso a la inicialización de variables y de puertos de entrada y salida.

Para la adquisición de datos de los 3 sensores MQ-3 se emplearon los puertos de entrada analógicos de la tarjeta y se consideró un tiempo inicial de tres minutos de espera, permitiendo que los sensores puedan calentarse y estabilizar su línea base, transcurridos los 3 minutos, se enciende un led indicando el inicio de la navegación del robot por el ambiente. Al ejecutarse esta instrucción en el robot móvil, se procede a escribir los datos siguientes en memoria.

Transcurrido el tiempo de espera inicial, el robot obtiene datos de cada uno de los cuadrantes empleando los 3 sensores MQ-3. Los datos son convertidos en una señal discreta empleando el conversor ADC de la tarjeta y almacenados en su memoria EEPROM. Para los 3 sensores MQ-3 se obtienen 10 muestras en cada cuadrante, es decir se obtiene un total de 30 muestras de cada uno de los cuadrantes del espacio de trabajo. Los datos son almacenados en forma de vectores, y en el espacio de memoria se construyen matrices ordenando los datos de acuerdo al orden de adquisición con el que se obtuvieron.

Al finalizar el levantamiento del mapa de dispersión, se obtiene un total de 30 matrices de 81 elementos. Las matrices obtenidas por el robot móvil son transferidas a un ordenador mediante comunicación UART bajo el estándar RS-232 para ser procesadas posteriormente en Matlab y obtener los mapas de dispersión de forma gráfica.

A continuación, en la Figura 54 se presenta en forma resumida un esquema del funcionamiento del algoritmo que permite realizar al robot móvil tareas de navegación, adquisición de datos y transferencia de datos con el ordenador a partir de las instrucciones recibidas de la aplicación móvil.

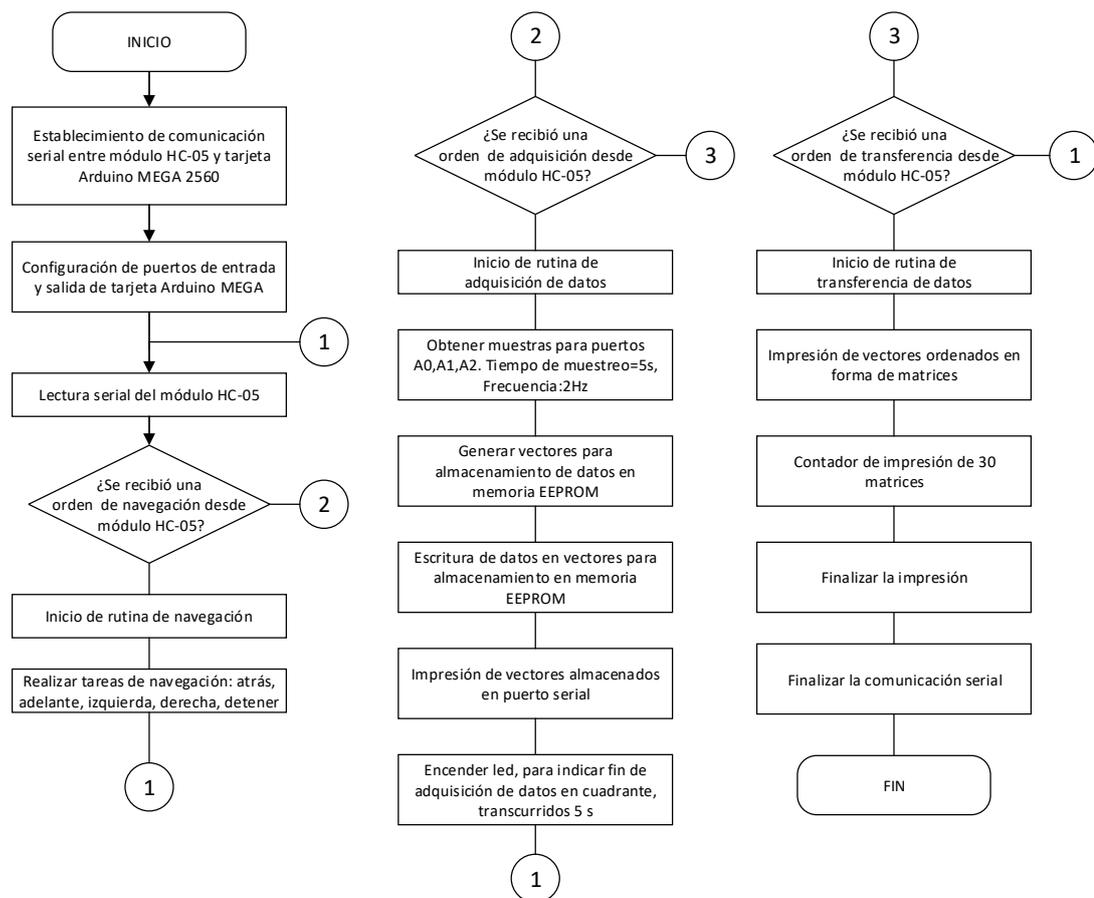


Figura 54. Diagrama de flujo algoritmo de mapeo

3.9.3 Procedimiento de operación del robot móvil

Una vez desarrollada la aplicación móvil y el algoritmo de mapeo para el robot móvil, se presenta el procedimiento de operación para realizar el levantamiento de mapas. El procedimiento consiste en establecer una conexión Bluetooth entre smartphone y módulo HC-05 del robot móvil, posteriormente se realiza la comunicación serial entre el módulo HC-05 y la tarjeta Arduino MEGA para la transmisión y recepción de las ordenes desde la aplicación móvil.

Al establecer la comunicación Bluetooth y serial ente los dispositivos se ejecutan las órdenes de navegación, adquisición y transferencia de datos. En la Figura 55 se muestra el diagrama de bloques que representa el procedimiento de operación del robot móvil para realizar la navegación y la adquisición de datos de los sensores químicos en el entorno controlado.

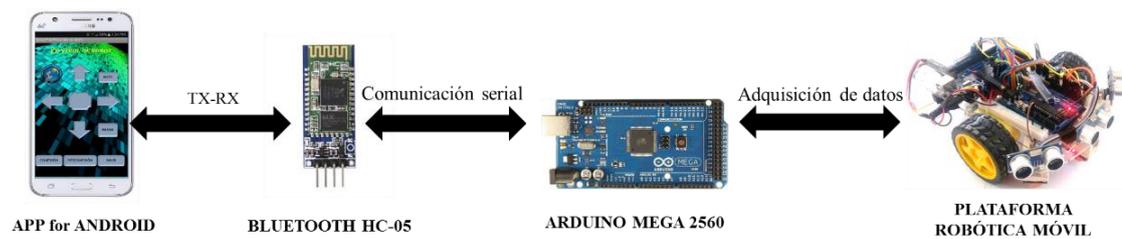


Figura 55. Diagrama de bloques de adquisición del patrón de dispersión

3.10 Generación de mapas de dispersión de alcohol y colonia

La generación de mapas de dispersión para sustancias de alcohol y colonia se realizó para varios ambientes controlados, los cuales presentaban diferentes configuraciones con respecto al volumen y concentración de alcohol y colonia. Los diferentes mapas fueron obtenidos con y sin presencia de obstáculos para conocer el comportamiento de la pluma de olor frente a estos.

Adicional, se presenta un mapa de dispersión sujeto a perturbación, Para esto, se colocó un ventilador el cual genera corrientes de aire en el ambiente provocando que la dispersión de alcohol varíe y por consecuente su pluma de olor. Es necesario especificar las condiciones de trabajo y los procedimientos realizados para cada experimentación, los mismos que se presentan a continuación.

3.10.1 Dimensiones del espacio de trabajo

El espacio de trabajo se define como el lugar geométrico que contiene todos los puntos que pueden ser alcanzados por un robot (Moldes & Jokin, 2014), para nuestro caso se establecen las dimensiones del espacio en el que el robot móvil realizará el levantamiento de mapas. Las dimensiones son las siguientes: 189cm x 189cm.

En base a estas dimensiones se dividió la zona de trabajo en 9 cuadrantes principales y para cada uno de estos 9 cuadrantes secundarios. El objetivo de trabajar con estos cuadrantes es determinar fácilmente las posiciones de los robots y disponer de una matriz de 9x9 que permita cuantificar la dispersión de olor para cada una de las posiciones de los cuadrantes.

Las dimensiones de los cuadrantes se detallan a continuación: cuadrante principal (representados por números romanos): 63cm x 63cm, cuadrante secundario (representados por números arábigos): 21cm x 21cm. A continuación se presenta la disposición final de los 9 cuadrantes principales y 81 cuadrantes secundarios en la Figura 56.

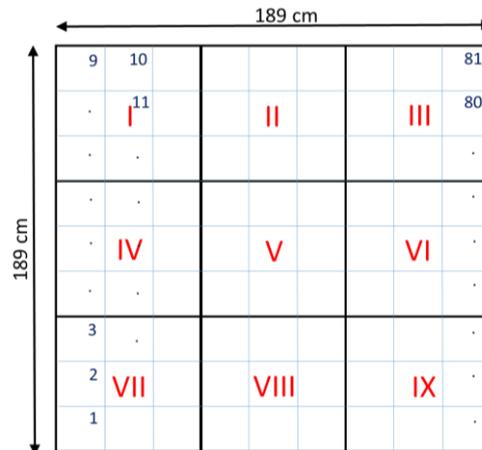


Figura 56. Cuadrantes principales y secundarios para el espacio de trabajo

Con la división del espacio de trabajo en cuadrantes se definió la trayectoria con la que el robot navegará para obtener los diferentes mapas de dispersión. El robot avanza en trayectorias rectilíneas para cada una de las 9 columnas del espacio de trabajo, y realiza giros para cambiarse de columna. La trayectoria garantiza realizar un barrido completo de toda el área, debido a que el robot inicia en el cuadrante 1 y se desplaza hasta el cuadrante 81. En la Figura 57, se observa a detalle la trayectoria definida para realizar el levantamiento de los mapas de dispersión, mostrándose la posición inicial del robot y los movimientos dentro del área.

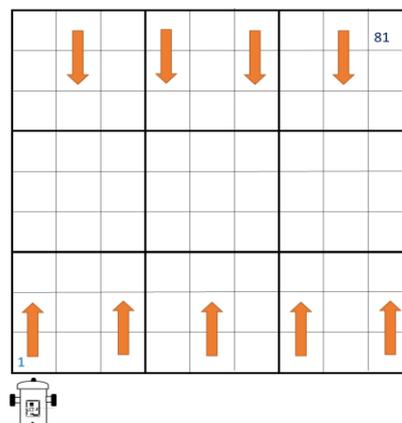


Figura 57. Trayectoria del robot para el levantamiento de mapa de dispersión

3.10.2 Procedimiento para la obtención de mapas de dispersión

El robot móvil tiene 3 sensores químicos MQ-3 localizados en su parte frontal, por tanto, para cada uno de los 81 cuadrantes del espacio de trabajo sobre el cual se levantaron los mapas de dispersión se registró el valor de 3 sensores a la vez. A manera de ejemplo, en la Figura 58 se presenta la forma con la que el robot móvil realizaba la adquisición de datos con los 3 sensores para un cuadrante del ambiente controlado, garantizando así el registro de 3 datos a la vez para un mismo punto.

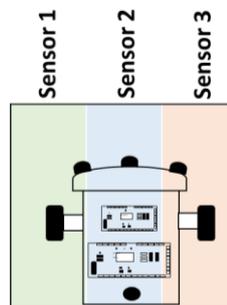


Figura 58. Disposición de sensores MQ-3 en robot móvil

Para el levantamiento de mapas de dispersión de cada uno de los ambientes controlados se realizaron 10 experimentaciones. El objetivo de la realización de varios experimentos se debe a la aleatoriedad que presentan los sensores MQ-3 al obtener datos del medio debido a las variaciones de temperatura y humedad que puedan presentarse.

Los mapas de dispersión obtenidos para cada ambiente controlado inicialmente presentaban una resolución de 9x9, y se registraron mapas para cada uno de los 3 sensores MQ-3 los cuales eran almacenados en matrices de 81 elementos. Al finalizar el levantamiento de mapas de un escenario se disponía de un total de 30 mapas, de los cuales, a través de la determinación de: la media, valores máximos y mínimos, se seleccionaba el mejor mapa para cada uno de los 3 sensores MQ-3.

El tiempo de experimentación promedio para el levantamiento de cada uno de los mapas obtenidos es aproximadamente 20 minutos. Para la estabilización de la línea base se estableció un tiempo de 3 minutos permitiendo que los sensores puedan calentarse y operen en condiciones normales, la navegación con el robot móvil para la adquisición de datos con los sensores tardaba 17 minutos. Por tal razón el análisis de

autonomía del uso de la batería presentando anteriormente en la Tabla 3 se justa a los tiempos determinados para cada experimento.

A manera de ejemplo en la Figura 59, se presenta un ambiente controlado con obstáculos, sobre el cual se colocó un volumen de 5 ml de alcohol y se realizó el levantamiento del mapa de dispersión de esta sustancia siguiendo la trayectoria definida. Se realizaron 10 experimentaciones trabajando bajo las mismas condiciones: temperatura: 21 °C y humedad 68% y se almacenó los datos en matrices de 81 datos para cada uno de los 3 sensores MQ-3.

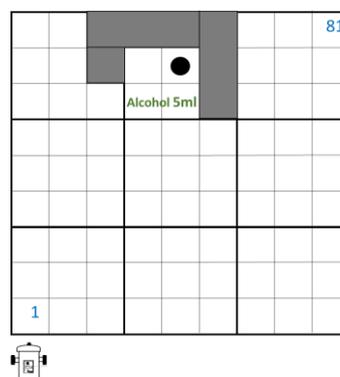


Figura 59. Ambiente controlado con obstáculos- 5 ml de alcohol

Una vez obtenidos los datos de las 10 experimentaciones realizadas para el ambiente controlado, se procede a determinar los valores máximos, mínimos y la media de cada matriz de datos. Bajo estos parámetros se seleccionaron 3 matrices de datos: uno para el sensor 1, otra para el sensor 2 y otra para el sensor 3 para su posterior tratamiento mediante el uso de Gráficas empleando MATLAB 2016.

Las 3 matrices de datos seleccionadas fueron representadas mediante matrices de resolución, para esto se empleó los comandos de la API “OpenGL” de MATLAB. Empleando el comando “*imagesc*” que permite representar un vector o una matriz mediante una imagen empleando la gama de colores RGB.

La representación se da mediante una correlación de cada uno de los datos de la matriz con los pixeles de una imagen. Se determinan valores máximos y mínimos y sobre estos se establece el rango de escalado para representar un dato con un color. En la Figura 60 se muestra la representación que realiza MATLAB para obtener imágenes de una matriz de datos.

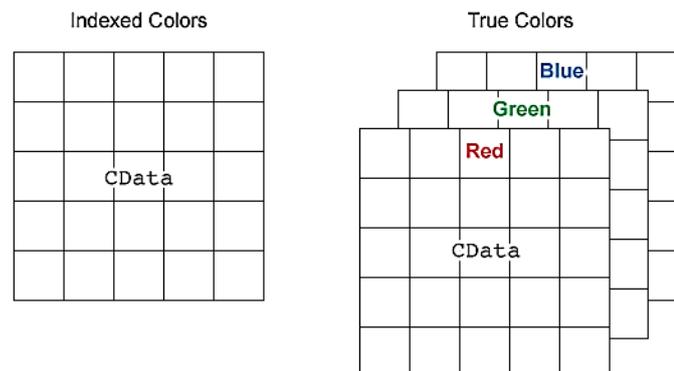


Figura 60. Representación gráfica de una matriz de datos en MATLAB

Fuente: (Mathworks, 2017)

Las matrices de datos obtenidas para los 3 sensores MQ-3 del robot fueron representadas mediante matrices de resolución, para esto se definió el rango de voltaje que representa el nivel de detección de alcohol en el medio. En la Figura 61, se aprecia los mapas de dispersión obtenidos, en donde se puede observar la presencia de alcohol en el cuadrante sobre el que se colocó la muestra de 5 ml, y pequeñas variaciones de sus dispersión en los cuadrantes que se encuentran a su alrededor.

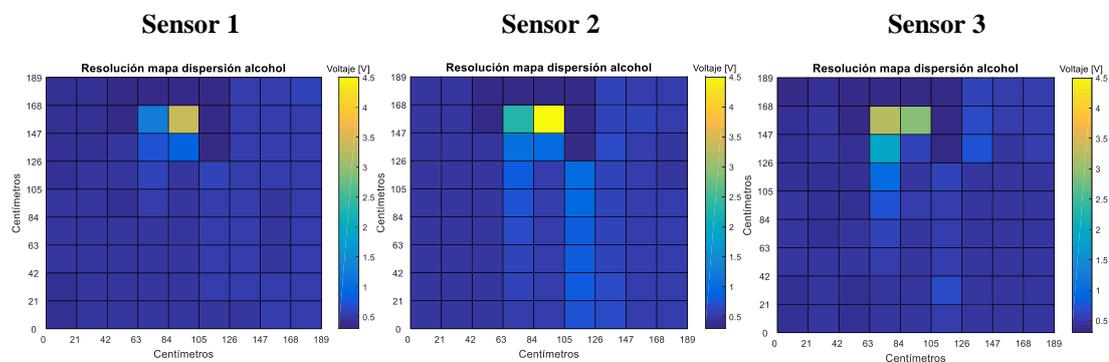


Figura 61. Matrices de resolución 9x9 obtenidas para un ambiente con 5 ml de alcohol y con presencia de obstáculos

Posteriormente para obtener una mejor resolución de los mapas de dispersión, se combinó las 3 matrices de resolución 9x9 obtenidas de los sensores MQ-3 generando de esta forma una matriz de 9x27. La combinación se realizó considerando que cada uno de los elementos de las 3 matrices correspondía a un cuadrante del espacio de trabajo, por tal razón los cuadrantes que inicialmente eran 81, donde se tenía 9 filas y 9 columnas, ahora pasarían a tener 9 filas y 27 columnas.

La nueva matriz de datos generada con una resolución de 9×27 que representa al mapa de dispersión obtenido resultado de la realización de varias experimentaciones se presenta a continuación en la Figura 62, en la que se aprecia la dispersión de 5 ml de alcohol en un ambiente con presencia de obstáculos representados por pixeles de color azul oscuro que corresponde al nivel más bajo de la escala de colores, y la mayor concentración de sustancia representada por un pixel de color amarillo que corresponde al nivel más alto de la escala de colores.

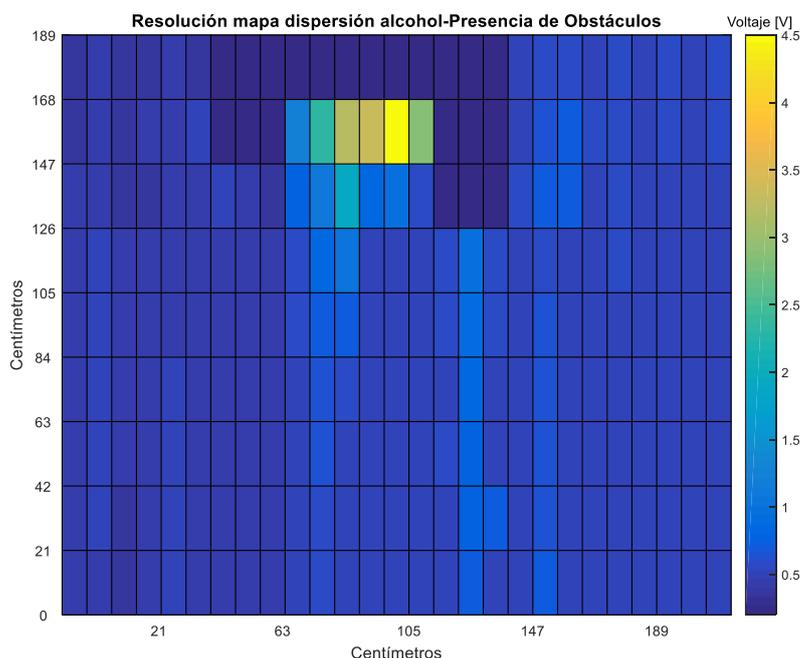


Figura 62. Matriz de resolución 9×27 obtenida para un ambiente con 5 ml de alcohol y con presencia de obstáculos

Adicional, se presentan los mapas de difusión obtenidos para cada escenario mediante el uso del comando “*pcolor*” y “*shading interp*” de MATLAB que generan una interpolación bilineal para un elemento de una matriz o vector, relacionándolo con los 4 elementos adyacentes a este a través de sus vértices. De esta forma se define un nuevo valor de color que represente al dato interpolado con los datos adyacentes. La interpolación se realiza para cada uno de los 243 elementos de la matriz de 9×27 obteniéndose un mapa de difusión.

A continuación, en la Figura 63 se muestra el resultado de la interpolación de la matriz de resolución obtenida en la Figura 62. Se pueda apreciar la dispersión del alcohol al transcurrir un tiempo de 18 minutos, la mayor concentración de alcohol se

encuentra en la fuente de olor y se pueden observar filamentos de la dispersión de la sustancia de forma direccional.

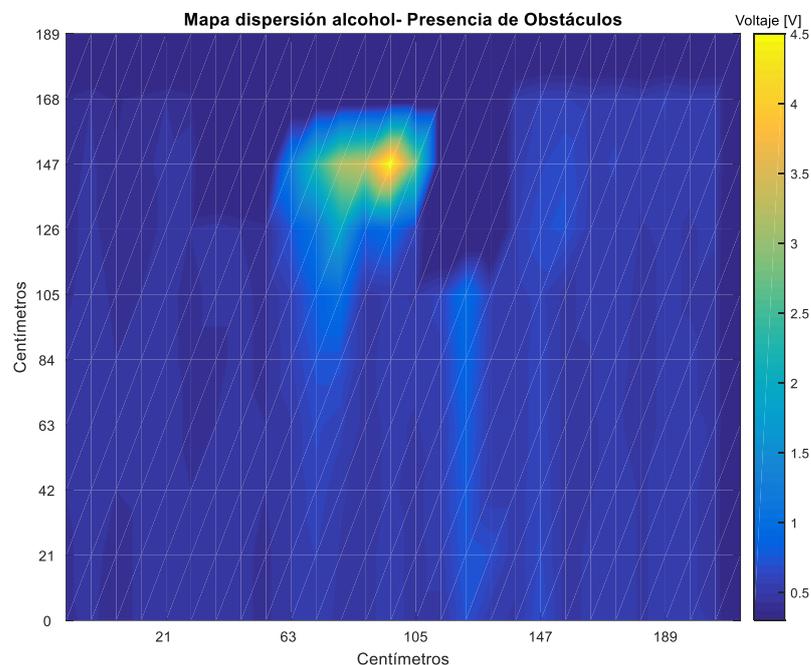


Figura 63. Matriz de difusión 9x27 obtenida para un ambiente con 5 ml de alcohol y con presencia de obstáculos

3.10.3 Mapas de dispersión obtenidos en las experimentaciones

Para la obtención de los 13 mapas de dispersión se empleó una concentración de alcohol de 72 °GL y se trabajó bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura: 21°C y humedad: 68%
- Tiempo estabilización inicial para línea base: 3 minutos
- Tiempo de experimentación: 17 minutos
- Tiempo de limpieza de ambiente: 30 minutos

Se obtuvo un total de 13 mapas de dispersión diferentes, los cuales presentan varias configuraciones. Los primeros mapas representan la dispersión de alcohol en el medio, posteriormente se presentan mapas de dispersión de colonia en el medio. Finalmente se generó un mapa de dispersión con presencia de una perturbación generada por un ventilador. Los mapas obtenidos se muestran a continuación.

3.10.3.1 Mapa 1 - 1 fuente de olor de 5 ml de Alcohol- Presencia de obstáculos

Para el mapa 1 se colocó un volumen de alcohol de 5 ml en un medio con presencia de obstáculos. En la Figura 64 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión con el robot móvil se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 64 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 64 c).

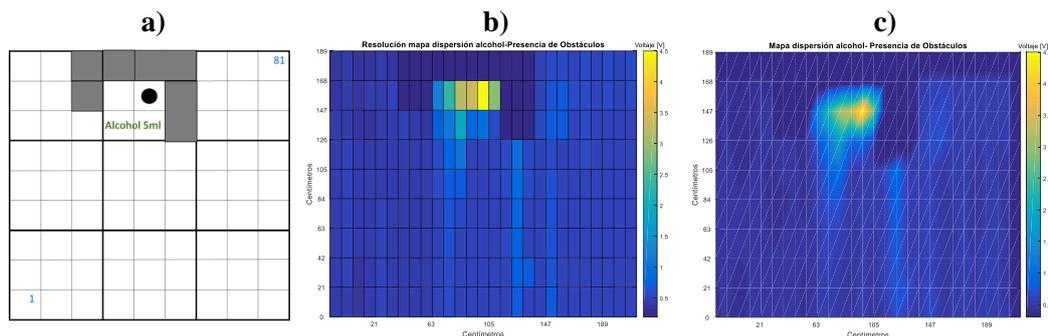


Figura 64. Mapa 1: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

3.10.3.2 Mapa 2 - 1 fuente de olor de 5 ml de alcohol- Sin presencia de obstáculos

Para la obtención del mapa 2 de dispersión se colocó un volumen de 5 ml de alcohol en un medio sin la presencia de obstáculos. En la Figura 65 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión con el robot móvil se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 65 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 65 c).

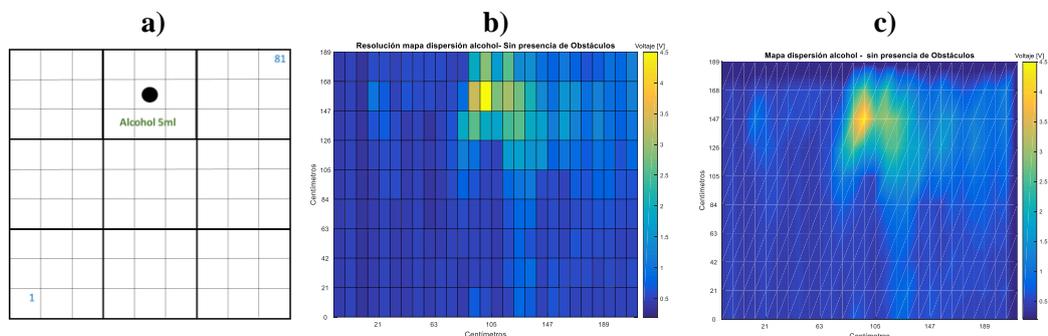


Figura 65. Mapa 2: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

3.10.3.3 Mapa 3 - 2 fuentes de olor de 5 ml de alcohol- Presencia de obstáculos

En el mapa 3 de dispersión se colocó dos volúmenes de alcohol de 5 ml en un medio con presencia obstáculos. En la Figura 66 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión con el robot móvil se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 66 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 66 c).

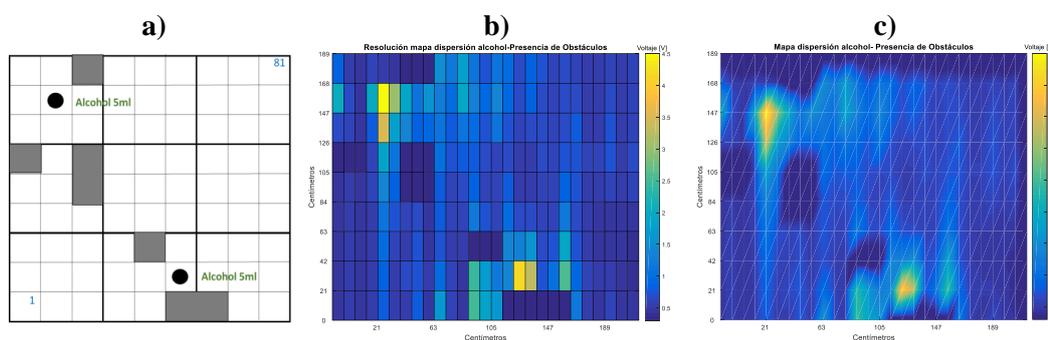


Figura 66. Mapa 3: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

3.10.3.4 Mapa 4 - 2 fuentes de olor de 5 ml de alcohol- Sin presencia de obstáculos

Para la obtención del mapa 4 de dispersión se colocó 2 volúmenes de 5 ml de alcohol en un medio sin la presencia de obstáculos. En la Figura 67 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión con el robot móvil se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 67 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 67 c).

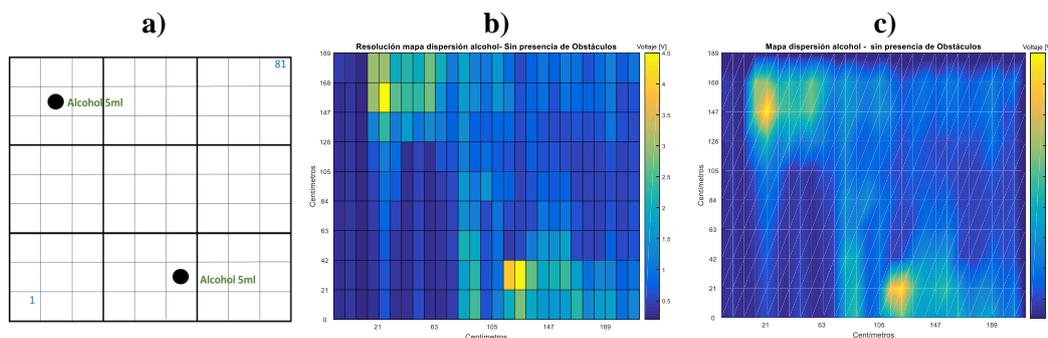


Figura 67. Mapa 4: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

3.10.3.5 Mapa 5 - 3 fuentes de olor de 3, 5 y 10 ml de alcohol- Presencia de obstáculos

En el mapa 5 de dispersión se colocó 3 volúmenes de alcohol de: 3, 5 y 10 ml en un medio con presencia obstáculos. En la Figura 68 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 68 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 68 c).

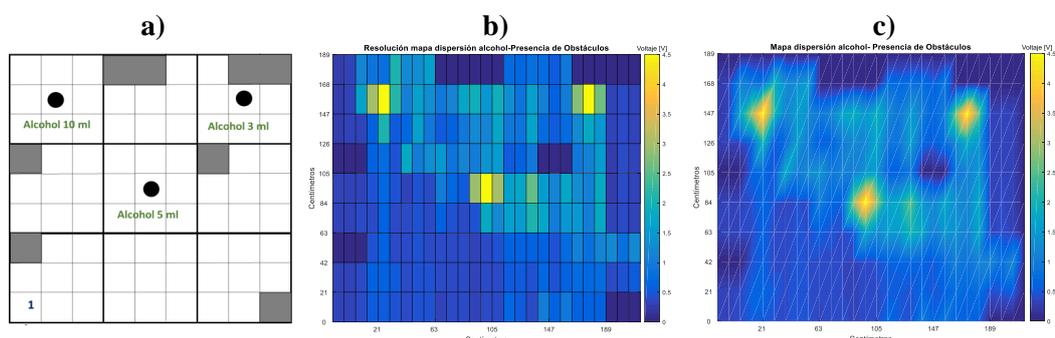


Figura 68. Mapa 5: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

3.10.3.6 Mapa 6 - 3 fuentes de olor de 3, 5 y 10 ml de alcohol- Sin presencia de obstáculos

En el mapa 6 de dispersión se colocó 3 volúmenes de alcohol de 3, 5 y 10 ml en un medio sin presencia obstáculos. En la Figura 69 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 69 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 69 c).

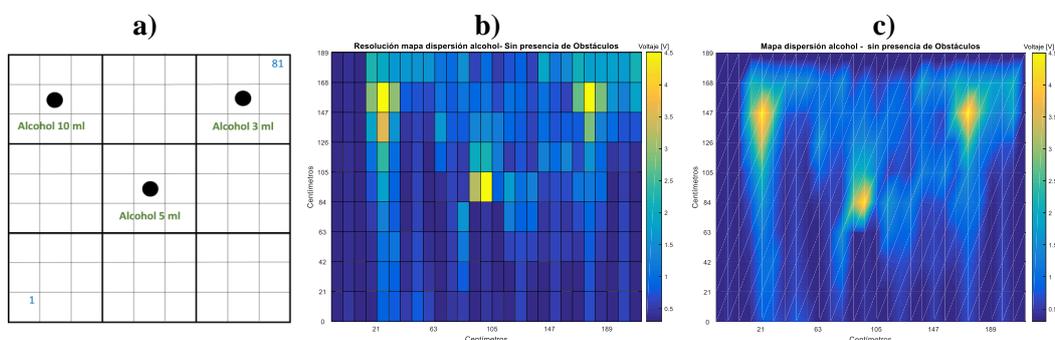


Figura 69. Mapa 6: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

3.10.3.7 Mapa 7 - 3 fuentes de olor de 5 ml de alcohol- Presencia de obstáculos

En el mapa 7 de dispersión se colocó 3 volúmenes de alcohol de 5 ml en un medio con presencia obstáculos. En la Figura 70 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 70 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 70 c).

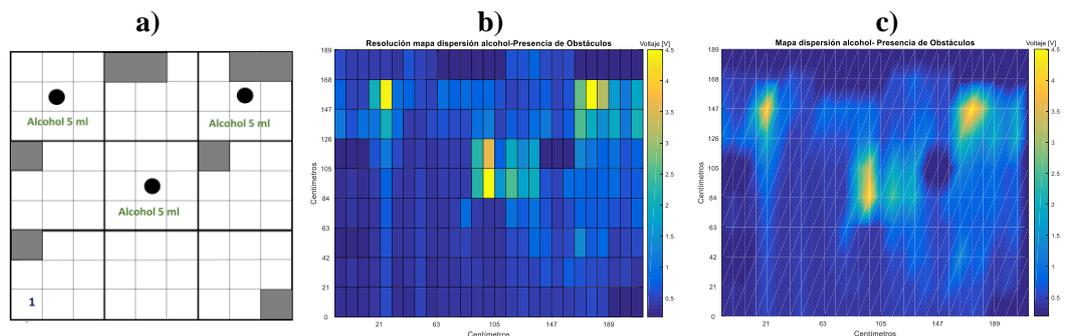


Figura 70. Mapa 7: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

3.10.3.8 Mapa 8 - 3 fuentes de olor de 5 ml de alcohol- Sin presencia de obstáculos

Para la obtención del mapa 8 de dispersión se colocó 3 volúmenes de 5 ml de alcohol en un medio sin la presencia de obstáculos. En la Figura 71 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión con el robot móvil se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 71 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 71 c).

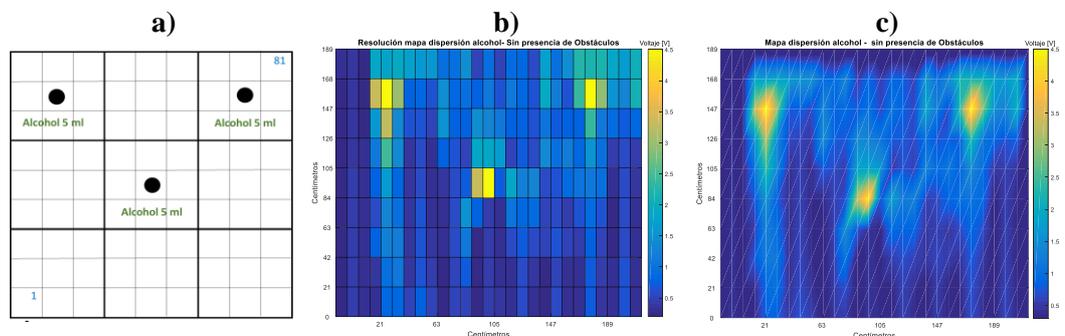


Figura 71. Mapa 8: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

3.10.3.9 Mapa 9 - 3 fuentes de olor de 3, 5 y 10 ml de colonia- Presencia de obstáculos

En el mapa 9 de dispersión se colocó 3 volúmenes de colonia de 3, 5 y 10 ml en un medio con presencia obstáculos. En la Figura 72 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 72 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 72 c).

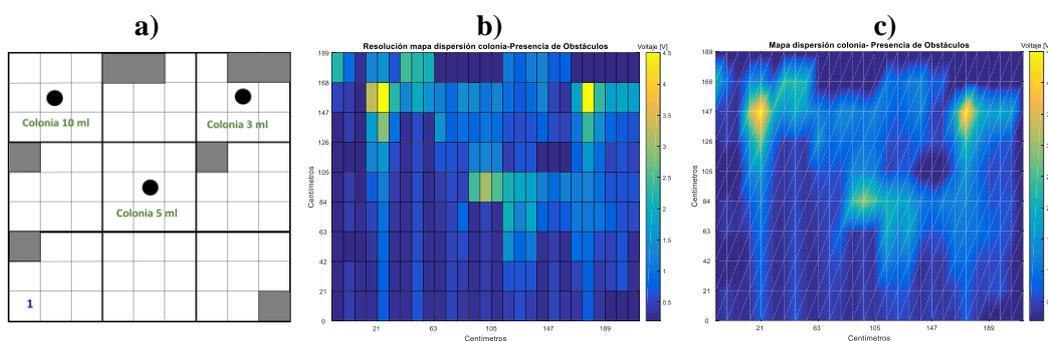


Figura 72. Mapa 9: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

3.10.3.10 Mapa 10 - 3 fuentes de olor de 3, 5 y 10 ml de colonia- Sin presencia de obstáculos

En la obtención del mapa 10 se colocó 3 volúmenes de 3, 5 y 10 ml de alcohol en un medio sin la presencia de obstáculos. En la Figura 73 a) se puede apreciar la configuración del entorno. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 73 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 73 c).

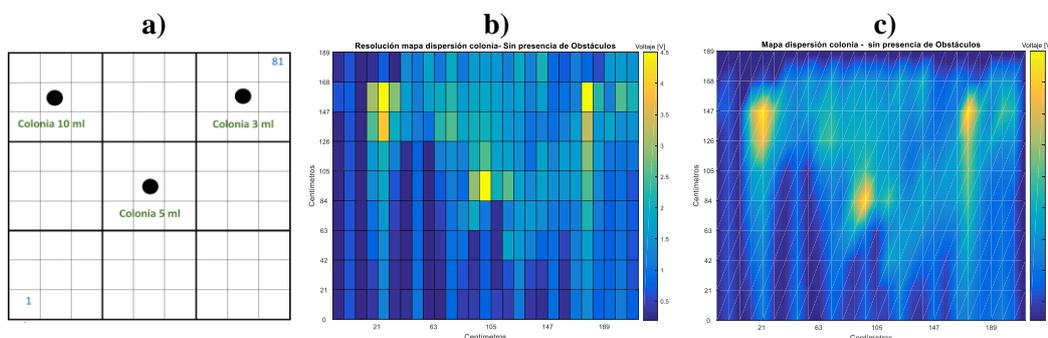


Figura 73. Mapa 10: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

3.10.3.11 Mapa 11 - 1 fuente de olor de 5ml de alcohol y 1 fuente de olor de 5 ml de colonia - Presencia de obstáculos

En el mapa 11 se colocó 2 volúmenes: 5 ml de alcohol y 5 ml de colonia en un medio con presencia obstáculos. En la Figura 74 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 74 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 74 c).

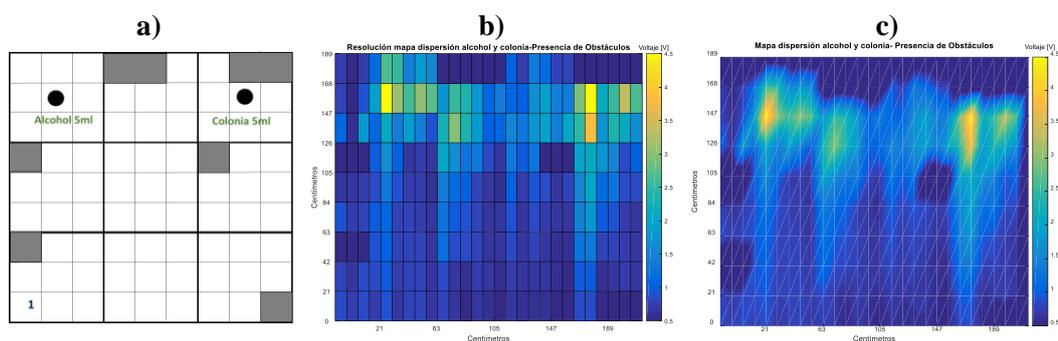


Figura 74. Mapa 11: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

3.10.3.12 Mapa 12 - 1 fuente de olor de 5ml de alcohol y 1 fuente de olor de 5 ml de colonia- Sin presencia de obstáculos

En la obtención del mapa 12 se colocó 2 volúmenes: 5 ml de alcohol y 5 ml de colonia en un medio sin la presencia de obstáculos. En la Figura 75 a) se puede apreciar la configuración del entorno. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 75 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 75 c).

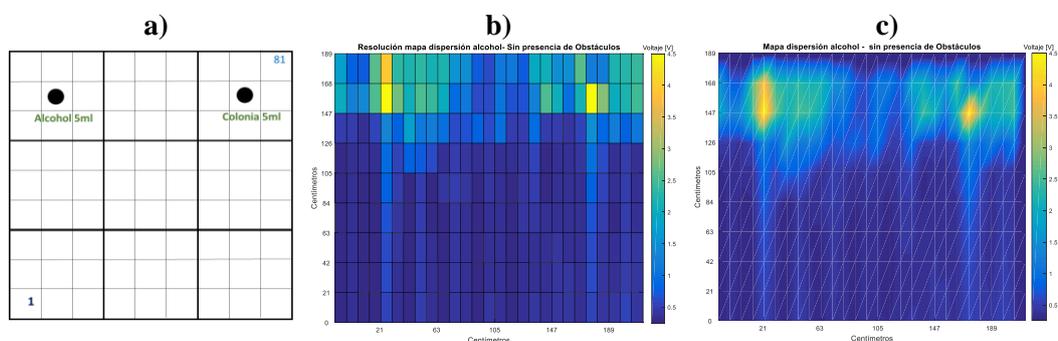


Figura 75. Mapa 12: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

3.10.3.13 Mapa 13 - fuente de olor de 20 ml de alcohol - Sin presencia de obstáculos- Perturbación generada por ventilador

En la obtención del mapa 13 de dispersión se colocó 20 ml de alcohol en un medio sin presencia de obstáculos. Adicional, se colocó un ventilador localizado junto a la fuente de olor provocando perturbaciones a través del flujo de aire. En la Figura 76 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado. Al realizar el levantamiento del mapa de dispersión se obtuvo la matriz de resolución que se puede observar en la Figura 76 b). El mapa de dispersión obtenido en las experimentaciones realizadas se muestra en la Figura 76 c).

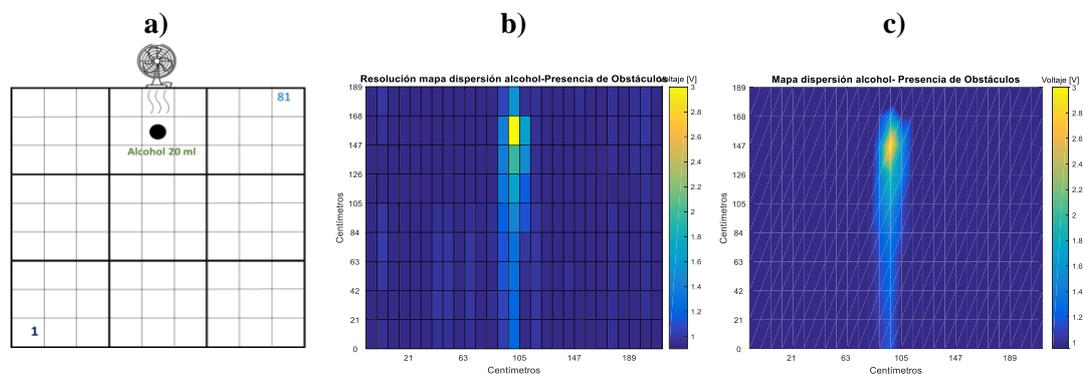


Figura 76. Mapa 13: a) entorno controlado, b) matriz de resolución 9x27, c) mapa de dispersión 9x27

CAPITULO IV

IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE BÚSQUEDA EN ENTORNOS SIMULADOS

En este capítulo se presenta la implementación de algoritmos de búsqueda en entornos simulados. Para eso se empleó el entorno de simulación robótico V-REP, el cual permite evaluar algoritmos mediante la utilización de API's y programación orientada a objetos. Se seleccionó 3 algoritmos de búsqueda de fuentes de olor, los cuales fueron implementados en el lenguaje Python y evaluados mediante simulaciones en las que se utilizaba robots móviles. Los resultados registrados en las simulaciones permitieron conocer parámetros como: tiempo de búsqueda de fuentes de olor, proximidad de cada robot a la fuente detectada y efectividad en la detección de fuentes de olor.

Para replicar los ambientes controlados de los que se obtuvo los mapas de dispersión, el entorno de V-REP permite crear las condiciones necesarias para disponer de escenarios simulados que conserven las características reales de un ambiente. Entre sus características se presenta la posibilidad de cambiar las dimensiones del entorno de trabajo, importar modelos CAD de robots móviles, y cambiar las propiedades de los objetos. Por tal razón, se creó escenarios en el entorno simulado de V-REP, sobre los que se importó varios mapas de dispersión obtenidos para crear entornos simulados con la dispersión de alcohol con y sin presencia de obstáculos.

Además, en los entornos simulados se importó el modelo CAD de la plataforma robótica móvil con configuración diferencial descrito en el Capítulo III. La importación del modelo al entorno de V-REP permite trabajar con robots móviles virtuales que presenten similares características de los robots reales. Al ser desarrollados los escenarios y los modelos de los robots móviles de búsqueda se procedió a realizar pruebas a 3 algoritmos de búsqueda de fuentes de olor: aleatorio, zigzag y guiado. De los algoritmos mencionados se realizaron 10 simulaciones para cada uno de los mapas de dispersión importados en V-REP, evaluando diferentes parámetros.

4.1 Simulación de entornos controlados en V-REP

V-REP es un entorno de simulación para el desarrollo y prueba de algoritmos mediante la utilización de objetos, especialmente robots y presenta al usuario las facilidades para el desarrollo y configuración de entornos. Además, permite realizar la importación de robots modelados en CAD, programación de scripts propios del entorno y la posibilidad de trabajar con interfaces de programación para aplicaciones (API) que permite probar programas realizados en varios lenguajes. A continuación, se presenta a detalle las propiedades del software V-REP, su utilización en el desarrollo de entornos y las configuraciones realizadas para relacionar los entornos de simulación con el software PyCharm.

4.1.1 Plataforma virtual para experimentación con Robots (V-REP)

V-REP es un entorno de desarrollo integrado el cual se basa en una arquitectura de control distribuido y que permite trabajar con objetos o modelos los cuales pueden ser programados, controlados y observados mediante el uso de un Script nativo propio del entorno o a través de un API remoto, proceso similar a trabajar con escenarios realizados en ROS.

V-REP permite el uso de distintos lenguajes para la programación de la técnica de control, entre ellos: C/C++, Python, Java, Lua, Matlab o Octave. Estableciendo para cada uno de estos lenguajes las siguientes características: funciones, parámetros y secuencias que garantizan un adecuado manejo de los objetos o modelos que V-REP proporciona en su interfaz (Coppelia Robotics, 2017).

En la presente investigación se empleó el lenguaje Python, que es lenguaje de propósito general, con licencia de software libre, de código abierto y orientado a objetos, y para su ejecución no necesita de software especializado para ser compilado en cualquier plataforma. Además, permite la conexión con V-REP mediante una aplicación de desarrollo integrado (API), la cual incorpora librerías y líneas de código que permiten trabajar con todos los elementos y funciones disponibles en V-REP.

Además, se desarrolló los algoritmos de búsqueda de fuentes de olor para robots móviles en Python debido a que este lenguaje se encuentra en constante desarrollo y

posee las librerías necesarias para realizar operaciones con cualquier tipo de dato. Los algoritmos desarrollados en Python pueden ser ejecutados y probados en V-REP e implementados en una tarjeta Raspberry PI-3, debido a que los robots de búsqueda utilizan esta tarjeta de procesamiento para cumplir a futuro diversos propósitos, para el caso de esta investigación los robots son dedicados para la exploración y localización de fuentes de olor.

La plataforma empleada para el desarrollo de los algoritmos de búsqueda es JetBrains PyCharm Community Edition 2017.1.3, que es un ambiente de desarrollo integrado (IDE) específicamente para el lenguaje Python. A continuación, se presenta el desarrollo de los modelos de las plataformas robóticas, escenarios y la comunicación entre V-REP y PyCharm.

4.1.2 Desarrollo de Plataformas Robóticas

El software de simulación V-REP presenta un entorno visual que permite importar modelos CAD de software especializado y representarlos a través de formas poligonales para generar formas 3D del modelo. Las plataformas robóticas se desarrollaron en el software SOLIDWORKS 2016 y representadas en V-REP mediante triángulos. El modelo CAD se presenta en la Figura 77.

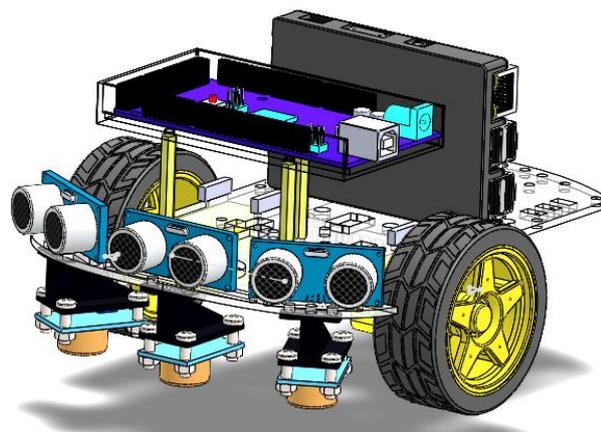


Figura 77. Diseño CAD del robot de detección de fuentes de olor

Todo objeto dentro de la simulación puede ser configurado en base a sus características cinemáticas y dinámicas. Para el caso de los robots móviles se especifican condiciones como: dimensión, peso, momentos de inercia, velocidad de

motores, posición, orientación en el espacio y la posibilidad de configurar sensores de proximidad.

El diseño CAD de la plataforma robótica fue importado a V-REP con una definición de triángulos de 15000 a 20000, la cual es recomendada en los manuales de usuario para conservar las características del robot y disminuir la carga en el procesamiento. De igual manera se definen jerarquías entre los objetos que constituyen al robot como: ruedas, motores, chasis. Estas características serán utilizadas para la programación de los robots. A manera de ejemplo, en la Figura 78, se aprecia el modelo del robot móvil importado como un solo bloque, conservando las características de ensamble del modelo original.

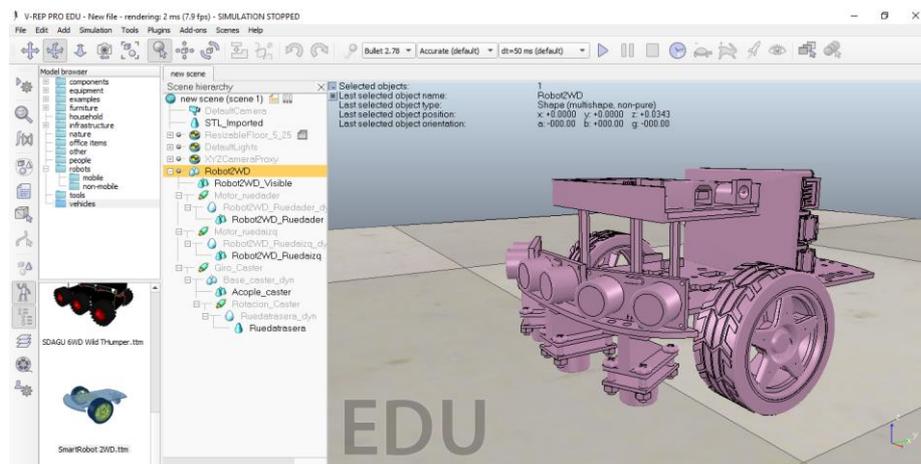


Figura 78. Modelo robot móvil generado para el entorno V-REP

Los modelos de los robots o de las formas que son importadas a V-REP pueden ser guardadas dentro de sus librerías para su posterior utilización mediante las opciones de búsqueda de modelos. Los modelos importados son guardados en formato (*.ttm), y pueden ser cargados en cualquier versión de V-REP. Por cuestiones de coste computacional para las simulaciones se usó el modelo del robot de configuración diferencial más sencillo.

El nivel de detalle de los modelos de los robots dentro del entorno de simulación provoca que los tiempos de simulación aumenten, varíen las trayectorias en robots móviles. En estos casos para tener simulaciones en tiempo real se requiere de un alto procesamiento de datos y de video. En la Figura 79 se presenta el modelo del robot de búsqueda importado inicialmente y el robot más sencillo que fue utilizado para la

realización de las simulaciones y pruebas de los algoritmos de búsqueda de fuentes de olor.

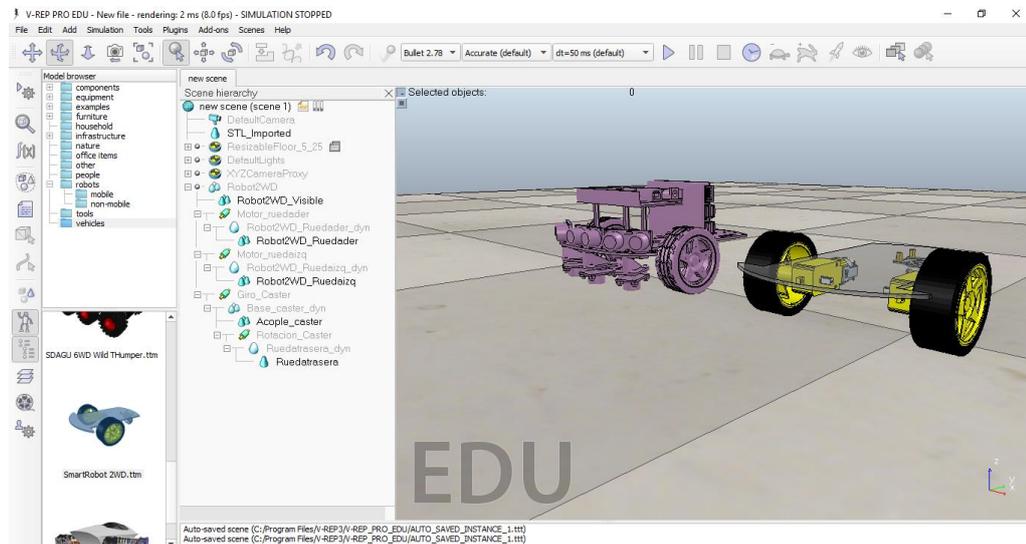


Figura 79. Escena con presencia de distintos modelos importados

Para el modelo del robot utilizado en las simulaciones se implementó: sensores de proximidad para tareas de detección y evasión de objetos, sensores de visión que simulan a los sensores químicos MQ-3, articulaciones rotacionales configuradas para su uso como motores que permitan planificar las trayectorias de búsqueda en base al control de giro y desplazamiento lineal. De esta forma se genera un robot simulado con condiciones similares a las de un robot real.

En V-REP es necesario realizar varias configuraciones a todos los objetos presentes en el entorno de simulación. Las configuraciones permiten establecer propiedades a los objetos para que puedan ser programados o en su defecto ser empleados como elementos que forman parte del escenario. Se configuraron las propiedades cinemáticas y dinámicas de los robots para generar movimientos dentro del entorno.

Los objetos que fueron configurados son los siguientes: chasis, llantas, motores, rueda pivotante, sensores de proximidad y sensores de visión. De igual manera, se configuró características propias de los objetos en V-REP, tales como: máscaras de relación entre objetos para generar colisiones, capacidad de detección, presencia y medición de objetos en el entorno y la definición de masa y momentos de inercia. En la Figura 80 se presentan las configuraciones realizadas.

a)

b)

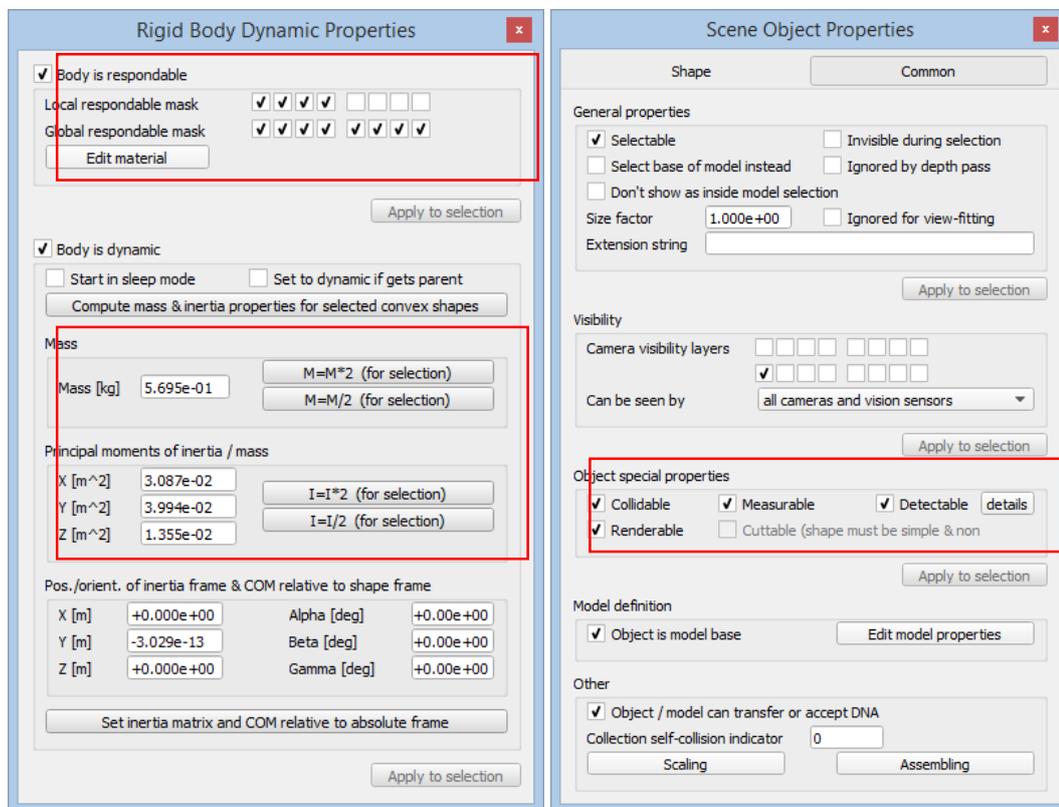


Figura 80. Configuración de objetos en V-REP: a) propiedades cinemáticas y dinámicas, b) propiedades de objetos en el entorno

Los sensores de proximidad de V-REP fueron utilizados para la detección de objetos colocándolos en posiciones adecuadas en el modelo del robot de búsqueda y fueron configurados para tener el comportamiento de un sensor ultrasónico. Las características configuradas fueron las siguientes: dimensiones del sensor, haz de detección, ángulos máximos de cobertura para la detección, distancia mínima y máxima de detección.

Los valores de cada uno de los parámetros fueron configurados en base a las especificaciones técnicas del sensor ultrasónico HC-SR04, el cual será implementado en los robots de búsqueda. Estas configuraciones deben ser validadas en las ventanas de: propiedades de escenas de los objetos, detección de parámetros y detección de volúmenes para cada uno de los 3 sensores de proximidad que fueron montados en el modelo del robot móvil. Las configuraciones de los parámetros realizadas para cada sensor se presentan en la Figura 81.

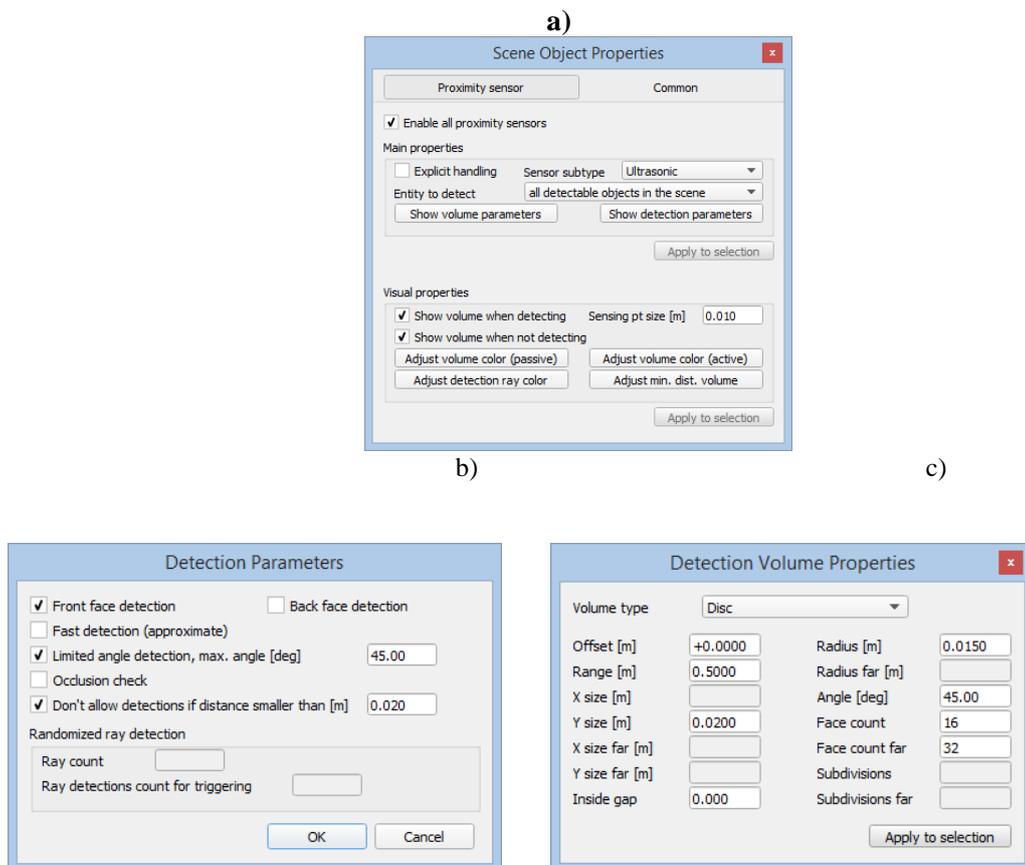


Figura 81. Configuración sensor de proximidad: a) propiedades para la escena, b) parámetros de detección, c) características del funcionamiento del sensor

Para la detección de las fuentes de olor en los mapas de dispersión cargados en el entorno de V-REP se utilizó sensores de visión. Los datos obtenidos de la lectura de estos sensores son representados mediante píxeles de la imagen que se registra. Por tal razón, se decidió cargar imágenes de varios mapas de dispersión en el piso del entorno de V-REP para representar la dispersión de una sustancia. Los sensores de visión registran los datos de los mapas y detectan los cambios de color en la imagen los cuales representan el nivel de concentración de una sustancia en el medio, de esta forma se simula el comportamiento del sensor químico MQ-3.

Los datos obtenidos por cada uno de los sensores de visión se obtienen en formato RGB, por tal razón se tienen 3 valores registrados por un sensor; para disponer de una sola variable en cada registro se decidió transformar la imagen capturada de una escala RGB a una escala de grises que presenta un rango de 0 a 255. Posteriormente se realizaron pruebas con los sensores de visión en los mapas de dispersión cargados en

V-REP para conocer los valores máximos y mínimos detectados, obteniéndose un rango de detección de 55 a 150 para los sensores de visión. Este rango representa el nivel de concentración registrado en los mapas de dispersión que fueron graficados en MATLAB con un rango de 0 a 4,5 V. Para el correcto funcionamiento de estos sensores se configuraron los parámetros que se presentan en la Figura 82.

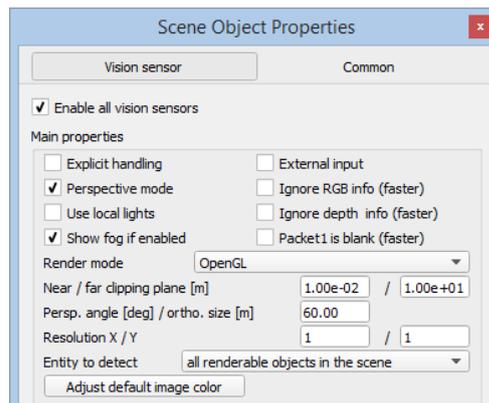


Figura 82. Configuración de propiedades para el sensor de visión

Los actuadores fueron simulados mediante articulaciones rotacionales propias de V-REP y relacionadas a la jerarquía de las llantas de los robots. Estas articulaciones fueron configuradas para representar el comportamiento de un motor real, para lo cual se configuró el máximo torque y velocidad del mismo en las propiedades del robot tal como se muestra en la Figura 83.

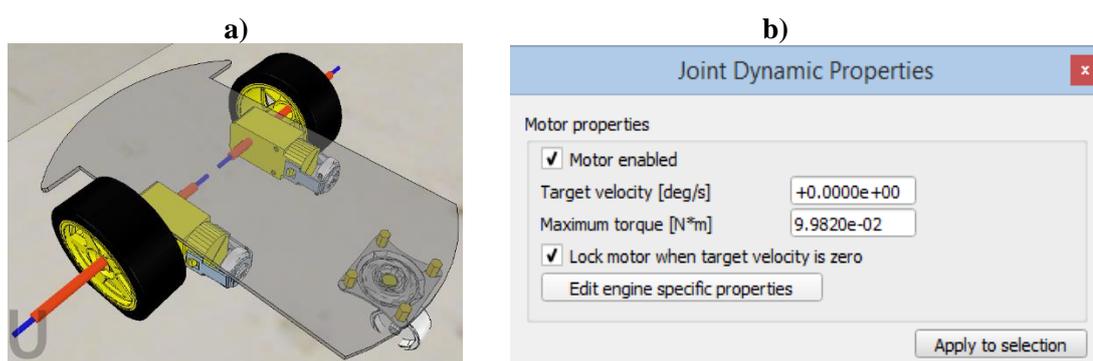


Figura 83. a) Ubicación de articulaciones rotacionales, b) configuración de propiedades dinámicas de las articulaciones rotacionales

El cálculo del torque del motor real que será empleado para los robots móviles en entornos simulados se realiza mediante la Ecuación 4 mostrada a continuación:

$$\text{Torque (kgm)} = \frac{\text{Potencia (HP)} * 716}{\text{Velocidad (RPM)}} \quad (4)$$

Reemplazando los datos de potencia y velocidad de los motores en base a las hojas técnicas se tiene:

$$\text{Torque (kgm)} = \frac{0,00241384 * 716}{170}$$

Los resultados son los siguientes:

$$\text{Torque (kgm)} = 0,01018$$

Al finalizar las configuraciones del modelo de la plataforma robótica móvil se procedió a obtener un objeto base con el cual se replicarán los 3 robots móviles para su posterior simulación. Para la diferenciación entre los agentes se definió un color y posición que permita identificarlos dentro del entorno. El modelo base se presenta en la Figura 84, en la que se puede apreciar la configuración de los sensores de proximidad y de los sensores de visión colocados en el chasis del robot.

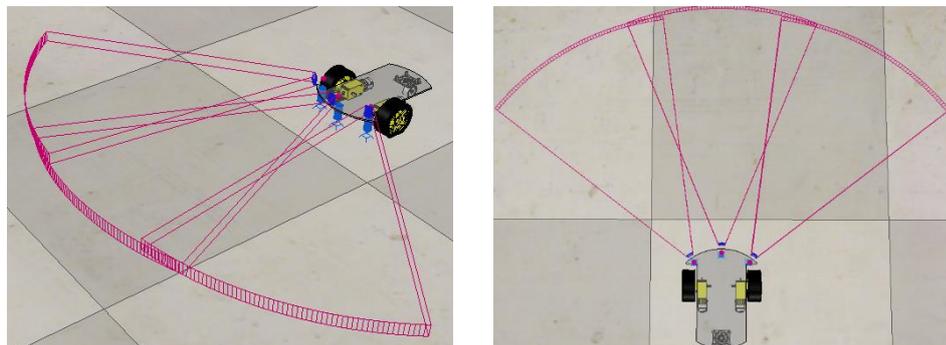


Figura 84. Modelo final de los robots para la simulación

La identificación de cada uno de los 3 robots se presenta en la Tabla 4, en la que se puede observar la nomenclatura y el color usado para cada modelo y la ubicación que le corresponde dentro del entorno de simulación.

Tabla 4
Nomenclatura Robots Simulados

Color en escenario V-REP	Ubicación dentro del Mapa	Nomenclatura
Negro	Izquierda	Robot 0
Blanco	Centro	Robot 1
Rojo	Derecha	Robot 2

La configuración se presenta en la Figura 85.

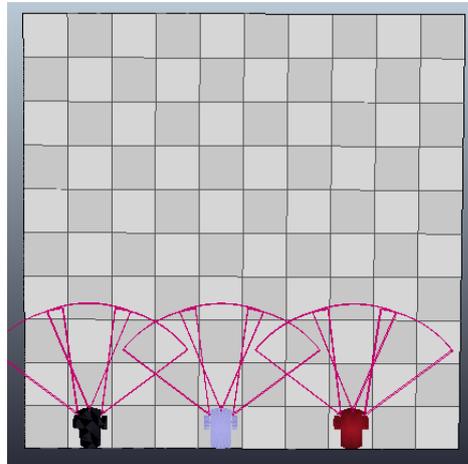


Figura 85. Ubicación inicial de los robots en el entorno V-REP

4.1.3 Simulación de mapas de dispersión

El entorno de V-REP dispone de un espacio de trabajo virtual denominado “*piso*” del cual se puede configurar propiedades como: dimensión, color y textura. Por defecto presenta una configuración de 5 metros de largo por 5 metros de ancho y 100 cuadrículas distribuidas como una matriz de 10x10, lo cual se relaciona con la distribución propuesta para el espacio de trabajo del ambiente controlado definido con una dimensión de 9x9 propuesta para la adquisición de mapas de dispersión. En la Figura 86 se presenta el entorno de V-REP.

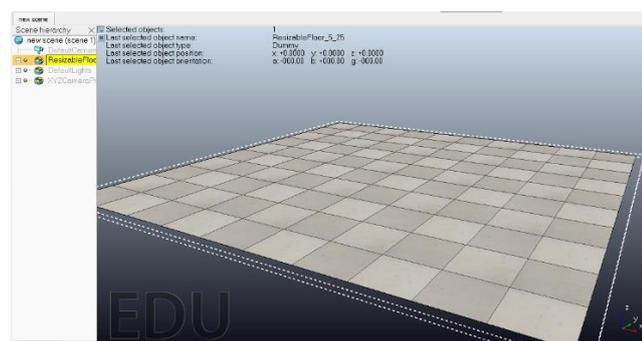


Figura 86. Entorno de simulación en V-REP

La construcción del entorno de simulación se realizó en base a las características establecidas para los diferentes ambientes controlados. Para esto se utiliza las formas pre-establecidas en V-REP tales como: cubos, esferas, cilindros, entre otros. Estas

formas facilitan la construcción de los entornos permitiendo definir obstáculos y límites de frontera de trabajo.

Se configuró las cuadrículas del piso de V-REP con dimensiones de 21cm x 21cm para guardar relación con los cuadrantes definidos en los ambientes controlados de los que se obtuvo los mapas de dispersión, y se importó como una textura del piso cada uno de los mapas generados en MATLAB. A manera de ejemplo, en la Figura 87 se presenta un mapa con 3 fuentes de olor dispersas colocado en el piso de V-REP.

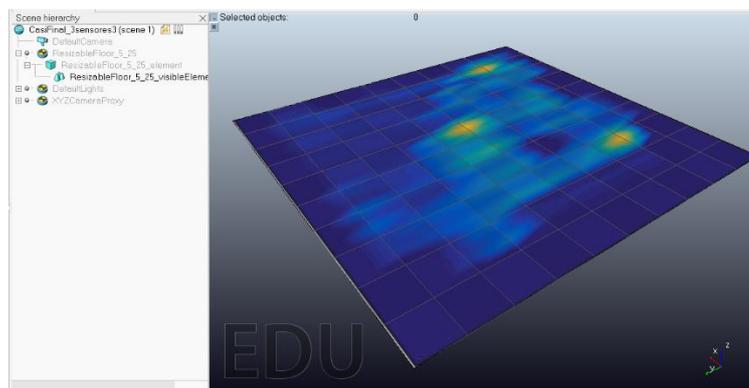


Figura 87. Configuración de mapa de dispersión en el entorno de V-REP

Posteriormente en el entorno de simulación se agregaron obstáculos de acuerdo a las configuraciones de los mapas de dispersión descritos en el Capítulo III, para generar los diferentes escenarios con los que se realizó las simulaciones que permitieron evaluar los algoritmos de búsqueda de fuentes de olor. A manera de ejemplo, en la Figura 88 se presenta un entorno simulado desarrollado.

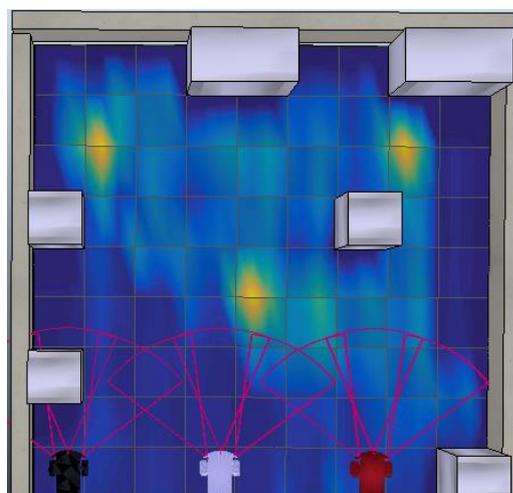


Figura 88. Entorno de simulación desarrollado en V-REP

Se desarrolló entornos simulados para un total de 6 mapas de dispersión que presentaban configuraciones con y sin presencia de obstáculos y con diferente cantidad de muestras de alcohol. Adicional, se desarrolló un entorno de simulación para un mapa de dispersión con presencia de una perturbación generada por un ventilador. Por lo que en total se simuló 7 mapas de dispersión de los ambientes controlados propuestos en el Capítulo III. Estos mapas son los más representativos ya que presentan configuraciones en las que se presentan diferentes volúmenes de los químicos, obstáculos y perturbaciones.

4.1.4 Comunicación de V-REP con IDE para Python

La utilización de la API Remota de V-REP facilita la conexión con JetBrains PyCharm, programa en el que se desarrolló los algoritmos en lenguaje Python debido a que se establece una comunicación asíncrona para el envío y recepción de datos entre las dos aplicaciones. La API Remota está basada en una arquitectura cliente-servidor, en la cual el algoritmo realizado en JetBrains es el cliente encargado de enviar los comandos y recibir información de los objetos en V-REP mediante la utilización de librerías propias del lenguaje Python, mientras que V-REP es el servidor encargado de recibir y ejecutar comandos en base a las peticiones del cliente.

La comunicación para la realización de las simulaciones utiliza la dirección IP de loopback (127.0.0.1), la cual fue configurada en el cliente a través de la función “*vrep.simxStart*”. Para V-REP se define un servidor temporal para la API remota que es iniciado mediante la función “*simExtRemoteApiStart*” declarado en el script nativo de V-REP. En la Figura 89 se presenta un esquema de la comunicación entre las dos aplicaciones.



Figura 89. Comunicación cliente-servidor para V-REP

Una vez definidas las propiedades cinemáticas y dinámicas de los robots móviles, las características del entorno de simulación y la comunicación entre V-REP y PyCharm, se procede a describir los algoritmos de búsqueda desarrollados en lenguaje Python y su posterior simulación en los entornos de V-REP para la obtención de parámetros que permitan evaluar el desempeño de cada uno. A continuación, se presentan los algoritmos desarrollados.

4.2 Algoritmos de búsqueda de fuentes de olor

Los algoritmos de búsqueda que se desarrollaron se basan en la planificación de trayectorias y en el comportamiento animal debido a que el seguimiento de una pluma de olor y detección de fuentes de olor es realizado por muchos insectos los cuales generan trayectorias de búsqueda de fuentes de olor en base a su comportamiento. Los algoritmos desarrollados son: zigzag, aleatorio y guiado. El algoritmo zigzag es un algoritmo bioinspirado enfocado en el seguimiento de la pluma de olor y empleado en la localización de fuentes de olor para áreas grandes. Mientras que los algoritmos: aleatorio y guiado se enfocan en la planificación de trayectorias para el objetivo de búsqueda que es la localización de sustancias químicas. A continuación, se describen los algoritmos de búsqueda propuestos.

4.2.1 Algoritmo Zigzag

El algoritmo se basa en la generación de trayectorias zigzag que permitan realizar el seguimiento a la pluma de olor, para esto se generan trayectorias rectilíneas y se cambia la dirección de las mismas dependiendo de los niveles de concentración detectados por los sensores químicos MQ-3. Cuando el robot se aproxima a niveles cercanos a la fuente de olor se reduce la distancia recorrida por el robot en cada tramo rectilíneo aumentando el número de giros hasta localizar la fuente de olor y posicionarse sobre esta.

4.2.1.1 Funcionamiento

La detección de una fuente de olor depende de la dirección de la dispersión con la que se propaga el alcohol o la colonia en el medio. Para esto se hace el seguimiento de

la pluma de olor abarcando todas las posibles áreas sobre las que se encuentre dispersa la sustancia mediante trayectorias en zigzag. Se termina la generación de la trayectoria zigzag en el momento en el que el robot detecta una fuente de olor. En la Figura 90 se muestra el funcionamiento del algoritmo.

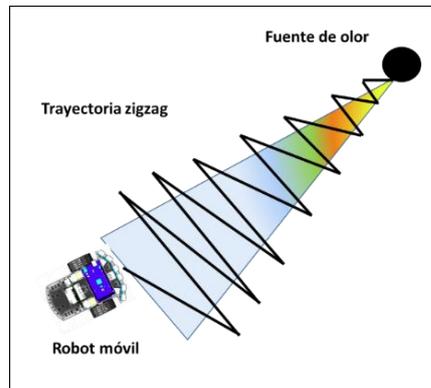


Figura 90. Trayectoria zigzag planificada

La ejecución de este algoritmo considera la asignación de un espacio de cobertura a cada robot dentro del entorno explorando una mayor área. La planificación de trayectoria y navegación autónoma realizada por el robot considera la evasión de obstáculos y la detección de fronteras del espacio de trabajo, por lo que los robots ajustan su trayectoria zigzag hasta encontrar un espacio libre de objetos.

Si los sensores MQ-3 detectan niveles medios y altos de concentración de la sustancia química en el sentido en el que el robot este avanzando se mantiene la misma dirección, pero si la concentración se reduce se modifica su orientación con un ángulo de 150° en sentido horario o antihorario dependiendo del giro que corresponda en ese momento para generar la trayectoria zigzag. Debido a esto las iteraciones necesarias requieren mayor tiempo de navegación.

4.2.1.2 Diagrama de flujo

La lógica de programación para este algoritmo se muestra en la Figura 91, en la que se representa la secuencia comparativa de los niveles de detección y las comprobaciones que se realizan relacionadas con la detección del máximo nivel de concentración. Además, se analiza la posibilidad de colisión y la detección de fronteras

de decisión que enmarcan la zona explorada tales como: esquinas o límites del espacio de trabajo permitiendo ajustar una nueva trayectoria.

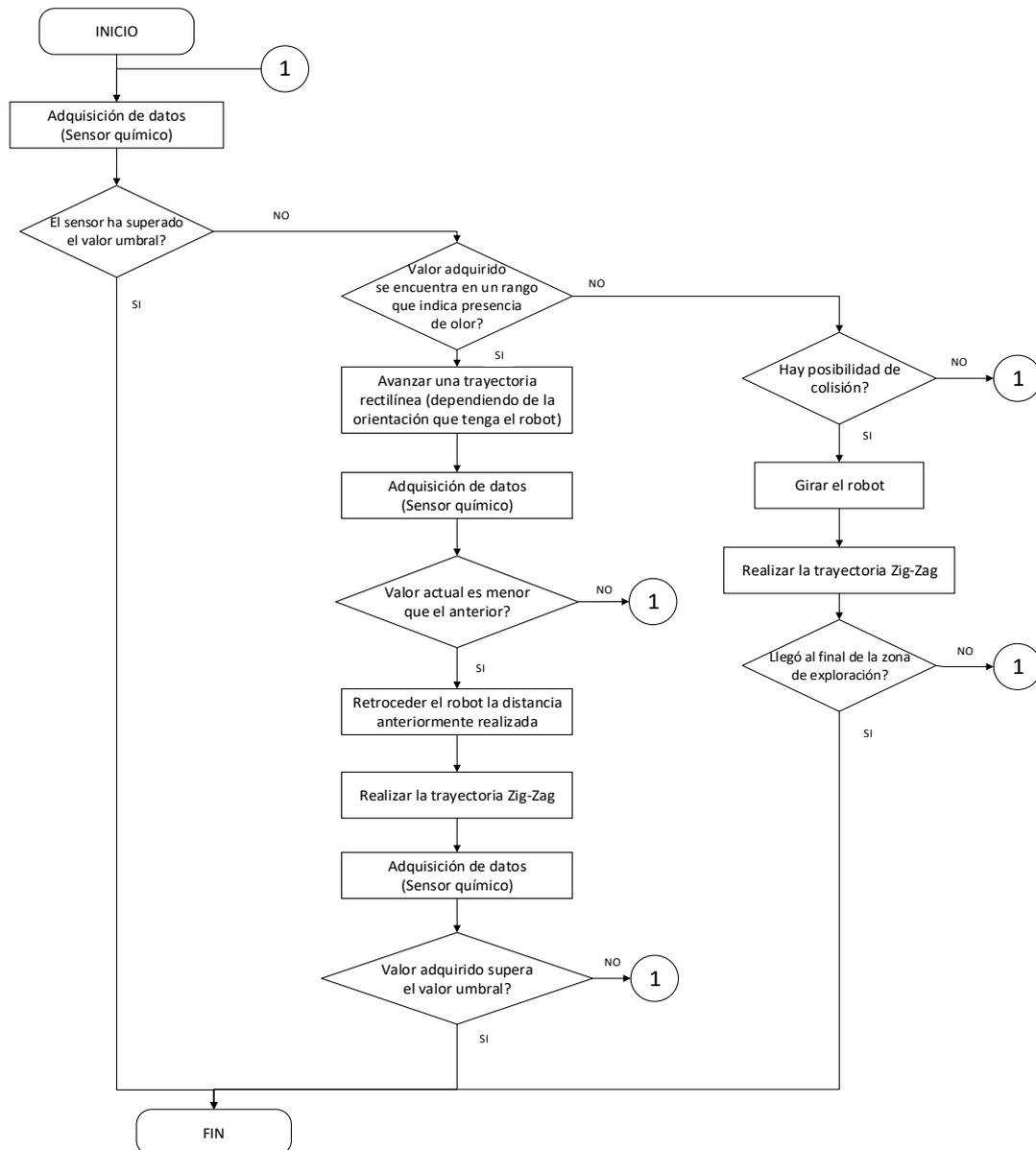


Figura 91. Diagrama de flujo algoritmo Zigzag

4.2.2 Algoritmo aleatorio

El algoritmo aleatorio se desarrolló bajo el principio de navegación autónoma de forma aleatoria en entornos desconocidos y fue aplicado en la búsqueda de olores en base a la exploración. Para esto se generaron trayectorias rectilíneas que permitan navegar al robot en el entorno hasta localizar la fuente de olor, considerando la evasión de obstáculos.

4.2.2.1 Funcionamiento

Las trayectorias por defecto generadas inicialmente son rectilíneas de 10 cm para el caso en el que el robot se encuentre lejos de una fuente de olor. Para el caso en el que el robot se encuentre próximo a la detección de una fuente de olor las trayectorias rectilíneas varían de 5 cm a 2 cm hasta localizar la fuente de olor y posicionarse sobre esta.

Si no existe detección de la sustancia química se originan dos posibles situaciones, estas son: la primera considera si existe presencia de un obstáculo el robot modifica su orientación girando en sentido horario o antihorario con un ángulo de 30° dependiendo del sensor ultrasónico izquierdo o derecho respectivamente, mientras que si el obstáculo se encuentra al frente realiza un giro de 90° . La segunda considera la ejecución de 7 ciclos, en el cual al cumplirse estos el robot cambia su orientación en sentido horario o antihorario aleatoriamente en un rango entre 30° y 60° .

En el caso de detección de sustancias químicas el robot mantiene una trayectoria rectilínea reduciendo únicamente su desplazamiento y velocidad hasta encontrar niveles de concentración altos que permitan localizar la fuente de olor dentro del entorno. En la Figura 92 se aprecia el funcionamiento del algoritmo en un entorno con presencia de obstáculos.

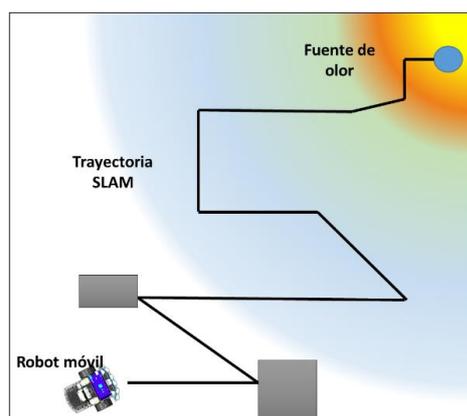


Figura 92. Trayectoria aleatoria planificada

4.2.2.2 Diagrama de flujo

La lógica de programación para el algoritmo aleatorio se muestra en la Figura 93, en la que se observa de forma ordenada las validaciones y la generación de trayectorias

para los niveles de detección mencionados, el algoritmo realiza 3 comprobaciones relacionadas con detección de nivel de concentración, posibilidad de colisión y tiempo de duración de la trayectoria.

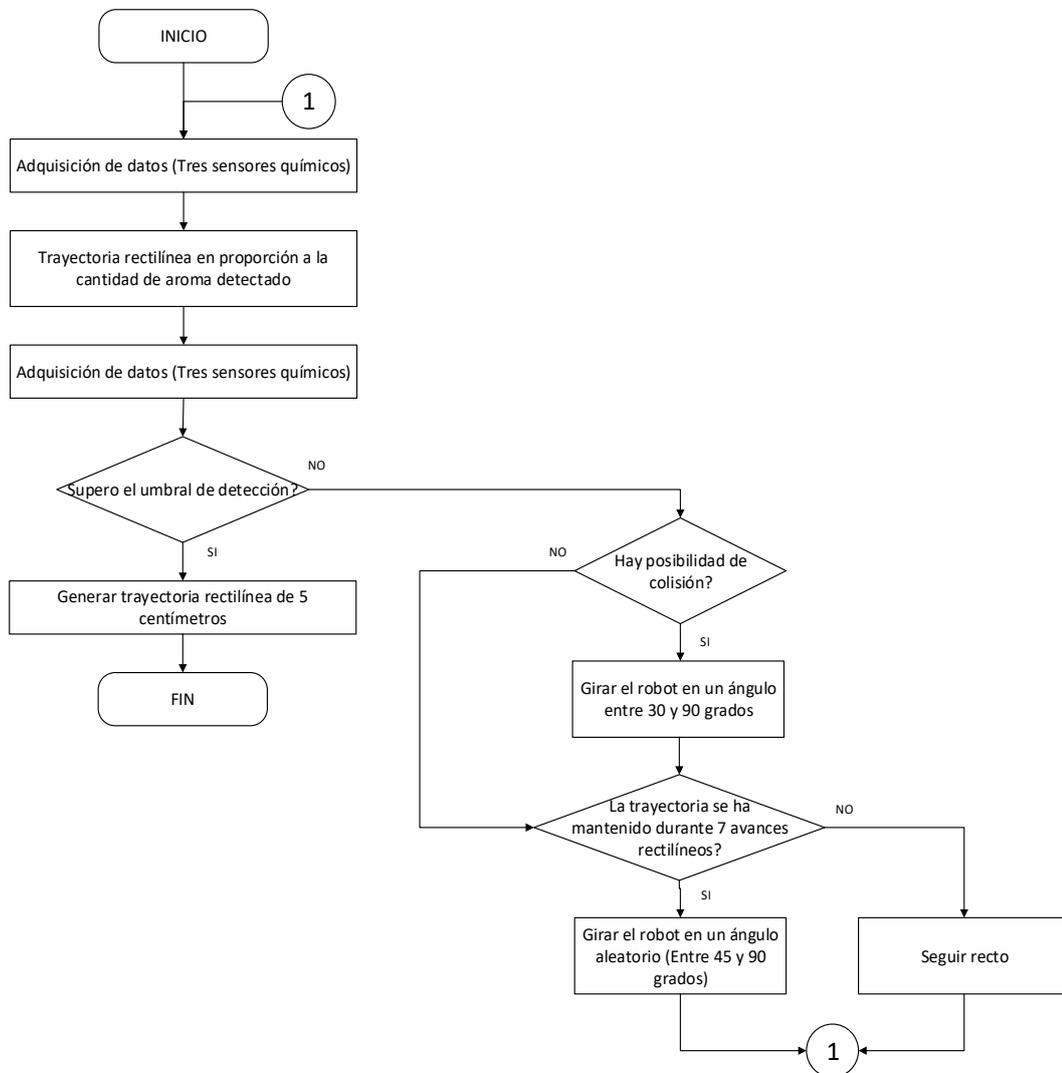


Figura 93. Diagrama de flujo algoritmo aleatorio

4.2.3 Algoritmo Guiado (Odor Tracking 2WD)

El algoritmo se basa en el seguimiento de la pluma de olor y en la generación de trayectorias rectilíneas que permitan al robot acercarse a la sustancia química. Para esto la orientación y navegación del robot depende del nivel de detección que pueda tener cualquiera de los 3 sensores implementados en las plataformas robóticas. Los

niveles de concentración determinarán los giros hacia la izquierda y derecha o el avance rectilíneo del robot.

4.2.3.1 Funcionamiento

El funcionamiento del algoritmo se basa en los niveles de concentración detectados por los 3 sensores MQ-3 modificando su orientación en base a las lecturas obtenidas de cada uno. Si no existe detección de la sustancia química y existe presencia de un obstáculo el robot cambia su orientación girando en sentido horario o antihorario con un ángulo de 30° dependiendo del valor de detección del sensor ultrasónico izquierdo o derecho respectivamente, mientras que si el obstáculo se encuentra al frente del robot realiza un giro de 90° , esto depende del sensor ultrasónico central.

En el caso en el que los sensores MQ-3 detecten niveles de concentración medios o altos de la sustancia química, el robot modifica su orientación en sentido horario o antihorario con ángulos de 15° y 30° , esto depende de la proximidad del robot a la sustancia y de la lectura de cada sensor MQ-3 izquierdo y derecho. La finalidad de esta operación es la de mantener al sensor químico del centro normal a la ubicación de la fuente, de esta forma el robot únicamente realiza trayectorias rectilíneas que irán reduciéndose hasta encontrar la fuente con desplazamientos de 10 cm hasta 2 cm. En caso de presentarse obstáculos cercanos a la fuente de olor, el robot se aproxima a la fuente de olor sin importar las colisiones que puedan presentarse. En la Figura 94 se observa el funcionamiento del algoritmo. Los niveles de concentración de la sustancia son diferenciados por colores y se muestran las trayectorias realizadas por el robot.

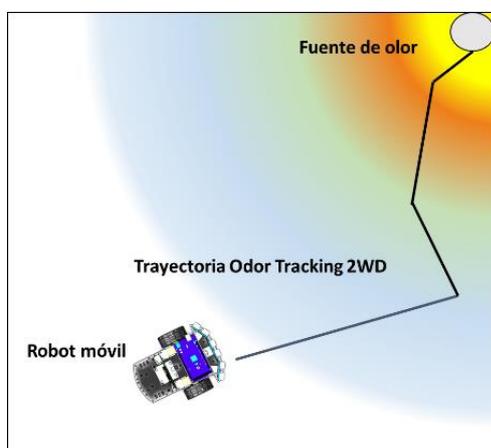


Figura 94. Trayectoria Odor Tracking 2WD planificada

4.2.3.2 Diagrama de flujo

El diagrama de flujo del funcionamiento del algoritmo Odor tracking 2WD se muestra en la Figura 95, que representa la adquisición de datos de los sensores químicos MQ-3, las validaciones y comprobaciones que se realizan dependiendo del nivel de concentración de sustancia detectado, posibilidad de colisión con obstáculos y con fronteras de decisión tales como esquinas o límites del espacio de trabajo.

Cuando los niveles de concentración son altos y superan el valor pico de detección se ejecuta una subrutina dentro del algoritmo denominada: Odor Tracking 2WD, la cual permite realizar los cambios de orientación y los desplazamientos rectilíneos que permitan al robot localizar y posicionarse sobre la fuente de olor.

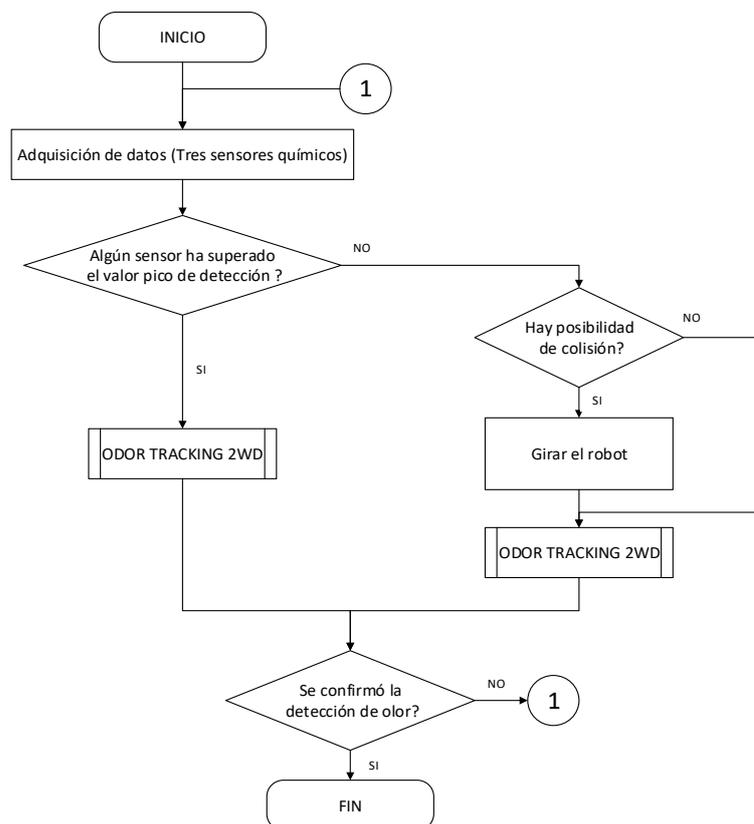


Figura 95. Diagrama de flujo algoritmo Odor Tracking 2WD

En la Figura 96 se presenta el diagrama de flujo de la subrutina Odor Tracking 2WD que permite ejecutar los giros especificados para cada nivel de detección y que varían entre 15° hasta 30°. En el caso de que los niveles de detección sean valores similares

a los de línea base el robot avanza de forma rectilínea hasta encontrar un obstáculo o una fuente de olor. Si los niveles de detección de son altos el robot termina su exploración y envía una señal de alerta indicado que la detección de la sustancia fue efectiva.

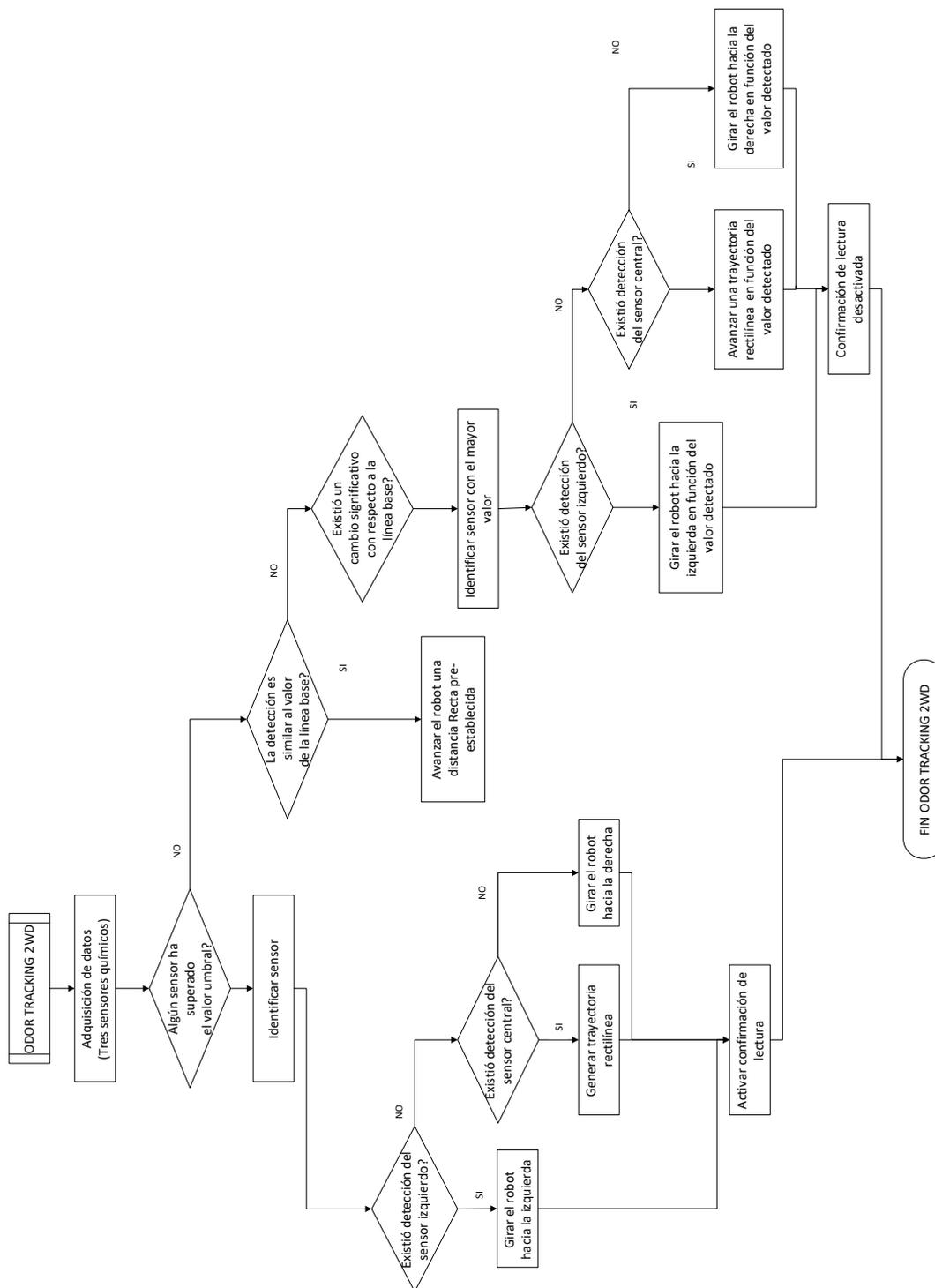


Figura 96. Diagrama de flujo subrutina Odor Tracking 2WD

4.3 Pruebas realizadas a los algoritmos en entornos simulados

Las pruebas realizadas para los algoritmos: zigzag, aleatorio y Odor Tracking 2WD se realizaron en los escenarios desarrollados en el entorno de simulación V-REP. Para esto se realizaron 10 simulaciones para cada uno de los escenarios con la finalidad de conocer la respuesta de los algoritmos frente a las diferentes condiciones de ambientes controlados.

Para cada algoritmo se utilizó la información proveniente de los sensores de visión, los cuales capturan a través de una imagen con resolución configurable las características del color del mapa de dispersión que se está detectando, para las simulaciones se empleó un pixel en cada captura. Los valores capturados son enviados al algoritmo que se esté ejecutando y transformados de una escala RGB a una escala de grises obteniendo un solo valor y generando una relación lineal entre el color detectado y el valor enviado.

Los datos obtenidos de los sensores de visión de los mapas de dispersión se encontraban en el rango de 55 a 150 en la escala de grises, y debido a la aleatoriedad que presentan los sensores químicos MQ-3 frente a la detección de sustancias, se decidió normalizar este rango de detección a un rango de 0 a 1. Para la normalización se decidió obtener una ecuación lineal que relacione los dos rangos. Empleando las ecuaciones de primer orden que permiten obtener la ecuación de una recta, se obtuvo el valor de la pendiente de 0,011 y el valor de la ordenada al origen de 0,66. La ecuación de la recta obtenida se presenta en la Ecuación 5.

$$V_{\text{Norm}} = 0,011 \cdot V_{\text{escala de grises}} - 0,66 \quad (5)$$

En donde:

- V_{Norm} : Valor normalizado entre 0 a 1
- $V_{\text{escala de grises}}$: Valor del sensor de visión en escala de grises

Los valores normalizados de la lectura de los sensores de visión entre 0 a 1 permitieron establecer niveles de detección, con estos valores se realizó la programación de los algoritmos de búsqueda y la planificación de la trayectoria. En la

Tabla 5 se presentan los rangos de detección establecidos para los 3 sensores de cada robot móvil.

Los sensores de visión no presentan cambios en sus valores de detección debido a que se consideran condiciones ideales de su funcionamiento, mientras que los niveles de detección de los sensores MQ-3 varían para cada robot. Los niveles de detección para los sensores de visión fueron establecidos en 3 rangos, especificados como: baja, media y alta detección sobre los cuales cada algoritmo de búsqueda ejecuta acciones de control en los robots móviles para localizar una fuente de olor.

Tabla 5
Rangos de detección sensores de visión para los robots simulados

Robot	Sensores de visión	Rango de Detección establecidos		
		Baja detección	Media Detección	Alta Detección
0, 1 y 2	Izquierdo-Centro-Derecho	$x \leq 0,50$	$0,50 < x < 0,80$	$x \geq 0,80$

En base a los datos registrados en la Tabla 5 se implementó los niveles de detección para los algoritmos: zigzag, aleatorio y guiado. Se realizó las simulaciones para varios mapas de dispersión que representan las configuraciones de ambientes controlados descritas en el Capítulo III.

Para cada ambiente se realizaron 10 simulaciones en las que se probó los 3 algoritmos de búsqueda propuestos, obteniéndose los siguientes parámetros: tiempo de simulación que representa el tiempo de exploración de los robots hasta localizar la mayor cantidad de sustancias presentes, la proximidad de los robots a una sustancia terminado el tiempo de simulación y la efectividad en la detección de todas las sustancias químicas presentes en el entorno simulado.

Al finalizar las simulaciones para cada uno de los algoritmos probados en los diferentes mapas de dispersión propuestos, se registró una base de datos con los resultados obtenidos. Debido a la aleatoriedad que se presenta en la planificación de trayectorias de cada uno de los algoritmos para los robots móviles se determinó: media (\bar{x}), desviación estándar (σ) y los valores máximos (Max) y mínimos (Min) para cada uno de los parámetros mencionados. A continuación, se presentan las pruebas realizadas para los mapas de dispersión y los resultados obtenidos mediante tablas.

4.3.1 Simulación mapa 1- 5ml de alcohol-Presencia de obstáculos

El mapa 1 presenta la dispersión de una fuente de olor de 5ml de alcohol. En la Figura 97 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado para este mapa. En la Figura 97 b) se muestra el entorno simulado desarrollado en V-REP con la presencia de obstáculos y el mapa de dispersión de la fuente de olor correspondiente. La simulación de uno de los algoritmos de búsqueda se observa en la Figura 97 c), en la cual los robots se encuentran realizando tareas de navegación y búsqueda de la fuente de olor. Para la Figura 97 d) un robot de búsqueda localizó la fuente de olor presente en el ambiente, mientras los demás continúan explorando hasta terminar el tiempo máximo establecido para las simulaciones.

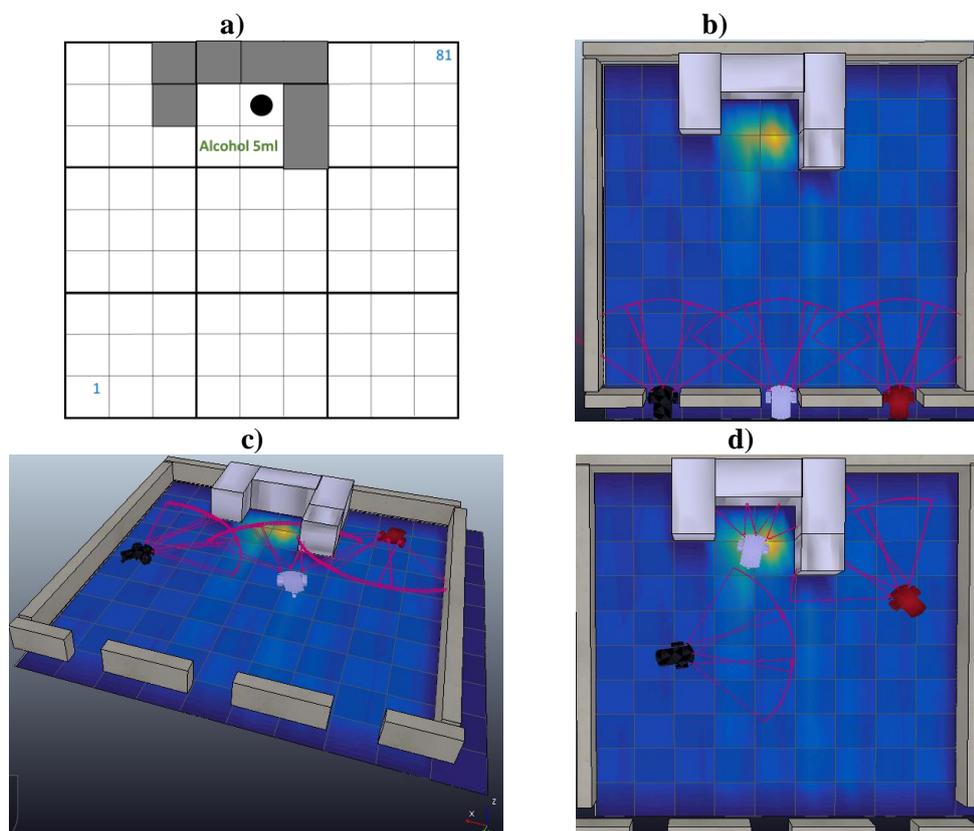


Figura 97. Simulación del Mapa 1: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor, d) localización de fuente de olor

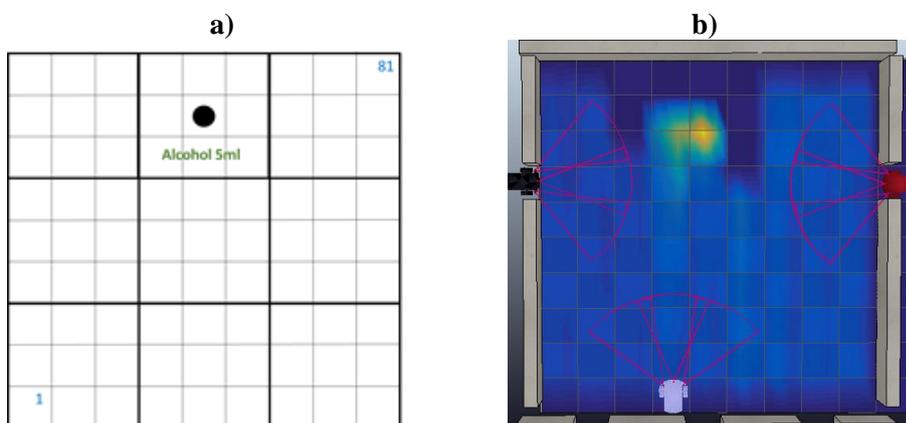
Los resultados obtenidos para las simulaciones realizadas para el Mapa 1 se presentan a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6
Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas en V-REP en el Mapa 1 con presencia de obstáculos

Parámetro	Robot	Aleatorio			Zigzag			Odor Tracking 2WD		
		$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min
Distancia del robot a fuente (cm)	0	89,8±38,5	159	61	65,0±1,9	67	63	58,6±39,2	103	5
	1	78,0±67,1	159	5	9,5±1,6	10	5	19,0±29,5	75	5
	2	56,2±66,1	163	5	64,0±1,3	65	62	84,8±30,5	132	42
Tiempo de simulación (s)	Todos	540±332	1020	250	989±245	1452	840	146±32	193	125
Número de fuentes localizadas	0	0			0			2		
	1	4			10			8		
	2	6			0			0		
Fuentes encontradas	Total	10/10			10/10			10/10		
	%	100,00%			100,00%			100,00%		

4.3.2 Simulación mapa 2 - 5ml de alcohol-Sin presencia de obstáculos

Para la simulación del mapa 2 se representa la dispersión de una fuente de olor de 5ml de alcohol sin presencia de obstáculos. En la Figura 98 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado para este mapa. En la Figura 98 b) se muestra el entorno simulado desarrollado en V-REP y el mapa de dispersión de la fuente de olor correspondiente. La simulación de uno de los algoritmos de búsqueda se observa en la Figura 98 c). Para la Figura 98 d) se presenta un robot de búsqueda que localizó la fuente de olor presente en el ambiente sin obstáculos, mientras los demás continúan explorando el entorno hasta terminar el tiempo máximo establecido para las simulaciones.



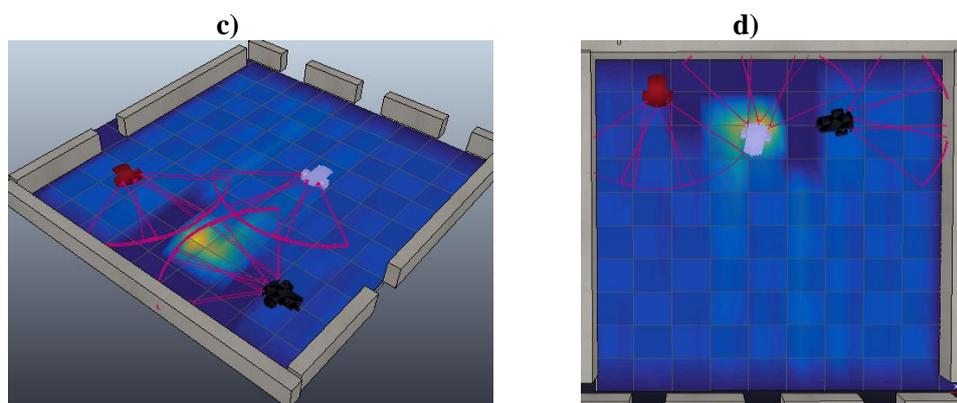


Figura 98. Simulación del Mapa 2: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor, d) localización de fuente de olor

Los resultados obtenidos se presentan a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7

Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas para el Mapa 2

Parámetro	Robot	Aleatorio			Zigzag			Odor Tracking 2WD		
		$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min
Distancia del robot a fuente (cm)	0	77,8±48,5	169	46	64,6±1,6	67	63	65,0±44,7	132	0
	1	66,8±51,6	132	10	11,2±5,6	21	5	34,0±37,6	75	0
	2	51,6±55,9	120	5	64,6±1,6	67	63	58,0±53,2	137	0
Tiempo de simulación (s)	Todos	498 ± 427	1200	150	883±94	1056	803	192±104	382	107
Número de fuentes localizadas	0	0			0			2		
	1	2			10			4		
	2	6			0			4		
Fuentes encontradas	Total	8/10			10/10			10/10		
	%	80,00%			100,00%			100,00%		

4.3.3 Simulación mapa 3 - 2 fuentes de 5ml de alcohol-Presencia de obstáculos

El mapa 3 presenta la dispersión de 2 fuentes de olor de 5 ml de alcohol. En la Figura 99 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado para este mapa. En la Figura 99 b) se muestra el entorno simulado desarrollado en V-REP con la presencia de obstáculos y el mapa de dispersión de las 2 fuentes de olor. La simulación de uno de los algoritmos de búsqueda se observa en la Figura 99 c). Para la Figura 99 d) se presenta la detección de las 2 fuentes de olor presentes en el ambiente.

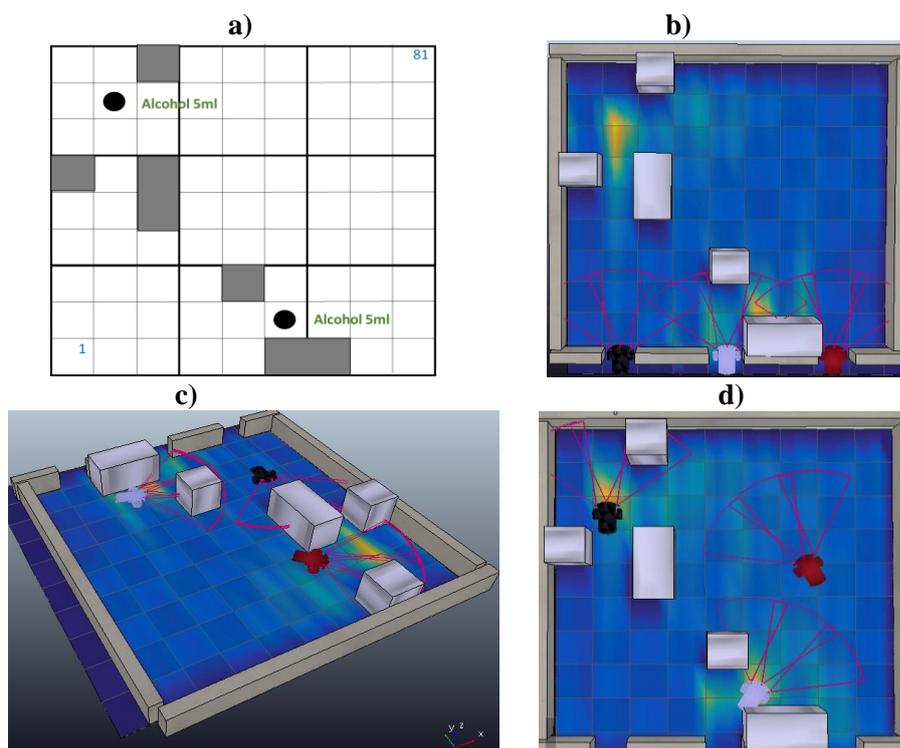


Figura 99. Simulación del Mapa 3: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor, d) localización de 2 fuentes de olor

Los resultados se presentan a continuación en la Tabla 8.

Tabla 8
Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas en V-REP en el Mapa 3 con presencia de obstáculos

Parámetro	Robot	Aleatorio			Zigzag			Odor Tracking 2WD		
		$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min
Distancia del robot a fuente (cm)	0	64,0±49,5	107	5	11,2±5,6	21	5	76,1±58,6	130	5
	1	60,4±49,5	110	5	12,4±7,6	21	5	31,4±42,1	105	0
	2	21,8±27,6	74	5	34,6±27,6	80	5	26,4±53,1	127	0
Tiempo de simulación (s)	Todos	1088±145	1200	940	734±98	915	665	602±516	1200	140
Número de fuentes localizadas	0	0			10			4		
	1	4			6			6		
	2	8			2			8		
Fuentes encontradas	Total	12/20			18/20			18/20		
	%	60,00%			90,00%			90,00%		

4.3.4 Simulación mapa 4 - 2 fuentes de 5ml de alcohol- Sin presencia de obstáculos

Para la simulación del mapa 4 se presenta la dispersión de 2 fuentes de olor de 5ml de alcohol sin presencia de obstáculos. En la Figura 100 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado para este mapa. En la Figura 100 b) se muestra el entorno simulado desarrollado en V-REP y el mapa de dispersión de las fuentes de olor correspondientes. La simulación de uno de los algoritmos de búsqueda se observa en la Figura 100 c). Para la Figura 100 d) se presenta la detección de las 2 fuentes de olor presentes en el ambiente.

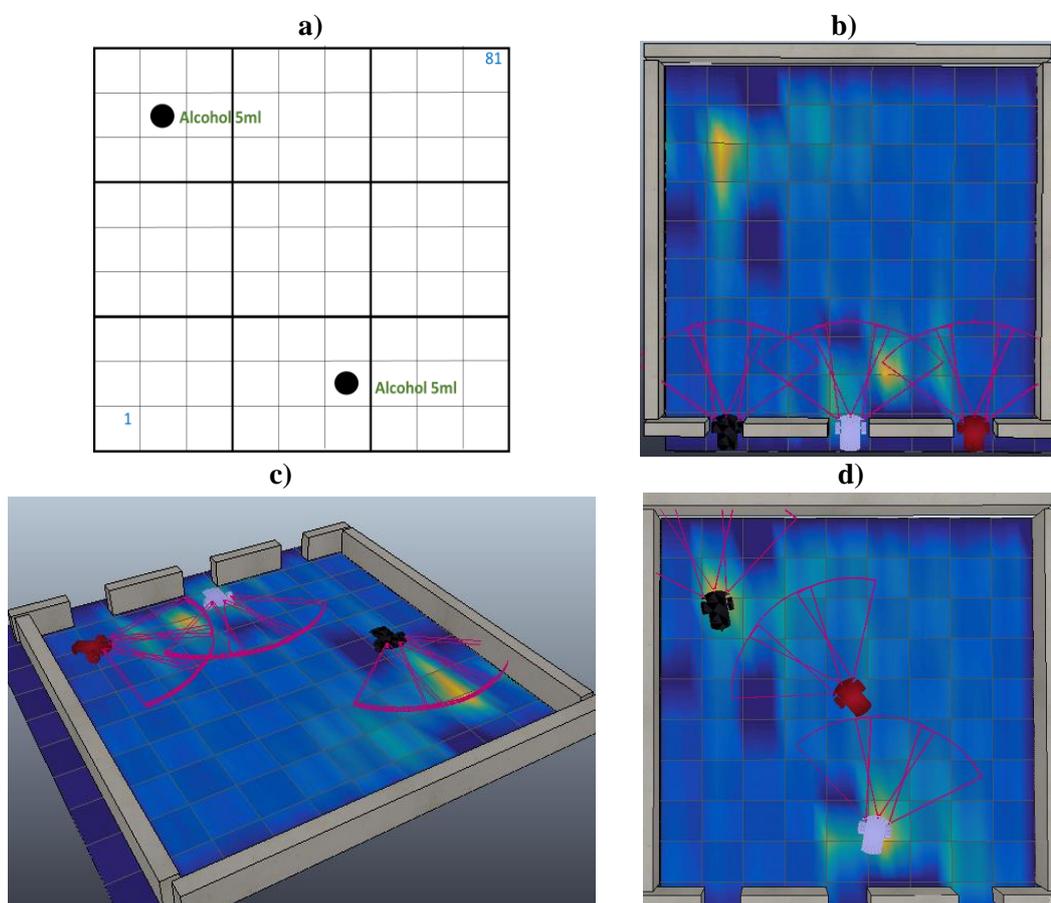


Figura 100. Simulación del Mapa 4: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor, d) localización de 2 fuentes de olor

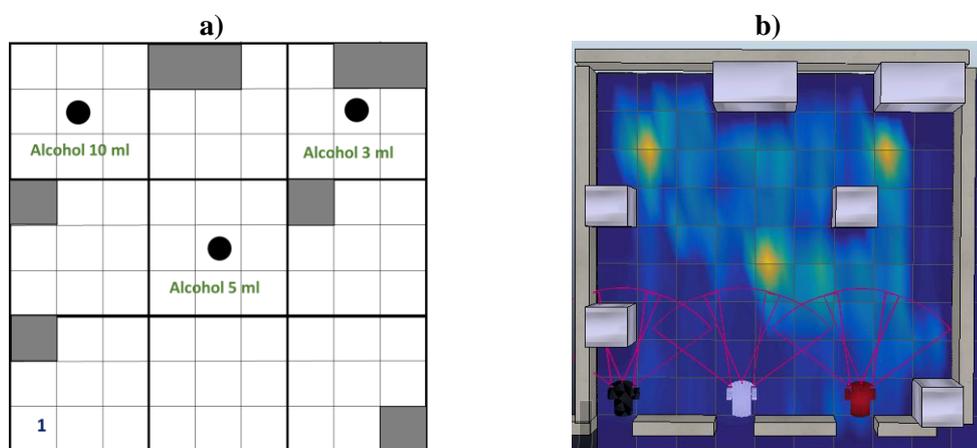
Los resultados obtenidos se presentan a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9
Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas en V-REP en el Mapa 4 sin presencia de obstáculos

Parámetro	Robot	Aleatorio			Zigzag			Odor Tracking 2WD		
		$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min
Distancia del robot a fuente (cm)	0	3,0±4,2	10	0	8,0±2,6	10	5	10,2±7,0	10	0
	1	16,0±10,0	32	5	11,2±5,6	21	5	10,6±14,9	10	0
	2	28,6±25,0	67	10	28,6±20,4	46	5	14,8±23,6	10	0
Tiempo de simulación (s)	Todos	787±359	1200	455	1026±142	1245	820	287±78	384	185
Número de fuentes localizadas	0	6			10			6		
	1	4			8			6		
	2	6			0			8		
Fuentes encontradas	Total	16/20			18/20			20/20		
	%	80,00%			90,00%			100,00%		

4.3.5 Simulación mapa 5- 3 fuentes de 3, 5 y 10 ml de alcohol- Presencia de obstáculos

El mapa 5 presenta la dispersión de 3 fuentes de olor de 3, 5 y 10 ml de alcohol. En la Figura 101 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado para este mapa. En la Figura 101 b) se muestra el entorno simulado desarrollado en V-REP con la presencia de obstáculos y el mapa de dispersión de las 3 fuentes de olor. La simulación de uno de los algoritmos de búsqueda se observa en la Figura 101 c). Para la Figura 101 d) se presenta la detección de las 3 fuentes de olor presentes en el ambiente.



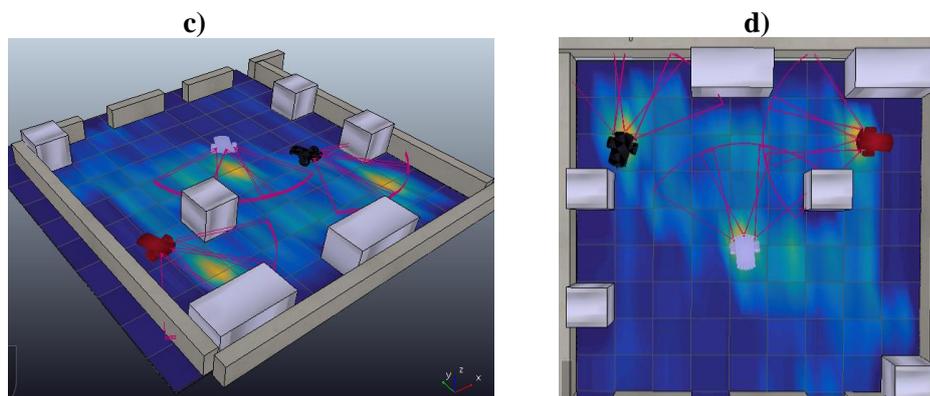


Figura 101. Simulación del Mapa 5: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor, d) localización de 3 fuentes de olor

Los resultados se presentan a continuación en la Tabla 10.

Tabla 10

Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas en V-REP en el Mapa 5 con presencia de obstáculos

Parámetro	Robot	Aleatorio			Zigzag			Odor Tracking 2WD		
		$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min
Distancia del robot a fuente (cm)	0	18,4±25,8	61	0	16,2±10,1	29	5	7,00±4,22	10	0
	1	1,0±2,1	5	0	7,0±2,6	10	5	4,00±3,94	10	0
	2	45,0±42,6	118	5	13,4±6,9	21	5	0 ± 0	0	0
Tiempo de simulación (s)	Todos	1022±375	1200	310	2926±440	3300	2400	290±79	366	186
Número de fuentes localizadas	0	7			4			9		
	1	10			10			6		
	2	4			6			9		
Fuentes encontradas	Total	21/30			20/30			24/30		
	%	70,00%			66,67%			80,00%		

4.3.6 Simulación mapa 6 - 3 fuentes de alcohol - Sin presencia de obstáculos

Para la simulación del mapa 6 se presenta la dispersión de 3, 5 y 10 ml de alcohol sin presencia de obstáculos. En la Figura 102 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado. En la Figura 102 b) se muestra el entorno simulado en V-REP. La simulación de uno de los algoritmos de búsqueda se observa en la Figura 102 c). Para la Figura 102 d) se presenta la detección de las 3 fuentes de olor.

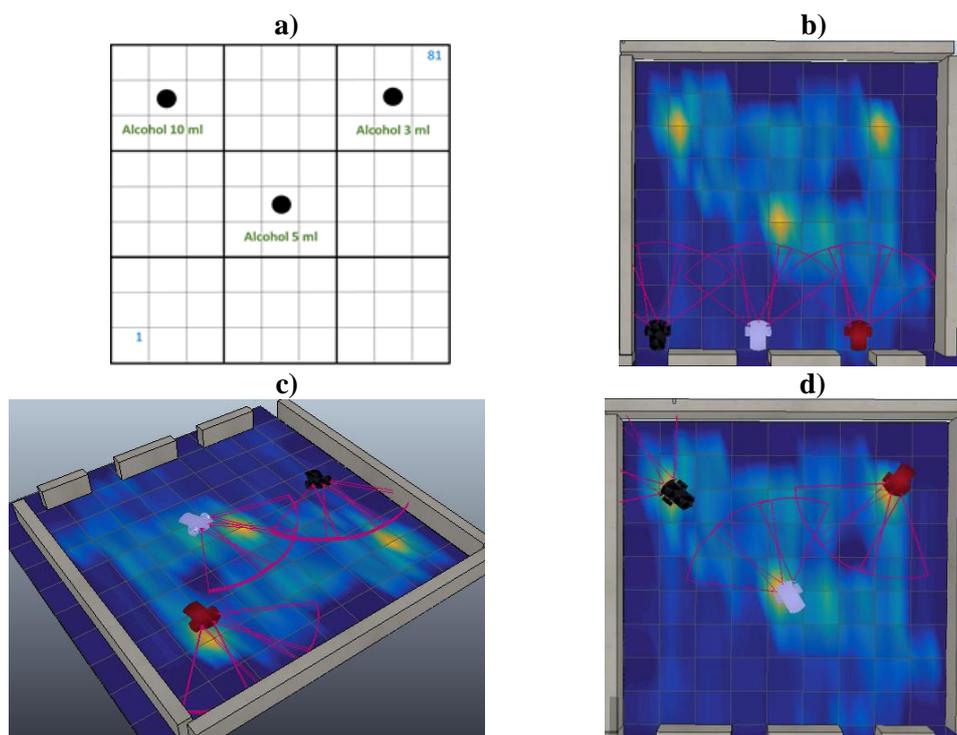


Figura 102. Simulación del Mapa 6: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor, d) localización de 3 fuentes de olor

Los resultados obtenidos se presentan a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11

Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas en V-REP en el Mapa 6 sin presencia de obstáculos

Parámetro	Robot	Aleatorio			Zigzag			Odor Tracking 2WD		
		$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min
Distancia del robot a fuente (cm)	0	1,0±2,1	5	0	15,0±9,2	29	5	2,0±4,2	10	0
	1	0±0	0	0	8,0±4,2	10	0	6,0±5,2	10	0
	2	14,6±8,9	21	0	28,8±24,5	71	5	2,0±4,2	10	0
Tiempo de simulación (s)	Todos	887±295	1200	510	1575±83	1620	1419	296±187	647	167
Número de fuentes localizadas	0	7			6			10		
	1	10			10			10		
	2	5			4			10		
Fuentes encontradas	Total	22/30			20/30			30/30		
	%	73,33%			66,67%			100,00%		

4.3.7 Simulación mapa 13 - 20ml de alcohol - perturbación - sin presencia de obstáculos

El mapa 13 presenta la dispersión de 1 fuente de olor de 20 ml de alcohol producida por la perturbación generada por el flujo de aire proveniente de un ventilador. En la Figura 103 a) se puede apreciar la configuración del entorno controlado para este mapa. En la Figura 103 b) se muestra el entorno simulado en V-REP. La simulación de uno de los algoritmos de búsqueda para este mapa se observa en la Figura 103 c). Para la Figura 102 d) se presenta la detección de las 3 fuentes de olor.

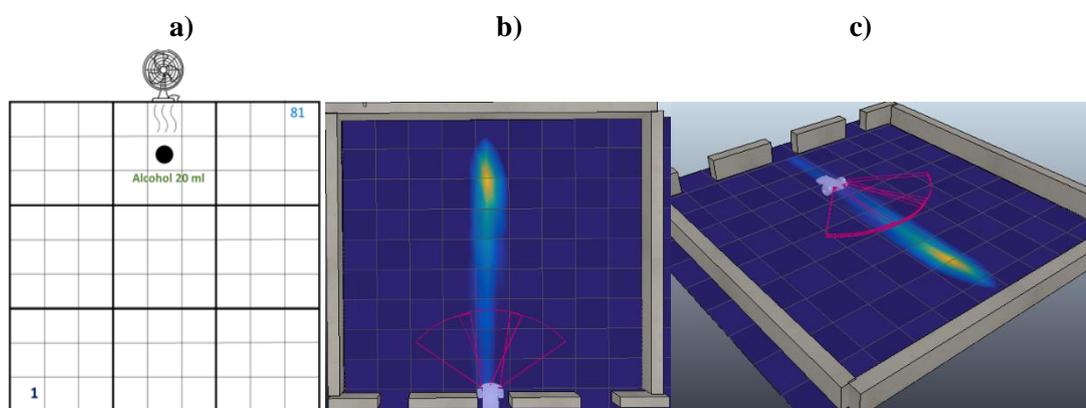


Figura 103. Simulación del Mapa 13: a) ambiente controlado, b) entorno desarrollado en V-REP, c) simulación de búsqueda de la fuente de olor

Los resultados obtenidos de las 10 simulaciones se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12

Resultados obtenidos para 10 simulaciones realizadas en V-REP en el Mapa 13 con presencia de perturbación

Algoritmo Odor Tracking 2WD							
Parámetro	Robot	Con Perturbación			Sin Perturbación		
		$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min
Distancia del robot a la fuente (cm)	1	$6 \pm 3,94$	10	0	$2 \pm 2,58$	5	0
Tiempo de simulación (s)	1	179 ± 52	281	125	63 ± 13	76	42

CAPITULO V

IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE BÚSQUEDA Y DETECCIÓN EN ROBOTS MÓVILES

En el desarrollo de este capítulo se presenta la implementación de los algoritmos de búsqueda de fuentes de olor en entornos reales. Para esto se implementó los algoritmos: aleatorio y Odor tracking 2WD en 3 robots móviles y se registró los siguientes parámetros en las pruebas realizadas: distancia de detección entre el robot móvil y la fuente de olor, tiempo de exploración y efectividad en la detección de todas las sustancias presentes en los ambientes.

Se presenta también el diseño y construcción de los robots móviles que realizan tareas de navegación y búsqueda de fuentes de olor. Se implementó en cada robot móvil una tarjeta Arduino MEGA 2560 dedicada a la adquisición de datos y etapa de control de actuadores. Se caracterizó 3 sensores químicos MQ-3 para la detección de alcohol, se calibró 3 sensores ultrasónicos HC-SR04 para detectar y evadir obstáculos presentes en el medio, además se calibró 2 encoders FC-03 que permitían realizar giros y control de velocidad en los actuadores. Adicional, se realizó el diseño de la etapa de potencia y control para cada robot.

Para la implementación de los algoritmos de búsqueda se empleó la tarjeta microprocesada Raspberry PI-3 la cual ejecuta los programas realizados en lenguaje Python y que fueron probados en la etapa de simulación. Se estableció una comunicación serial entre la tarjeta microprocesada Raspberry PI-3 y la tarjeta microcontrolada Arduino MEGA para realizar la adquisición de datos de los sensores, el procesamiento y la ejecución de las acciones de control en los robots. Adicional, se estableció un control distribuido entre los 3 robots por medio de una comunicación inalámbrica WIFI entre los agentes y un router.

Al ser implementada la arquitectura de control distribuido para robótica cooperativa bajo los conceptos de cooperación, comunicación y coordinación, se realizaron pruebas para 2 algoritmos de búsqueda de fuentes de olor, evaluando parámetros de prueba mediante la realización de 10 experimentos para varios de los ambientes controlados propuestos en el Capítulo III.

5.1 Implementación de robots móviles para búsqueda de fuentes de olor

Para el desarrollo de los robots móviles de búsqueda se tomó como base el diseño del robot de mapeo que presenta una configuración diferencial para sus desplazamientos que disponía de sensores de proximidad y sensores químicos para la detección de alcohol. En base a este modelo se construyeron los robots de búsqueda con la diferencia que el procesamiento de datos se realizó mediante la tarjeta Raspberry PI 3 y la adquisición de datos se realizó con la tarjeta Arduino MEGA.

La disposición final de la plataforma robótica que realiza tareas de exploración y búsqueda de fuentes de olor se presenta en la Figura 104, en la que se puede apreciar una vista isométrica del diseño CAD y del robot móvil construido. En esta figura se observa también la disposición final de los elementos acoplados al chasis del robot mediante la utilización de tornillos y tuercas; obteniéndose una estructura que pueda navegar y detectar fuentes de olor sin riesgo de sufrir daños o desconexiones.

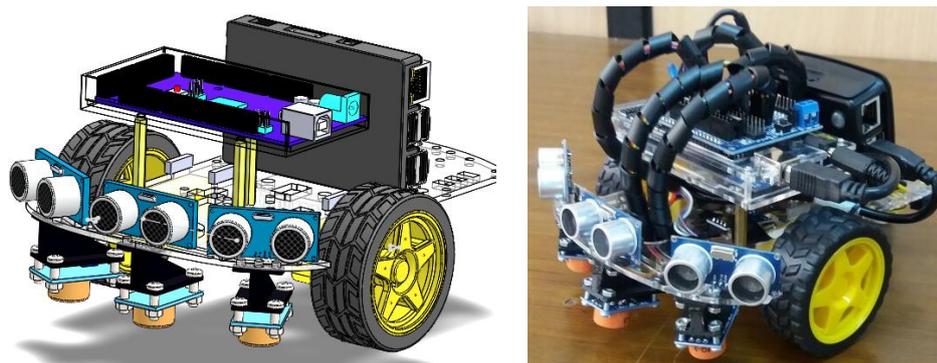


Figura 104. Plataforma Robótica Final

En base al modelo del robot móvil que se presenta en la Figura 104, se construyó un total de 3 robots móviles, los mismos que se utilizaron para realizar las pruebas de los algoritmos de búsqueda bajo el concepto de robótica cooperativa con control distribuido. A continuación en la Figura 105 se muestra la construcción de los 3 robots.

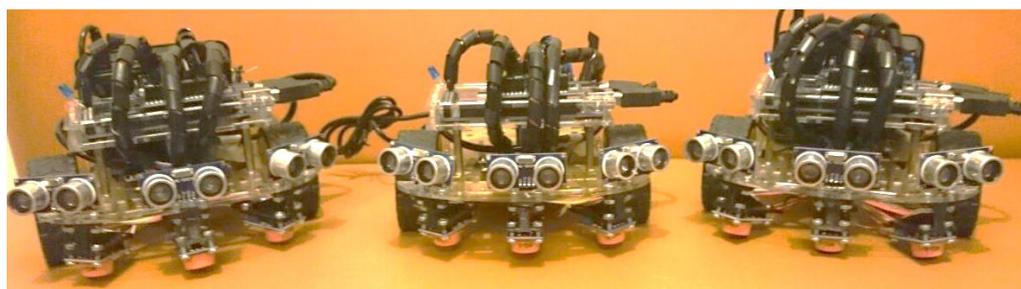


Figura 105. Robots móviles implementados para robótica cooperativa

Los robots de búsqueda fueron construidos empleando los elementos mostrados en la Tabla 13, los cuales han sido agrupados en diferentes sistemas que son los siguientes: adquisición, control y potencia. La identificación de estos sistemas permitió realizar una construcción ordenada y sistemática de los robots considerando la distribución de los elementos, cableado, y la separación de las etapas de control y potencia para evitar posibles daños ocasionados por el transporte de los robots. Además, se detalla la función que cumple cada uno de los elementos de cada sistema mencionado anteriormente en cada robot móvil de búsqueda.

Tabla 13
Elementos utilizados en cada robot móvil

Sistema	Elementos	Función
Adquisición	2 Optointerruptor FC-03	Control de giros y desplazamientos en el robot
	3 Sensor MQ-3	Detección de sustancias químicas presentes en el ambiente controlado
	Sensores HC-SR04	Detección de proximidad de objetos en el entorno para la evasión de obstáculos
	Sensor Shield V5	Conexión de todos los elementos y
Control y procesamiento	Arduino MEGA 2560	Tarjeta de adquisición para los sensores y el control de actuadores
	Raspberry PI-3	Tarjeta de procesamiento de datos y ejecución de algoritmos de búsqueda
Potencia	Driver L298N	Controlador de motores DC mediante señales PWM
	Motores DG01D-A130	Desplazamiento del robot
	Regulador de Voltaje LM7805	Regulación de voltaje a 5(V) para alimentar la tarjeta Raspberry PI-3
	Baterías LIPO	Fuente de voltaje DC del circuito electrónico

El acoplamiento y ubicación de los elementos del robot móvil de búsqueda se realizó en base al sistema al que pertenecen, es decir: adquisición, control o potencia. En la Figura 106 se presenta la vista superior del robot móvil y los elementos acoplados y su referencia.

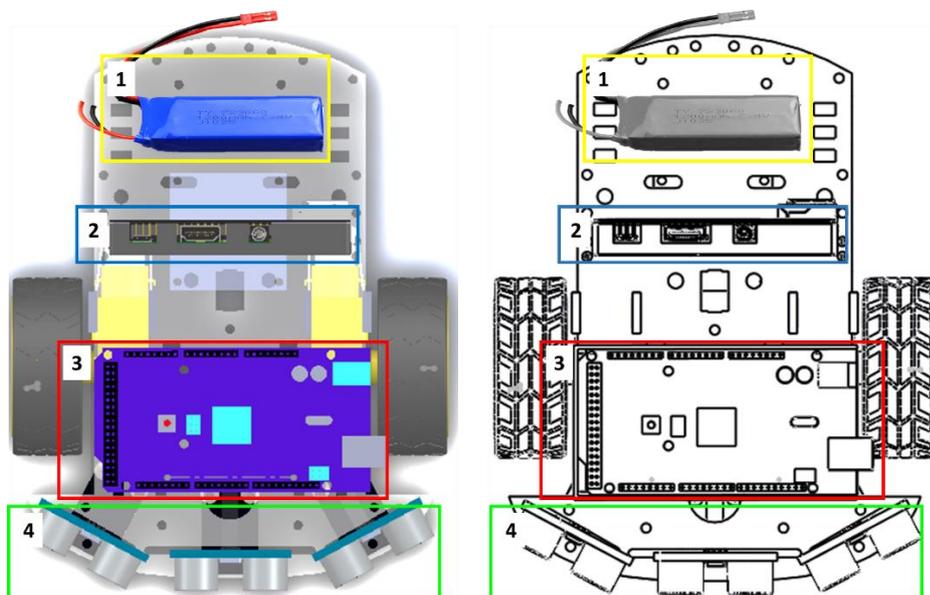


Figura 106. Distribución Parte Superior: (1) Batería LIPO, (2) Raspberry PI 3, (3) Arduino Mega 2560, (4) Sensores Ultrasónicos

En la Figura 107 se presenta la vista inferior del robot móvil, la distribución de los elementos acoplados y su referencia.

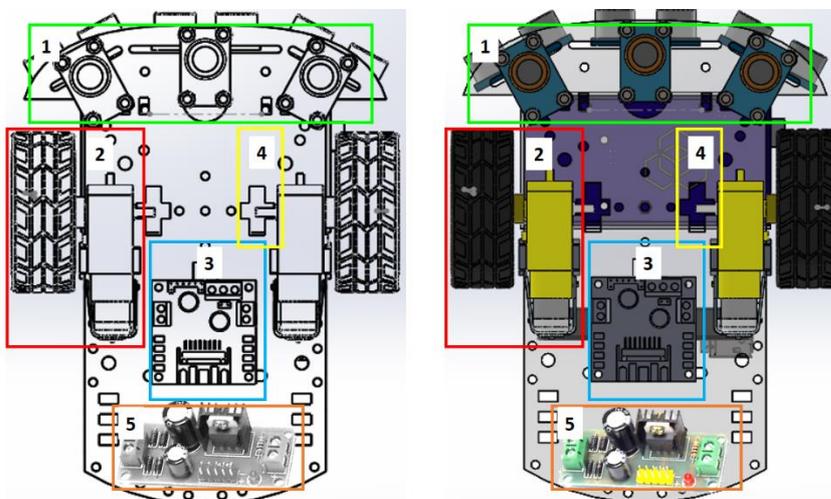


Figura 107. Distribución Parte Inferior: (1) Sensores Químicos MQ-3, (2) Motor CC y llanta, (3) Driver L298N, (4) Sensor FC-03, (5) Regulador de Voltaje

La tarjeta Arduino Mega 2560 acoplada con el Sensor Shield V5 que fue empleado para el manejo de sensores y actuadores, mientras que la implementación de los algoritmos y el procesamiento de los datos obtenidos se realizan en la tarjeta Raspberry PI 3. Los elementos utilizados para el montaje en la plataforma robótica de búsqueda de fuentes de olor se muestran en un circuito electrónico mostrado en la Figura 108.

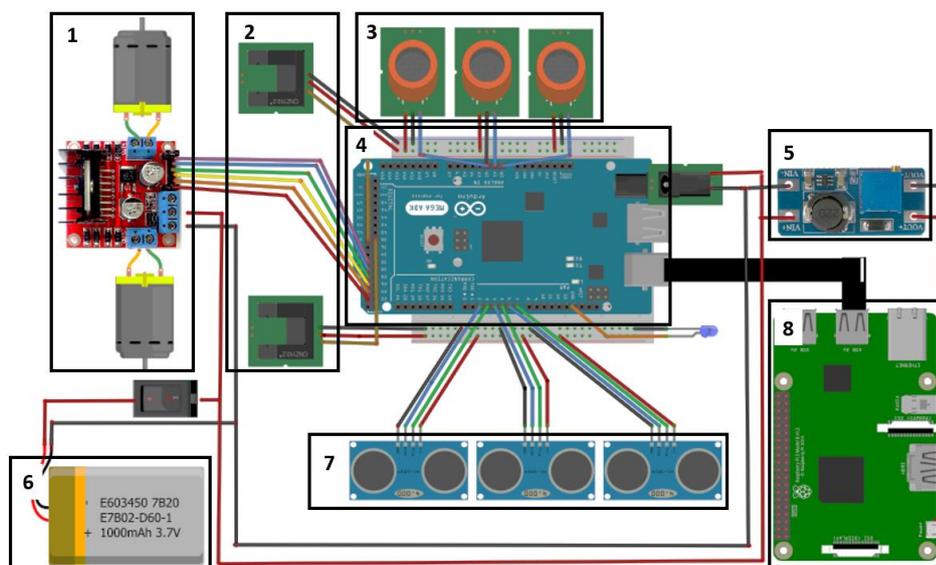


Figura 108. Circuito electrónico: (1) driver L298N y motores CC, (2) encoder FC-03, (3) sensores MQ-3, (4) Arduino Mega, (5) regulador de Voltaje, (6) batería LIPO, (7) sensores ultrasónicos, (8) Raspberry PI 3

5.2 Implementación de hardware para el robot de búsqueda de fuentes de olor

La mayoría de los elementos empleados en la construcción del robot móvil de búsqueda y detección de fuentes de olor, fueron descritos en la Sección 3.7, en la que se presentó los elementos de hardware del robot de mapeo. Por lo que a continuación únicamente se describen las características y funciones de los elementos adicionales requeridos para la construcción del robot de búsqueda.

5.2.1 Sensor optointerruptor FC-03 (Encoder)

Este sensor fue adaptado en la parte superior de la plataforma robótica y es utilizado para hacer el control de velocidad y de giro en el robot, para esto se generan pulsos en función del giro de una rueda de encoder. Este dispositivo se caracteriza por ser un sensor de velocidad infrarrojo (IR), su funcionamiento se basa en la interrupción del haz de luz que se encuentra en su ranura lo cual crea un pulso digital en el pin D0. A continuación, se presenta el modelo del sensor:



Figura 109. Pines del sensor FC-03

Los parámetros técnicos se muestran a continuación:

- Rango de detección: 25-500
- Voltaje de alimentación: 3.3 V– 12 V en CC
- Señal de salida digital: 0 V – 5 V
- Chip: LM293D comparador de señal de referencia

5.2.2 Sensor Shield V5

Tarjeta de expansión empleada para disponer de una mayor cantidad de pines para la energización y conexión de los distintos sensores y actuadores, permitiendo obtener mediante una conexión ordenada la identificación rápida de los elementos por zonas. Esta tarjeta es un accesorio adaptable a las placas Arduino. A continuación, se presenta el modelo del Sensor shield V5.

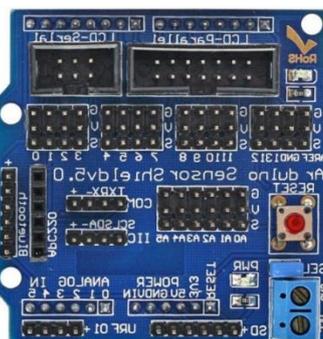


Figura 110. Sensor Shield V5

Los parámetros técnicos se muestran a continuación:

- Conexión puerto I2C
- Puerto para conexión de módulo Bluetooth
- Módulo de interface de comunicación serie y paralelo.
- Establece todas las conexiones digitales y análogas de la placa Due/Uno/Mega

5.2.3 Tarjeta microprocesada (SBC) Raspberry PI 3

La tarjeta Raspberry PI 3 fue empleada con el objetivo de ser la unidad de procesamiento de toda la plataforma robótica, la cual mediante una comunicación

serial entre la tarjeta Arduino Mega recibía datos provenientes de los distintos sensores, además realizaba la ejecución de uno de los algoritmos de búsqueda y detección de fuentes de olor.

Esta tarjeta se define como un ordenador de placa reducida (Single Board Computer), que opera con sistemas operativos como GNU/Linux y posee un sistema operativo propio denominado “*Raspbian*”. Posee un gran procesamiento para la ejecución de tareas que no demandan alto costo computacional. En la Tabla 14 se presentan las características técnicas de mayor relevancia.

Tabla 14
Características técnicas Raspberry PI 3

Raspberry PI 3	
Procesador	1.2 GHz cuatro núcleos 64 bits
Arquitectura	ARM
RAM	1 GB
Conectividad	Ethernet 10/100 Base T Bluetooth 4.1 802.11 b/g/n LAN inalámbrica HDMI rev 1.3-1.4 USB 4 x conector USB 2.0
Almacenamiento	Tarjeta Micro SDIO
Sistemas Operativos	Raspbian Arch Linux OpenELEC
Fuente de Alimentación	5 V – 2,5 A

5.2.4 Regulador de voltaje

El uso de un regulador de voltaje es requerido por la utilización de la tarjeta Raspberry PI 3, la cual en sus especificaciones indica que debe ser energizada con un voltaje de alimentación de 5 V, mediante en la Figura 111 se observa el circuito del regulador realizado.

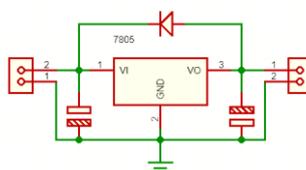


Figura 111. Regulador de voltaje 5 [V]

El circuito fue colocado en la parte inferior de la estructura robótica, manteniendo una adecuada separación de elementos de control como: Raspberry PI-3, Arduino Mega, sensores, entre otros; los cuales puedan sufrir algún daño frente a una avería del regulador. Los elementos colocados en la Tabla 15 fueron utilizados en el regulador.

Tabla 15
Elementos del regulador LM7805

Elemento	Cantidad	Detalle
Borneras	2	Entrada: Cables provenientes de batería LIPO Salida: Cables de Micro-USB
Capacitores	2	1000 uF
Diodo	1	1N4007
LM7805	1	Operación: 5 V - 1 A

5.3 Análisis de autonomía del uso de la batería

Para determinar la autonomía del uso de la batería se tomó en consideración los valores máximos de consumo de corriente de todos los elementos implementados en el robot móvil. Esta tarea fue realizada para determinar el tiempo de operación del robot dentro del entorno de búsqueda. En la Tabla 16 se muestra los elementos incorporados en la plataforma robótica.

Tabla 16
Elementos finales de la estructura robótica

Cantidad	Elementos	V _{min} (V)	I (mA)
2	Encoder FC-03	3,3 V -12 V	200 mA
3	SensorMQ-3	5V ± 0.1	450 mA
3	Sensores HC-SR04	5 V	45 mA
1	Arduino MEGA 2560	7 V -12 V	100 mA
1	Sensor Shield V5		100 mA
1	Raspberry PI-3	5 V	1000 mA
1	Driver L298N	5 V -35 V	450 mA
2	Motores DG01D-A130	3-9 V	1000 mA
1	Baterías LIPO	7,4 V	2200 mA
1	Regulador de Voltaje	2,2 V -30 V	45 mA

El consumo energético de los elementos implementados es 3390 mA y para determinar el tiempo de autonomía se emplea la Ecuación 6:

$$\text{Tiempo de autonomía} = \frac{\text{Capacidad batería}}{\text{Consumo carga}} \quad (6)$$

Reemplazando el consumo de carga determinado del análisis de autonomía encontrado de 3390 mA y el valor de la capacidad de la batería de 2200 mAh se tiene.

$$\text{Tiempo de autonomía} = \frac{2200 \text{ mAh}}{3390 \text{ mA}} = 0,64 \text{ horas}$$

Calculando el tiempo de autonomía de horas a minutos, se tiene lo siguiente:

$$\text{Tiempo de autonomía} = 0,64 \text{ horas} \times \frac{60 \text{ minutos}}{1 \text{ hora}} = 38,4 \approx 39 \text{ minutos}$$

En base al análisis del tiempo de autonomía, el robot móvil de búsqueda puede operar en un tiempo aproximado de 39 minutos. Considerando este tiempo y los resultados de las simulaciones detalladas en el anterior capítulo se determinó los algoritmos de búsqueda factibles de ser implementados en los robots móviles. Por tal razón se decidió implementar los algoritmos: aleatorio y Odor Tracking 2WD, además el algoritmo zigzag requiere de una amplia área de trabajo y de constantes giros en el robot lo que disminuye la autonomía de uso del robot y produce eventuales cambios en la planificación de trayectoria por lo que no fue implementado. Una vez definidos todos los parámetros necesarios para realizar la implementación de los 3 robots móviles de búsqueda, se procede a describir la caracterización de los sensores químicos MQ-3 para ser montados en las plataformas robóticas y el desarrollo de los sistemas de: adquisición, control y procesamiento.

5.4 Caracterización de sensores químicos MQ-3

La caracterización de los sensores químicos MQ-3 para cada robot móvil se realizó mediante experimentos bajo condiciones de temperatura y humedad similares. De los 10 experimentos realizados se determinaron los siguientes parámetros: línea base, tiempos de respuesta, valor pico máximo de detección. Para las mediciones se trabajó bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura: 23 °C y humedad: 70%
- Volumen sustancia: 3 ml
- Tiempo de muestreo: 600 s
- Periodo de muestreo: 1 s

A continuación, en la Figura 112, Figura 113, Figura 114 se presentan las curvas características obtenidas para los sensores químicos MQ-3 de cada robot, en las que se puede observar los tiempos de respuesta de los sensores frente a la presencia de estímulos, el voltaje pico máximo de detección y la línea base característica.

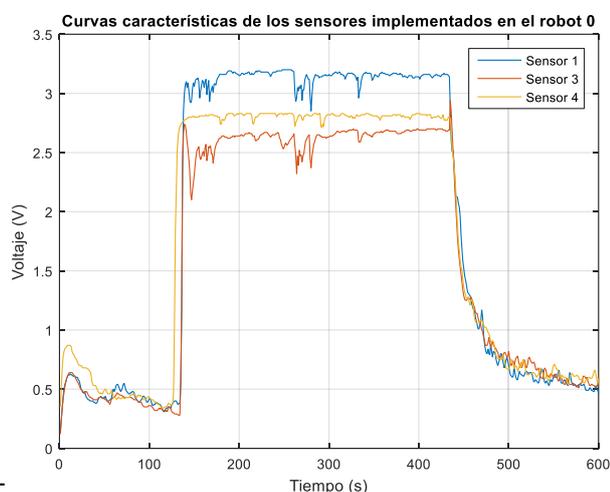


Figura 112. Curvas características de los sensores MQ-3 para el Robot 0

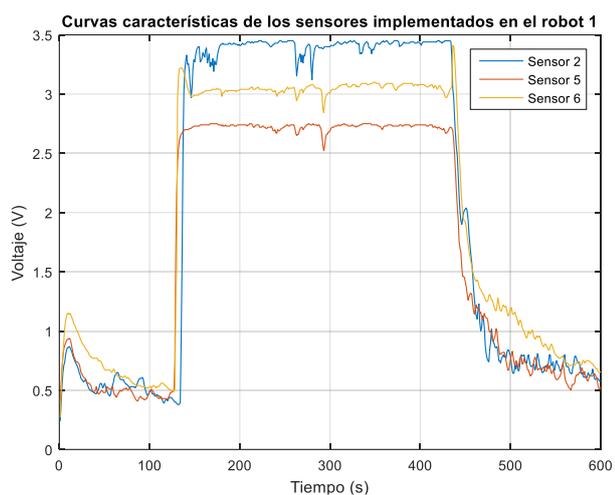


Figura 113 Curvas características de los sensores MQ-3 para el Robot 1

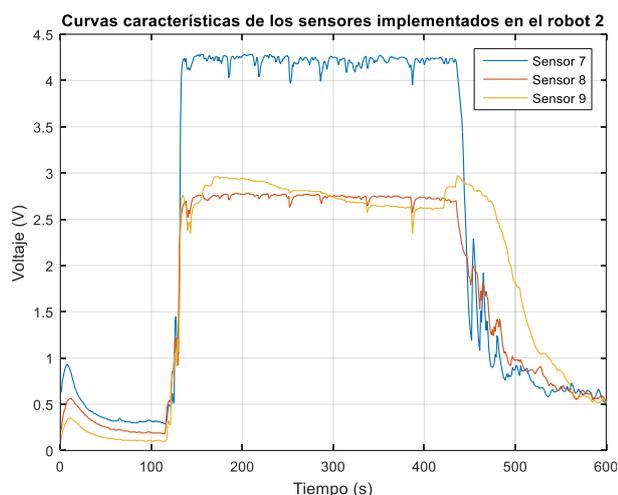


Figura 114. Curvas características de los sensores MQ-3 para el Robot 2

En la Tabla 17 se presentan los parámetros obtenidos de los sensores MQ-3, que serán empleados en el desarrollo de los algoritmos de búsqueda para que los robots móviles puedan detectar volúmenes de alcohol superiores a 3 ml, debido a que con esta muestra de alcohol se caracterizó los sensores. Los parámetros mostrados son: línea base y voltaje pico.

Tabla 17

Valores de línea base y de saturación de sensores MQ-3

Robot	Sensor	Ubicación del sensor en robot	Línea Base (V)	Valor pico de detección (V)
0	3	Izquierda	0,40	2,60
	1	Centro	0,40	3,25
	4	Derecha	0,40	2,75
1	5	Izquierda	0,40	2,62
	2	Centro	0,40	3,45
	6	Derecha	0,50	3,10
2	8	Izquierda	0,25	2,75
	7	Centro	0,40	4,30
	9	Derecha	0,15	2,60

Al obtener un registro de los datos de los sensores MQ-3 se pueden realizar las validaciones en los algoritmos de búsqueda y las configuraciones necesarias para el sistema de adquisición. A continuación, se presenta el desarrollo del mismo.

5.5 Desarrollo de sistema de adquisición

La adquisición de datos se realizó empleando una tarjeta Arduino MEGA 2560 acoplada con el Sensor Shield V5; los datos de los sensores fueron registrados y enviados a la tarjeta de procesamiento Raspberry PI3 a través de una comunicación serial cuando se enviaba la petición de envío y recepción de la información. A continuación, se presentan las configuraciones realizadas para establecer la comunicación serial y la forma de adquisición de datos de los respectivos sensores, además del manejo de actuadores.

5.5.1 Configuración Arduino Mega 2560

Esta tarjeta es programada haciendo uso del IDE propio de Arduino cuya versión instalada en el entorno de Raspberry Pi3 fue la (Arduino IDE 1.5.0). Esta facilidad permitió mantener una conexión directa entre las dos tarjetas sin la necesidad de disponer de un ordenador externo para la programación. Los puertos de comunicación serial disponibles en la tarjeta Raspberry permitieron establecer la conexión física con la tarjeta Arduino y generar una comunicación UART.

5.5.2 Comunicación serial para Arduino Mega 2560

Se estableció una comunicación serial para el envío y recepción de datos entre la tarjeta de adquisición y la tarjeta de procesamiento. Este tipo de comunicación permite el envío de datos a distintas velocidades de transmisión en un rango desde los 300 bps hasta los 115200 bps. El software IDE de Arduino posee una librería serial que dispone de comandos, los cuales permiten asegurar una conexión entre los dispositivos que se encuentran enviando y recibiendo información.

En la Figura 115 se muestra el diagrama de flujo que representa la configuración realizada en la función “*Void Setup*” del entorno de programación del IDE Arduino para establecer la comunicación serial, en donde se configuran los valores de la

velocidad de transmisión, cantidad de bits a transmitir, la paridad y los bits de parada necesarias para generar fiabilidad en la comunicación.

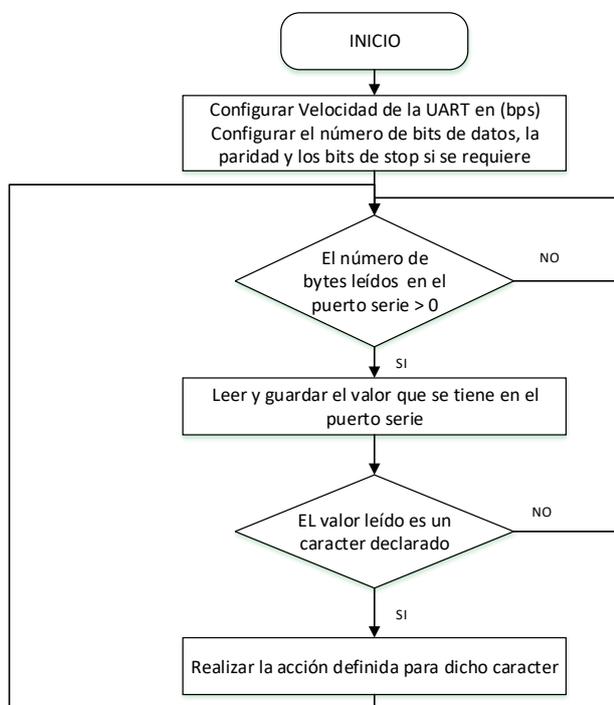


Figura 115. Diagrama de Flujo: comunicación serial Arduino MEGA

La comunicación establecida en el Arduino MEGA de cada uno de los robots se realizó con las siguientes configuraciones: velocidad de transmisión 9600 bps, el número de bits de datos, los bits de paridad y de stop no han sido modificados siendo por defecto 8 bits de datos, transmisión sin paridad y un bit de parada. A continuación, se presentan los procedimientos realizados para la adquisición de datos.

5.5.3 Adquisición de datos de sensores

La adquisición de datos de los sensores: MQ-3, HC-SR04 y FC-03 fue realizada por la tarjeta Arduino MEGA. La tarjeta Raspberry reenvía una petición de lectura de los datos de los sensores mediante envío e identificación de un carácter por el puerto serie; la tarjeta Arduino en base a la petición solicitada realiza la adquisición de datos del respectivo sensor y envía la información por el puerto serial a la tarjeta de procesamiento. A continuación, se detalla el funcionamiento y procedimiento de adquisición de los datos para cada uno de los sensores.

5.5.3.1 Sensores de Proximidad HC-SR04

El funcionamiento del sensor HC-SR04 se basa en el envío y recepción de una señal ultrasónica mediante sus pines digitales “*Trigger*” y “*Echo*”, los cuales una vez que son conectados y configurados en la tarjeta de adquisición se encargan del envío de pulsos y de la medición del tiempo requerido para el envío-recepción de la señal ultrasónica. El tiempo determinado se transforma a distancia empleando la Ecuación 7 que fue programada en el IDE de Arduino.

$$\text{Distancia (cm)} = \frac{\text{Tiempo (us)} * \text{Velocidad del Sonido}}{2} \quad (7)$$

Donde:

- **Velocidad del sonido:** $\frac{1}{29.2} \frac{\text{cm}}{\text{us}}$
- **Tiempo:** Tiempo de viaje de la señal ultrasónica
- **Distancia:** Distancia de proximidad entre el sensor y un objeto

Mediante la Figura 116 se describe la programación realizada en el Arduino IDE para el funcionamiento de este sensor.

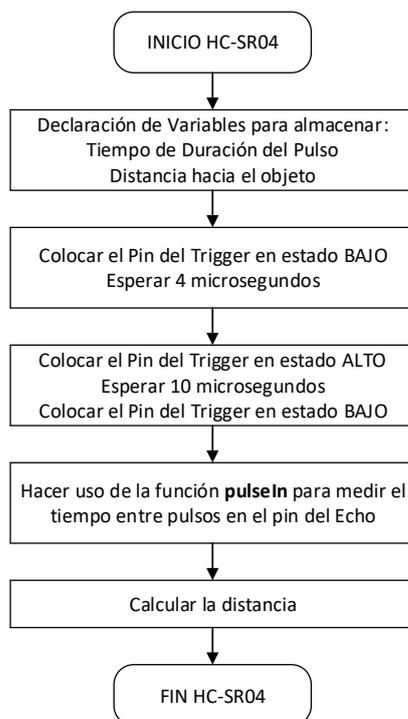


Figura 116. Configuración y funcionamiento sensor HC-SR04

5.5.3.2 Sensores químicos MQ-3

Los sensores químicos MQ-3 operan en un rango de voltaje de salida de 0 a 5 V, el cual es transformado por medio del ADC del Arduino Mega a un rango de 0 a 1023, razón por la cual se realizó nuevamente una conversión a valores entre 0 y 5 para el envío y utilización de esta información en los algoritmos de búsqueda. La Ecuación 8 fue utilizada para transformar la lectura de los pines análogos del Arduino Mega al rango de interés para el envío de datos por puerto serial.

$$\text{Voltaje MQ} - 3 = \text{Valor del Pin Análogo} * \frac{5}{1023} \quad (8)$$

Mediante la Figura 117 se describe la programación realizada en el IDE de Arduino para la adquisición de datos del sensor.

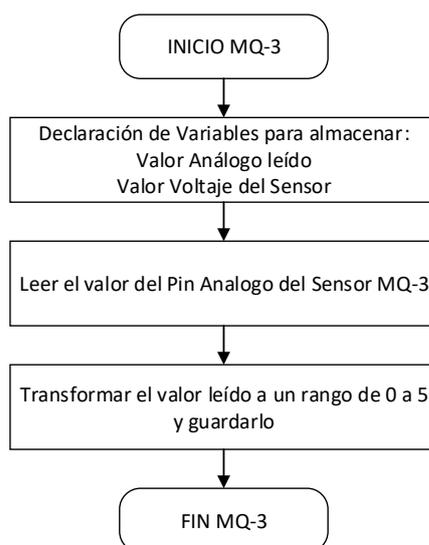


Figura 117. Configuración y funcionamiento del sensor MQ-3

5.5.3.3 Encoder FC-03

Los datos obtenidos del encoder FC-03 son de uso exclusivo del Arduino Mega, este optointerruptor se utilizó con el propósito de controlar los avances y giros del robot móvil, para lo cual se empleó dos discos con 20 huecos en su estructura y que fueron incorporados en el eje de los motores del robot. Al ser accionados los motores la tarjeta Raspberry PI3 realiza una petición por puerto serial para iniciar la lectura de los sensores FC-03 para el control de los motores. En base a la distancia y a los giros

realizados por el robot se determinó el número de pulsos detectados por el sensor en base a las siguientes Ecuaciones:

$$\text{(Distancia recta)} \quad x = \frac{\alpha \cdot R}{57} \quad (9)$$

$$\text{(Giro del Objeto Rodante)} \quad \theta = \frac{x}{2 \cdot \pi \cdot R'} \quad (10)$$

Donde:

- x : Distancia que avanza el objeto metros.
- α : Ángulo a recorren (grados)
- R : Radio desde la rueda al centro del giro que se desea dar (metros)
- θ : Cantidad de vueltas que debe dar la rueda para cumplir el giro.
- R' : Radio de la rueda (metros)

Para efectuar los cálculos en las ecuaciones se realizaron mediciones en la plataforma robótica con respecto al radio de la rueda R' y el radio de giro R . Los valores obtenidos se presentan a continuación:

- R : 0,11 m
- R' : 0,0325 m

Con los valores determinados se procedió a determinar la distancia a recorrer por el robot en base a las Ecuaciones 9 y 10. Además se determinó el número de pulsos requeridos para que el robot realice trayectorias rectilíneas y giros. En la Tabla 18 se presenta las diferentes distancias rectilíneas programadas en los robots, las cuales dependen del número de vueltas de las ruedas del robot y el número de pulsos detectados por el sensor FC-03.

Tabla 18

Cálculo de pulsos requeridos para generar trayectorias rectilíneas

Distancia recorrida por el robot	Vueltas de las ruedas del robot $\theta = \frac{x}{2 \cdot \pi \cdot R'}$	Número de pulsos detectados $P = \theta * 20$
0,10 m	0,49	9,8≈10
0,05 m	0,25	5
0,02 m	0,09	1,95≈2

En la Tabla 19 se presenta los diferentes ángulos de giro que se implementaron en los algoritmos de búsqueda y el cálculo de los pulsos requeridos para generar giros en el robot móvil en base a un ángulo. Para esto, se utilizaron los ángulos de giro de los robots simulados en el entorno de V-REP, los cuales permitieron calcular la distancia necesaria a recorrer y el número de vueltas de las ruedas obteniendo con estos parámetros el número de pulsos.

Tabla 19
Cálculo de pulsos requeridos para generar giros

Ángulo Requerido	Distancia que necesita avanzar (metros) $x = \frac{\alpha \cdot R}{57}$	Número de Vueltas que se requiere $\theta = \frac{x}{2 \cdot \pi \cdot R'}$	Número de Pulsos requeridos $P = \theta * 20$
15°	0,014	0,07	1,4≈1
30°	0,029	0,14	2,8≈3
60°	0,058	0,28	5,6≈6
90°	0,087	0,43	8,6≈9

5.5.4 Control de Actuadores

La plataforma robótica está constituida únicamente por 2 actuadores, que son los motores DC izquierdo y derecho del robot. El accionamiento es realizado por una señal PWM generada por la tarjeta Arduino Mega y el control de los mismos a través de 4 puertos digitales de la tarjeta que establecen el sentido de giro deseado, estas señales son enviadas al Driver L298N para el control de los dos actuadores. Mediante la Figura 118 se observa los pines utilizados del Driver L298N para el manejo de los motores mediante las señales generadas en Arduino Mega



Figura 118. Pines para el control de sentido de giro

En la Tabla 20 se presenta la configuración de los pines del driver L298N para generar las diferentes trayectorias y giros en el robot móvil. En donde Habilitado

significa el envío de un “1” lógico e inhabilitado significa el envío de un “0” lógico desde los puertos de control del Arduino MEGA.

Tabla 20
Configuración de señales enviadas a pines del driver L298N

Driver L298N				
Trayectoria	Pin 1	Pin 2	Pin 3	Pin 4
Recta	Inhabilitado	Habilitado	Habilitado	Inhabilitado
Giro Derecha	Inhabilitado	Habilitado	Inhabilitado	Habilitado
Giro Izquierda	Habilitado	Inhabilitado	Habilitado	Inhabilitado

5.6 Desarrollo de sistema de procesamiento

Para el sistema de procesamiento de la plataforma robótica se empleó la tarjeta Raspberry PI 3, en la cual se implementó los algoritmos de búsqueda y detección de fuentes de olor desarrollados en la fase de simulación. Esta tarjeta se encargaba de enviar los caracteres a la tarjeta de adquisición Arduino para el registro y envío de datos de los sensores, así como el manejo de actuadores en función del procesamiento del algoritmo en ejecución. A continuación, se presenta las configuraciones, tipo de comunicación, adquisición y procesamiento de datos establecidos para la tarjeta microprocesada para la ejecución de los algoritmos.

5.6.1 Configuración Raspberry PI 3

Para la configuración de la tarjeta microprocesada se instaló el sistema operativo “*Raspbian*”, el cual está basado en “*Debian*” y optimizado para trabajar sobre ordenadores simples como la Raspberry PI 3. Este sistema dispone de 35000 paquetes, software pre-compilado y posee por defecto el entorno de desarrollo integrado (IDLE) para Python (Raspbian, 2017).

Python presenta facilidades de uso debido a que es un lenguaje de programación libre e interprete, lo cual significa que realiza un seguimiento de instrucciones y las ejecuta en tiempo real, convirtiendo las sentencias directamente a código máquina (Python, 2017). La versión utilizada para la Raspberry PI 3 fue (Python 2.7), debido

a sus facilidades de uso y a que los algoritmos de búsqueda fueron programados en Python para realizar las simulaciones en V-REP.

Sin embargo, es necesario instalar librerías y módulos para el adecuado manejo de los datos provenientes de la tarjeta Arduino Mega, consiguiendo el mejor desempeño para el procesamiento de los mismos dentro de los algoritmos. Los módulos y librerías instaladas se presentan en la Tabla 21 y Tabla 22.

Tabla 21
Librerías usadas en los algoritmos

Librería	Descripción
Serial	Permite hacer uso de la conexión serie, estableciendo parámetros tales como velocidad de conexión, tiempo de espera, puerto a ser utilizado.
Numpy	Librería que aporta numerosas funciones matemáticas para realizar operaciones con vectores o matrices.
Matplotlib	Permite la generación de gráficos de los datos obtenidos y mostrarlos en varios formatos.

Tabla 22
Módulos usados en los algoritmos

Módulos	Descripción
Random	Permite generar números aleatorios dentro de un rango específico.
Threading	Permite la programación con hilos, permitiendo obtener una API de un nivel mayor y orientada a objetos
Time	Contiene funciones que permiten hacer uso de fechas y/o horas, generar una detención de programa

Una vez instalado en el sistema operativo de la tarjeta las librerías y módulos necesarios se realizó la importación de los algoritmos desarrollados en el software PyCharm utilizados en las simulaciones de V-REP y que fueron explicados en el Capítulo IV. Estos programas importados mantienen la misma lógica de funcionamiento, con la diferencia de que los datos que se requieren para el procesamiento del algoritmo se encuentran en la tarjeta Arduino Mega, por lo que las sentencias de adquisición de datos de los sensores y control de actuadores fueron modificadas por peticiones utilizando la comunicación serial establecida.

5.6.2 Comunicación serial para Raspberry PI 3

La comunicación serial establecida en la tarjeta microprocesada Raspberry PI3, fue configurada con una velocidad de transmisión de 9600 bps, debido a que a esta velocidad existió menor probabilidad de colisión de datos, permitiendo una mejor recepción de los mismos frente a las demás velocidades. Además, la velocidad de transmisión establecida en el Arduino Mega fue de 9600 bps, por lo que permite tener una sincronía en la transmisión y recepción de datos entre las dos tarjetas. Mediante la Figura 119 se presenta la configuración y funcionamiento general de la comunicación serial establecida para la tarjeta Raspberry PI 3.

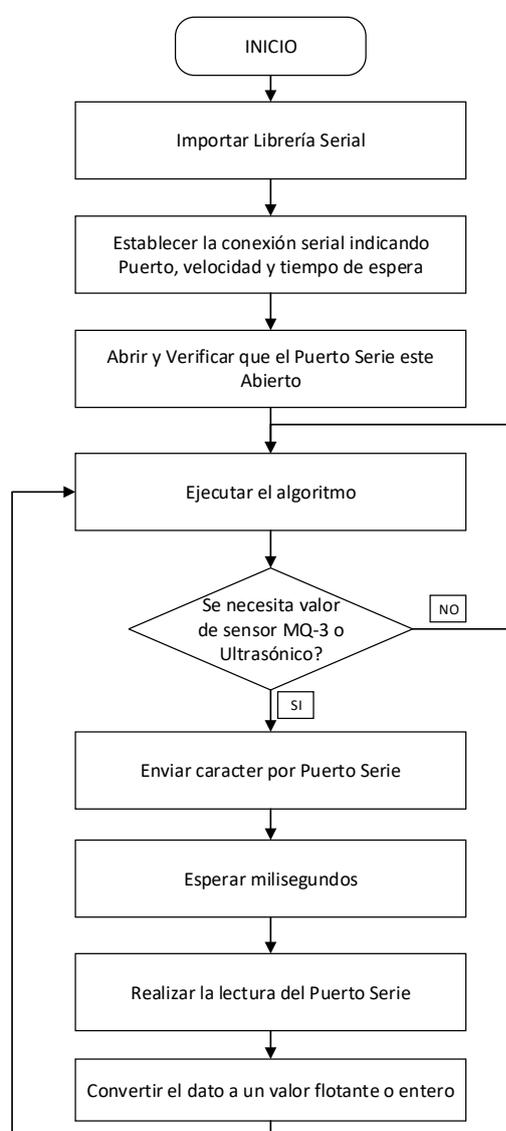


Figura 119. Comunicación serial Raspberry PI 3

5.6.3 Procesamiento de datos obtenidos de los sensores MQ-3

Los valores de los 3 sensores MQ-3 son obtenidos mediante la comunicación serie establecida con la tarjeta de adquisición, para lo cual el caracter dispuesto para la petición de esta información por puerto serial fue la letra “S”. Una vez enviada la petición, se almacenan los valores obtenidos de los sensores y son transformados a tipo de dato flotante puesto que al ser transmitidos por el puerto serie como caracteres.

Debido a las variabilidades de los sensores químicos MQ-3 se optó por realizar una normalización de la señal obtenida de cada uno. Con los datos obtenidos por puerto serial de los sensores, dentro del procesamiento de los algoritmos se normalizó el valor de detección y el valor de línea base en un rango de 0 a 1. Para esto se utilizó los valores pico de detección de cada sensor MQ-3 obtenidos durante su caracterización (ver Tabla 17) y que fueron establecidos en la programación como constantes. La normalización se realizó con la Ecuación 11.

$$V_{\text{normalizado}} = \frac{\text{Valor}_{\text{Serial}} - \text{Valor}_{\text{Línea base}}}{\text{Valor}_{\text{pico}}} \quad (11)$$

Donde:

- **Vnormalizado:** corresponde al valor normalizado.
- **Valor_{Línea base}:** valor offset obtenido de cada sensor
- **Valor_{Serial}:** valor recibido por el puerto serie de la detección de cada sensor.
- **Valor_{pico}:** es el valor pico de detección de cada sensor (Tabla 17).

El valor de línea base de los sensores no es considerado ya que es un offset que se presenta y que varía según las condiciones de temperatura y humedad, por tal razón se realiza la eliminación de la misma con el procedimiento que se presenta a continuación.

5.6.3.1 Eliminación Línea base sensores MQ-3

Los sensores MQ-3 se caracterizan por poseer un estado de transición en el momento en que son conectados a una fuente de energía, durante el estado se debe esperar un tiempo antes de la adquisición de datos debido a la presencia de picos en

los valores de la señal del sensor. Se estableció un tiempo de 2 minutos debido a que durante la fase de caracterización de los sensores se pudo observar que al transcurrir que transcurrido este tiempo la línea base de los sensores se estabiliza.

Se implementó una función que permite obtener el valor normalizado de la detección de los sensores y la eliminación de la línea base en los algoritmos. Al momento de iniciar la ejecución cada algoritmo existe un período de espera en el cual durante 2 minutos el sensor se estabiliza y pasado este tiempo durante 1 minuto se procedió a realizar la petición de los valores medidos por los sensores químicos a la tarjeta de adquisición con la finalidad de obtener una línea base con el promedio de todas las muestras obtenidas en el rango de tiempo. Con los datos obtenidos se ejecutaba la función de eliminación de línea base y se determinaba el valor normalizado detectado por cada sensor.

5.6.3.2 Funcionamiento de los algoritmos de búsqueda en base a los datos obtenidos de los sensores MQ-3

Los algoritmos implementados al tener por objetivo la búsqueda de fuentes de olor hacen uso de los valores de los sensores MQ-3 para ubicarse lo más cerca de las sustancias químicas, el valor recibido mediante la conexión serie son utilizados de diferente manera debido a la lógica de cada uno de los algoritmos.

Con los valores de detección normalizados para cada sensor MQ-3 se establecieron niveles de detección en los algoritmos de búsqueda implementados. Dependiendo del valor de detección los robots móviles pueden determinar la cercanía de una fuente de olor y dirigirse hacia esta. A continuación, se presenta la descripción del funcionamiento de los algoritmos en base a los niveles de detección establecidos para los sensores MQ-3.

El Algoritmo Odor Tracking 2WD se caracteriza por seguir la pluma de olor de la sustancia química, es decir da prioridad a los valores detectados por los sensores modificando tanto su trayectoria y su desplazamiento, este comportamiento permite que el consumo de energía se vea reducido puesto que no se realiza la exploración de todo el entorno de trabajo e igualmente resulta en una mayor fiabilidad en cuanto a la

ubicación de la fuente de olor. El funcionamiento del algoritmo se describe en la Sección 4.2.3.

El algoritmo Aleatorio se caracteriza por cubrir la mayor área posible del entorno controlado, en el desplazamiento realizado por cada robot los valores detectados por los sensores MQ-3 son procesados, en el caso de registrarse un valor dentro del rango de detección alto el desplazamiento rectilíneo se reduce paulatinamente hasta ubicarse cerca de la fuente de olor. Este algoritmo no se basa en seguir la pluma de olor generada por la sustancia química, lo que se traduce en un mayor tiempo de exploración. El funcionamiento del algoritmo se describe en la Sección 4.2.2.

El algoritmo zigzag tal como su nombre lo indica planifica este tipo de trayectoria, y realizaba una exploración del área hasta que el sensor MQ-3 detecte una sustancia química. En el caso de no localizar la sustancia química el robot continúa planificando trayectorias en zigzag, sin embargo, para este algoritmo se presentan los siguientes inconvenientes: el tamaño del robot al momento de los giros ocasionaba pérdida de espacio para el registro de valores de los sensores químicos, debido a la trayectoria que realiza el robot el tiempo de exploración es mayor de y por lo tanto el consumo de energía es mayor.

En la implementación de los algoritmos explicados previamente los rangos de detección para cada sensor se establecieron mediante la correspondiente normalización de los valores de línea base y de pico de detección identificados, estos rangos son mostrados en la Tabla 23, en la cual los rangos para cada sensor varían debido al comportamiento característico de cada uno lo cual no sucedió en la simulación en la que se manejó rangos similares para todos debido al comportamiento ideal.

Tabla 23
Rangos de detección sensores de MQ-3

Robot	Sensor	Rango de Detección para la Sustancia Química (Alcohol)			Valores de Detección Normalizado Restado Línea Base	
		Baja detección	Media Detección	Alta Detección	Valor Máximo	Valor Mínimo
0	3	$x \leq 0,20$	$0,20 < x < 0,61$	$x \geq 0,61$	0,85	0,62
	1	$x \leq 0,20$	$0,20 < x < 0,68$	$x \geq 0,68$	0,88	0,69
	4	$x \leq 0,20$	$0,20 < x < 0,63$	$x \geq 0,63$	0,85	0,64

1	5	$x \leq 0,20$	$0,20 < x < 0,61$	$x \geq 0,61$	0,85	0,62
	2	$x \leq 0,20$	$0,20 < x < 0,67$	$x \geq 0,67$	0,88	0,68
	6	$x \leq 0,20$	$0,20 < x < 0,74$	$x \geq 0,74$	0,84	0,75
2	8	$x \leq 0,20$	$0,20 < x < 0,63$	$x \geq 0,63$	0,91	0,64
	7	$x \leq 0,20$	$0,20 < x < 0,76$	$x \geq 0,76$	0,90	0,77
	9	$x \leq 0,20$	$0,20 < x < 0,61$	$x \geq 0,61$	0,94	0,62

5.6.4 Procesamiento de datos obtenidos de los sensores ultrasónicos

Los valores de los sensores ultrasónicos HC-SR04 son obtenidos mediante la comunicación serie que se encuentra establecida para la tarjeta de procesamiento con la tarjeta de adquisición, para lo cual el caracter dispuesto para la petición de esta información es la letra “U”. Una vez enviada la petición por puerto serial, se realiza la adquisición de datos, los cuales son almacenados y transformados a valores de tipo flotante. Al realizar la implementación de los algoritmos los valores de proximidad fueron utilizados con la finalidad de que el robot no se acerque a ningún obstáculo del entorno; el valor de proximidad entre el sensor y un obstáculo fue 10 cm, y a partir de la verificación de este valor cada algoritmo ejecuta las acciones de giro o paro.

5.7 Control distribuido para robótica móvil cooperativa

El sistema de control distribuido para los robots móviles fue desarrollado a partir de una arquitectura de red, en la que se usó una comunicación inalámbrica que permite a los robots comunicarse y tener una sincronía entre ellos al momento de iniciar la búsqueda de fuentes de olor. Adicional, para la ejecución de los algoritmos de búsqueda se necesita de un ordenador por robot, el cual ejecute online los algoritmos en la tarjeta Raspberry PI 3 y posteriormente realice únicamente un monitoreo del estado del programa sin afectar el funcionamiento del algoritmo.

La cooperación entre los 3 agentes robóticos móviles se realizó mediante la implementación de un sistema de control distribuido. Las tareas de cooperación entre los robots se enfocaron en cubrir una mayor área de exploración de un entorno controlado y en reducir los tiempos de exploración, permitiendo obtener una mayor posibilidad en la búsqueda y localización de fuentes de olor.

El control distribuido implementado se realizó bajo los siguientes conceptos:

- Cooperación (Tareas de cooperación entre los robots móviles)
- Comunicación (Interfaz de comunicación)
- Coordinación (Tareas de coordinación entre los robots móviles)

El control distribuido implementado para los 3 agentes robóticos encargados de la detección y búsqueda de fuentes de olor se presenta en la Figura 120. Los robots realizan la adquisición del entorno, con respecto a la detección de un agente químico y obstáculos. En base a los parámetros detectados por su sistema de adquisición cada robot es capaz de interactuar con el entorno y realizar una navegación planificada en base al algoritmo que se ejecute para localizar una fuente de olor.

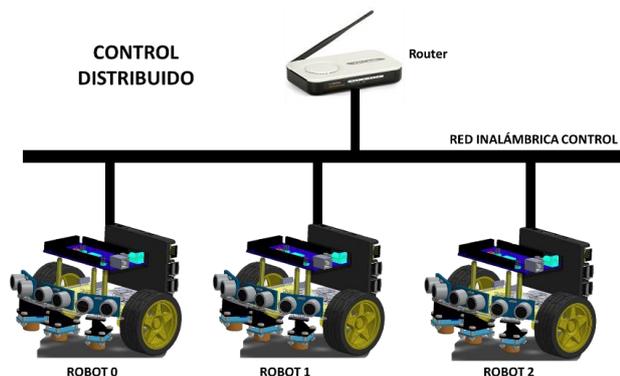


Figura 120. Control distribuido para robótica cooperativa

A continuación, se describe cada uno de los conceptos empleados en el sistema de control distribuido y las configuraciones realizadas para la correcta interacción de los agentes robotizados con el entorno.

5.7.1 Tareas de cooperación entre los robots móviles de búsqueda

Los algoritmos implementados en los robots móviles permiten que realicen la búsqueda de fuentes de olor independientemente, es decir cada robot puede localizar una fuente de olor en el entorno. Si existe la presencia de más de una fuente de olor, los robots podrían encontrar hasta 3 de las sustancias químicas presentes en el entorno. Finalizada la detección de las primeras fuentes de olor, los robots tienen la capacidad de volver a realizar una nueva búsqueda por medio de la ejecución del algoritmo de búsqueda en la tarjeta de procesamiento integrada en cada uno.

La utilización de los 3 robots bajo el sistema de control distribuido permite reducir los tiempos de exploración, debido a que si se utilizará un solo agente se encontraría una sola muestra en un tiempo determinado, frente al caso de utilizar 3 robots para localizar 3 fuentes de olor en el mismo intervalo de tiempo. Además de disponer de una mayor cobertura de exploración en la zona de búsqueda.

5.7.2 Desarrollo de interfaz de comunicación para robots móviles

Los 3 robots móviles al poseer cada uno de una tarjeta Raspberry PI 3 presenta las siguientes ventajas: posibilidad de programación y configuración de manera remota, envío de comandos por parte del usuario a la Raspberry y el envío de información del estado del proceso que este ejecutándose a un ordenador por medio del módulo de comunicación integrado en la tarjeta, el cual establece una comunicación WIFI.

Para la comunicación WIFI se utilizó un Router inalámbrico encargado del direccionamiento IP para los robots y los ordenadores. Para esto se configuró la red inalámbrica “TESIS JP-JP” de acceso libre para la conexión entre los dispositivos. Para la tarjeta Raspberry PI 3 de cada robot móvil se asignó una dirección IP estática, de igual manera se asignó direcciones IP dinámicas a los ordenadores encargados únicamente del monitoreo de las tarjetas. A continuación, en la Figura 121 a) se presenta el esquema de la topología de la red empleada. En la Figura 121 b) se presenta el direccionamiento IP de los dispositivos.

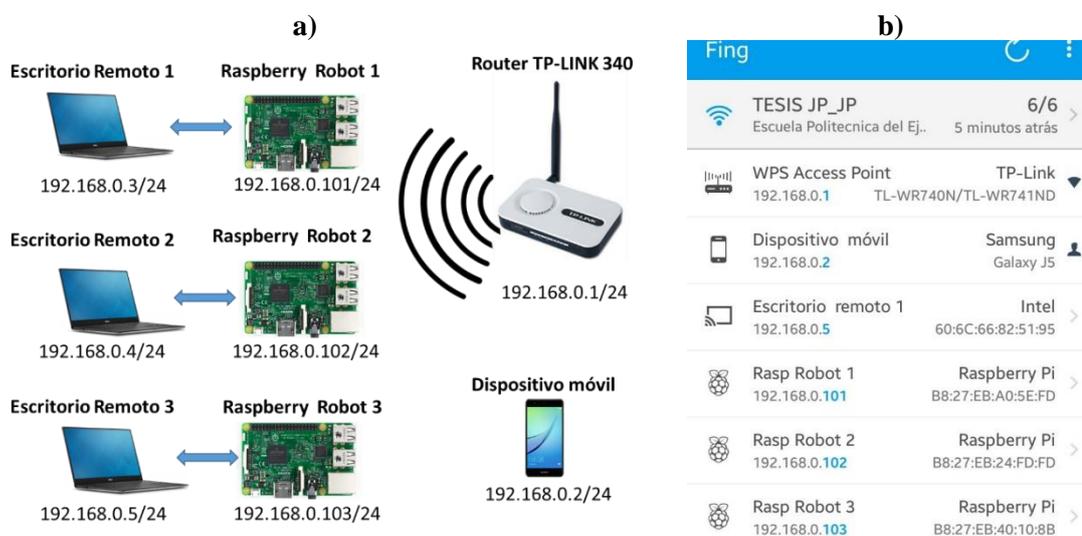


Figura 121. a) Diseño de la red inalámbrica, b) dispositivos conectados en la red visualizados desde un dispositivo móvil

5.7.2.1 Comunicación Cliente-Servidor

La tarjeta Raspberry PI 3 fue configurada para el uso del protocolo SSH, el cual se basa en una arquitectura Cliente-Servidor, permitiendo la conexión de un ordenador al host (IP estática Raspberry PI 3) de forma remota y acceder a sus atributos y funciones. La tipología distribuida implementada en los robots móviles permitía el acceso a sus datos de forma independiente, cada robot envía al ordenador al que esté conectado información mediante la utilización del terminal Putty que es un cliente SSH que permite establecer una comunicación con el Host de la tarjeta y recibir la siguiente información:

- Mensaje de inicio y fin del algoritmo que se esté ejecutando.
- Mensaje de detección de fuente de olor.
- Valor de detección los 3 sensores químicos MQ-3.
- Valor de distancia recorrida por el robot (centímetros).

La configuración establecida en el terminal Putty se aprecia en la Figura 122, en donde se configura la dirección IP del host (dirección de cada tarjeta Raspberry PI-3) y se establece el puerto de comunicación 22 que permite una comunicación SSH.

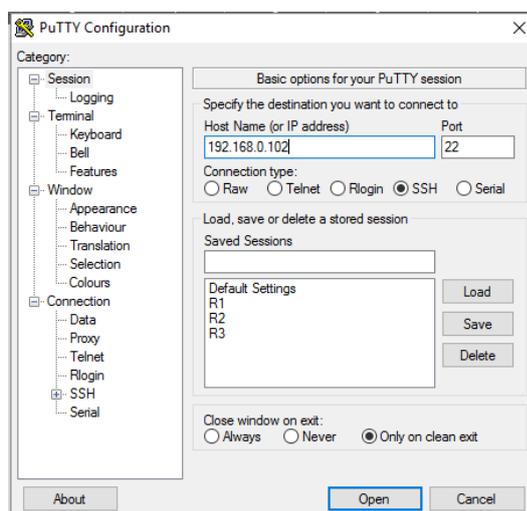


Figura 122. Software utilizado para la comunicación SSH

Establecida la conexión cliente-servidor en la interfaz de Putty se presenta un mensaje de comunicación del acceso al host, presentando posteriormente la consola de comandos (cmd) propio de la tarjeta Raspberry, en donde se ingresa el nombre del

directorio en el cual se encuentra almacenado algoritmo para su ejecución tal como se observa en la Figura 123.

```

pi@raspberrypi: ~/Desktop
login as: pi
pi@192.168.0.102's password:

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Thu Aug 24 21:06:39 2017 from 192.168.0.100

SSH is enabled and the default password for the 'pi' user has not been changed.
This is a security risk - please login as the 'pi' user and type 'passwd' to set
a new password.

pi@raspberrypi:~$ cd Desktop
pi@raspberrypi:~/Desktop$ sudo python 3Sensores.py

```

Entro a Inicializacion

Figura 123. Ventana de comunicación y envío de comando para ejecutar el algoritmo

La ejecución del algoritmo de búsqueda en la tarjeta Raspberry puede ser visualizada en un ordenador mediante Putty. En la Figura 124 se aprecia el monitoreo de los datos registrados por los 3 sensores químicos MQ-3 por medio de un vector, en el que se presentan valores de detección altos indicando que el robot localizó una fuente de olor imprimiendo el mensaje “Objeto centrado” que representa la detección efectiva de una fuente de olor y el fin del algoritmo. Además, se muestran las distancias recorridas por las dos ruedas del robot móvil.

```

[ 1.16842105  0.44140351  0.010625 ]
Nariz
Matriz Nariz 1
[ 1.57894737  0.66245614  0.460625 ]
Objeto Centrado
9.08
11.34
pi@raspberrypi:~/Desktop$ █

```

Figura 124. Información mostrada del estado del algoritmo al usuario

5.7.3 Tareas de coordinación entre los robots móviles de búsqueda

Las tareas de coordinación implementadas para los robots de búsqueda permiten que por medio del sistema de comunicación establecido los robots inicien la exploración y localización de fuentes de olor en el mismo instante de tiempo. Esto permite establecer una detección de las fuentes de olor bajo las mismas condiciones

del ambiente de trabajo, es decir se mantiene la temperatura, humedad y concentración de la sustancia.

Además, los sensores de proximidad ultrasónicos integrados en el sistema de detección de los robots móviles permite que en el caso de que un robot haya localizado una fuente de olor, y un segundo robot se dirija hacia esta, el segundo detectará la presencia del robot móvil y cambiará su trayectoria hasta localizar una fuente de olor, permitiendo que los robots puedan encontrar una mayor cantidad de sustancias químicas en el ambiente.

5.8 Implementación de algoritmos de búsqueda y detección de fuentes de olor en entornos reales

La investigación, desarrollo, implementación y simulación de los algoritmos permitieron conocer que el algoritmo zigzag no puede ser implementado en entornos reales, debido a factores tales como: dimensiones del robot, el poco espacio de trabajo sobre el cual se realiza la búsqueda de fuentes de olor, la autonomía que brindaban las baterías y el tiempo de búsqueda en un rango de 41 a 59 minutos registrado para este algoritmo en las simulaciones. Por tal razón el algoritmo zigzag no fue implementado.

Los algoritmos que fueron implementados en los robots móviles de búsqueda son los siguientes: aleatorio y Odor Tracking 2WD ya que los parámetros analizados para el algoritmo zigzag permitían su implementación. Las pruebas realizadas para los 2 algoritmos se realizaron bajo las mismas condiciones con las que se hizo las simulaciones, obteniéndose los siguientes parámetros: proximidad entre la fuente de olor y el robot, tiempo de búsqueda y efectividad en la detección de todas las fuentes de olor presentes.

5.9 Pruebas realizadas a los algoritmos de búsqueda en entornos reales

Para evaluar las características de desempeño de los algoritmos de búsqueda en entornos reales se realizaron pruebas en 3 entornos controlados que corresponden a los mapas de dispersión 5, 6 y 13 descritos en la sección 3.9.3. Se estableció la realización de un total de 10 pruebas para cada escenario y para cada algoritmo de búsqueda.

Para cada escenario explicado se realizaron diez repeticiones con las tres plataformas robóticas, los datos obtenidos de cada simulación fueron promediados con la finalidad de conseguir datos característicos de proximidad a las fuentes de olor, tiempos de duración en la búsqueda realizada por cada robot y eficacia en el número de fuentes detectadas para cada uno de los algoritmos planteados. Para las mediciones se empleó alcohol de 72 °GL y se trabajó bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura: 20-23°C
- Humedad: 60%
- Tiempo estabilización inicial para línea base: 3 minutos

A continuación, se presentan las pruebas realizadas para los entornos controlados: 5, 6 y 13 de la sección 3.9.3.

5.9.1 Ambiente controlado 5

El ambiente controlado 5 escogido para las pruebas de los algoritmos presenta 3 fuentes de olor diferentes con volúmenes de: 3, 5 y 10 ml de alcohol, el ambiente presentaba obstáculos y presentaba el mayor número de sustancias químicas de todos los ambientes propuestos en el Capítulo III. El espacio de trabajo del ambiente controlado mantiene las mismas dimensiones de los cuadrantes propuestos del área de trabajo de la cual se obtuvo los mapas de dispersión. En la Figura 125 se presenta la configuración del ambiente y la exploración de los robots móviles para la detección de las 3 sustancias químicas frente a la presencia de obstáculos.

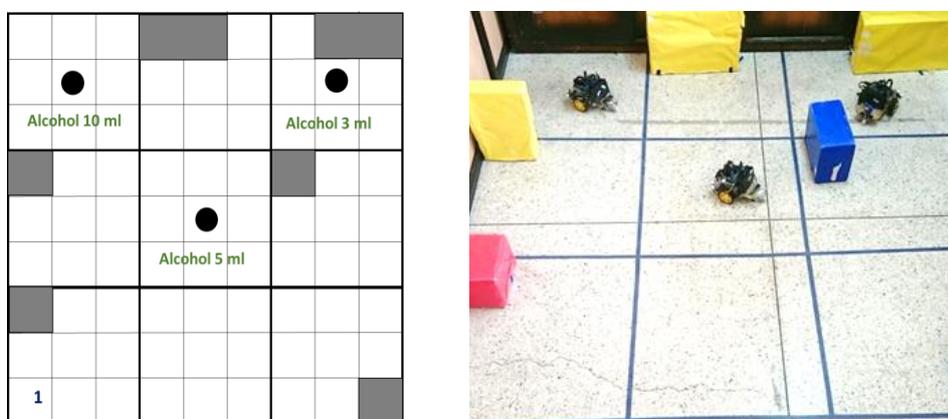


Figura 125. Ambiente controlado 5 - Configuración con tres fuentes de olor

Los resultados obtenidos de los experimentos realizados con los 2 algoritmos implementados se presentan en la Tabla 24, en donde se puede apreciar el cálculo obtenido de: la media, la desviación estándar, el máximo y mínimo de cada uno de los parámetros registrados para cada robot.

Tabla 24

Resultados obtenidos para 10 pruebas realizadas en un entorno real para la configuración del ambiente controlado 5 con presencia de obstáculos

Parámetro	Robot	Aleatorio			Odor Tracking 2WD		
		$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min
Distancia robot a fuente (cm)	0	22,1±31,7	89	0	10,9±17,5	45	0
	1	16,0±17,2	48	0	0,5±1,6	5	0
	2	14,0±29,4	90	0	1,0±2,1	5	0
Tiempo de experimento (s)	Todos	300±118	360	65	153±102	300	73
Número de fuentes localizadas	0	7			7		
	1	5			10		
	2	8			10		
Fuentes encontradas	Total	20/30			27/30		
	%	66,67%			90,00%		

5.9.1 Ambiente controlado 6

El ambiente controlado 6 escogido para las pruebas de los algoritmos presenta 3 fuentes de olor diferentes con volúmenes de: 3, 5 y 10 ml de alcohol, el ambiente no presenta obstáculos. El espacio de trabajo del ambiente controlado mantiene las mismas dimensiones de los cuadrantes propuestos del área de trabajo de la cual se obtuvo los mapas de dispersión. En la Figura 126 se presenta la configuración del ambiente y la distribución de las 3 sustancias químicas.

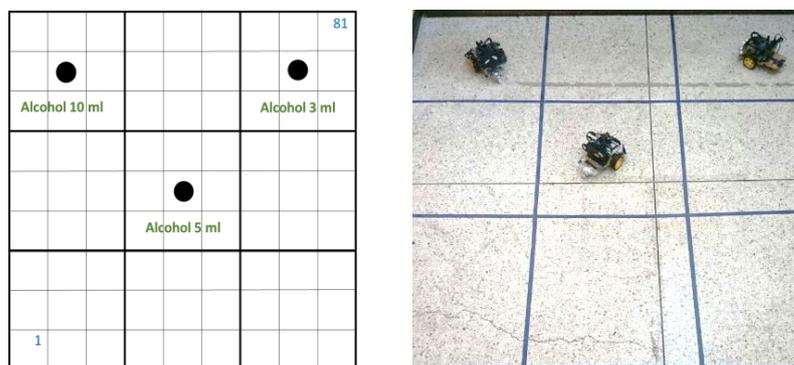


Figura 126. Ambiente controlado 6 - Configuración con tres fuentes de olor

Los resultados obtenidos de los experimentos realizados con los 2 algoritmos implementados se presentan en la Tabla 25, en donde se puede apreciar el cálculo obtenido de: la media, la desviación estándar, el máximo y mínimo de cada uno de los parámetros registrados para cada robot y la efectividad en la detección de todas las sustancias presentes de forma porcentual.

Tabla 25

Resultados obtenidos para 10 pruebas realizadas en un entorno real para la configuración del ambiente controlado 6 sin presencia de obstáculos

Parámetro	Robot	Aleatorio			Odor Tracking 2WD		
		$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min
Distancia del robot a la fuente (cm)	0	1,5±2,4	5	0	3,8±6,9	18	0
	1	9,6±15,6	45	0	9,3±17,4	48	0
	2	14,9±26,5	78	0	0±0	0	0
Tiempo de experimento (s)		279±115	360	53	183±108	300	71
Número de fuentes localizadas	0	10			8		
	1	7			8		
	2	7			10		
Fuentes encontradas	Total	24/30			26/30		
	%	80,00%			86,67%		

5.9.2 Ambiente controlado 13

El ambiente controlado 13 presenta la dispersión de un volumen de 20 ml alcohol producida por un ventilador, tal como se aprecia en la Figura 127. Para las pruebas realizadas en este ambiente controlado se utilizó únicamente el algoritmo Odor Tracking 2WD dedicado al seguimiento de plumas de olor. Las pruebas permitieron conocer el comportamiento del algoritmo frente a la presencia de perturbaciones generadas por corrientes de aire en el medio.

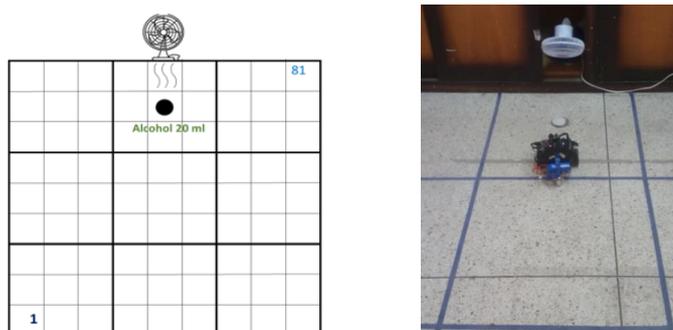


Figura 127. Área de experimentación -Configuración con perturbación

Los resultados obtenidos de los experimentos realizados para este ambiente controlado se presentan en la Tabla 26. Se puede observar una comparativa de los parámetros obtenidos para los experimentos con perturbación y sin perturbación, para los dos casos el algoritmo detectó todas las muestras de alcohol colocadas.

Tabla 26

Resultados obtenidos para 10 pruebas realizadas en un entorno real para la configuración del ambiente controlado 13 con presencia de perturbación

Algoritmo Odor Tracking 2WD							
Parámetro	Robot	Con Perturbación			Sin Perturbación		
		$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min	$\bar{x} \pm \sigma$	Max	Min
Distancia del robot a la fuente (cm)	2	4,00 ± 3,94	10	0	2,00 ± 2,58	5	0
Tiempo de experimento (s)	2	61 ± 22	97	40	63 ± 13	76	42
Número de fuentes localizadas	Total	10/10			10/10		
Fuentes encontradas	%	100,00%			100,00%		

5.10 Comparación de resultados de algoritmos de búsqueda y detección de fuentes de olor obtenidos en entornos simulados y reales

Finalizado las pruebas se procedió a realizar la comparación de los datos registrados para entornos simulados y reales de cada uno de los ambientes controlados propuestos y de los algoritmos que fueron implementados. Se compararon los siguientes parámetros: distancia del robot a la fuente, tiempo de experimentación requerido para localizar las fuentes de olor, número de fuentes localizadas por cada uno de los robots y el número total de fuentes encontradas durante la realización de las 10 pruebas para entornos reales y 10 pruebas para entornos simulados.

En la Tabla 27 se muestra los resultados del algoritmo aleatorio que son los siguientes: distancias de los robots a las fuentes de olor que muestran la proximidad de la detección de los agentes químicos; los tiempos de búsqueda y detección en el medio real son menores debido a las trayectorias generadas por este algoritmo y por la disposición de las fuentes dentro del entorno.

Tabla 27

Comparación de los resultados obtenidos para las pruebas del algoritmo aleatorio en entornos reales y simulados con 3 fuentes de olor.

Parámetro	Robot	Presencia de obstáculos		Sin presencia de obstáculos	
		Real	Simulación	Real	Simulación
		$\bar{x} \pm \sigma$	$\bar{x} \pm \sigma$	$\bar{x} \pm \sigma$	$\bar{x} \pm \sigma$
Distancia robot a fuente (cm)	0	22,1±31,7	18,4±25,8	1,5±2,4	1,0± 2,1
	1	16,0±17,2	1,0±2,1	9,6±15,6	0±0
	2	14,0±29,4	45,0±42,6	14,9±26,5	14,6±8,9
Búsqueda y Detección (s)	Todos	300±118	1022±375	279±115	887±295
Número de fuentes localizadas	0	7	7	10	7
	1	5	10	7	10
	2	8	4	7	5
Fuentes encontradas	Total	20/30	21/30	24/30	22/30
	%	66,67%	70,00%	80,00%	73,33%

En la Tabla 28 se muestra la comparación de los resultados del algoritmo Odor Tracking 2WD para entornos reales y simulados, apreciándose lo siguiente: distancias de los robots a las fuentes no presentan un cambio significativo debido al comportamiento propio del algoritmo, mientras que los tiempos varían debido a que los sensores MQ-3 responden al nivel de concentración y dispersión del químico.

Tabla 28

Comparación de los resultados obtenidos para las pruebas del algoritmo Odor Tracking 2WD en entornos reales y simulados con tres fuentes de olor.

Parámetro	Robot	Presencia de obstáculos		Sin presencia de obstáculos	
		Real	Simulación	Real	Simulación
		$\bar{x} \pm \sigma$	$\bar{x} \pm \sigma$	$\bar{x} \pm \sigma$	$\bar{x} \pm \sigma$
Distancia robot a fuente (cm)	0	10,9±17,5	7,0±4,2	3,8±6,9	2,0±4,2
	1	0,5±1,6	4,0±3,9	9,3±17,4	6,0±5,2
	2	1,0±2,1	0 ± 0	0 ± 0	2,0± 4,2
Búsqueda y Detección (s)	Todos	153±102	290±79	183±108	296±187
Detección de Fuentes	0	7	9	8	10
	1	10	6	8	10
	2	10	9	10	10
	Total	27/30	24/30	26/30	30/30
	%	90,00%	80,00%	86,67%	100,00%

En la Tabla 29, se presenta la comparación de los resultados obtenidos en las pruebas del algoritmo Odor Tracking 2WD en un entorno con perturbación, en donde se aprecia que las variación en la proximidad de cada robot a una fuente de olor es poco significativa, mientras que para el tiempo de experimentación el cambio es apreciable, debido a que el algoritmo se enfoca en el seguimiento de una pluma de olor, en este caso los sensores detectaban diferentes niveles de concentración en el ambiente provocado por la dispersión generada por el ventilador, provocando que el algoritmo ajuste su trayectoria hacia los niveles altos de concentración detectados.

Tabla 29

Comparación de los resultados obtenidos de pruebas del algoritmo Odor Tracking 2WD en un entornos real y simulado con perturbación.

Algoritmo Odor Tracking 2WD en entorno con Perturbación Sin Obstáculos			
Parámetro	Robot	Real	Simulación
		$\bar{x} \pm \sigma$	$\bar{x} \pm \sigma$
Distancia del robot a la fuente (cm)	1	4,00 ± 3,94	6,00 ± 3,94
Tiempo de experimento (s)	1	61 ± 22	179 ± 52
Número de fuentes localizadas	Total	10/10	10/10
Fuentes encontradas	%	100.00%	100.00%

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones y recomendaciones

6.1.1 Obtención de patrones de dispersión en ambientes controlados

Previo a la obtención de patrones de dispersión de alcohol y colonia con sensores químicos se realizó la caracterización y comparativa de 2 sensores: MQ-3 y MQ-135 dedicados a la detección de alcohol. Para esto se colocó diferentes volúmenes de alcohol con concentración de 72°GL para estimular a los sensores, obteniéndose las curvas características para cada volumen de alcohol, de las cuales se obtuvo parámetros cuantitativos que permitieron comparar la respuesta de cada sensor al ser estimulado. Se pudo comprobar que el sensor MQ-3 presentó un mejor tiempo de respuesta, mayor estabilidad de línea base y valores pico de detección mayores que el sensor MQ-135 para los diferentes experimentos realizados.

Al seleccionar el sensor MQ-3 para la detección de alcohol, se efectuaron varios experimentos para determinar la mejor ubicación del sensor en el robot móvil con respecto a su posición y altura para realizar una detección efectiva del químico presente en el entorno. Por tal razón, se probaron varias posiciones y alturas del sensor con respecto al piso obteniéndose curvas características que permitan determinar una detección efectiva de volúmenes de alcohol de 0,2 ml a 10 ml, determinándose una posición de montaje de la tarjeta del sensor paralela al robot y una altura de 1 cm desde el piso.

Se determinó el rango de detección de los sensores químicos MQ-3 a partir de varios experimentos, en los cuales fueron colocadas volúmenes de alcohol y se ubicó los sensores MQ-3 a diferentes distancias desde 5 cm hasta 40 cm, bajo estas disposiciones se obtuvo las curvas de respuesta de los sensores y se analizó los valores pico de detección y tiempos de respuesta obteniéndose las distancias de detección: máxima de 10 cm y mínima de 0 cm, en las que los sensores eran capaces de detectar la presencia de un volumen de alcohol de 3 ml a 10 ml.

Se desarrolló el primer prototipo de un robot móvil para el levantamiento de mapas de dispersión para realizar el registro de datos de la dispersión de alcohol en entornos controlados. Para esto el robot fue equipado con un sistema de adquisición que disponía de 3 sensores MQ-3 que permitieron la detección de alcohol y colonia, además se implementó un sistema de comunicación inalámbrica basado en el estándar IEEE 802.15 para una comunicación Bluetooth, permitiendo que el robot realice una navegación semiautomática dentro del ambiente controlado, evitándose el ingreso de perturbaciones por acciones del usuario.

La construcción del robot móvil de mapeo permitió realizar el levantamiento de 13 mapas de dispersión en diferentes entornos bajo condiciones de temperatura y humedad constantes, los mapas obtenidos representaban el comportamiento de la dispersión de alcohol y colonia en un tiempo de 20 minutos, se pudo observar que la dispersión de los volátiles se realizaba de forma radial, la cual dependía de la concentración y volumen presente en el ambiente. Además, se pudo observar en los mapas de dispersión que la dirección de propagación del volátil dependía de la presencia de obstáculos, lo cual impedía una dispersión uniforme.

Los sensores MQ-3 presentaban un arrastre en su señal al ser estimulados por una sustancia química, lo que provocó la alteración en el registro de datos de los mapas de dispersión obtenidos debido a que el tiempo de espera entre registro fue menor al tiempo requerido para que el sensor se estabilice en su línea base.

Se obtuvo un mapa de dispersión de una muestra de alcohol de 20 ml colocada en entorno controlado con la presencia de una perturbación generada por un ventilador. En el mapa se puede observar que las corrientes de aire presentes en el entorno provocan que la dispersión de la sustancia sea radial y también conserve la dirección de propagación del aire generado. De esta forma se obtuvo una pluma de olor sujeta a condiciones reales, en donde la dispersión de la sustancia dependerá del volumen y nivel de concentración para que pueda ser detectada.

Se recomienda obtener los mapas de dispersión de sustancias volátiles como: benceno, etanol, TNT, entre otras para conocer el comportamiento de la pluma de olor de estos químicos debido a que en las hojas técnicas se especifica que el sensor MQ-3 presenta una mayor detección para estos químicos que para alcohol.

Se recomienda realizar una limpieza al entorno controlado antes y después de cada experimento que se plantee realizar, debido a la presencia de residuos resultantes de la dispersión del químico volátil, provocando que las nuevas mediciones tengan resultados erróneos. Para volúmenes de alcohol de hasta 10 ml se recomienda un tiempo de limpieza entre experimentos de 30 minutos.

Debido a la aleatoriedad en la obtención de datos de los sensores MQ-3 en los experimentos realizados debido al acondicionamiento del fabricante al sensor químico, se recomienda realizar un mejor acondicionamiento de las señales en base a una caracterización previa que permita conocer el comportamiento de varios sensores frente a la presencia de un estímulo químico, con esto se garantiza que las señales de los sensores químicos empleados sean similares.

Para obtener un único rango de trabajo con las señales de los sensores MQ-3 se recomienda realizar una normalización de las mismas, en un rango específico. Para el caso del presente trabajo se realizó la caracterización de los sensores determinando sus valores pico de detección y de línea base, lo que permitió establecer la señal de cada sensor en un rango de 0 a 1 que representa los niveles de detección del sensor.

Para el levantamiento de mapas de dispersión se debe cuidar que los sensores MQ-3 no se encuentren estimulados, es decir al momento de realizar la adquisición de datos en un punto se debe esperar un tiempo de hasta 10 segundos hasta que la señal de cada sensor pueda regresar a su línea base y efectuar nuevamente una medición en otro punto del área de trabajo.

Se recomienda utilizar varios sensores químicos en una misma plataforma para cubrir un mayor espacio y reducir el tiempo de adquisición de datos de la dispersión de un químico dentro de un entorno, de esta forma se puede obtener mapas de dispersión con mayor resolución, además se debe considerar que la respuesta del sensor a distancia no es adecuada debido a que en varios experimentos se pudo comprobar que generalmente se generan picos de detección que no superaban los valores de detección de los sensores.

6.1.2 Implementación de algoritmos de búsqueda en entornos simulados

Con los mapas de dispersión obtenidos por el robot de mapeo se generaron imágenes que representen el comportamiento del patrón de dispersión en Matlab, Las imágenes fueron importadas en el entorno de simulación V-REP para disponer de ambientes de dispersión simulados que permitan el desarrollo e implementación de algoritmos de búsqueda de fuentes de olor en robots móviles. Para esto se estableció una comunicación entre V-REP y Python mediante una API para el envío y gestión de datos de los objetos en el entorno de V-REP.

La comunicación establecida entre V-REP y Python en muchas de las simulaciones originaba que los sensores y actuadores se comporten de forma errónea. Para el caso de los sensores de visión que fueron configurados para simular el comportamiento de los sensores MQ-3, se encontró errores en la lectura de los datos obtenidos. Los errores generalmente se produjeron en la detección de los diferentes niveles de dispersión de una sustancia en la imagen cargada en el entorno y que provocaban que los robots móviles no encuentren la fuente de olor. De igual manera los sensores proximidad en los robots simulados registraban datos erróneos en sus detecciones provocando que estos naveguen de forma errónea aumentando el tiempo de simulación.

Para las pruebas de los algoritmos de búsqueda realizadas en los entornos simulados y reales se normalizó los rangos de detección de los sensores químicos en un rango de 0 a 1, debido a que los sensores presentan línea base y valores picos de detección diferentes, además la normalización facilitó el desarrollo de los algoritmos debido a que se implementaron los mismos niveles de búsqueda de las sustancias químicas basados en la concentración sin importar los valores de línea base y valores pico de detección de cada sensor.

Se empleó el lenguaje Python para el desarrollo de 3 algoritmos de búsqueda debido a que es un lenguaje de propósito general, con licencia libre y orientado a objetos, el cual permite la comunicación mediante la utilización de librerías y comandos establecidos por el desarrollador de V-REP, por lo que se pudo programar robots móviles simulados que planifiquen trayectorias y localicen fuentes de olor en los entornos desarrollados.

En la etapa de simulación se comprobó 3 algoritmos de búsqueda de fuentes de olor: zigzag, aleatorio y Odor Tracking 2WD. Las simulaciones requieren de un alto costo computacional, debido a que se requiere un gran procesamiento para la ejecución de los algoritmos y su relación con todos los objetos presentes en el escenario, por lo que se configuró cada escenario de simulación con las características gráficas más básicas permitiendo simulaciones en tiempo real.

Las simulaciones realizadas para los mapas de dispersión con presencia de obstáculos permitieron determinar el algoritmo que presentaba un mejor desempeño en la búsqueda y detección de fuentes de olor. El algoritmo Odor Tracking 2WD presentó los mejores resultados para los siguientes parámetros: tiempo de simulación, proximidad del robot a una fuente de olor y número total de fuentes detectadas por todos los robots en la realización de las 10 simulaciones. Se utilizaron 3 mapas de dispersión, los cuales contenían 1,2 y 3 fuentes de olor encontrándose el siguiente comportamiento en cada uno: en el mapa de 1 fuente de olor, el tiempo medio de simulación fue de 192 segundos, una proximidad media del robot a la fuente de 0 cm, encontrándose todas las fuentes de olor dando como resultado un 100% de efectividad en la detección; para el caso del mapa con 2 fuentes, el tiempo medio de simulación fue de 287 segundos, la proximidad del robot a la fuente fue de 0 cm, y los robots encontraron un total de 20 fuentes dando como resultado un 100% de efectividad; en el caso del mapa con 3 fuentes se presentó un tiempo medio de simulación de 296 segundos, una proximidad de los robots de 0 cm a las fuentes, y se detectó un total de 30 fuentes dando como resultado un 100% de efectividad en la búsqueda y detección de las fuentes de olor

Las simulaciones realizadas para los mapas de dispersión sin presencia de obstáculos permitieron determinar el algoritmo que presentaba un mejor desempeño, resultando el algoritmo Odor Tracking 2WD, el cual presentaba los mejores resultados en los parámetros de tiempo de simulación, proximidad de los robots a una fuente de olor y total de fuentes detectadas. Se utilizaron 3 mapas de dispersión, los cuales contenían 1,2 y 3 fuentes de olor encontrándose el siguiente comportamiento en cada uno: para el caso del mapa con 1 fuente de olor el tiempo medio de simulación fue de 146 segundos, se encontró una proximidad de un robot a una fuente de 5 cm, los robots encontraron un total de 10 fuentes dando como resultado un 100% de efectividad en

la detección; en el caso de los mapas con 2 fuentes el tiempo de simulación fue de 602 segundos, los robots se localizaron a una distancia de 0 cm a las fuentes de olor y se encontró un total de 18 fuentes dando como resultado un 90% de efectividad; finalmente para el caso de los mapas de 3 fuentes el tiempo medio de simulación fue de 296 segundos, los robots se posicionaron a 0 cm de las fuentes de olor y se encontró un total de 24 fuentes dando como resultado un 80% de efectividad en la detección de las fuentes de olor totales.

Para un manejo adecuado de los recursos de V-REP se debe disponer de un computador con buenas características, es decir un procesador Core i7 de 2.4 GHz y una memoria RAM de 12GB, de esta forma se garantiza que las simulaciones se ejecuten en tiempo real evitando que se generen colapsos en el sistema operativo del ordenador y gestionando una adecuada comunicación entre V-REP y la API de comunicación con el programa de control orientado a objetos como Python.

6.1.3 Implementación de algoritmos de búsqueda y detección en robots móviles

Los algoritmos de búsqueda y detección de fuentes de olor que fueron desarrollados en lenguaje Python y evaluados en el entorno de simulación de V-REP, para posteriormente ser implementados en robots móviles. Para esto se construyeron 3 robots móviles de búsqueda, sobre los cuales se adaptó una tarjeta microprocesada Raspberry PI 3 para la ejecución los algoritmos de búsqueda en Python y obtención de datos de los sensores de proximidad y sensores químicos mediante una tarjeta Arduino Mega 2560. La utilización de la tarjeta Raspberry PI 3 permitió que los robots sean escalables, debido a sus altas prestaciones permitiendo a futuro la integración de más dispositivos que brinden mayor funcionalidad.

Se realizaron varias pruebas de los algoritmos de búsqueda en varios entornos, con y sin presencia de obstáculos, además del ingreso de perturbaciones al ambiente generadas por el ventilador, en donde se pudo comprobar que los robots presentaban dificultad en la detección de volúmenes de alcohol inferiores a los 4 ml.

En las pruebas realizadas las variaciones de las condiciones climáticas, especialmente de temperatura y humedad producían que los sensores presenten

diferentes picos de detección y de línea base generando que los robots exploren la zona ignorando bajas concentraciones de alcohol.

En las pruebas realizadas se observó que los robots móviles fueron capaces de hacer un seguimiento de la pluma de olor para volúmenes de alcohol de 5 y 10 ml, la detección de la pluma por los robots se realizaba a 10 cm y a 21 cm de la fuente de olor respectivamente. Sin embargo, para de 3 ml de alcohol los robots necesariamente debían localizarse a una distancia de 1 cm a 2 cm para detectar la fuente de olor y realizar el seguimiento de la pluma de olor.

Las pruebas realizadas a los algoritmos de búsqueda: aleatorio y Odor Tracking 2WD en entornos reales con 3 fuentes diferentes de alcohol de 3, 5 y 10 ml, en donde existió la presencia de obstáculos permitieron determinar que el algoritmo Odor Tracking 2WD presentó el mejor desempeño, debido a que la búsqueda de las 3 fuentes de olor en 10 pruebas realizadas establecieron un tiempo medio de búsqueda de 153 segundos, una proximidad de 0 cm entre los robots y las fuentes de olor, y fueron detectadas un total de 27 fuentes dando como resultado un 90% de efectividad. Para el caso del ambiente controlado con 3 fuentes de alcohol y sin presencia de obstáculos se encontró un tiempo medio de búsqueda de 183 segundos, una proximidad de 0 cm entre los robots y las fuentes, y se encontró un total de 26 fuentes dando como resultado un 86,67% de efectividad.

Con los resultados obtenidos de la implementación de los algoritmos de búsqueda en entornos simulados y reales se determinó que el algoritmo Odor Tracking 2WD dedicado al seguimiento de la pluma de olor obtuvo los mejores resultados, debido a que los tiempos de búsqueda y la proximidad entre un robot y la fuente de olor eran menores con respecto a los demás algoritmos, registrando en simulación una fiabilidad en la detección de las fuentes de olor con presencia de obstáculos para entornos reales del 90% y del 80% en entornos simulados, mientras que sin la presencia de obstáculos en entornos reales presentó una fiabilidad del 86,67% frente a la fiabilidad de 100% en entornos simulados.

El algoritmo aleatorio en entornos simulados y reales presenta una adecuada detección de las fuentes de olor debido a que para ambientes con presencia de obstáculos se obtuvo una fiabilidad de 66,67% para entornos reales y una fiabilidad

del 70% para entornos simulados, mientras que sin la presencia de obstáculos en los entornos reales presentó una fiabilidad del 76,67% frente a la fiabilidad de 73,33% en entornos simulados, reduciendo la eficiencia de este algoritmo con respecto al Odor Tracking 2WD debido a los tiempos de búsqueda encontrados y a la cercanía entre los robots y las fuentes de olor.

En las pruebas realizadas para los algoritmos de búsqueda en entornos reales, se observó que los niveles de concentración de una sustancia disminuyen frente a la presencia de una perturbación generada por un ventilador, por lo que al momento de implementar el algoritmo Odor Tracking 2WD se calibró nuevamente los sensores MQ-3 debido a que los niveles de detección configurados en el algoritmo disminuyeron provocando que el robot no detecte una fuente de alcohol de 20 ml.

Debido al uso de la tarjeta Raspberry PI 3 y la utilización de 3 sensores MQ-3, los cuales tienen un consumo energético alto, se recomienda utilizar baterías tipo Li-ON de litio superiores a los 1500 mAh, para garantizar un mayor tiempo de autonomía en la búsqueda de fuentes de olor con los robots.

En futuros trabajos se aconseja utilizar sensores de proximidad diferentes a los empleados en esta investigación para mejorar la navegación de los robots móviles de búsqueda, debido a que en las pruebas realizadas en muchas ocasiones los robots colisionaban entre sí o con los objetos, una opción viable es el uso de sensores de proximidad SHARP.

En los diseños de robots móviles futuros se recomienda utilizar motores con mayor torque y un mejor sistema de control de velocidad y giros de estos, debido a que en las pruebas realizadas con los robots móviles se encontró que el peso de estos no permitía que se desplacen correctamente provocando que los motores trabajen a máxima capacidad, también no se disponía de una adecuada precisión al momento de realizar cambios de giros en el robot debido a que la rueda de encoder únicamente disponía de 20 huecos.

6.2 Trabajos Futuros

En base al trabajo de investigación realizado se propone las siguientes ideas dedicadas a la contribución de la temática relacionada a la búsqueda y detección de fuentes de olor empleando robots móviles bajo el concepto de robótica cooperativa.

Para los robots móviles de búsqueda construidos en esta investigación se plantea implementar un control centralizado para los robots móviles de búsqueda que permita el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario (GUI) que muestre parámetros como: trayectorias realizadas, localización de los robots en el entorno en tiempo real, niveles detectados por los sensores químicos, confirmación de identificación de una fuente, entre otras. La GUI debe almacenar esta información en una base de datos que permita a un robot laboratorio que incorpore una nariz electrónica dirigirse directamente a la posible fuente de olor detectada y comprobar la existencia de la misma.

En futuros trabajos de investigación dedicados a la detección de sustancia químicas se propone incrementar las funcionalidades de los robots móviles integrando diferentes sensores químicos para que cada robot sea capaz de discriminar e identificar una o más sustancias químicas presentes en el ambiente, para esto es necesario desarrollar un algoritmo de selectividad que permita a los robots clasificar las sustancias.

Es necesario realizar mejoras del sistema de navegación de los robots móviles de búsqueda mediante la implementación de tecnologías para odometría que permitan al robot localizarse en el entorno, además se debe desarrollar un sistema que permita controlar al robot de forma autónoma o semiautomática.

Se invita a ampliar la investigación realizada y proponer más algoritmos de búsqueda centrados en la navegación autónoma para enjambres robóticos que permitan desarrollar y cumplir de mejor manera los objetivos propuestos para el proyecto institucional ESPE-PIC-2016-009 denominado “SmellRobSense”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, N. R., Cortés, J., & Martínez, S. (2016). Distributed control and estimation of robotic vehicle networks: An overview of part 2. *IEEE Control Systems Magazine*, 36(4), 18–21. Retrieved from <http://www.digikey.at/de/articles/techzone/2014/jul/what-engineers-need-to-know-when-selecting-an-automotive-qualified-mcu-for-vehicle-applications>
- Aniketh, R., Manohar, E. B., Yazwa, G. R. S. P. R., Nithya, M., & Rashmi, M. R. (2017). A decentralized fault-tolerant weights based algorithm for coordination of swarm robots for a disaster scenario. *2016 IEEE Annual India Conference, INDICON 2016*. <https://doi.org/10.1109/INDICON.2016.7839027>
- Arduino. (2017). Arduino mega 2560. Retrieved from <http://arduino.cl/arduino-mega-2560/>
- Bachir, B., Ali, A., & Abdellah, M. (2012). Multiobjective Optimization of an Operational Amplifier by the Ant Colony Optimisation Algorithm. *Electrical and Electronic Engineering*, 2(4), 230–235. <https://doi.org/10.5923/j.eee.20120204.09>
- Belanger, J. H., & Willis, M. A. (1998). Biologically-inspired search algorithms for locating unseen odor sources. *Ieee International Symposium on Intelligent Control - Proceedings*, p 265-270. <https://doi.org/10.1109/ISIC.1998.713672>
- Bhattacharya, S., & Agrawal, R. (2017). Development of robot swarm algorithms on an extensible framework. *Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON*. <https://doi.org/10.1109/SECON.2017.7925296>
- Blit, I. W., Juwita, A. B., Suprijanto, & Nugraha. (2015). Prototype Instruments for Determination of Aroma and Flavor Quality of Brewed Black Tea. *ICICI-BME*, 138–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ICICI-BME.2015.7401351>
- Brink, J., & Pebesma, E. (2014). Plume tracking with a mobile sensor based on incomplete and imprecise information. *Transactions in GIS*, 18(5), 740–766. <https://doi.org/10.1111/tgis.12063>
- Cai, A., Fukuda, T., & Arai, F. (1997). Cooperation of multiple robots in cellular robotic system based on information sharing. *Advanced Intelligent Mechatronics '97. Final Program and Abstracts., IEEE/ASME International Conference on*, 20-. <https://doi.org/10.1109/AIM.1997.652878>
- Cao, Y. U., Fukunaga, A. S., Kahng, A. B., & Meng, F. (1997). Cooperative mobile robotics: antecedents and directions. *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, 23, 226–234. <https://doi.org/10.1109/IROS.1995.525801>
- Cardé, R. T., & Willis, M. A. (2008). Navigational strategies used by insects to find distant, wind-borne sources of odor. *Journal of Chemical Ecology*, 34(7), 854–866. <https://doi.org/10.1007/s10886-008-9484-5>
- Chu, C. W., Lin, M. Der, Liu, G. F., & Sung, Y. H. (2008). Application of immune

- algorithms on solving minimum-cost problem of water distribution network. *Mathematical and Computer Modelling*, 48(11–12), 1888–1900. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.02.008>
- Clark, K. L., & Robinson, P. J. (2015). Robotic agent programming in TeleoR. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015–June*(June), 5040–5047. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139900>
- Copelia Robotics. (2017). Introduction of V-REP. Retrieved from <http://www.coppeliarobotics.com/>
- Craver, M. D. (2014). *Mobile Robot Homing Control Based on Odor Sensing*. NC State University. Retrieved from <https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/9848>
- Crimaldi, J. P., Koehl, M. A. R., & Koseff, J. R. (2002). Effects of the resolution and kinematics of olfactory appendages on the interception of chemical signals in a turbulent odor plume. *Environmental Fluid Mechanics*, 2(1–2), 35–63. <https://doi.org/10.1023/A:1016279617858>
- de Croon, G. C. H. E., O'Connor, L. M., Nicol, C., & Izzo, D. (2013). Evolutionary robotics approach to odor source localization. *Neurocomputing*, 121, 481–497. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.05.028>
- De la Cruz, C., & Carelli, R. (2006). Dynamic Modeling and Centralized Formation Control of Mobile Robots. *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, 3880–3885. <https://doi.org/10.1109/IECON.2006.347299>
- Electronics DAGU Hi-Tech. (2009). Gearmotor Dg01D-a130. Retrieved from <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Robotics/DG01D.pdf>
- ElectronicsOsaka. (2016). DC motor gear model MR3110K. Retrieved from <http://osakaelectronicsltda.com/pdf/MR3110K.pdf>
- Farkas, S., & Shorey, H. H. (1972). Chemical Tril-Following by Flying Insects. *Science*, 178, 67–68. Retrieved from [http://biology.kenyon.edu/courses/biol261/PDF Files/FarkasScience.pdf](http://biology.kenyon.edu/courses/biol261/PDF%20Files/FarkasScience.pdf)
- Freaks, E. (2011). *HC-SR04 User Guide*. *Elec Freaks*. Retrieved from http://www.electfreaks.com/store/download/product/Sensor/HC-SR04/HC-SR04_Ultrasonic_Module_User_Guide.pdf
- Gaibor, D., & Mediavilla, J. (2016). *Desarrollo e Implementación de un sistema robótico para el análisis de acetona en un ambiente controlado*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/11834/T-ESPE-053235.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gao, X., & Acar, L. (2016). Multi-sensor integration to map odor distribution for the detection of chemical sources. *Sensors (Switzerland)*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/s16071034>
- Genqun Cui, Kun Ren, Chunshu Li, & Zhen Wang. (2011). Odor source localization research of mobile robot based on neural network. *2011 International Conference*

on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization, 130–133. <https://doi.org/10.1109/ICSSEM.2011.6081256>

- Gonzalez, E., Alarcon, M., Aristiziibal, P., & Parra, C. (2003). BSA : A Coverage Algorithm. *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ*, (October), 1679–1684. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/document/1248885/>
- González, E., Álvarez, O., Díaz, Y., Parra, C., & Bustacara, C. (2005). BSA: A complete coverage algorithm. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005(April), 2040–2044. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570413>
- Gonzalez, E., & Gerlein, E. (2009). BSA-CM: A multi-robot coverage algorithm. *Proceedings - 2009 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, IAT 2009*, 2, 383–386. <https://doi.org/10.1109/WI-IAT.2009.182>
- Guo, F., Wen, C., Mao, J., Chen, J., & Song, Y. D. (2015). Distributed Cooperative Secondary Control for Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(5), 1078–1088. <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2462773>
- Haddad, R., Carmel, L., Sobel, N., & Harel, D. (2008). Predicting the receptive range of olfactory receptors. *PLoS Computational Biology*, 4(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.0040018>
- Hanwei Eletronics. (2002). Technical data: MQ-3 gas sensor. *Sparkfun*, 1–2. Retrieved from <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/MQ-3.pdf>
- Hayes, a. T., Martinoli, a., & Goodman, R. M. (2001). Swarm robotic odor localization. *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No.01CH37180)*, 2, 1073–1078. <https://doi.org/10.1109/IROS.2001.976311>
- Hirokawa, M., Funahashi, A., Pan, Y., Itoh, Y., & Suzuki, K. (2016). Design of a robotic agent that measures smile and facing behavior of children with Autism Spectrum Disorder. *25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, RO-MAN 2016*, 843–848. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2016.7745217>
- INAMHI. (2017). Humedad relativa Quito Junio-Agosto 2017. Retrieved from <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/pronostico/pichinchadmq.pdf>
- Ingllett, J. E., & Rodriguez-Seda, E. J. (2017). Object transportation by cooperative robots. *Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON*. <https://doi.org/10.1109/SECON.2017.7925348>
- Ishida, H., Nakamoto, T., & Moriizumi, T. (1997). Remote Sensing and Localization of Gas/Odor Source and Distribution Using Mobile Sensing System. *International Conference on Solid State Sensors and Actuators*, 49(1), 4–7.
- Ishida, H., Nakayama, G., & Nakamoto, T. (2005). Controlling a Gas / Odor Plume-

- Tracking Robot Based on Transient Responses of Gas Sensors, 5(3), 537–545.
- ITEAD Studio. (2010). Hc-05 Bluetooth Module. *Datasheet*. Retrieved from <http://www.electronicastudio.com/docs/istd016A.pdf>
- Jatmiko, W., Ikemoto, Y., Matsuno, T., Fukuda, T., & Sekiyama, K. (2005). Distributed odor source localization in dynamic environment. *Proceedings of IEEE Sensors, 2005*, 254–257. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2005.1597684>
- Jiu, H. F., Pang, S., Li, J. L., & Han, B. (2014). Odor plume source localization with a Pioneer 3 Mobile Robot in an indoor airflow environment. *Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON*, (61175095), 0–5. <https://doi.org/10.1109/SECON.2014.6950691>
- Khan, A., Rinner, B., & Cavallaro, A. (2016). Cooperative Robots to Observe Moving Targets: Review. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2016.2628161>
- Kiatweerasakul, M., & Stonham, T. (2002). Odour Plume Tracking Robot Using Semiconductor Gas Sensors. *Seventh International Conference on Control, Automation, Robotics And Vision (ICARCV'02), Dec 2002, Singapore*, 5–9. <https://doi.org/10.1109/icarcv.2002.1238527>
- Kim, Y., & Kim, B. K. (2017). Time-Optimal Trajectory Planning Based on Dynamics for Differential-Wheeled Mobile Robots With a Geometric Corridor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(7), 5502–5512. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2677331>
- Kowadlo, G., & Russell, R. A. (2008). Robot Odor Localization: A Taxonomy and Survey. *The International Journal of Robotics Research*, 27(8), 869–894. <https://doi.org/10.1177/0278364908095118>
- Kowadlq, G., & Russell, R. A. (2004). To naively smell as no robot has smelt before. *2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 898–903. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/RAMECH.2004.1438037>
- Li, J.-G., Meng, Q.-H., Wang, Y., & Zeng, M. (2011). Odor source localization using a mobile robot in outdoor airflow environments with a particle filter algorithm. *Autonomous Robots*, 30(3), 281–292. <https://doi.org/10.1007/s10514-011-9219-2>
- Lilienthal, A., & Duckett, T. (2004). Building Gas Concentration Gridmaps, (April 2004). Retrieved from http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/publikationen/2004/lilien04-ras2004_col.pdf
- Lilienthal, A. J., Loutfi, A., & Duckett, T. (2006). Airborne Chemical Sensing with Mobile Robots. *Sensors*, 6, 1616–1678. <https://doi.org/10.3390/s6111616>
- Lilienthal, a., Zell, a., Wandel, M., & Weimar, U. (2001). Sensing odour sources in indoor environments without a constant airflow by a mobile robot. *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*, 4, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.933243>
- Liu, Z. (2010). *Odour Source Localization Using Multiple Plume- Tracing Mobile*

Robots. University of Adelaide. Retrieved from <https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/bitstream/2440/65209/8/02chapters1-4.pdf>

- Liu, Z., & Lu, T. F. (2008). Odor source localization in complicated indoor environments. *2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2008*, (December), 371–377. <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2008.4795548>
- Lu, Q., & Han, Q. L. (2011a). Cooperative control of a multi-robot system for odor source localization. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2359–2364. <https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6119678>
- Lu, Q., & Han, Q. L. (2011b). Decision-making in a multi-robot system for odor source localization. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 74–79. <https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6119291>
- Lu, T. F. (2013). Indoor odour source localisation using robot: Initial location and surge distance matter? *Robotics and Autonomous Systems*, 61(6), 637–647. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.02.002>
- Maidens, J., & Li, M. Y. (2013). Global Lyapunov Functions and a Hierarchical Control Scheme for Networks of Robotic Agents. *American Control Conference (ACC)*, 4050–4055. <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580460>
- Manuel, D.-A. C., Eduardo, G.-G. O., & Mariela, H.-O. (2014). Nariz electrónica para determinar el índice de madurez del tomate de árbol (*Cyphomandra Betacea* Sendt). *Ingeniería, Investigación Y Tecnología*, 15(3), 351–362. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(14\)70346-4](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(14)70346-4)
- Marco, S., Gutiérrez-Gálvez, A., Lansner, A., Martínez, D., Rospars, J. P., Beccherelli, R., ... Persaud, K. (2014). A biomimetic approach to machine olfaction, featuring a very large-scale chemical sensor array and embedded neuro-bio-inspired computation. *Microsystem Technologies*, 20(4–5), 729–742. <https://doi.org/10.1007/s00542-013-2020-8>
- Marin, L. (2011). *Navegación De Un Robot Móvil De Configuración Diferencial Basada En Fusión Sensorial*. Universidad Politécnica de Valencia. Retrieved from https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15617/TESINA_LeonardoMarin.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Marino, A., & Chiacchio, P. (2016). Task-oriented decentralized adaptive control of cooperative manipulators, 1325–1330.
- Marjovi, A., & Marques, L. (2011). Multi-robot olfactory search in structured environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 59(11), 867–881. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.07.010>
- Marjovi, A., & Marques, L. (2013). Swarm robotic plume tracking for intermittent and time-variant odor dispersion. *2013 European Conference on Mobile Robots, ECMR 2013 - Conference Proceedings*, 379–384. <https://doi.org/10.1109/ECMR.2013.6698871>

- Marques, L., Almeida, N., & Almeida, a. T. De. (2003). Olfactory sensory system for odour-plume tracking and localization. *Proceedings of IEEE Sensors 2003 (IEEE Cat. No.03CH37498)*, 1, 418–423. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2003.1278971>
- Marques, L., Nunes Urbano, & Almeida, A. (2002). Olfaction-based mobile robot navigation. *Thin Solid Films*, 418, 51–58. Retrieved from <https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/4079/1/fileac99dab638a743789380cb4378ceb1d9.pdf>
- Mashood, A., Mohammed, M., Abdulwahab, M., Abdulwahab, S., & Noura, H. (2016). A hardware setup for formation flight of UAVs using motion tracking system. *ISMA 2015 - 10th International Symposium on Mechatronics and Its Applications*. <https://doi.org/10.1109/ISMA.2015.7373474>
- Mathworks. (2017). Uso del comando image. Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/image.html>
- Meng, Q. H., Li, J.-C. L. J.-C., Li, F. L. F., & Zeng, M. Z. M. (2006). Mobile Robots Odor Localization with an Improved Ant Colony Algorithm. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, (1), 959–964. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2006.340358>
- Merino, L., Capitan, J., & Ollero, A. (2009). Robotica cooperativa e integracion con sensores en el ambiente. Aplicaciones en entornos urbanos. *Workshop Robotica 09*, 7. Retrieved from <https://www.upo.es/isa/lmercab/papers/robot09Spanish.pdf>
- Moldes, D., & Jokin, A. (2014). *Cálculo y optimización del espacio de trabajo de un manipulador paralelo del tipo Hexaglide*. Universidad Pública de Navarra. Retrieved from <https://academic.e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/11884/TFGMoldesSáezDavid2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Montemayor, G., & Wen, J. T. (2005). Decentralized collaborative load transport by multiple robots. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005(April), 372–377. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570147>
- Montes, G., Letheren, B., Villa, T., & Gonzalez, F. (2014). Bio-inspired plume tracking algorithm for UAVs. *Australasian Conference on Robotics and Automation, ACRA, 02–04–Dece(December)*, 2–4. Retrieved from <http://www.araa.asn.au/acra/acra2014/papers/pap164.pdf>
- Morsi, I. (2008). Electronic noses for monitoring environmental pollution and building regression model. *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 1730–1735. <https://doi.org/10.1109/IECON.2008.4758215>
- Nagle, H. T., Schiffman, S. S., & Gutierrez-Osuna, R. (1998). How and why of electronic noses. *IEEE Spectrum*, 35(9), 22–34. <https://doi.org/10.1109/6.715180>
- Nakamoto, T., Ishida, H., & Moriizumi, T. (1996). An odor compass for localizing an odor source. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 35(1–3), 32–36.

[https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0925-4005\(96\)02009-6](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0925-4005(96)02009-6)

- Pane, Y. P., Fuady, S., & Mutijarsa, K. (2013). Overtaking in centralized multi robot formation control based on pedestrian behavior. *Proceedings - UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, UKSim 2013*, 271–276. <https://doi.org/10.1109/UKSim.2013.146>
- Park, J. K., Jeon, H. S., Noh, S. H., Park, J. H., Oh, R., & Author, C. (2010). A Practical Coverage Algorithm for Intelligent Robots with Deadline Situations. *Knowledge Creation Diffusion Utilization*, 299–303. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ICCAS.2010.5670232>
- Penders, J., & Cervera, E. (2007). Guardians: a swarm of autonomous robots for emergencies. *Workshop on ...*. Retrieved from <http://www.robot.uji.es/documents/guardians/workshops/IJCAI07.pdf#page=16>
- Pomareda Sesé, V., & Marco Colás, S. (2013). *Signal Processing Approaches to the Detection and Localization of Gas Chemical Sources using Partially Selective Sensors*. *Departament d'Electrònica*. Retrieved from <http://www.tdx.cat/handle/10803/119727>
- Python. (2017). Python. Retrieved from <https://fabricadigital.org/2016/01/hola-pi-empezando-a-programar-en-raspberry-pi-con-python/>
- Raspbian. (2017). Retrieved from <https://www.raspbian.org/>
- Rozas, R., Morales, J., & Vage, D. (1991). Artificial smell detection for robotic navigation. *IEEE International Conference on Advanced Robotics, Pisa, Italy*. <https://doi.org/10.1109/ICAR.1991.240354>
- Saeed, S. H., Abbas, Z., & Gopal, B. (2009). Study of TGS 822 Sensor for Electronic Nose Applications, *1*(2). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/259384563_Study_of_TGS_822_Sensor_for_Electronic_Nose_Applications
- Senanayake, M., Senthoooran, I., Barca, J. C., Chung, H., Kamruzzaman, J., & Murshed, M. (2014). Search and tracking algorithms for swarms of robots: A survey. *Robotics and Autonomous Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.08.010>
- Soares, J. M., Aguiar, A. P., Pascoal, A. M., & Martinoli, A. (2015). A distributed formation-based odor source localization algorithm - Design, implementation, and wind tunnel evaluation. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015-June*(June), 1830–1836. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139436>
- Soldan, S., Bonow, G., & Kroll, A. (2012). RoboGas Inspector - A mobile robotic system for remote leak sensing and localization in large industrial environments: Overview and first results. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, *1*(PART 1), 33–38. <https://doi.org/10.3182/20120531-2-NO-4020.00005>
- Song, K., Liu, Q., & Wang, Q. (2011). Olfaction and hearing based mobile robot navigation for odor/sound source search. *Sensors*, *11*(2), 2129–2154.

<https://doi.org/10.3390/s110202129>

- Soumya, S., & Guruprasad, K. R. (2015). Model-based Distributed Cooperative Control of a Robotic Manipulator. *2015 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering*, 313–316. <https://doi.org/10.1109/WIECON-ECE.2015.7443926>
- sparkfun. (2015). Alcohol Gas Sensor - MQ-3. Retrieved from <https://www.sparkfun.com/products/8880>
- Sparkfun. (2000). DUAL FULL-BRIDGE DRIVER L298N. Retrieved from <http://blog.pennybuying.com/down/f/F815A.pdf>
- Stoian, V., & Bobasu, E. (1998). Control Algorithm for a Cooperative Robotic System in Fault Conditions, 281–288. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/document/7347781/>
- Trincavelli, M., Coradeschi, S., & Loutfi, A. (2009). Odour classification system for continuous monitoring applications. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 139(2), 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.03.018>
- Urrea, C., & Barbosa, K. A. (2015). Controller design of Industrial Cooperative Robots. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/document/7400355/>
- Vancouver, S., Centre, W., Jatmiko, W., Sekiyama, K., & Fukuda, T. (2006). A PSO-based Mobile Sensor Network for Odor Source Localization in Dynamic Environment: Theory, Simulation and Measurement. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 1036–1043. <https://doi.org/10.1109/CEC.2006.1688423>
- Villarreal, B. L., Olague, G., & Gordillo, J. L. (2016). Synthesis of odor tracking algorithms with genetic programming. *Neurocomputing*, 175, 1019–1032. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.108>
- Wada, Y., Trincavelli, M., Fukazawa, Y., & Ishida, H. (2010). Collecting a Database for Studying Gas Distribution Mapping and Gas Source Localization with Mobile Robots. *International Conference on Advanced Mechatronics*, 183–188. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Webster, D. R., & Weissburg, M. J. (2001). Chemosensory guidance cues in a turbulent chemical odor plume. *Limnology and Oceanography*, 46(5), 1034–1047. <https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.5.1034>
- Winseng. (2015). MQ135 Semiconductor Sensor for Air Quality Control, 2–4. Retrieved from <http://www.china-total.com/Product/meter/gas-sensor/MQ135.pdf>
- Yamaguchi, H. (1998). A cooperative hunting behavior by mobile robot troops. *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*, 4(May), 3204–3209. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1998.680918>
- Yang, X. (2010). *Firefly Algorithm. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416743-8.00005-1>

- Yang, X.-S. (2010). Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimization. *Int. J. Bio-Inspired Computation* 2, 2(2), 78–84. <https://doi.org/10.1504/IJBIC.2010.032124>
- Yeon, A. S. A., Visvanathan, R., Mamduh, S. M., Kamarudin, K., Kamarudin, L. M., & Zakaria, A. (2015). Implementation of Behaviour Based Robot with Sense of Smell and Sight. *Procedia Computer Science*, 76(Iris), 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.300>
- Zecchin, A. C., Simpson, A. R., Maier, H. R., Leonard, M., Roberts, A. J., & Berrisford, M. J. (2006). Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimisation. *Mathematical and Computer Modelling*, 44(5–6), 451–468. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.01.005>
- Zhang, X., & Zhang, M. (2008). Biologically-inspired search strategy for locating odor source. *Proceedings - 4th International Conference on Natural Computation, ICNC 2008*, 4, 342–346. <https://doi.org/10.1109/ICNC.2008.228>
- Zhang, Y., Ma, X., Miao, Y., Yuli, Z., Xiaoping, M. a, & Yanzi, M. (2011). Localization of multiple odor sources using modified glowworm swarm optimization with collective robots. *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, 1899–1904. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/document/6000754/>
- Zhou, X., Wang, Y., Wang, J., Xie, Z., Wu, X., Han, N., & Chen, Y. (2017). Amplifying the Signal of Metal Oxide Gas Sensors for Low Concentration Gas Detection, *17*(9), 2841–2847. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2678985>