

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



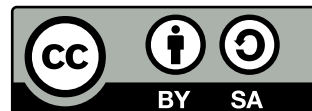
Implementación de un sistema de comunicación para un sistema multirobot de
enjambre.

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Célimo José Porras Aguilar

Cartago, 25 de noviembre 2022

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons “Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional”.




Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 25 de noviembre 2022

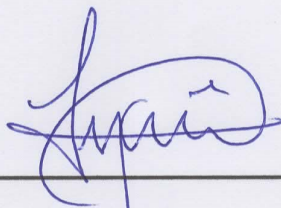

Célamo José Porras Aguilar
Céd: 3-0520-0512

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Célimo José Porras Aguilar

Proyecto: Implementación de un sistema de comunicación para un sistema multirobot de Enjambre.



MSc. -Ing. Felipe Meza Obando
Asesor

Cartago, 25 de noviembre 2022

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Célimo José Porras Aguilar

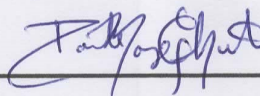
Proyecto: Implementación de un sistema de comunicación para un sistema multirobot de Enjambre.

Miembros del jurado



MSc. -Ing. Johanna Vanessa Muñoz Pérez

Jurado



Ing. Paula Elena Monge Chanto

Jurado



Ing. Eduardo José Asenjo Castillo

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 25 de noviembre 2022

Resumen

El principal objetivo de este proyecto es la selección y desarrollo de un sistema de comunicación con el fin de implementar nuevos algoritmos de comportamiento colectivo en el proyecto Planificación de Rutas Óptimas por medio de Enjambres (PROE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El problema solucionado fue las limitaciones que generaba el sistema de comunicación actual y la falta de interpretación de las señales por parte del sistema de enjambre. De esta forma, se desarrolla un sistema de comunicación, un protocolo de inicio para el enjambre y un comportamiento colectivo para continuar con los experimentos del laboratorio. Estas soluciones fueron validadas por medio de un experimento factorial 2^k completo con el fin de identificar factores a mejorar y validar que los valores estén dentro del margen permitido.

Palabras clave: Robótica de enjambre, TDMA, Agregación, Comportamiento colectivo, Filtro de Kalman

Abstract

The main aim of the project is the selection and development of a communication system in order to implement new collective behaviors in the project Planificación de Rutas Óptimas por medio de Enjambres (PROE) of the Instituto Tecnológico de Costa Rica. The problem solved was the limitations generated by the current communication system and the lack of interpretation of the signals by the swarm system. Thus, it was necessary to developed a communication system, a swarm start-up protocol and a collective behavior to continue with the experiments. These solutions were validated by means of a 2^k full factorial experiment in order to identify factors to improve and validate that the values are in the allowed range.

Keywords: Swarm robotic, TDMA, Agregation, Collective behavior, Kalman Filter

Agradecimiento

Primero que nada le agradezco profundamente a mi familia: a mi madre Kattia que siempre se preocupó porque no dejara de lado mi salud y siempre estaba atenta de mis problemas, a mi padre Célamo por el apoyo incondicional a lo largo de mi carrera en el TEC y sus consejos de vida. A mis hermanos por todo su cariño y apoyo a lo largo de estos años. Han sido un pilar en mi vida y no lo cambiaría por nada.

A mis compañeros de carrera: Alejandro, André, Chris, Jara, Jorge y Kenneth por todo el apoyo en momentos de estrés en la carrera, por toda la enseñanza y en definitiva hacer más ameno el paso por la universidad, gracias a ello pude vivir estos años al máximo.

También, quiero agradecer a todos aquellos que de alguna forma u otra me ayudaron a lo largo de todos estos años.

Por último, extender mi agradecimiento a Felipe Meza por todo el apoyo y seguimiento a lo largo de este proyecto. A Juan Carlos Brenes, Cindy Calderón y Rebeca Solís por permitirme ingresar al proyecto PROE, estos meses han sido de gran aprendizaje. Sin ustedes no lo hubiera logrado

Índice general

Índice de figuras	iv
Índice de tablas	viii
Lista de abreviaciones	xi
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	5
1.1.1. Objetivo general	5
1.1.2. Objetivos específicos	5
1.2. Estructura del informe	5
2. Marco teórico	6
2.1. Estado del arte: robótica de enjambres	6
2.1.1. Campo de investigación	8
2.2. Comunicación inalámbrica	15
2.2.1. Protocolos de Acceso Múltiple	17
2.3. Transformación de coordenadas	22
2.4. Filtro de Kalman	25
2.5. Algoritmos de comportamiento colectivo	26
2.5.1. Organización espacial	27
2.5.2. Navegación	28
2.5.3. Toma de decisiones	29

2.6.	Antecedentes de los Atta-Bots	29
3.	Metodología	32
3.1.	Identificación necesidades del cliente	33
3.2.	Establecer especificaciones objetivos	34
3.2.1.	Lista de métricas	34
3.2.2.	Establecer valores meta	34
3.3.	Generar conceptos del producto	34
3.4.	Seleccionar un concepto del producto	36
3.4.1.	Filtrado de conceptos	36
3.4.2.	Evaluación de conceptos	36
3.5.	Probar concepto del producto	37
3.6.	Establecer especificaciones finales	37
3.7.	Diseño de experimentos	37
3.7.1.	Diseños factoriales 2^k	38
4.	Desarrollo de la solución	39
4.1.	Consideraciones de diseño	39
4.1.1.	Sistema de locomoción	41
4.1.2.	Sensores	42
4.1.3.	Sistema de comunicación	43
4.1.4.	Algoritmos de comportamiento colectivo	43
4.2.	Necesidades y especificaciones	45
4.3.	Generación de conceptos	47
4.3.1.	Concepto A	51
4.3.2.	Concepto B	53
4.3.3.	Concepto C	54
4.3.4.	Concepto D	56
4.3.5.	Concepto E	56
4.3.6.	Concepto F	57
4.3.7.	Concepto G	58
4.3.8.	Concepto H	59
4.4.	Selección de conceptos	59
4.4.1.	Matriz selección de conceptos	59
4.4.2.	Evaluación de conceptos	60

4.5.	Prueba de conceptos	61
4.5.1.	Localización	61
4.5.2.	Sistema de comunicación	67
4.5.3.	Transformación de coordenadas	72
4.5.4.	Algoritmo de exploración colectiva	77
5.	Resultados y análisis	80
5.1.	Validación del sistema de comunicación	80
5.1.1.	Modelo porcentaje de recepción de paquetes en la base	81
5.1.2.	Modelo porcentaje de recepción de paquetes en un nodo (Atta-bot)	84
5.2.	Validación de actualización de ubicación	89
5.3.	Validación del algoritmo de exploración colectiva	94
5.4.	Análisis económico	96
6.	Conclusiones y recomendaciones	100
6.1.	Conclusiones	100
6.2.	Recomendaciones	101
	Bibliografía	103
A.	Bitácora de diseño	108
A.1.	Necesidades	108
A.1.1.	Entrevistas	108
A.2.	Especificaciones	110
A.2.1.	Métricas	110
A.3.	Búsqueda de información	113
A.3.1.	Sistema de comunicación	113
A.3.2.	Topología de comunicación	116
A.3.3.	Posicionamiento	118
A.3.4.	Algoritmos de comportamiento colectivo	120
B.	Experimentos	121
B.1.	Datos del diseño de experimentos	121
B.1.1.	Experimento desempeño del sistema de comunicación	121
B.1.2.	Experimento actualización de ubicación real	123
B.1.3.	Experimento algoritmo de exploración colectiva	123

Índice de figuras

1.1. Número de publicaciones referentes a “swarm robotics”	1
2.1. Comportamiento colectivo de animales.	7
2.2. Jasmine swarm robot platform. [17]	8
2.3. Swarm-bots project. [18]	9
2.4. Pheeno. [19]	10
2.5. Khepera IV.[20]	11
2.6. E-puck. [21]	12
2.7. Kilobot. [22]	13
2.8. Colias robot. [23]	14
2.9. Ejemplo de modulación OOK	16
2.10. Ejemplo de modulación FSK	16
2.11. Métodos de acceso al canal. Fixed y Random Access. Adaptado de [27] . . .	18
2.12. Métodos de acceso al canal. Demand y Adaptive Access. Adaptado de [27] .	19
2.13. Modelo de un sistema TDMA	20
2.14. Modelo de un sistema FDMA	21
2.15. Arreglo para el protocolo CDMA	22
2.16. Vector relativo a la base. [30]	22
2.17. Localización del objeto con posición y orientación. [30]	23
2.18. Mapear una traslación. [30]	24
2.19. Mapear una rotación. [30]	24
2.20. Transformación general. [30]	25

2.21. Resumen de comportamientos colectivos. Adaptado de [9]	27
2.22. Primer versión del Atta-bot. [35]	30
2.23. Versión actual de los Atta-bots.	30
2.24. Prototipo de actualización para el Atta-bot en espacios no controlados. [8]	31
3.1. Proceso de diseño. Adaptado de [37, p. 16]	32
3.2. Método de generación de conceptos de cinco pasos. [37, p. 122]	35
3.3. Representación del sistema como caja negra.	35
3.4. Clasificación de los diseños de experimento. Adaptado de [38]	38
4.1. Robot con sistema de locomoción diferencial. [39]	41
4.2. Descomposición funcional de los Atta-Bots.	48
4.3. Descomposición de la subfunción interpretar.	48
4.4. Descomposición de la subfunción procesamiento de información.	49
4.5. Conceptos para el protocolo de comunicación.	49
4.6. Conceptos para la topología de comunicación.	50
4.7. Conceptos para la localización.	50
4.8. Conceptos para el comportamiento colectivo.	51
4.9. Concepto de solución A.	52
4.10. Boceto de comunicación por medio de TDMA.	52
4.11. Boceto del resultado del algoritmo formación de patrones.	53
4.12. Concepto de solución B.	53
4.13. Comunicación para el concepto B.	54
4.14. Boceto del resultado del algoritmo agregación.	54
4.15. Concepto de solución C.	55
4.16. Boceto del algoritmo de exploración.	55
4.17. Concepto de solución D.	56
4.18. Concepto de solución E.	57
4.19. Concepto de solución F.	57
4.20. Boceto del resultado del algoritmo formación de cadenas.	58
4.21. Concepto de solución G.	58
4.22. Concepto de solución H.	59
4.23. Experimento realizado para obtener el valor Received Signal Strength Indicator (RSSI) en función de la distancia	62
4.24. Valores RSSI recibidos a lo largo del experimento.	63

4.25. Diagrama de cajas del experimento RSSI.	63
4.26. RSSI en función de la distancia con una potencia de 20.	64
4.27. RSSI en función de la distancia con una potencia de 13.	64
4.28. Experimento realizado para obtener los valores del sharp en función de la distancia.	65
4.29. Valores del sharp en función de la distancia	66
4.30. Medición de distancia del sensor sharp acondicionado.	66
4.31. Composición del mensaje enviado por los Atta-bots.	67
4.32. Comparación del tiempo de espera para enviar el mensaje en función de la cantidad de robots en el enjambre.	68
4.33. Diagrama de flujo de la base para la comunicación.	69
4.34. Diagrama de flujo del nodo para la comunicación.	70
4.35. Arreglo inicial de los Atta-bots	72
4.36. Secuencia de inicio de un robot del enjambre.	74
4.37. Determinación de precisión de la medición inicial para la transformación de coordenadas.	75
4.38. Lectura del magnetómetro en movimientos rectos con el uso del filtro de Kalman.	76
4.39. Lectura del magnetómetro al girar con el uso del filtro de Kalman.	77
5.1. Gáfica de residuos del modelo de comunicación de la base	82
5.2. Diagrama pareto del modelo de comunicación de la base	83
5.3. Diagrama de efectos principales del modelo de comunicación de la base	84
5.4. Gáfica de residuos del modelo de comunicación de un nodo	86
5.5. Diagrama pareto del modelo de comunicación de un nodo	87
5.6. Diagrama de efectos principales del modelo de comunicación de un nodo	88
5.7. Gáfica de residuos del primer modelo de actualización de ubicación	90
5.8. Diagrama pareto del primer modelo de actualización de ubicación	91
5.9. Gáfica de residuos del segundo modelo de actualización de ubicación	92
5.10. Diagrama pareto del segundo modelo de actualización de ubicación	93
5.11. Diagrama de efectos principales del segundo modelo de actualización de ubicación	94
5.12. Línea de tiempo de una validación del comportamiento colectivo.	95
A.1. Activación del nodo en el espacio tiempo. [28]	114
A.2. División de la frecuencia por nodo y duplexación del nodo receptor. [44]	115

A.3. Ejemplo del protocolo MSAP	116
A.4. Topología de comunicación combinando FDMA con TDMA.	117
A.5. Módulo de comunicación NRF905.	117
A.6. Topología de red inalámbrica.	118
A.7. Módulo GPS GTU7.	119

Índice de tablas

1.1. Algoritmos que requieren conocer la posición de los robots. [9]	3
2.1. Sensores que componen el robot Jasmine. [17]	9
2.2. Lista de sensores para el swarm-robot project. [18]	10
2.3. Lista de materiales para la fabricación del robot Phenno. [19]	11
2.4. Lista de sensores del Khepera IV. [20]	12
2.5. Sensores del robot e-puck. [21]	13
2.6. Sensores del robot Colias. [23]	14
2.7. Designaciones de banda CCIR	17
3.1. Valores de importancia utilizados para las necesidades y especificaciones. . .	33
3.2. Evaluación relativa utilizada para comparar los conceptos. [37, p. 151]	36
3.3. Escala de evaluación de conceptos. [37, p. 155]	37
4.1. Lista de materiales	39
4.2. Tareas requeridas por algoritmo de comportamiento colectivo.	44
4.3. Algoritmos que teóricamente se pueden implementar en el Atta-bot	45
4.4. Necesidades del proyecto	46
4.5. Especificaciones objetivo referentes al robot PROE.	47
4.6. Matriz de selección de conceptos	60
4.7. Evaluación de conceptos	61
4.8. Envío y recepción de paquetes con un tiempo de prueba de 1 minuto.	71
4.9. Envío y recepción de paquetes con un tiempo de prueba de 5 minuto.	71

4.10. Envío y recepción de paquetes con un tiempo de prueba de 10 minuto.	71
5.1. Resumen de factores controlables para el experimento factorial completo del sistema de comunicación.	81
5.2. Resumen de factores controlables para el experimento factorial completo de actualización de ubicación.	89
5.3. Porcentaje de éxito del comportamiento colectivo	95
5.4. Resumen con los indicadores del proyecto	96
5.5. Comparación precio-funcionalidad de robots de enjambre	97
5.6. Precio del Atta-bot con esos sensores	97
5.7. Costos de desarrollo del proyecto	98
A.1. Necesidades interpretadas del cliente.	108
A.2. Tabla de métricas	111
A.3. Comentario de métricas.	112
B.1. Diseño de experimento factorial completo para el sistema de comunicación, con las respuestas de cada agente.	122
B.2. Porcentaje de recepción de la base del sistema de comunicación	122
B.3. Porcentaje de recepción de un nodo del sistema de comunicación	123
B.4. Distancia de error entre posición real y presentada por el robot	123
B.5. Porcentaje de éxito del algoritmo de comportamiento colectivo	123

Índice de algoritmos

4.1. Algoritmo de exploración por caminata aleatoria con dirección. [1]	78
4.2. Algoritmo de detección fuente de calor y agrupación de los robots.	79

Lista de abreviaciones

PROE Planificación de Rutas Óptimas por medio de Enjambres

UCR Universidad de Costa Rica

CSMA Carrier Sense Multiple Access

TDMA Time Division Multiple Access

FDMA Frequency Division Multiple Access

CDMA Code Division Multiple Access

RSSI Received Signal Strength Indicator

GPS Global Positioning System

MSAP Mini Slotted Alternating Priority

IMU Unidad de Medición Inercial

PCB Printed Circuit Board

DOE Design of Experiments

FSK Frequency Shift Keying

OOK On Off Keying

GFSK Gaussian Frequency Shift Keying

CCIR Comité Consultivo Internacional de Radio

ELF Extremely low frequency

VF Vice frequency

VLF Very low frequency

LF Low frequency

MF Medium frequency

HF High frequency

VHF Very High frequency

UHF Ultrahigh Frequency

SHF Superhigh Frequency

EHF Extremely High Frequency

Inspirado en los comportamientos que presentan los sistemas de enjambre en la naturaleza, se desarrolla una nueva rama en la robótica llamada robótica de enjambre, la cual busca crear sistemas descentralizados con la finalidad de resolver problemas o realizar tareas por medio de la interacción de un gran grupo de agentes autónomos. [2]

El concepto de robótica de enjambre aparece por primera vez en 1989 por Beni y Wang, en su artículo [3] se presenta una definición de la inteligencia de enjambre y como esta se puede aplicar en el campo de la robótica. A partir de este año, la investigación en el campo de la robótica de enjambre ha aumentado considerablemente; en un artículo realizado por Marco, Guy y Vito [4] se muestra la cantidad de citas relacionadas a "swarm robotics" con el paso de los años, como se presenta en la figura 1.1. En este caso se puede apreciar un crecimiento exponencial en los trabajos realizados.

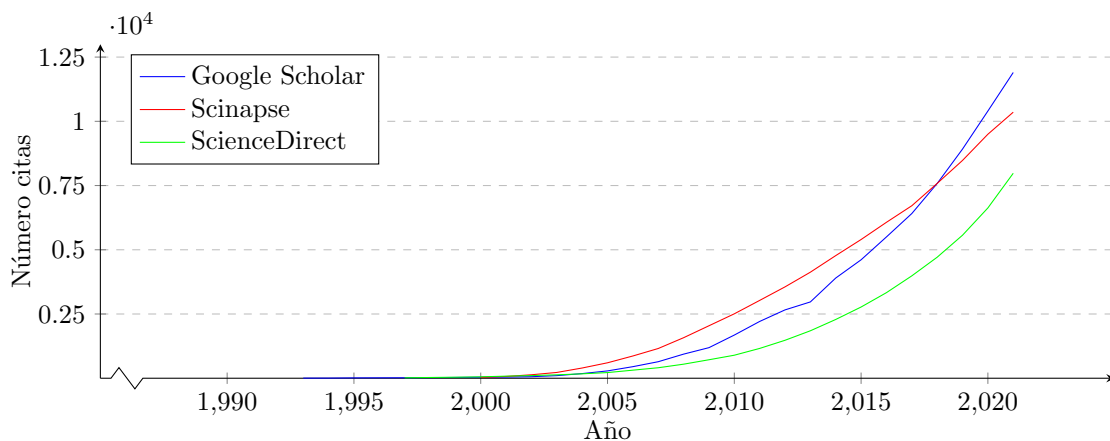


Figura 1.1. Número de publicaciones referentes a "swarm robotics". Adaptación de [4].

Dentro de las fortalezas de un sistema de enjambre se destaca la escalabilidad y robustez,

esto se debe a que cada agente del enjambre tiene autonomía y es capaz de interactuar con su entorno. De esta forma, si un robot falla el sistema puede continuar realizando su tarea. Esto permite realizar tareas donde se requiere una gran cobertura de área, por ejemplo: tareas de rescate o vigilancia, tareas que sean peligrosas y el robot quede muy dañado o tareas donde se requiere escalabilidad y redundancia, en este último las tareas de limpieza están relacionadas, al principio de estas tareas se requiere una gran cantidad de robots pero conforme la superficie queda limpia no es necesario tener tantos robots, en este caso se necesita un sistema flexible que permita disponer los recursos de la mejor manera. [2], [5]

Sin embargo, un robot de enjambre debe ser simple y de bajo costo, esto limita los sensores, actuadores y la unidad de procesamiento que se utilizan en esta clase de robots. Una de las soluciones, es mejorar la eficiencia de los algoritmos de comportamiento colectivo, permitiendo disponer de unidades de procesamiento de bajo costo y menor tamaño. Planificación de Rutas Óptimas por medio de Enjambres (PROE) nace en el periodo 2017-2018, gracias al esfuerzo en conjunto de Cindy Calderón Arce y Rebeca Solís Ortega, con la posterior incorporación de Juan Carlos Brenes Torres, con el objetivo de implementar un enjambre de robots físico en ambientes dinámicos, combinando técnicas de exploración terrestres y aéreas. [6], [7]

Actualmente PROE ha concluido dos fases del proyecto y se cuenta con un prototipo de robot terrestre para espacios controlados, llamado Atta-Bot¹, y una propuesta de diseño de locomoción para un robot en espacios no uniformes [8]. Atta-Bot ha sido utilizado para verificar y validar los algoritmos desarrollados en PROE:E1F2², cuentan con un sistema de comunicación centralizado, la navegación se realiza por medio de odometría y el software y hardware de control toma en consideración la detección de necesidades y condiciones del entorno a explorar.

Sin embargo, el sistema de enjambre actual no cuenta con todas las características que debe cumplir para ser considerado un enjambre, la primer limitante es que los robots son incapaces de resolver tareas en conjunto. Como se mencionó anteriormente, la comunicación es centralizada y los robots envían únicamente la información a la unidad central esto limita en gran medida cuales algoritmos de comportamiento colectivo se pueden implementar. La tabla 1.1 muestra un resumen de algoritmos que requieren conocer la posición de los robots vecinos en orden de completar una tarea.

¹Su nombre proviene de las Atta Cephalotes o popularmente en Costa Rica como hormigas zompopas.

²Etapa 1, Fase 2

Tabla 1.1. Algoritmos que requieren conocer la posición de los robots. [9]

Algoritmo	Requerimiento
Agregación	El objetivo de la agregación es agrupar todos los robots en una región del ambiente, a su vez que se tiene suficiente espacio para que los robots puedan interactuar.
Formación de patrones	El objetivo de este algoritmo, como su nombre lo indica, es colocar los robots de una manera repetitiva o regular (cuadrado, triángulo). Para ello, típicamente se necesita saber la distancia en que se encuentran los robots.
Formación de cadenas	Para este algoritmo se busca que los robots se ubiquen de forma que conecten dos puntos en el espacio, este algoritmo puede tener aplicaciones en navegación o inspección.
Exploración colectiva	Este algoritmo lo que busca es mapear una zona e identificar los obstáculos en su entorno. Actualmente se está implementando este comportamiento, sin embargo no se puede generar el mapa de la zona de forma automática ya que no se cuenta con un punto de referencia para empezar a construir el mapa.
Movimiento colectivo	En este comportamiento los robots se mueven en formación, similar al que realizan las parvadas de aves o cardúmenes de peces.

Otra limitante es la cantidad de algoritmos de comportamiento colectivo que pueden ser implementados, los robots tienen su propio eje de coordenadas y aunque envíen información a sus vecinos, estos no van a saber como interpretar esta información, de igual forma, la unidad central de procesamiento tampoco sabe como interpretar la información que recibe de los robots.

Por último, actualmente el sistema de enjambre utiliza el protocolo de comunicación Time Division Multiple Access (TDMA) y cada robot tiene una ventana de tiempo para enviar información. Recordemos que un sistema de enjambre debe ser escalable, el problema sucede cuando el número de agentes aumenta, ya que el tiempo que debe esperar el robot para enviar la información incrementa considerablemente y la información que envía en esa ventana no es en tiempo real.

Este proyecto va a abordar estas limitantes, el cual se va a enfocar en fortalecer las características que identifican un sistema de enjambre. Se va a implementar un protocolo de comunicación descentralizado que permita compartir la información entre los robots y esta sea lo más actual posible. Así mismo, los robots deben ser capaces de interpretar la

información de sus vecinos con el fin de implementar nuevos algoritmos de comportamiento colectivo, para ello se va a implementar un modelo matemático que permita identificar la posición de los robots a través del enjambre.

De esta forma, se va a incrementar el alcance de las investigaciones realizadas en PROE, permitiendo implementar comportamientos colectivos existentes en el enjambre, para en un futuro desarrollar nuevos comportamientos colectivos. Además, PROE actualmente está colaborando con la Universidad de Costa Rica (UCR) y estas mejoras permitirán la generación de recursos científicos dentro de las universidades.

El principal aporte de este proyecto consiste en utilizar los recursos que cuentan los Atta-bots para implementar nuevos comportamientos colectivos, sin necesidad de incrementar el costo de la fabricación de los Atta-bots. Para ello se requiere tener un entendimiento de los componentes utilizados, las limitaciones que ellos suponen y posibles interferencias en la información de los Atta-bots. Al final de este proyecto la información recolectada por los Atta-bots va a ser más precisa y se va a tener la posibilidad de implementar más de 5 algoritmos de comportamiento colectivo extendiendo el alcance de investigación del proyecto a un menor costo en comparación con otros robots presentes en el mercado.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de comunicación para la obtención de la posición relativa de los robots móviles en el enjambre de PROE y que permita implementar nuevos algoritmos de comportamiento colectivo.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Realizar un diagnóstico del protocolo de comunicación y el equipo utilizado actual para identificar las ventajas y desventajas de estos.
2. Implementar un sistema de comunicación para el envío de datos entre robots y entre la unidad de procesamiento.
3. Diseñar un modelo matemático para la identificación de la posición de los robots a través del enjambre.
4. Validar el sistema de comunicación mediante la implementación de un algoritmo de comportamiento colectivo.

1.2. Estructura del informe

Este trabajo cuenta con seis capítulos principales, a continuación se presenta la estructura de los siguientes capítulos de este documento. El capítulo 2 presenta el estado del arte de la robótica de enjambre, así como los aspectos teóricos más relevantes para la resolución del proyecto y por último, antecedentes de los Atta-bots.

El capítulo 3 describe la metodología de diseño implementada para la solución del problema. Los siguientes capítulos están relacionados a la solución del problema en cuestión, el capítulo 4 muestra la implementación de la metodología de diseño, este capítulo está vinculado con los objetivos específicos 1, 2 y 3.

El capítulo 5 aborda el objetivo específico 4, en este capítulo se presenta la implementación del algoritmo de comportamiento colectivo elegido y un análisis de los resultados. Por último, el capítulo 6 presenta conclusiones generales del proyecto, así como recomendaciones para futuros proyectos.

2.1. Estado del arte: robótica de enjambres

Los seres humanos a lo largo de los años han tomado muchos fenómenos de la naturaleza para estudiarlos, entender su funcionamiento y luego aplicar estos descubrimientos en ramas de la ciencia, música, arte, entre otros. Estos desarrollos tecnológicos basados en sistemas naturales reciben el nombre de biomimética. [10] La idea general consiste en tomar una propiedad funcional de un sistema de la naturaleza y convertirlo a un sistema artificial, por ejemplo, para practicar *wingfly* se necesita un traje especial que está inspirado en la anatomía de la ardilla *glaucomy volans* o ardilla voladora.

La robótica de enjambre es una rama de la robótica que está inspirada en el comportamiento colectivo de enjambres naturales, por ejemplo, las hormigas guerreras son capaces de construir puentes con el fin de pasar obstáculos o completar tareas complejas, figura 2.1a. Por otro lado, cientos de abejas vuelan para buscar una nueva localización para su nido y cuando lo encuentran le indican a los miembros de la colonia la localización, figura 2.1b.



(a) Puente construido por hormigas guerreras. [11] (b) Búsqueda de polen de las abejas. [12]

Figura 2.1. Comportamiento colectivo en animales para alcanzar un objetivo común.

Los enjambres no están únicamente asociados a la robótica, este término se aplica en la ciencia a diferentes áreas como: enjambres biológicos, comportamientos de enjambre, ingeniería de enjambre e inteligencia de enjambre. Los enjambres biológicos son aquellos que encontramos en la naturaleza, como las colmenas de abejas, enjambres de hormigas, cardúmenes y se caracterizan porque realizan comportamientos colectivos. La inteligencia de enjambre nace del comportamientos de las hormigas, abejas o peces en el cual no existe una comunicación directa pero, trabajan en conjunto para realizar una tarea. [13]

Un sistema robótico de enjambre debe cumplir con ciertas propiedades para diferenciarlo de otros sistemas como un sistema multi agente, sin embargo, no siempre se logra cumplir con todas las características al momento de realizar un sistema de enjambre y estas propiedades se pueden considerar una lista de tareas al momento de diseñar uno. [2], [13]-[15]

- **Autonomía:** los robots deben ser capaces de interactuar y tomar decisiones en función de las entradas del entorno.
- **Capacidad limitada:** un robot por si solo debe ser incapaz o ineficiente a la hora de realizar una tarea, pero cuando la tarea se realiza de forma cooperativa es altamente eficiente.
- **Descentralizados:** en los enjambres de robot no existe un líder, la existencia de un líder genera dificultades al momento de controlar un gran número de robots.
- **Elevado número:** un enjambre de robots debe poseer la capacidad de operar con elevado números de robots o al menos la lógica de control soportarlo.

- **Homogeneidad:** los robots deben buscar ser iguales entre ellos, esta característica está vinculada con la descentralización. Pueden existir robots heterogéneos, pero la cantidad debe ser reducida.
- **Estigmergia:** este concepto se refiere a la comunicación indirecta de los robots, esta comunicación en principio es local y está limitada. Si se utilizara métodos de comunicación global podría perjudicar la escalabilidad del sistema.

2.1.1. Campo de investigación

El gran reto que supone desarrollar un robot que logre cumplir con todas las tareas anteriores ha generado que diversas universidades al rededor del mundo desarrollen proyectos enfocados a la robótica de enjambre. Cada uno de estos robots tienen características propias y están enfocados a realizar ciertos comportamientos colectivos. Los robots que se van a presentar a continuación son: Jasmine, Swarm-bot, Pheeno, Khepera IV, E-puck, Kilobot, Colias. Sin embargo, existen muchos más en el mercado, por ejemplo: R-one, Mona, Psi Swarm, Thymio, Alice, Kobot, I-Swarm robot. [2], [5], [13]-[16]

Jasmine

El objetivo de este robot era desarrollar el hardware y software en código abierto de un micro-robot menor a $3cm^3$. El diseño final permite la interacción de hasta 100 robots, con el fin de investigar comportamiento de organización, fenómenos emergentes, control de grandes grupos de robots y más. La figura 2.2 presenta el prototipo del robot. [2]

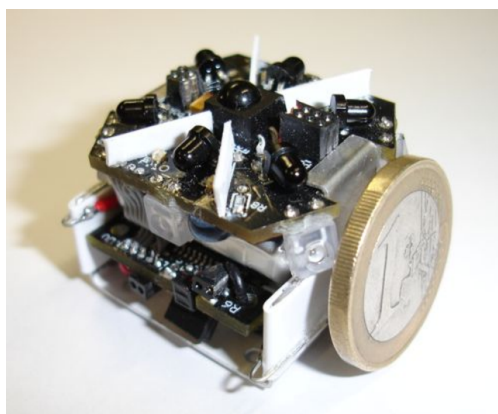


Figura 2.2. Jasmine swarm robot platform. [17]

Este prototipo tiene un costo de \$100 aproximadamente, el cual se conforma por dos motores DC y sensores para realizar tareas de detección de obstáculos y comunicación, la tabla 2.1 presenta los sensores que conforma el robot Jasmine.

Tabla 2.1. Sensores que componen el robot Jasmine. [17]

Dispositivo	Cantidad
Sensor de proximidad	min 4, máx 6
Sensor de distancia	1
Sensor táctil	1
Sensor de color	1
Comunicación	6-8
Receptor PCM	1
Emisor PCM	1

Swarm-bot

Este proyecto finalizó en 2005 y el principal objetivo fue el desarrollo de un diseño novedoso, la implementación del hardware, pruebas y uso de un sistema robótico metamórfico capaz de auto-ensamblarse y auto-organizarse llamado swarm-robots. Al final del proyecto se realizó la construcción de los prototipos y se realizaron pruebas para validar el comportamiento. [18]

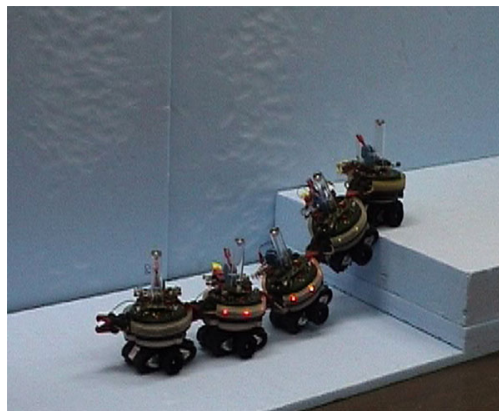


Figura 2.3. Swarm-bots project. [18]

Dentro de los resultados presentados se encuentra el transporte de equipos pesados por medio de la colaboración de los robots, es decir, un robot no cuenta con el torque necesario para poder mover el objeto y por medio de la colaboración se pudo trasladar el objeto.

El costo del robot no se presenta en la página oficial, sin embargo, cuando se analizan los sensores presentados en la tabla 2.2 se determina que la cantidad y tipo de sensores sugiere un costo de fabricación elevado.

Tabla 2.2. Lista de sensores para el swarm-robot project. [18]

Sensor	Cantidad
Proximidad alrededor	15
Proximidad debajo	8
Sensor de luz	8
Acelerómetro 3 ejes	1
Sensor de fuerza	1
Sensor de torque	1
Sensor humedad	1
Sensor temperatura	1
Cámara omnidireccional	1
Parlante	1
Micrófono	4

Pheeno

Este robot de enjambre se destaca de los anteriores debido a que el principal objetivo era desarrollar un diseño modular, en otras palabras el usuario puede personalizar el robot con el fin de realizar diferentes experimentos. El robot cuenta con un módulo para colocar un gripper y permitir realizar comportamientos de transporte colectivo. [19]

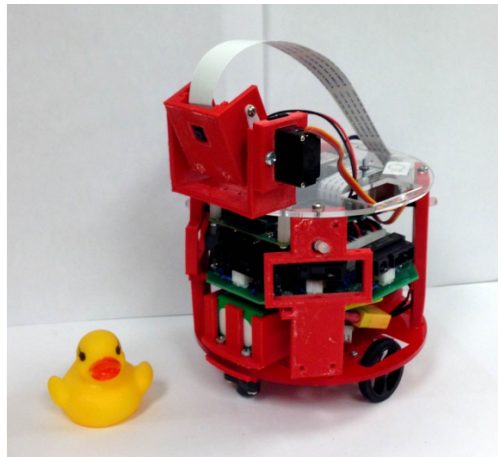


Figura 2.4. Pheeno. [19]

La tabla 2.3 presenta la lista de sensores utilizados para la fabricación. En el trabajo

presentado [19] no se presenta el costo total de construcción del robot, sin embargo, se cuentan con dos unidades de procesamiento, un microcontrolador y un microprocesador. Lo cual es de esperar debido a que el robot cuenta con una cámara y es necesario procesar mucho información. Sin embargo, este incrementa el costo considerablemente.

Tabla 2.3. Lista de materiales para la fabricación del robot Phenno. [19]

Sensores	Cantidad
Sensor distancia (sharp)	6
Sensor infrarrojo	1
Cámara	1
Sensor distancia	1

Khepera IV

Este robot está pensado para ser utilizado en gran cantidad de experimentos realizados en laboratorios, lo cual genera una amplia gama de funciones en el robot. Khepera IV se caracteriza por su escalabilidad y la posibilidad de operar en espacios reducidos. Sin embargo, el principal problema de este robot se basa en que solo puede operar en espacios cerrados controlados.

Muchos de los objetivos a largo plazo de los enjambres es que puedan movilizarse en el exterior y ayudar a desarrollar tareas que son complejas para los robots actuales o humanos. Por tanto, los Khepera IV presentan un gran problema si los experimentos se requieren llevar al exterior. [20]



Figura 2.5. Khepera IV.[20]

Los Khepera IV se especializan es brindar todas las posibilidades de experimentación,

la tabla 2.4 presenta todos los componentes. Este robot es el más costoso de todos los analizados, sin mencionar que no es código abierto, así que, no es tan fácil configurar nuevos comportamientos o modificar aspectos del Khepera IV, el costo del robot es de \$2700 dólares aproximadamanete.

Tabla 2.4. Lista de sensores del Khepera IV. [20]

Sensor	Cantidad
Sensor proximidad	8
Sensor luz	8
Sensor proximidad infrarrojo	4
Sensor ultrasónico	5
Acelerómetro y giroscopio de 3 ejes	1
Cámara de color	1

E-puck

Este robot tuvo un rediseño en 2018 y fue desarrollado por GCTronic and EPFL. En este nuevo modelo se agregan opciones de compatibilidad USB , WiFi y cargador. Actualmente los robots se han utilizado para experimentar con diversos algoritmos de comportamiento colectivo, sin embargo, estos robots solo se pueden utilizar en espacios controlados ya que las ruedas no permitirían desplazarse en terrenos irregulares. [21]

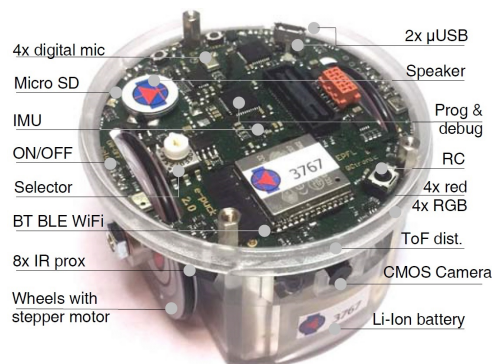


Figura 2.6. E-puck. [21]

En cuanto a la lista de materiales, pese a su pequeño tamaño estos robots cuentan con una amplia gama de sensores, como se presenta en la tabla 2.5. Como se puede observar, la comunicación de los robots se realiza por medio de señales infrarrojas lo que disminuye el área de comunicación.

Tabla 2.5. Sensores del robot e-puck. [21]

Sensor	Cantidad
IMU 9 ejes	1
Sensor proximidad infrarrojo	8
Cámara	1
Micrófono	4
Parlante	1

Kilobot

Este prototipo de robot se caracteriza porque es sumamente barato, sin embargo se sacrifica la movilidad y la comunicación del robot. Por ejemplo, este robot no se desplaza por medio de ruedas, si no que utiliza la vibración para desplazarse, lo que ocasiona que el comportamiento lleve más tiempo en completarse. La figura 2.7 presenta un ejemplo del prototipo.

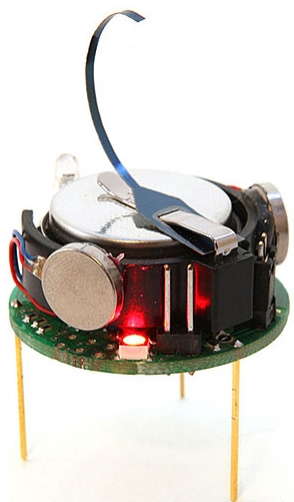


Figura 2.7. Kilobot. [22]

En cuanto a los sensores utilizados se tiene que solo se pueden comunicar a un rango de 7cm por medio de infrarrojo y pueden detectar la distancia entre ellos por medio de la intensidad de la señal. Así mismo, pueden detectar el brillo de la habitación.

Colias

Por último, este robot se ha utilizado para simular comportamientos de agregación similares a las abejas. La comunicación se realiza por medio de infrarrojo a un rango máximo de

2m. Similar a los demás robots, Colias está pensado para ser utilizado en espacios controlables lo que imposibilita realizar tareas en exteriores.

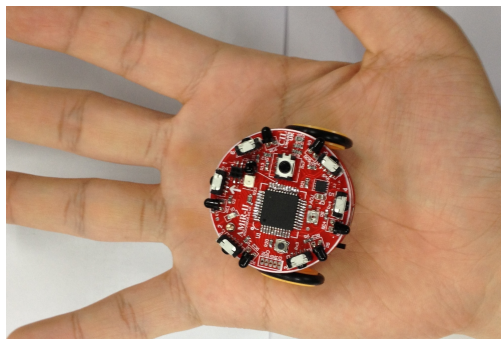


Figura 2.8. Colias robot. [23]

La tabla 2.6 presenta los sensores del Colias, como se puede observar, la cantidad de sensores es limitada y por ende la cantidad de algoritmos de comportamiento colectivo se va a ver reducido.

Tabla 2.6. Sensores del robot Colias. [23]

Sensor	cantidad
Infrarrojo	6
Encoder	2

Como se expuso anteriormente, la mayoría de los robots utilizan los sensores infrarrojos para la detección de obstáculos y utilizan un arreglo de sensores ubicados a 60° cada uno. Sin embargo, cuando se desarrolló la selección de componentes para los Atta-bots se descartó esta posibilidad con el fin de disminuir el costo e integrar otros sensores al sistema.

Otra diferencia entre los Atta-bots y las opciones del mercado es el método para realizar la comunicación, en su mayoría la comunicación se realiza por medio de infrarrojo, sin embargo la distancia de comunicación es limitada y se requiere un arreglo de sensores para realizar esa comunicación. Otra opción es utilizar WiFi, pero esto aumentaría el consumo energético y el costo. Por esa razón, los Atta-bots utilizan un punto intermedio entre distancia de comunicación, consumo energético y costo al implementar radio frecuencia para realizar la comunicación.

Por tanto, los Atta-bots representan un nuevo enfoque al diseño de robots de enjambre al buscar un balance entre la percepción de las variables del entorno y la posibilidad de realizar experimentos en espacios no controlables, el objetivo final de los Atta-bots es realizar pruebas en exteriores, por esa razón las soluciones planteadas deben ser robustas.

2.2. Comunicación inalámbrica

Como se presentó en la sección 2.1 una de las características de un sistema de enjambre es que debe existir una interacción entre los robots para completar una tarea. Por tanto, la construcción de un prototipo de enjambre debe contemplar el transferir información de un robot a otro y que este envío de información incluya la característica de estigmergia. Por esa razón, en la mayoría de prototipos se utiliza la comunicación inalámbrica para solucionar este problema, el infrarrojo presenta la ventaja que permite comunicaciones locales y es de bajo consumo energético.

Sin embargo, la comunicación infrarroja al estar limitada a menos de 5m, no traspasar paredes y tener la luz de fondo como principal ruido generan que no sea una opción viable para aplicaciones en exteriores. [24]

Para enviar una señal de información uno de los primeros pasos a considerar es la modulación y demodulación, es necesario que tanto emisor como receptor hablen un mismo idioma y puedan interpretar la información. Además, en la práctica propagar señales a través de la atmósfera terrestres no es práctico sin un preprocesado y se debe modular la información con una señal analógica de mayor frecuencia, llamada portadora. De esta forma, nos referimos a la modulación como el proceso en el que la señal portadora cambia una o más propiedades en proporción con la señal de información. La señal portadora puede modificar su amplitud, frecuencia o su fase. [25]

Para este proyecto se va a trabajar con señales digitales, por tanto se debe considerar una modulación digital, la cual consiste en convertir la forma analógica a pulsos digitales. Existen diversos métodos de modulación digital, entre ellos se encuentran On Off Keying (OOK), Frequency Shift Keying (FSK) y Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK). La ecuación 2.1 presenta la representación de una señal portadora.

$$v(t) = V \sin(2\pi ft + \theta) \tag{2.1}$$

Donde:

- $v(t)$: Tensión variable senoidal en el tiempo
- V : Amplitud máxima (Volts)
- f : Frecuencia (Hz)
- θ : Desplazamiento de fase (rad)

Cada variable indicada puede ser modificada en la modulación dependiendo de las técnicas utilizadas la modulación OOK consiste en “apagar” o “encender” la señal portadora dependiendo del valor digital, en caso que sea un cero se apaga la señal portadora y si se tiene un uno se activa la señal. La figura 2.9 presenta un ejemplo de la modulación OOK. [25].

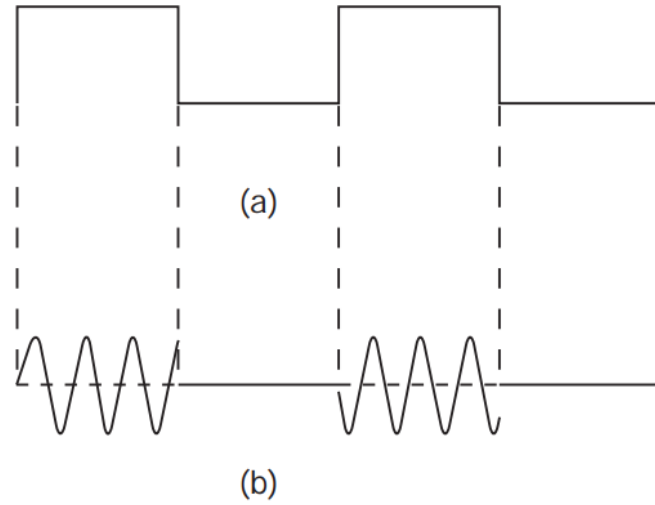


Figura 2.9. Ejemplo de modulación OOK. [25]

Para la modulación FSK y GFSK el concepto es similar, es una forma de modulación de ángulo, de amplitud constante. Y ya que se tienen dos valores en la señal moduladora el corrimiento de la fase solo va a tener dos valores. La figura 2.10 presenta un ejemplo de modulación por medio de FSK.

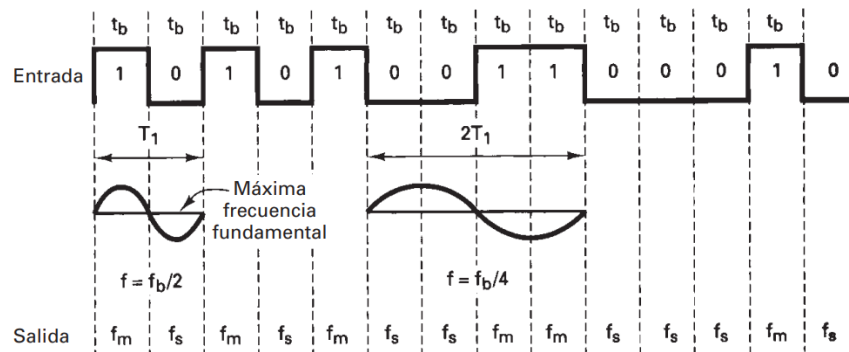


Figura 2.10. Ejemplo de modulación FSK. [25]

Otro factor a considerar es la frecuencia, ya que se está trabajando con el espectro

electromagnético se tiene una amplia gama de frecuencias a elegir, la tabla 2.7 presenta un resumen del espectro total útil según el Comité Consultivo Internacional de Radio (CCIR).

Tabla 2.7. Designaciones de banda CCIR. [25]

Num. de banda	Intervalo de frecuencias	Designaciones
2	30Hz - 300Hz	Extremely low frequency (ELF)
3	0.3kHz - 3kHz	Vice frequency (VF)
4	3kHz - 30kHz	Very low frequency (VLF)
5	30kHz - 300kHz	Low frequency (LF)
6	0.3MHz - 3MHz	Medium frequency (MF)
7	3MHz - 30MHz	High frequency (HF)
8	30MHz - 300MHz	Very High frequency (VHF)
9	300MHz - 3GHz	Ultrahigh Frequency (UHF)
10	3GHz - 30GHz	Superhigh Frequency (SHF)
11	30GHz - 300GHz	Extremely High Frequency (EHF)
12	0.3THz - 3THz	Luz infrarroja
13	3THz - 30THz	Luz infrarroja
14	30THz - 300THz	Luz infrarroja
15	0.3PHz - 3PHz	Luz visible
16	3PHz - 30PHz	Luz ultravioleta
17	30PHz - 300PHz	Rayos X
18	0.3EHZ - 3EHZ	Rayos gamma
19	3EHZ - 30EHZ	Rayos cósmicos

No obstante, los intervalos de frecuencia están regulados y solo hay bandas específicas para fines de investigación, sin embargo el módulo de radiofrecuencia que cuenta el Atta-bot contempla esas regulaciones y trabaja en frecuencias libres. [26]

2.2.1. Protocolos de Acceso Múltiple

Por último, al trabajar con comunicación inalámbrica y al requerir que los Atta-bots envíen información en tiempo real el medio de acceso va a ser el mismo para todos los robots, por tanto si varios robots tratan de enviar información al mismo tiempo se va a presentar una colisión y la información va a llegar corrupta. Por esa razón se requieren de protocolos especiales para el envío de la información, llamados protocolos de acceso múltiple, la figura 2.11 presenta protocolos de comunicación basados en un asignación fija y una asignación aleatoria.

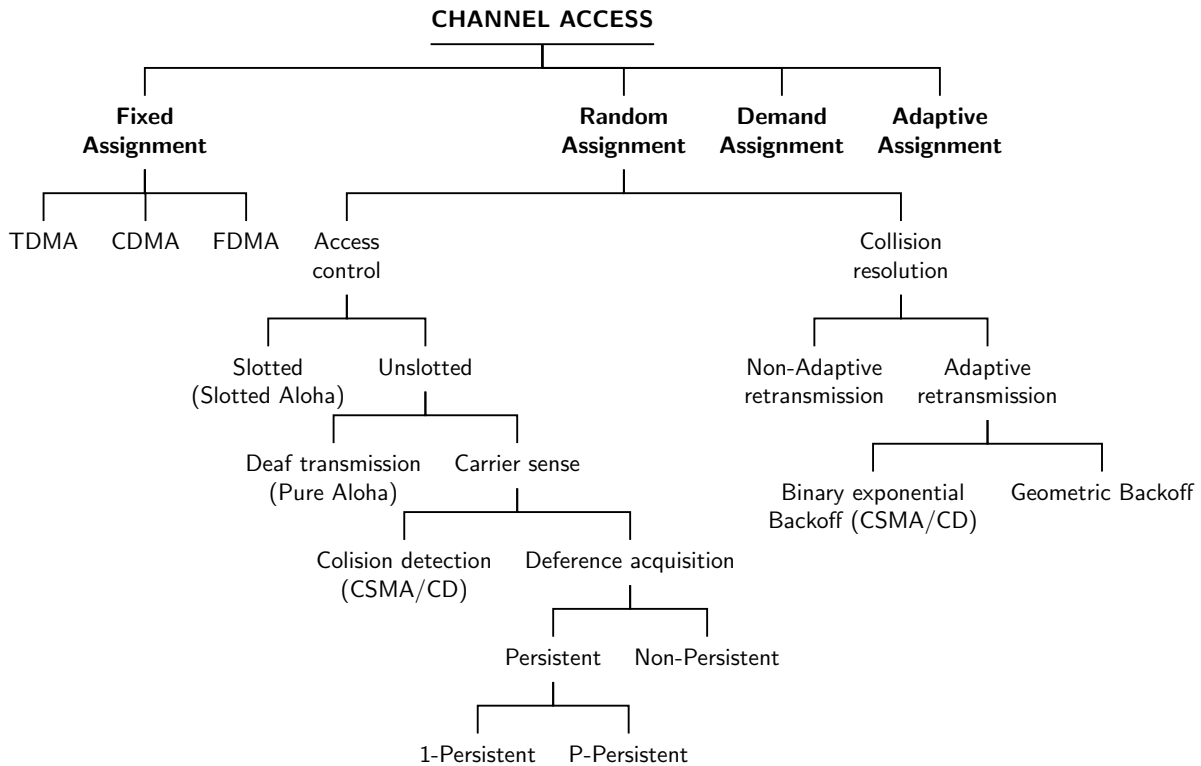


Figura 2.11. Métodos de acceso al canal. Fixed y Random Access. Adaptado de [27]

Por otro lado, la figura 2.12 presenta los protocolos de comunicación dinámicos en donde se toma en consideración la demanda de la red. Los protocolos de comunicación dinámicos requieren de cálculos complejos mientras los protocolos de asignación fija y aleatoria no requieren cálculos especiales.

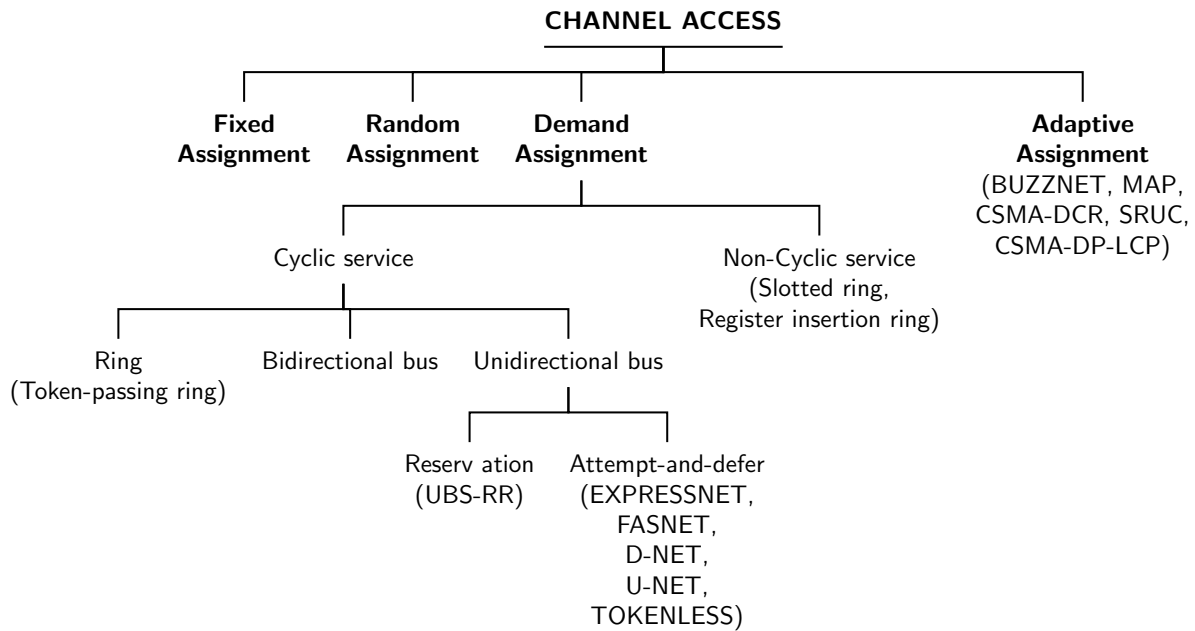


Figura 2.12. Métodos de acceso al canal. Demand y Adaptive Access. Adaptado de [27]

Pero, el implementar un protocolo de comunicación de asignación aleatoria requiere de una confirmación de envío, por tanto, en el caso de implementarse se va a disminuir la cantidad de información enviada debido a que los nodos deben verificar que no existan colisiones y en caso de existir realizar los métodos para corregir las colisiones.

Time Division Multiple Access (TDMA)

Este protocolo de comunicación, como su nombre lo indica, crea divisiones en el tiempo. El principio es muy sencillo, se crean espacios en el tiempo donde solo un nodo tiene permitido enviar la información, de esta forma se evitan colisiones entre la información. La figura 2.13 presenta una representación del protocolo. [28]

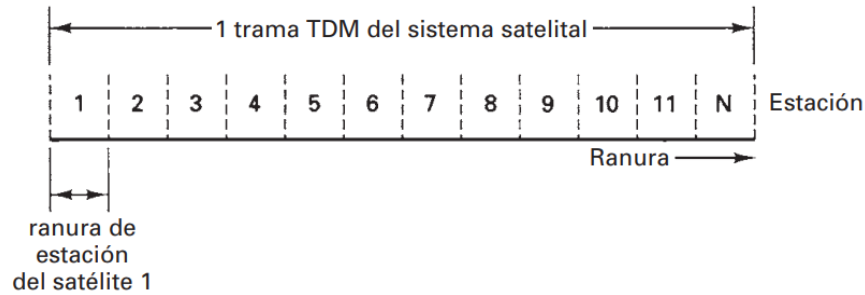


Figura 2.13. Modelo de un sistema TDMA.[25]

La principal desventaja de este protocolo es que los nodos se deben sincronizar y si esta sincronización no está bien realizada es probable que la mayoría de los paquetes van a estar corruptos. Así mismo, si lo escalamos a la robótica de enjambre este protocolo no soporta grandes cantidades de nodos. Ya que conforme aumenta la cantidad de nodos el tiempo de espera entre el mensaje aumenta también.

Frequency Division Multiple Access (FDMA)

Este protocolo consiste en dividir todo el dominio de frecuencia en pequeñas bandas que van a ocupar los nodo, de esa forma cuando un nodo necesita comunicarse con otro asigna la frecuencia del receptor y envía el mensaje. Este protocolo necesita de un equipo emisor para configurar cada banda de los nodos y otro equipo que va a tener su banda de escucha. La figura 2.14 presenta una representación de este protocolo de comunicación. [28]

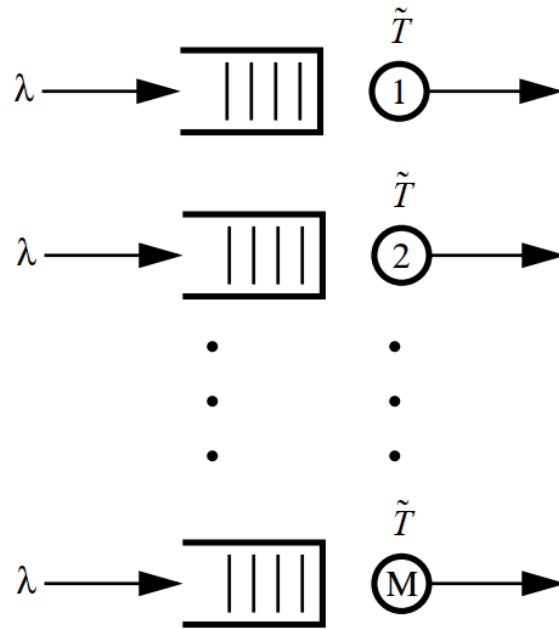


Figura 2.14. Modelo de un sistema FDMA. [28]

La principal ventaja de este protocolo es que no se requiere de sincronización para que cada nodo se comunique entre sí, ya que no existe interferencia con los demás. Sin embargo, existe un desperdicio en el uso del ancho de banda, ya que cuando un nodo no está recibiendo información ese canal no puede ser utilizado por otros nodos.

Code Division Multiple Access (CDMA)

Los protocolos anteriores de asignación fija se basaban en asignar espacios en el tiempo o en el espacio para cada nodo, el protocolo CDMA tiene un enfoque diferente, este se basa en la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa logrando utilizar todo el ancho de banda disponible. Esto se logra codificando el mensaje por medio de un código ortogonal, generando que el nodo receptor vea los demás mensajes con un ruido pseudo blanco, tal como se presenta en la figura 2.15. [29]

La principal desventaja de este protocolo es la sincronización, ya que si al menos un nodo está desincronizado todos los mensajes se van a corromper. Para solucionar este error se requiere de equipos especiales por lo que el costo incrementa en comparación con TDMA y FDMA.

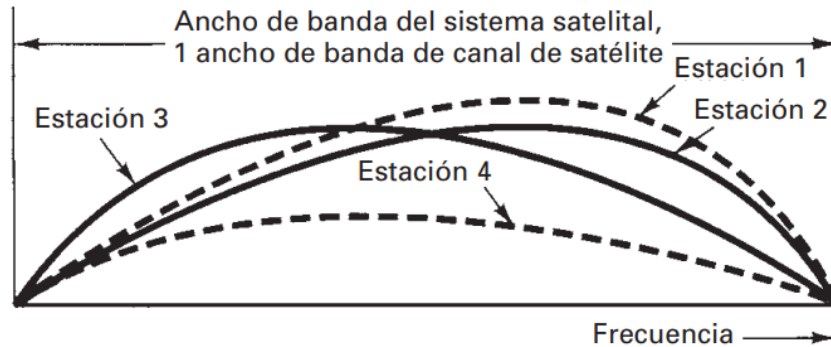


Figura 2.15. Arreglo para el protocolo CDMA. [25]

2.3. Transformación de coordenadas

Actualmente, los Atta-bots cuentan con un eje de coordenadas relativo, en otras palabras, cada robot considera que su posición inicial es su cero y no toma en cuenta el comportamiento de los demás robot. Sin embargo, cuando se requiere manipular cantidades que representan posición y orientación es necesario definir un lenguaje común para los robots. Por esa razón, el primer paso es definir un eje de coordenadas global, como se presenta en la figura 2.16, este eje global permite ubicar al robot en el espacio, no obstante, un robot también presenta una orientación en el espacio, por esa razón se debe identificar su orientación.

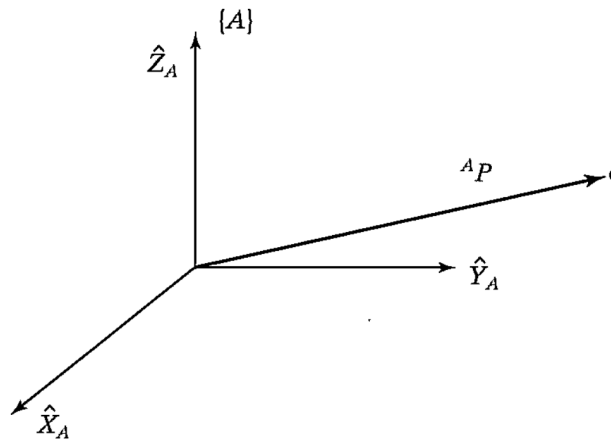


Figura 2.16. Vector relativo a la base. [30]

Para la identificación de la orientación del robot se coloca un eje de coordenadas sobre el punto donde se acaba de posicionar, como se muestra en la figura 2.17. Sin embargo, aquí se desarrolla la primera incógnita, ¿Cómo representar la orientación del robot respecto a la

global?

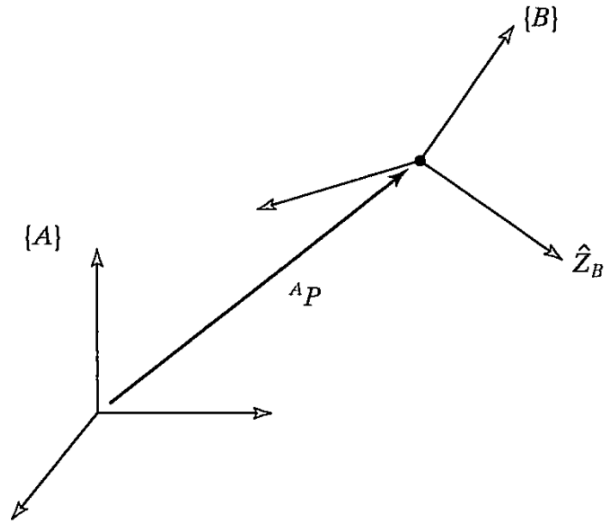


Figura 2.17. Localización del objeto con posición y orientación. [30]

Para ello se realiza una proyección del vector sobre las direcciones unitarias del marco de referencia, la ecuación 2.2 presenta la representación matemática de esa rotación, esta matriz es llamada la matriz de rotación ya que permite pasar de un plano a otro.

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} {}^A \hat{X}_B & {}^A \hat{Y}_B & {}^A \hat{Z}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X}_B \cdot \hat{X}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{X}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{X}_A \\ \hat{X}_B \cdot \hat{Y}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{Y}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{Y}_A \\ \hat{X}_B \cdot \hat{Z}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{Z}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{Z}_A \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Ahora en el caso que se tenga la misma orientación solo hace falta implementar la traslación, la figura 2.18 presenta el caso de traslación y la ecuación 2.3 presenta como se resuelve el caso de una traslación.

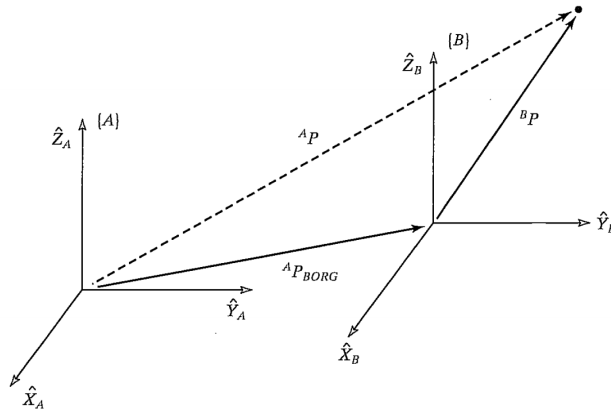


Figura 2.18. Mapear una traslación. [30]

$${}^A P = {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (2.3)$$

De forma similar, si el mapeo solo involucra una rotación pura como la que se presenta en la figura 2.19 se utiliza la matriz de rotación presentada en la ecuación 2.2.

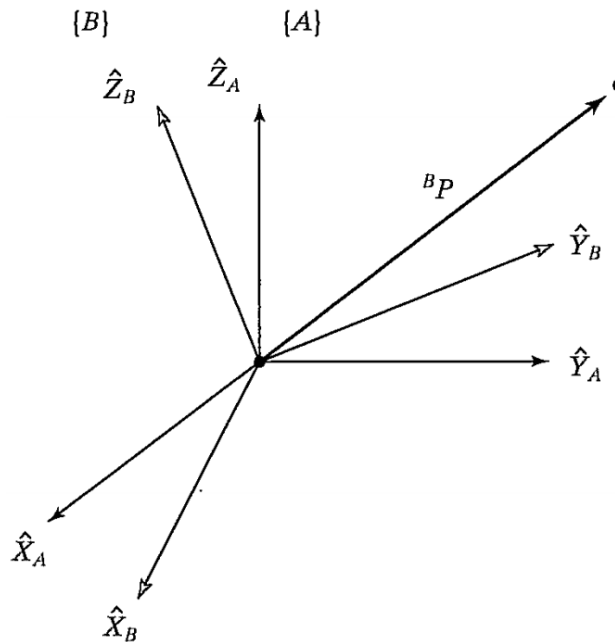


Figura 2.19. Mapear una rotación. [30]

Ahora, esos casos son muy particulares ya que en la realidad lo más probable es que ambos casos se combinen como se presenta en la figura 2.20, para esta transformación se realiza una combinación lineal de los casos anteriores, como se presenta en la ecuación 2.4.

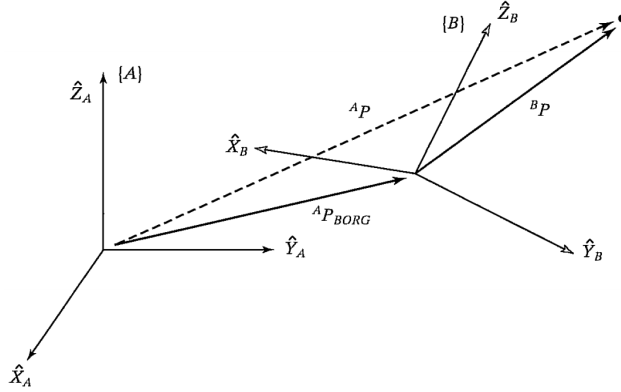


Figura 2.20. Transformación general. [30]

$${}^A P = {}^A_B R \cdot {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (2.4)$$

Sin embargo, con el fin de realizar la transformación en una sola operación se hace un proceso algebraico para combinar las matrices, quedando la ecuación 2.5.

$$\begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A_B R & | & {}^A P_{BORG} \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$${}^A P = {}^A_B T \cdot {}^B P \quad (2.6)$$

2.4. Filtro de Kalman

De forma resumida, un filtro de Kalman se puede entender como un estimador de estados, tiene la característica de obtener información valiosa donde hay presencia de ruido, además de requerir poco poder computacional para cumplir con su tarea. Esta clase de robots son aplicados en trabajos de robótica o para estimar variables de estado en sistemas lineales, pero también pueden ser utilizados para combinar sensores, imaginemos que se tienen dos componentes que están midiendo la misma variable física, siempre va a existir un ruido asociado a las mediciones de los sensores pero al combinar ambas mediciones la aproximación va a tener más exactitud. [31], [32]

Para la estimación se parte del modelo del proceso, presentado en la ecuación 2.7.

$$\mathbf{x}_k = F\mathbf{x}_{k-1} + B\mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (2.7)$$

Donde F es la matriz de transición de estado aplicada al vector de estado previo \mathbf{x}_{k-1} , B es la matriz de entrada y \mathbf{w}_{k-1} es el ruido del sistema, el cual se asume que es Gaussiano con una covarianza Q . Es decir $\mathbf{w}_{k-1} \sim N(0, Q)$.

Por otro lado, el modelo es comparado con un observador de estado que describe la relación entre el estado y la medición en el tiempo k , como se presenta en la ecuación 2.8.

$$\mathbf{z}_k = H\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (2.8)$$

Este observador de estado presenta un ruido \mathbf{v}_k que se asume Gaussiano con una covarianza R , es decir, $\mathbf{v}_k \sim N(0, R)$. El rol del filtro de Kalman es dar un estimado del estado \mathbf{x}_k a partir de la condición inicial, las mediciones z_1, z_2, z_3 consecutivas y la información del sistema descrito por F, B, H, Q y R . Para ello se desarrollan las ecuaciones presentadas a continuación.

Predicción

$$\text{Predecir el estado} \quad \hat{x}^- = F\hat{x}_{k-1}^+ + Bu_{k-1} \quad (2.9)$$

$$\text{Predecir el error covarianza} \quad P_k^- = FP_{k-1}^+F^T + Q \quad (2.10)$$

Actualización

$$\text{Medición del residuo} \quad \tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{z}_k - H\hat{\mathbf{x}}_k^- \quad (2.11)$$

$$\text{Ganancia de Kalman} \quad K_k = P_k^- H^T (R + HP_k^- H^T)^{-1} \quad (2.12)$$

$$\text{Actualizar estado} \quad \hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k \tilde{\mathbf{y}} \quad (2.13)$$

$$\text{Actualizar error covarianza} \quad P_k^+ = (I - K_k H)P_k^- \quad (2.14)$$

Estos procesos se realizan de manera cíclica en cada medición. [31]

2.5. Algoritmos de comportamiento colectivo

Los algoritmos de comportamiento colectivo o inteligencia de enjambre es una sub-área de la inteligencia artificial y ha ganado importancia con el paso de los años, uno de las razones del crecimiento es la versatilidad, flexibilidad y robustez que ofrecen estos comportamientos. Si combinamos los comportamientos colectivos con auto aprendizaje los resultados son casi

ilimitados y es que la adaptabilidad de la robótica de enjambre permite solucionar problemas donde encontrar la solución óptima para una tarea es casi imposible, como es en el caso de los problemas NP-complejos. [33]

A grandes rasgos los algoritmos de inteligencia de enjambre se pueden dividir en dos grupos: basados en insectos, como las hormigas, abejas y mariposas; y basados en animales, como el león, lobo, murciélago, entre otro. Sin embargo, tratar de mapear todos los algoritmos existentes por estas categorías no sería descriptivo, así que se opta por definir los algoritmos por su funcionalidad, tal como lo presenta Manuele Brambilla en su trabajo, figura 2.21

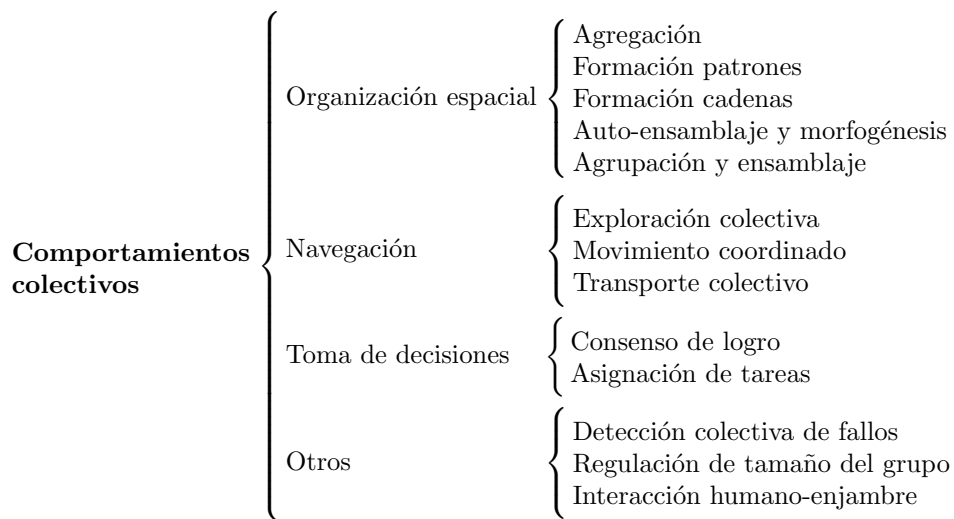


Figura 2.21. Resumen de comportamientos colectivos. Adaptado de [9]

Al dividir los algoritmos en estas categorías el enfoque realizado en cada área se realiza de manera más eficiente y permite combinar comportamientos para comparar resultados, actualmente se tienen trabajos enfocados en combinar organización espacial con toma de decisiones o combinar organización espacial con navegación. [18], [34]

A continuación se presenta una breve explicación del objetivo del comportamiento colectivo. [9]

2.5.1. Organización espacial

Agregación

El objetivo de este algoritmo es agrupar a los robots en un área en específica, le permite a los robots estar lo suficientemente cerca para interactuar entre ellos. Muchos robots

de enjambre utilizan este método para intercambiar información entre los robots debido a limitaciones de potencia.

Formación de patrones

Como su nombre lo indica el objetivo de este algoritmo es organizar los robots en una forma regular y repetitiva. Comúnmente se configura a los robots para que realicen patrones.

Formación de cadenas

El objetivo de este algoritmo es posicionar a los robots uno detrás de otro con el fin de conectar dos puntos, este algoritmo se ha utilizado para permitir a robots a cruzar puentes, similar a las hormigas o incrementar la fuerza de los robots cuando se requiere mover una carga de gran peso.

2.5.2. Navegación

Exploración colectiva

El objetivo de este algoritmo es cubrir o reconocer un área desconocida en el menor tiempo posible, para ello se desarrollan diferentes métodos para explorar. También se puede utilizar para encontrar un punto en específico en lugar de mapear todo el área.

Movimiento coordinado

Este comportamiento se enfoca en que los robots se movilen en una formación definida, ya sea fija o por métodos estadísticos. Este comportamiento puede ser utilizado para formar plataformas de transporte y aplicarlo en la industria.

Transporte colectivo

La idea general de este algoritmo es que un robot no puede cargar un objeto por sí mismo, de esta forma los robots deben cooperar para lograr mover la carga.

2.5.3. Toma de decisiones

Consenso de logro

Este comportamiento le permite al enjambre elegir una alternativa de solución entre muchas posibilidad, de forma que se elija la mejor opción. Sin embargo, este comportamiento es difícil de lograr debido a que en esta clase de tareas se requiere de iteraciones para encontrar la mejor solución.

Asignación de tareas

El enfoque de este comportamiento es que los robots tengan diversas tareas a cumplir y el mismo enjambre defina cual tareas o tareas realizar de forma que se minimice el tiempo para completarlas.

2.6. Antecedentes de los Atta-Bots

El primer trabajo realizado que ayudó a plantear PROE se realizó en 2019 por Cindy Calderón y Rebeca Solís, en donde se presentó un algoritmo para explorar ambientes desconocidos. El objetivo del algoritmo es mapear una zona y a partir del resultado determinar rutas óptimas. [1]

A partir de los resultados se explora la necesidad de desarrollar un prototipo de robot de enjambre con el fin de comparar las simulaciones con resultados reales. De esta forma se crea el primer prototipo del modelo presentado en la figura 2.22.

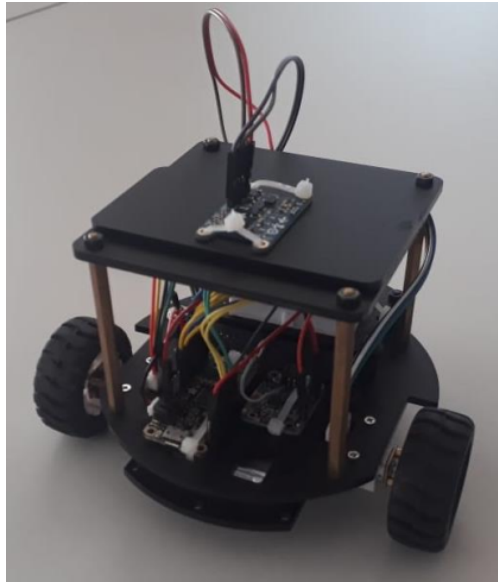


Figura 2.22. Primer versión del Atta-bot. [35]

Este primer prototipo no contaba con las características que definen un robot de enjambre, para ello se desarrolla el proyecto de Carlos Barrantes en 2019 [35] en donde se desarrolla un protocolo de comunicación semi descentralizado, se realiza un trabajo de filtrado y procesamiento de señales y se implementa un control automático de navegación, que contemplaba movimientos lineales y giros.

En el año 2020 los Atta-bots sufrieron un rediseño, en el cual se buscó mejorar la distribución de los componentes, hacer el robot más robusto y bridarle un aspecto más orgánico, la figura 2.23 muestra la versión actual de los Atta-bots.



Figura 2.23. Versión actual de los Atta-bots.

Por otro lado, ya que el objetivo de PROE es extenderse a exteriores y desarrollar comportamientos colectivos en ambientes no controlados, es necesario desarrollar un prototipo

para exteriores. El siguiente trabajo relevante en PROE lo desarrolló Sebastián Barquero en el primer semestre del 2020 [8] donde presenta una versión mejorada del Atta-bot capaz de funcionar en espacios no controlados. La figura 2.24 presenta el prototipo desarrollado al final del proyecto.

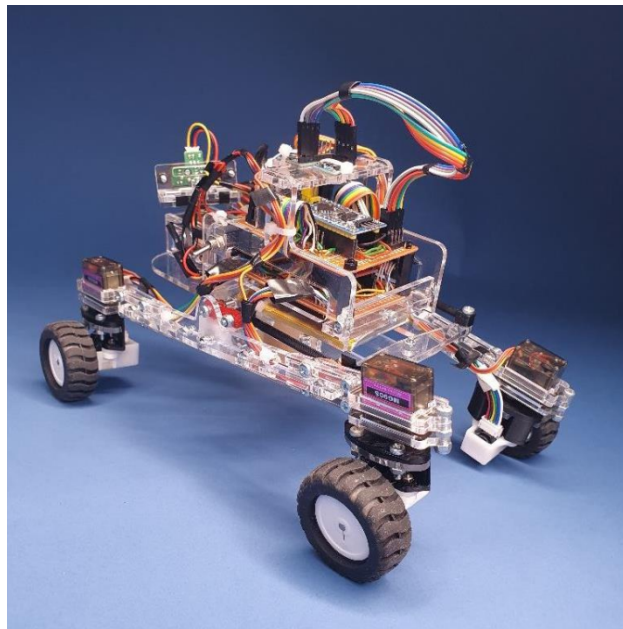


Figura 2.24. Prototipo de actualización para el Atta-bot en espacios no controlados. [8]

Por último, el proyecto más reciente relacionado a los Atta-bots fue desarrollado por Juan Carlos Brenes Torres en 2022 [36]. Donde presenta una propuesta de feromona artificial para robots de enjambre en espacios exteriores, esta feromona se realizó por medio de ferrofluidos y se espera que en futuros proyectos los Atta-bots puedan interactuar con estos ferrofluidos e implementar nuevos comportamientos colectivos. Por ejemplo, el comportamiento que realizan las hormigas cuando encuentran comida y dejan un rastro para alertar a las demás hormigas.

Para el desarrollo de este proyecto se va a tomar como base la metodología de diseño expuesta por Karl Ulrich y Steven Eppinger, en su libro se expone un procedimiento genérico para el desarrollo de nuevos productos el cual está dividido en seis pasos: planeación, desarrollo de conceptos, diseño a nivel sistema, diseño de detalle, pruebas & refinamientos e inicio de producción. [37]

Debido al alcance de este proyecto, no se van a abarcar todos los pasos expuestos por Karl y Steven, en su lugar se va a adaptar los pasos descritos en [37, p. 16-18]. La figura 3.1 presenta la metodología de diseño que se va a utilizar en este proyecto, la diferencia remarcable radica en que no se cuenta con un planeamiento en el desarrollo de la producción del concepto, ya que el producto va a ser utilizado para investigación.

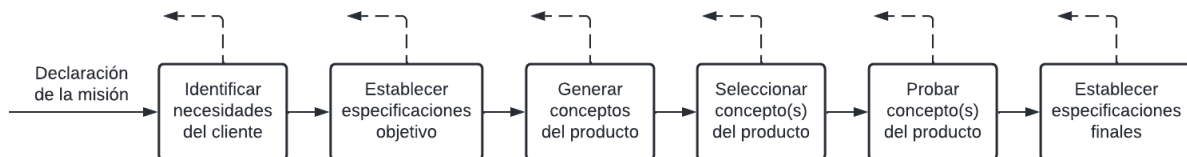


Figura 3.1. Proceso de diseño. Adaptado de [37, p. 16]

Al ser una metodología de diseño, estos pasos no se pueden ver como tareas a cumplir para el desarrollo de la solución, todos los pasos son iterativos y en caso de ser necesario se deberá analizar y plantear nuevas preguntas para determinar la mejor solución.

3.1. Identificación necesidades del cliente

Como se indica, el objetivo de este proceso es conocer qué necesita el cliente o cuál es el problema a solucionar, para ello se tienen diversos métodos: entrevistas, grupos de enfoque o como en este caso, observar el producto actual en funcionamiento. El método utilizado tiene objetivos concretos: [37, p. 74]

- Asegurar un enfoque a las necesidades del cliente.
- Identificar necesidades latentes u ocultas.
- Proporcionar una base de datos que justifiquen las especificaciones del producto.
- Crear un registro de archivos de las actividades de necesidades del proceso de desarrollo.
- Asegurar que no falte ninguna necesidad crítica.
- Desarrollar un entendimiento común de las necesidades del cliente.

Para este proyecto se opta por tres métodos: se realiza una entrevista al cliente, ya que PROE cuenta con un prototipo funcional se procede a ver el prototipo en funcionamiento y por último, se realiza una lectura de trabajos previos y las necesidades que se presentaban en ese entonces. Una vez que se determinan las necesidades, se procede a jerarquizar las necesidades por importancia, para ello se le pide al cliente que califique las necesidades en un rango de importancia, la clasificación se va a presentar a detalle en la sección 4.2, por otro lado, la tabla 3.1 muestra la escala de importancia utilizada a lo largo del diseño.

Tabla 3.1. Valores de importancia utilizados para las necesidades y especificaciones.

Valor	Descripción
1	La función es indeseable. No se consideraría un producto con esta función.
2	La función no es importante, pero no me importaría tenerla.
3	Sería bueno tener esa función, pero no es necesaria.
4	La función es altamente deseable, pero se consideraría un producto sin ella.
5	La función es de importancia crítica. No se consideraría un producto sin esta función

3.2. Establecer especificaciones objetivos

En este punto del trabajo se cuenta con un entendimiento general de las necesidades del cliente, sin embargo, con el fin de evitar interpretaciones subjetivas de los objetivos que abarca el proyecto se debe realizar un conjunto de especificaciones que detallen qué debe hacer el sistema de enjambre al final, estas especificaciones deben ser **medibles**. [37, p. 94].

3.2.1. Lista de métricas

Con el fin de medir el cumplimiento de las necesidades del cliente se va a desarrollar una lista de métricas en el cual cada métrica va a estar relacionada a una o más necesidades del cliente. De forma que, una vez que se cumplen estas métricas se logrará satisfacer las necesidades del cliente y por ende la finalización del proyecto. Por otro lado, para verificar que cada métrica esté vinculada a una necesidad se va a implementar una matriz necesidades-métricas.

3.2.2. Establecer valores meta

Una vez que se tienen las métricas que permiten cuantificar las necesidades, se van a establecer valores marginales e ideales del diseño, en donde los valores ideales son el mejor resultado que se podría esperar en la solución y los marginales son aquellos que apenas satisfacen las necesidades del cliente.

Para determinar estos valores se va a tomar como base la entrevista y la búsqueda de información externa, ya sea de la competencia o de las tecnologías utilizadas actualmente en el prototipo Atta-Bot que suponga una limitación en el desarrollo del proyecto.

3.3. Generar conceptos del producto

Cuando se tiene un problema de ingeniería, existe una amplia variedad de propuestas, equipos, técnicas y soluciones que pueden ser exploradas, por esta razón se deben explorar la mayor cantidad de alternativas. En este proyecto se va a utilizar el método propuesto en [37, p. 122], presentado en la figura 3.2.

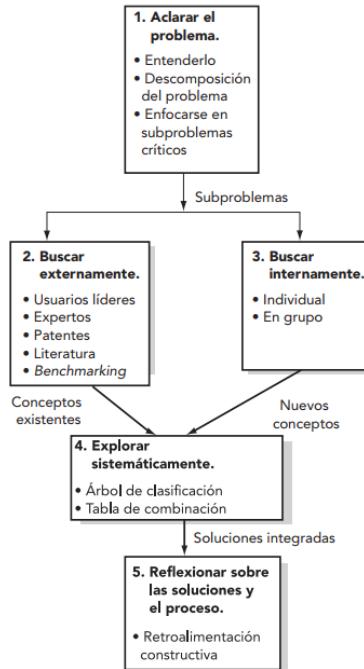


Figura 3.2. Método de generación de conceptos de cinco pasos. [37, p. 122]

Para ello primero se representa el sistema como la figura 3.3, en el cual solo se representan las entradas y salidas del sistema, para este caso se considera el Atta-Bot como la caja negra. El método consiste en dividir el problema en subproblemas más simples, de esta forma, cada subproblema se puede solucionar por medio de búsqueda de información interna o externa, una vez que se recopila la información se van a utilizar árboles de clasificación y tablas de combinación para explorar las alternativas e integrar las soluciones de un subproblema a una solución total.

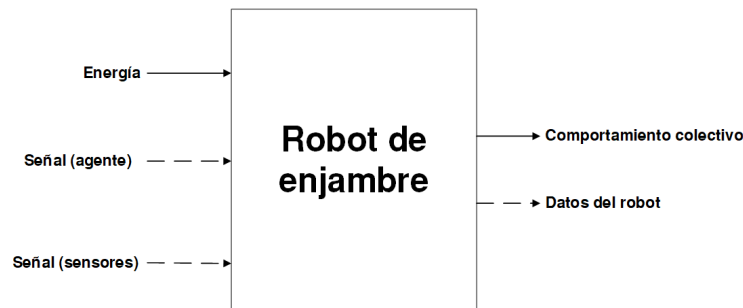


Figura 3.3. Representación del sistema como caja negra.

3.4. Seleccionar un concepto del producto

Con el fin de tener la mejor solución posible de todas las alternativas presentadas en la sección anterior, se debe realizar un filtrado en función de las necesidades del proyecto. Para ello, se van a utilizar las necesidades que se derivan de las entrevistas y de la búsqueda de información interna de PROE como criterio de selección.

3.4.1. Filtrado de conceptos

El primer método a utilizar es un filtrado de concepto por medio de una matriz de selección de conceptos, la cual consiste en utilizar un concepto base para ser comparado con las alternativas propuestas, para efectos de este trabajo se va a utilizar el prototipo funcional Atta-bot como concepto base.

Este primer filtro ordena los conceptos con las necesidades del proyecto y utiliza una evaluación relativa para determinar cuál concepto continúa en el proceso, esta selección se basa en utilizar el concepto base y compararlo con las soluciones propuestas, la tabla 3.2 muestra la evaluación utilizada para esta matriz.

Tabla 3.2. Evaluación relativa utilizada para comparar los conceptos. [37, p. 151]

Símbolo	Descripción
-	Peor que
0	Igual que
+	Mejor que

Al final de la evaluación se suman los resultados y se ordenan los conceptos, para este proyecto se tomaron los primeros cuatro conceptos para continuar con el siguiente paso de selección.

3.4.2. Evaluación de conceptos

El segundo filtro a utilizar es la evaluación de conceptos, para esta selección se utiliza una mejor “resolución” de los criterios de selección, en este caso se asigna una importancia relativa a cada necesidad, se evalúan los cinco conceptos y se realiza una suma ponderada de las calificaciones, al final se va a tener una mejor diferencia entre los conceptos, la tabla 3.3 muestra la evaluación a utilizar en la calificación de los conceptos.

Tabla 3.3. Escala de evaluación de conceptos. [37, p. 155]

Desempeño relativo	Calificación
Mucho peor que la referencia	1
Peor que la referencia	2
Igual que la referencia	3
Mejor que la referencia	4
Mucho mejor que la referencia	5

3.5. Probar concepto del producto

En esta etapa se desarrolla el concepto seleccionado y se realizan las pruebas necesarias para establecer el grado de cumplimiento de las necesidades, las pruebas a realizar van a definirse en función de la métrica a medir. Estas pruebas se van a presentar en detalle en la sección 4.5 conforme se implemente la solución.

3.6. Establecer especificaciones finales

Las especificaciones definidas al principio del desarrollo del proyecto se deben revisar después de la implementación de la solución, esto permite determinar si la solución cumple con las necesidades del cliente y en caso de tener especificaciones inferiores de lo esperado se debe realizar un análisis de las restricciones del concepto, limitaciones encontradas (costo económico, desempeño) y consideraciones que se realizaron durante la implementación.

3.7. Diseño de experimentos

En la fabricación o propuesta de un sistema, muchas veces se tiene una cantidad elevada de factores que pueden influir en el comportamiento del mismo y en la mayoría de los casos resulta sumamente costoso probar cada combinación o no se tiene el tiempo para realizarlo, por esa razón es necesario de plantear estrategias que permitan determinar cual factor tiene un mayor efecto en el sistema para enfocar los recursos en ese punto.

El diseño de experimentos o comúnmente llamado Design of Experiments (DOE) se entiende como la aplicación del método científico para generar conocimientos de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esto quiere decir que por medio de técnicas estadísticas e ingenieriles se pueden entender situaciones complejas de relación

causa-efecto de una mejor manera. [38]

La figura 3.4 presenta un resumen de diseño de experimentos, para la validación de este proyecto se utiliza un diseño factorial 2^k .

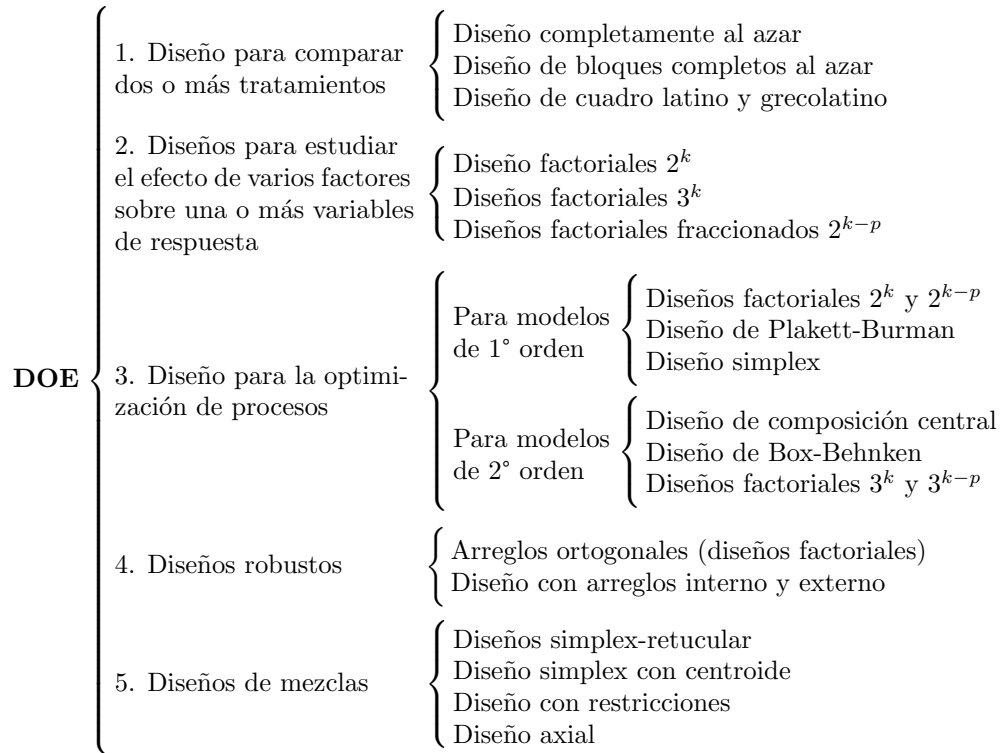


Figura 3.4. Clasificación de los diseños de experimento. Adaptado de [38]

3.7.1. Diseños factoriales 2^k

Según la literatura este es un diseño de experimentos de mayor impacto en la industria, esto se debe su eficacia y versatilidad. El diseño de experimento consiste en definir los factores controlables, se recomienda entre dos y cinco factores ($2 \leq k \leq 5$). En este experimento se analizan dos niveles para cada factor, un nivel inferior y otro superior. En caso que hayan factores no numéricos esta característica puede varias y se tendría una lista con las posibilidades de los factores.

Una vez que se realiza el experimento y se toman los datos es posible hacer el análisis de normalidad del experimento, que factores son importantes para el modelo y cual es la interacción de los factores en el comportamiento del modelo. Permitiendo tomar decisiones sobre los puntos a mejorar del modelo u obtener conclusiones del comportamiento del sistema.

Desarrollo de la solución

En este capítulo se presentan los pasos realizados a detalle de la metodología (cap 3) para completar el proyecto, a excepción de las especificaciones finales, el cual se va a presentar en el capítulo 5. Así mismo, se va a iniciar indicando consideraciones que se deben tomar en cuenta al momento de la selección de conceptos, ya que son parámetros de los Atta-bots que se eligieron en proyectos pasados y no se pueden cambiar, sin embargo se puede realizar la sugerencia de posibles mejoras a estos sistemas.

4.1. Consideraciones de diseño

En la entrevista previa con el cliente se indica que existe un modelo funcional de robot para el sistema de enjambre, por tanto, es necesario conocer los componentes que conforman el robot con el fin de brindar soluciones que se puedan adaptar al hardware actual y reduzca los costos. Así mismo, esta descomposición funcional del modelo actual permite realizar comparaciones con otros robots de la industria y determinar expectativas en los robots y limitaciones que pueden presentar, la tabla 4.1 presenta la lista de materiales para poder construir un Atta-bot.

Tabla 4.1. Lista de materiales

Cant.	Código	Nombre	Enlace	\$/u
1	AT-E-01	Batería Lipo 2Ah	https://bit.ly/3QuNXZ1	\$14,95
1	AT-E-02	Boost	https://bit.ly/3SxXtwx	\$10,95
1	AT-E-03	Puente H (módulo)	https://bit.ly/3zzudNc	\$4,95
2	AT-A-01	Motores DC encoder	https://bit.ly/3vNVjPs	\$14,95

Continúa en siguiente página

Tabla 4.1. Lista de materiales. Continuación

Cant.	Código	Nombre	Enlace	\$/u
2	AT-M-01	Soportes motores	https://bit.ly/3BKyLTx	\$0,75
1	AT-M-02	Ball caster	https://bit.ly/3bD0dYR	\$2,75
1	AT-C-01	Feather M0 RFM69	https://bit.ly/3dctUAm	\$24,95
1	AT-S-01	Magnetómetro	https://bit.ly/3JAB9hH	\$9,95
1	AT-C-02	Blue Pill	https://bit.ly/3BwcYgP	\$4,95
1	AT-A-02	Servomotor	https://bit.ly/3BSusoP	\$6,95
1	AT-S-02	Sensor IR adelante	https://bit.ly/3BTxn0F	\$2,95
2	AT-S-03	Sensor IR abajo	https://bit.ly/3BSW61C	\$1,95
1	AT-S-04	Sensor Temperatura	https://bit.ly/3DBpcqW	\$1,95
1	AT-S-05	Sensor sharp	https://bit.ly/3BtxEpI	\$16,95
1	AT-M-03	Pines	https://bit.ly/3DDiUr5	\$1,95
1	AT-M-04	Interruptor general	https://bit.ly/3DBpi1M	\$1,25
1	AT-M-05	Interruptor pequeño	https://bit.ly/3BrLwRq	\$0,95
1	AT-E-04	LED azul	https://bit.ly/3QXp9Zu	\$0,15
1	AT-E-05	LED rojo	https://bit.ly/3QXpbR6	\$0,15
1	AT-E-06	LED amarillo	https://bit.ly/3BSX4hI	\$0,15
1	AT-S-06	IMU	https://bit.ly/3BUcDWy	\$6,95
1	AT-E-07	Memoria eeprom	https://bit.ly/3xCvG5g	\$1,40
3	AT-E-08	Capacitores 100nF	https://bit.ly/3q0dIc6	\$0,40
3	AT-M-06	Header hembra 40 pines	https://bit.ly/3UmZT1V	\$0,80
2	AT-E-09	Conector motor hembra	https://ebay.to/3SciuvE	\$13,00
1	AT-E-10	Conector de batería	https://ebay.to/3f3nSDc	\$4,75
1	AT-M-07	Base DIP 8 pines	https://ebay.to/3BtDdo3	\$3,22
Componentes compartidos				
	AT-E-11	Programador Blue Pill	https://bit.ly/3r9FobP	\$5,95
	AT-E-12	Cable USB	https://bit.ly/3qQTnCZ	\$4,95
	AT-M-08	Espaciadores y tornillos	https://bit.ly/3q0AMYf	\$15,95
	AT-E-13	Resistencias	https://bit.ly/3Ugqeyy	\$11,95

Especificaciones generales

- Precio sin componentes compartidos: \$155

- Peso promedio: $(455 \pm 1)g$
- Dimensiones: 17cm x 15cm x 9cm

4.1.1. Sistema de locomoción

El sistema de locomoción está compuesto de los componentes:

- Puente H (AT-E-03)
- Motor DC encoder (AT-A-01)
- Soporte motores (AT-M-01)
- Ball caster (AT-M-02)
- Conector motor hembra (AT-E-09)

Principio de construcción

Para la fabricación se basó en un sistema diferencial, consiste en utilizar dos ruedas independientes que están motorizadas. De esta forma, variando la velocidad y dirección de giro de las ruedas se puede determinar la dirección de movimiento del robot, como se presenta en la figura 4.1.

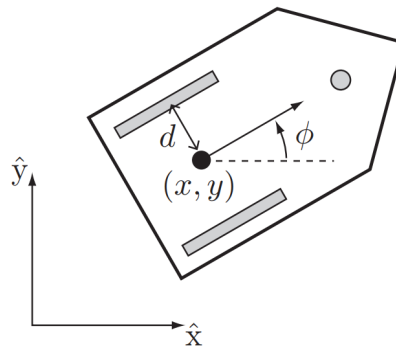


Figura 4.1. Robot con sistema de locomoción diferencial. [39]

Características técnicas

El motor utilizado puede alcanzar una velocidad máxima sin torque de 460rpm, la hoja de datos indica que a máxima eficiencia puede alcanzar 330rpm y ya que se utiliza una rueda con 42mm de diámetro, los Atta-bots pueden alcanzar una velocidad lineal teórica máxima de 726mm/s.

Posibilidades de mejora

Para los sistemas diferenciales es necesario tener un punto de apoyo o generar un sistema de control para mantener el robot en posición vertical, para esta aplicación el utilizar un sistema de control de péndulo invertido no está justificado y se optó por utilizar un punto de apoyo. Para ello se utilizó una ball caster. Sin embargo, en futuros proyectos se espera pasar los Atta-bots de un ambiente controlado en el laboratorio a un ambiente más cercano a la realidad y la ball caster utilizada puede generar problemas en la movilidad del robot. Ya que los atta-bots no requieren una velocidad elevada de desplazamiento, para futuras compras se puede considerar opciones más económicas de los motores N20.

4.1.2. Sensores

Los Atta-bots cuentan con los siguientes sensores:

- Magnetómetro (AT-S-01)
- Sensor distancia infrarrojo (AT-S-05)
- Tres sensores infrarrojos (AT-S-02 y AT-S-03)
- Giroscopio y acelerómetro (AT-S-06)
- Sensor temperatura (AT-S-04)
- Encoder (AT-A-01)

La selección de los sensores del Atta-bot se realizó de forma que se lograran detectar características del entorno al mayor rango posible y a su vez fuera económico. El giroscopio y magnetómetro se están utilizando para el control de los giros del robot, sin embargo, el acelerómetro no se está utilizando.

En aplicaciones de robótica, el encontrar sensores con alta precisión supone un reto por los proveedores que puedan existir en el país, además del alto costo de estos. Por esa razón, se utilizan otras técnicas para reducir el error de los sensores, por ejemplo, combinar diferentes resultados de sensores para tener una mejor aproximación.

Para determinar la velocidad de los Atta-bots solo se está utilizando los datos de los encoders, pero es posible combinar estos datos con el acelerómetro por medio de un promedio o métodos más avanzados como filtros de Kalman. Lo que va a permitir determinar la distancia avanzada y la ubicación del robot con mayor precisión.

Por otro lado, a partir de experimentos se determinó que las mediciones del magnetómetro son muy ruidosas y no es posible trabajar con los datos, aún cuando se está realizando un filtro paso bajas. Por esa razón es necesario implementar un procesamiento de señal más

potente, en la sección 4.5.3 se va a entrar en más detalle a la solución propuesta y los resultados obtenidos.

Por último, la implementación del sensor de temperatura está pensado para poder simular fuentes de comida en comportamientos colectivos, similar a las hormigas permitiendo la implementación de algoritmos de exploración.

4.1.3. Sistema de comunicación

Un factor a solucionar en este proyecto es el protocolo de comunicación que se implementa en el sistema de enjambre, para ello se debe tomar en consideración las características de un enjambre y las limitaciones que pueda presentar el hardware actual.

Los Atta-bots utilizan un módulo RFM69 para la comunicación, este módulo de radio frecuencia tiene la característica de poder trabajar a varias frecuencias y el consumo energético es pequeño. Sumado a ello, el microcontrolador SAMD21 presenta un reloj separado del reloj del sistema, lo que permite configurarlo para que solo se encargue de la comunicación del sistema y cada periodo de tiempo indicar que debe enviar un mensaje.

En cuanto al protocolo de comunicación utilizado, se está implementando el protocolo TDMA pero es posible implementar otro tipos de protocolos como Aloha, Carrier Sense Multiple Access (CSMA) o CDMA este último requiere que se realice una programación a bajo nivel, contrario a lo que se realiza actualmente. A lo largo del proyecto la comunicación a sido programada con la librería RadioHead debido a la amplia documentación y facilidad de realizar cambios en caso de requerirlos.

En cuanto a las limitaciones del protocolo de comunicación se encuentra la ventana de tiempo utilizada para el TDMA, al tener una ventana elevada de tiempos se reduce la escalabilidad del sistema. Así mismo, la idea principal de los Atta-bots es que cualquier persona puede adquirir uno sin necesidad de un entendimiento complejo del código, pero el sistema de comunicación tiene una librería especial y se debe buscar utilizar una librería que esté documentada y muchas personas la utilicen.

4.1.4. Algoritmos de comportamiento colectivo

Antes de continuar con la propuesta de solución, es necesario determinar si los Atta-bots son capaces de implementar diferentes algoritmos de comportamiento colectivo, en la sección 2.5 se presentaron comportamientos colectivos que están en investigación. Uno de los objetivos de PROE es la creación de un nuevo comportamiento colectivo, tomando como base

los actuales. Para ello se realiza una matriz comparativa para determinar cuales algoritmos son teóricamente posibles de implementar. Para determinar la factibilidad de implementar los algoritmos se tomaron las características de cada algoritmo, comunicación entre nodos, actualizar ubicación del robot, detección de obstáculos y transporte de objetos.

Todos los algoritmos necesitan como mínimo tener comunicación entre nodos y detección de obstáculos, la tabla 4.2 presenta las características que debe tener un robot para implementar cada comportamiento colectivo, esta tabla fue realizada por medio de una búsqueda interna de información, así como las diferentes opciones de solución presentadas en otras investigaciones, presentado en la sección 2.1.

Por ejemplo, en el caso de agregación no es necesario que cada robot conozca su ubicación ya que existen comportamientos en el cual los robots andan explorando el espacio y cuando se encuentra con cierta luminosidad o condición se queda en ese espacio y si llegan más robots configuran su distribución.

Tabla 4.2. Tareas requeridas por algoritmo de comportamiento colectivo.

Comportamiento	Requisitos	Comunicación	Det. obstáculos	Act. ubicación	Trans. objetos
Agregación	✓	✓	✗	✗	✗
Formación patrones	✓	✓	✓	✗	✗
Formación de cadenas	✓	✓	✓	✗	✗
Exploración colectiva	✓	✓	✓	✗	✗
Movimiento coordinado	✓	✓	✓	✗	✗
Transporte colectivo	✓	✓	✓	✓	✓
Consenso de logro	✓	✓	✓	✗	✗
Asignación de tareas	✓	✓	✓	✗	✗

Por otro lado, de los requisitos presentados anteriormente, el Atta-bot es capaz de realizar comunicación entre nodos, actualizar su ubicación y detectar objetos u obstáculos; transportar objetos es la única tarea que no es posible realizar. De esta forma, se determinan los algoritmos que pueden ser implementados teóricamente por el enjambre, la tabla 4.3 presenta un resumen de los algoritmos que teóricamente pueden ser implementados.

Tabla 4.3. Algoritmos que teóricamente se pueden implementar en el Atta-bot

Comportamiento	Estado	Posible
Agregación	X	✓
Formación patrones	X	✓
Formación de cadenas	X	✓
Exploración colectiva	✓	✓
Movimiento coordinado	X	✓
Transporte colectivo	X	X
Consenso de logro	X	✓
Asignación de tareas	X	✓

De la tabla 4.3 se obtiene que de los algoritmos consultados en la literatura solo uno no lograría ser implementado y siete algoritmos podrían ser implementados teóricamente.

Por tanto, se concluye que los Atta-bots tienen la capacidad de realizar más de cinco algoritmos con el hardware actual, el cual es la métrica planteada para la implementación de nuevos experimentos en el futuro y cumpliendo el primer indicador del proyecto.

4.2. Necesidades y especificaciones

El primer paso realizado es entender el problema que presenta PROE, esto se realiza por medio de entrevistas con el cliente, miembros del laboratorio y al tener un prototipo funcional se procede a realizar visitas a la sala de experimentos para analizar el prototipo, ver los Atta-Bots en funcionamiento y posteriormente realizar un análisis de los datos.

La tabla A.1 muestra las necesidades interpretadas a partir de la entrevista realizada con el cliente, una vez que se tienen las necesidades identificadas se procede a clasificar las necesidades por importancia. La tabla 4.4 muestra que la mayoría de las necesidades se deben completar al final del proyecto.

Solo se permite que el robot trabaje en áreas reducidas, más específico en el escenario de 3m x 3m que cuenta PROE, esto debido a la etapa en la que se encuentra los Atta-Bots. Y no es necesario que la configuración de los experimentos se realice con mayor facilidad de la que se tiene actualmente.

Para PROE es de gran interés implementar un nuevo algoritmo de comportamiento colectivo que incluya información recibida de los otros Atta-Bots, por esa razón la comunicación e interpretación de datos tienen una alta prioridad.

Tabla 4.4. Necesidades del proyecto

#	Necesidades	Imp.
1	El sistema de enjambre permite enviar información entre los robots y enviar información entre los robots y la base.	4
2	El sistema de enjambre es descentralizado.	4
3	La comunicación del sistema de enjambre tiene una tasa de bits mayor a la actual	4
4	Cada robot del sistema de enjambre interpreta la información recibida de manera correcta	5
5	Cada robot del sistema de enjambre es capaz de conocer la posición de sus vecinos respecto a él.	4
6	El sistema de enjambre permite configurar diferentes algoritmos de comportamiento colectivo.	4
7	El sistema de enjambre es capaz de trabajar en áreas extensas	3
8	La programación del protocolo de comunicación del sistema de enjambre permite que sea fácilmente duplicada o modificada	5
9	El protocolo de comunicación por implementar utiliza los recursos existentes del sistema de enjambre	5
10	Las pruebas del laboratorio son fáciles y rápidas de configurar en el sistema de enjambre.	3
11	Los robots del sistema de enjambres evitan colisiones.	5

Una vez que se tienen las necesidades se debe definir como determinar si estas se cumplen, para ello se toma en cuenta las especificaciones que indica el cliente en las entrevistas, así como resultados de proyectos de robótica de enjambre externos para tener una referencia y definir los valores marginales e ideales de este proyecto.

La tabla 4.5 muestra un resumen de las métricas con sus valores marginales y la tabla A.2 presenta de forma completa las métricas con su relación a las necesidades. Por otro lado, en la sección de anexos A se presentan los comentarios de cada métrica y como estas fueron definidas, tabla A.3.

Tabla 4.5. Especificaciones objetivo referentes al robot PROE.

#	Métrica	Imp.	Unidad	V. marginal	V. ideal
1	Porcentaje de recepción de datos en los nodos	4	%	>90	>99
2	Cantidad de operaciones en el enjambre que requieren una unidad central	4		<5	0
3	Tasa de bits enviados a la base	4	Bytes/s	>100	>250
4	Tases de bits recibidos en la base y nodos	4	Bytes/s	>400	>750
5	Porcentaje de bits recibidos con errores	5	%	<5	<1
6	Exactitud de la distancia calculada	4	%	>90	>95
7	Cantidad de algoritmos de comportamiento colectivo que se pueden configurar	4	Lista	*Lista 1	*Lista 2
8	Distancia máxima de comunicación	3	m	>3	>6
9	La comunicación es fácil de modificar	5	Subjetiva	>3	=5
10	Cantidad de componentes comprados	5		0	0
11	Tiempo requerido para configurar el experimento y obtener resultados	3	min.	<5	<2
12	Porcentaje de robots detectados como obstáculos en los resultados	5	%	<20	<5

***Lista 1:** Organización espacial, agregación, formación de patrones

***Lista 2:** Exploración colectiva, organización espacial, agregación, formación de patrones, formación de cadenas

4.3. Generación de conceptos

Por definición un robot de enjambre debe ser simple, la descomposición funcional de la figura 4.2 representa esa simplicidad de funciones de los Atta-Bots. Este proyecto no abarca todas estas funciones, en proyectos anteriores se han depurado [35], el enfoque de este proyecto es mejorar la comunicación del enjambre y la interpretación de la información recibida por los sensores del robot y otros nodos del enjambre. De esta forma, solo se van a tratar los bloques: interpretar, procesamiento de información y envío información.

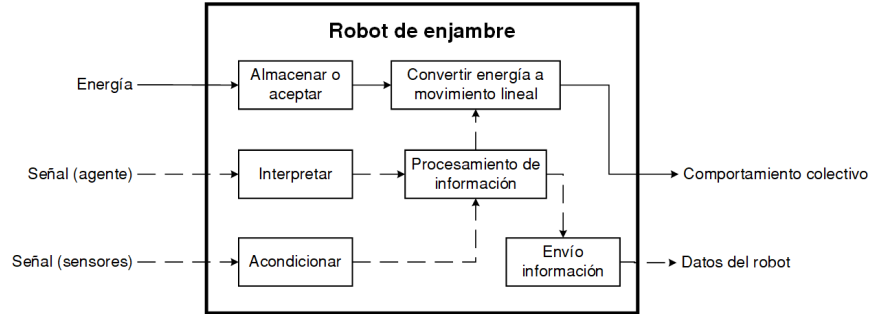


Figura 4.2. Descomposición funcional de los Atta-Bots.

La subfunción interpretar debe comprender los aspectos presentados en la figura 4.3, actualmente, cada robot compone un mensaje que se envía a la base, pero ese mensaje debe ser enviado a todos los robots del enjambre e interpretado correctamente. Por otro lado, una consideración de los robots de enjambre es que no procesan toda la información que reciben y existen algoritmos que toman en consideración la distancia a la que se encuentran los robots para procesar la información, generando regiones entre el sistema.

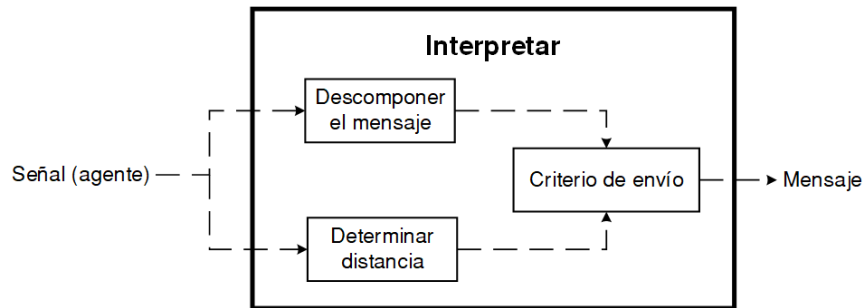


Figura 4.3. Descomposición de la subfunción interpretar.

La subfunción que conlleva más consideraciones es el procesamiento de información, este proyecto se va a enfocar en la implementación de un algoritmo de comportamiento colectivo diferente al que se tiene actualmente. Para ello se deben tomar en consideraciones los sensores que presenta los Atta-Bots y que limitaciones supone, así mismo, se debe decidir que información se va a enviar a través del sistema de enjambres.

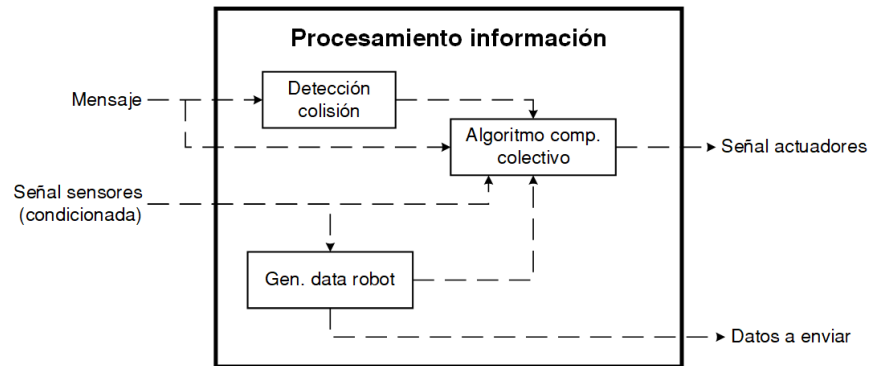


Figura 4.4. Descomposición de la subfunción procesamiento de información.

Ya que se tienen las subfunciones a analizar, se procede a realizar una búsqueda de información externa e interna para resolver las problemáticas. La figura 4.5 presenta los conceptos que tienen relevancia para el tipo de comunicación que se requiere en un sistema de enjambre.

Primeramente, se deben considerar protocolos de comunicación inalámbrica local, ya que una característica de un sistema de enjambre es la estigmergia. A partir de estar limitado a una comunicación inalámbrica se determinan protocolos de acceso múltiple, los cuales permiten enviar la información a través del mismo medio garantizando que el mensaje llegue a los nodos de la red. La característica de cada protocolo se encuentra en la sección A.3.1.

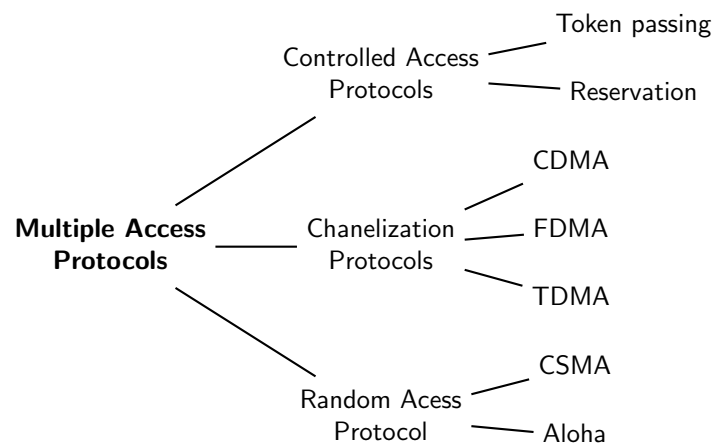


Figura 4.5. Conceptos para el protocolo de comunicación.

Así mismo, en un sistema de comunicación se debe considerar la topología de la red, en este caso al trabajar con comunicación inalámbrica la topología es malla. Sin embargo,

tomando en consideración algunos protocolos de comunicación es posible realizar otras topologías, para este caso se realiza una búsqueda interna de información y se determina que es posible implementar una topología tipo árbol con algunas modificaciones. En la sección A.3.2 se presenta a más detalle la opción planteada.

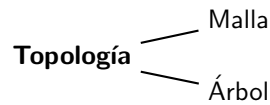


Figura 4.6. Conceptos para la topología de comunicación.

Trabajando en el procesamiento de la información, es necesario que los Atta-Bots sean capaces de interpretar la posición de sus vecinos, para ello se debe realizar una transformación de coordenadas, que a su vez necesita como primera instancia conocer la posición inicial de los robots para de esta forma generar la matriz de transformación (sección 2.3).

Para ello se requieren métodos para determinar la posición de los robots, el cual solo se va a realizar en el protocolo de inicio de los robots, con una exactitud apropiada y evitar errores de posicionamiento conforme los robots ejecutan el algoritmo. De esta forma, considerando la limitación de presupuesto y los componentes que cuentan los Atta-Bots se tienen las posibles soluciones presentadas en la figura 4.7, en la sección A.3.3 se presenta con más detalle los diferentes métodos.

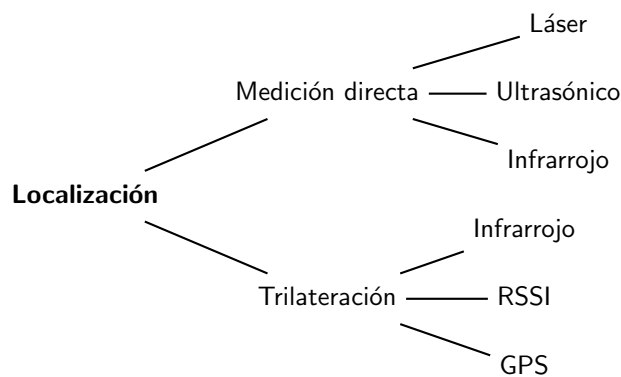


Figura 4.7. Conceptos para la localización.

Por último, uno de los objetivos de este proyecto es la implementación de un algoritmo de comportamiento colectivo que permita validar todas las mejoras a implementar. De esta

forma, se debe tomar en consideración los objetivos de PROE en conjunto con los métodos a implementar en los robots. La figura 4.8 presenta los algoritmos populares que se implementan en enjambres de robots y de implementarse en los Atta-Bots permitiría evaluar el desempeño de la solución propuesta. En la sección A.3.4 se presenta la idea general de los algoritmos a mayor detalle.

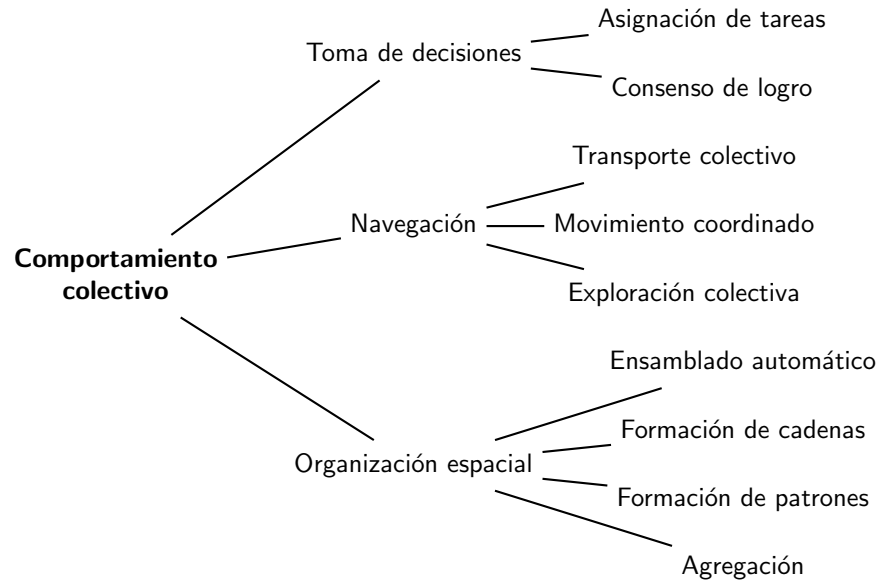


Figura 4.8. Conceptos para el comportamiento colectivo.

Ya que se tiene información para la solución de los subproblemas, se procede a presentar posibles alternativas de solución que cumplen de alguna forma las métricas del proyecto. Estas soluciones van a ser filtradas posteriormente para obtener la mejor alternativa. Por otro lado, las soluciones que contemplan la implementación del RSSI están susceptibles a quedar descartadas dependiendo de la precisión de los datos que se logre obtener para el área de trabajo actual.

4.3.1. Concepto A

La primer alternativa, figura 4.9, toma en consideración el protocolo de comunicación implementado actualmente en el cual se buscaría reducir la ventana de tiempo entre el envío de cada paquete para así tener una mayor tasa de envío y no se realizarían cambios en la topología de comunicación, lo cual facilita la escalabilidad y programación del protocolo de comunicación.

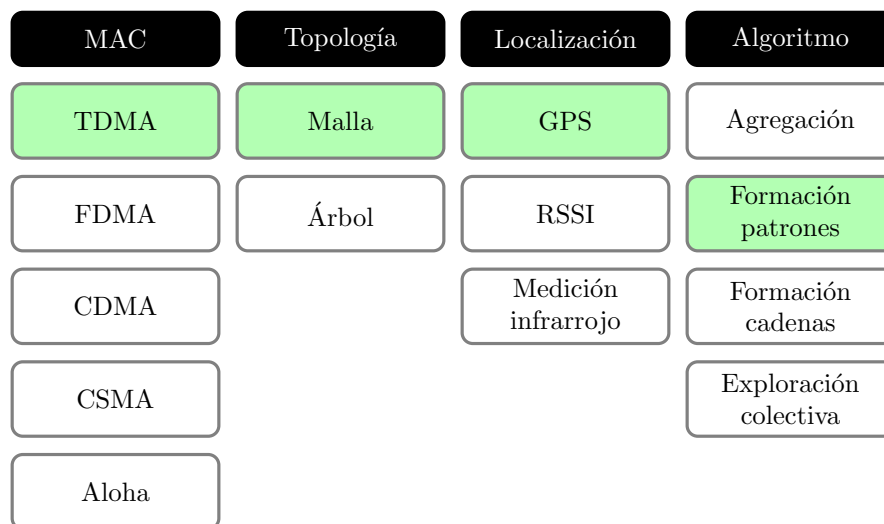


Figura 4.9. Concepto de solución A.

Por otro lado, este concepto propone la integración de un Global Positioning System (GPS) incrementando el costo del robot y la potencia requerida del mismo. Dentro de sus ventajas está el poder operar en espacios abiertos y tener una mayor certeza de la posición que se obtiene por medio del GPS. Sin embargo, el GPS es conocido por consumir una cantidad de energía considerable lo cual disminuirá la autonomía del robot.

La imagen 4.10 y 4.11 presenta un boceto del resultado esperado. Para este concepto el protocolo de inicio requiere que haya sincronización entre los robots, una vez que se tiene sincronización los robots realizarán el patrón seleccionado, un método a considerar es el calcular la posición que deben tener todos los robots de manera absoluta y luego cada robot convierte esas coordenadas a su propio eje de coordenadas.



Figura 4.10. Boceto de comunicación por medio de TDMA.

Así mismo, al tener localización por medio de GPS y utilizar un direccionamiento diferencial es posible implementar un filtro de Kalman con el fin de mejorar la exactitud de la posición del robot. De esta forma se tendría un posicionamiento más robusto, involucrando la Unidad de Medición Inercial (IMU) y encoders actuales más el GPS.

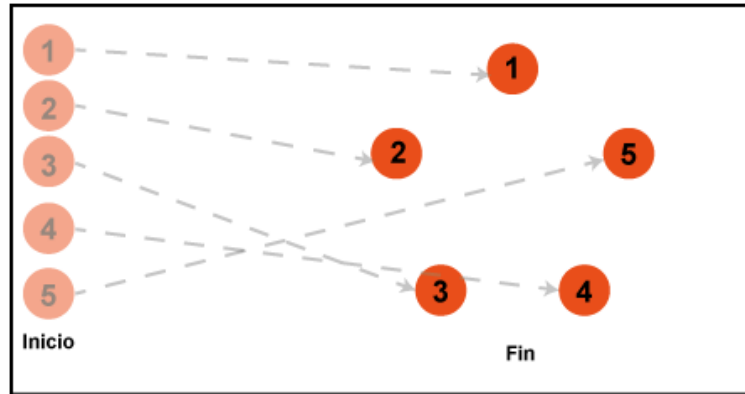


Figura 4.11. Boceto del resultado del algoritmo formación de patrones.

4.3.2. Concepto B

Este concepto requiere la compra de dos módulos, uno que permita comunicación por medio de FDMA y otro para la localización por medio de GPS (sección A.3.2 y A.3.3). La principal ventaja de este concepto es la escalabilidad y el incremento de exactitud en el posicionamiento del robot.

MAC	Topología	Localización	Algoritmo
TDMA	Malla	GPS	Agregación
FDMA	Árbol	RSSI	Formación patrones
CDMA		Medición infrarrojo	Formación cadenas
CSMA			Exploración colectiva
Aloha			

Figura 4.12. Concepto de solución B.

Para la comunicación se presenta una topología “árbol” que solo es posible de implementar debido al protocolo de comunicación FDMA, figura 4.13. Se van a tener diferentes redes que se van a comunicar por medio de una frecuencia en específico y cada red va a tener un nodo especial que puede comunicarse con otras redes en caso de completar la tarea o tener eventos

imprevistos, similar al funcionamiento que realiza un router. Por ejemplo, en caso que la red 2 realice la tarea debe informarle al robot 1 y este se encarga de avisarle al robot 3 que la tarea se completó, en esta topología los robots con menor numeración en las subredes son los que tienen mayor jerarquía.

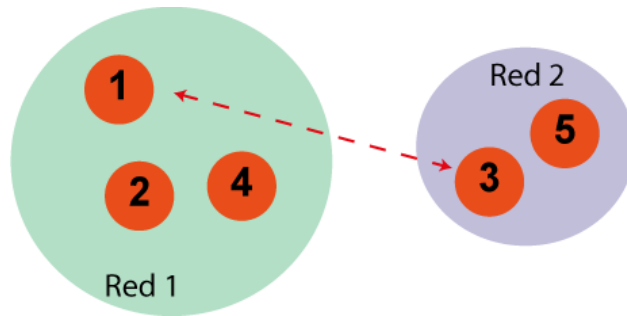


Figura 4.13. Comunicación para el concepto B.

En adición, la comunicación propuesta prioriza la estigmergia del enjambre ya que después de un cierto tiempo se implementaría un algoritmo de agrupamiento con el fin de reorganizar las redes para que los robots más cercanos pertenezcan a la misma red. Por otro lado, la figura 4.14 muestra el resultado esperado del algoritmo de agregación, en este caso los robots tendrían una distribución inicial y después se asignaría un punto al cual deben agruparse.

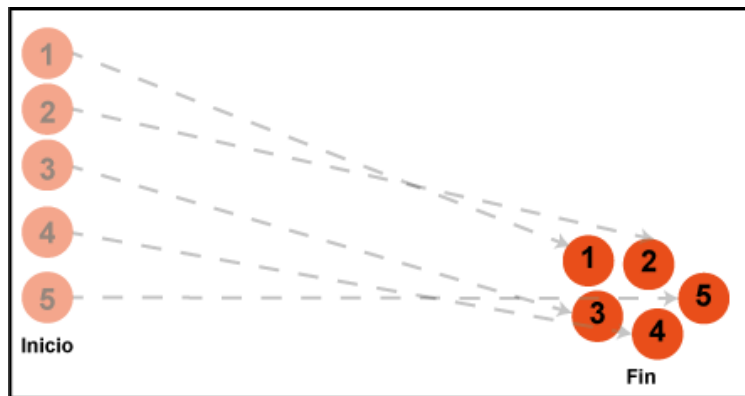


Figura 4.14. Boceto del resultado del algoritmo agregación.

4.3.3. Concepto C

El tercer concepto toma en consideración el hardware de comunicación que presentan los Atta-bots, en este caso el módulo RFM69 permite la lectura del RSSI el cual se puede

utilizar para determinar si un nodo está enviando un mensaje e implementar el protocolo CSMA.

MAC	Topología	Localización	Algoritmo
TDMA	Malla	GPS	Agregación
FDMA	Árbol	RSSI	Formación patrones
CDMA		Medición infrarrojo	Formación cadenas
CSMA			Exploración colectiva
Aloha			

Figura 4.15. Concepto de solución C.

La figura 4.16 presenta un boceto de la idea general de un algoritmo de exploración. La idea principal es tener los robots en una posición inicial e iniciar el movimiento de los robots, este movimiento va a ser aleatorio o definido por métodos de exploración con el fin de cubrir toda el área. Ahora, los Atta-bots solo van a enviar información cuando identifican un obstáculo y por esta razón la implementación del protocolo CSMA tiene ventaja en comparación con otros. Así mismo, este concepto supone una carga computacional adicional al tener que programar un manejo de colisiones de paquetes.

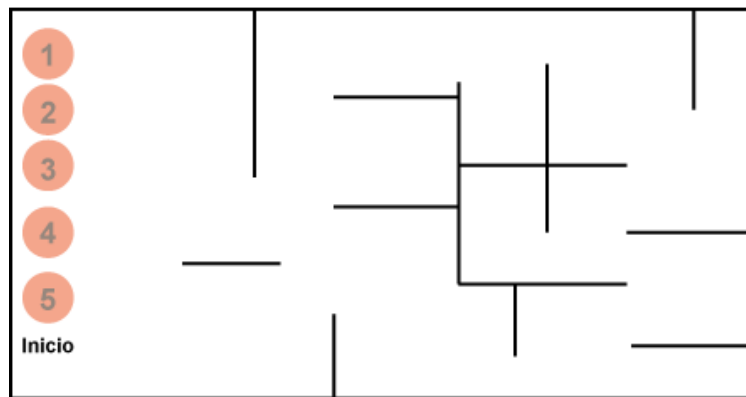


Figura 4.16. Boceto del algoritmo de exploración.

4.3.4. Concepto D

A diferencia de los conceptos anteriores donde se busca utilizar la trilateración para determinar la posición de los Atta-bot, este concepto propone crear un protocolo de inicio de los robots de forma que se pueda medir la distancia entre los robot y crear una matriz de transformación. La ventaja de este concepto es el bajo costo de implementación al utilizar el hardware actual de los Atta-bots, sin embargo limita la posición inicial de los Atta-bots.

MAC	Topología	Localización	Algoritmo
TDMA	Malla	GPS	Agregación
FDMA	Árbol	RSSI	Formación patrones
CDMA		Medición infrarrojo	Formación cadenas
CSMA			Exploración colectiva
Aloha			

Figura 4.17. Concepto de solución D.

En cuanto al algoritmo a incorporar se elige el mismo de la figura 4.16, para el protocolo de comunicación se elige el que tiene actualmente los Atta-bots (TDMA) optimizando los tiempos de envío de cada robot.

4.3.5. Concepto E

Este concepto requiere la compra de un módulo para la comunicación FDMA y utilizaría el RSSI para determinar la posición de los nodos, para la determinación de la posición de los robots se propone realizar un protocolo de inicio en el cual cada robot mide la distancia de sus vecinos y por medio de trilateración determina la posición relativa de cada robot. A partir de esta información se realiza la matriz de transformación y se continua con el funcionamiento normal de los robots.

MAC	Topología	Localización	Algoritmo
TDMA	Malla	GPS	Agregación
FDMA	Árbol	RSSI	Formación patrones
CDMA		Medición infrarrojo	Formación cadenas
CSMA			Exploración colectiva
Aloha			

Figura 4.18. Concepto de solución E.

4.3.6. Concepto F

Este concepto toma la ventaja del protocolo CSMA, solo hablar cuando es necesario y el aumento de exactitud al implementar el GPS, al igual que en los casos anteriores se debe comprar el módulo GPS. Otra ventaja que no se ha mencionado del GPS es el aumento del área que pueden abarcar los Atta-bots, ya que no están limitados a la intensidad de la señal como en las otras opciones propuestas.

MAC	Topología	Localización	Algoritmo
TDMA	Malla	GPS	Agregación
FDMA	Árbol	RSSI	Formación patrones
CDMA		Medición infrarrojo	Formación cadenas
CSMA			Exploración colectiva
Aloha			

Figura 4.19. Concepto de solución F.

Para este concepto se propone la implementación del algoritmo de formación de cadenas,

figura 4.20. Para este caso se busca que los robots encuentren una “semilla” y cuando un robot lo encuentra los demás formen una cadena hacia el punto (0,0) global para seguir el camino hacia la semilla.

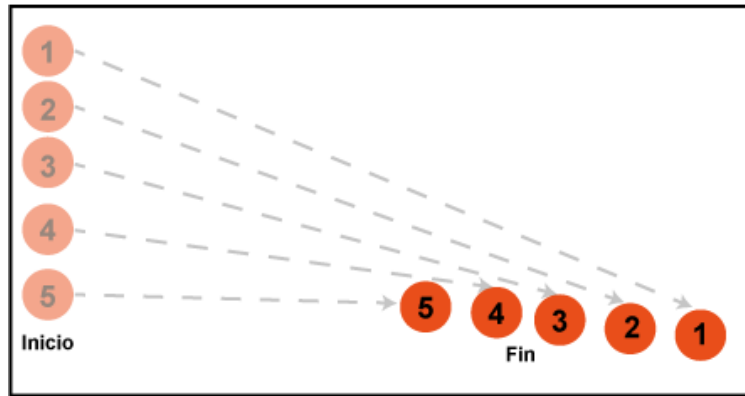


Figura 4.20. Boceto del resultado del algoritmo formación de cadenas.

4.3.7. Concepto G

Este concepto utiliza en 100% los componentes que cuenta los Atta-bots y no se requiere hacer una compra extra. Sin embargo, se requiere de hacer validaciones del RSSI del módulo a utilizar con el fin de determinar si la exactitud a obtener es la esperada. Por otro lado, el algoritmo a implementar es el presentado en la figura 4.14.

MAC	Topología	Localización	Algoritmo
TDMA	Malla	GPS	Agregación
FDMA	Árbol	RSSI	Formación patrones
CDMA		Medición infrarrojo	Formación cadenas
CSMA			Exploración colectiva
Aloha			

Figura 4.21. Concepto de solución G.

4.3.8. Concepto H

Por último, este concepto presenta un nuevo protocolo de comunicación (Aloha) en el cual es necesario la programación de manejo de colisiones. En adición, se propone una medición por medio de sensores infrarrojos, la implementación de estos sensores genera que la medición de la distancia de los robots sea en un espacio reducido, lo cual se debe tomar en cuenta.

Por otro lado, el algoritmo propuesto es el mismo de la figura 4.14 ya que se complementa bien con la medición por medio de sensores infrarrojos.

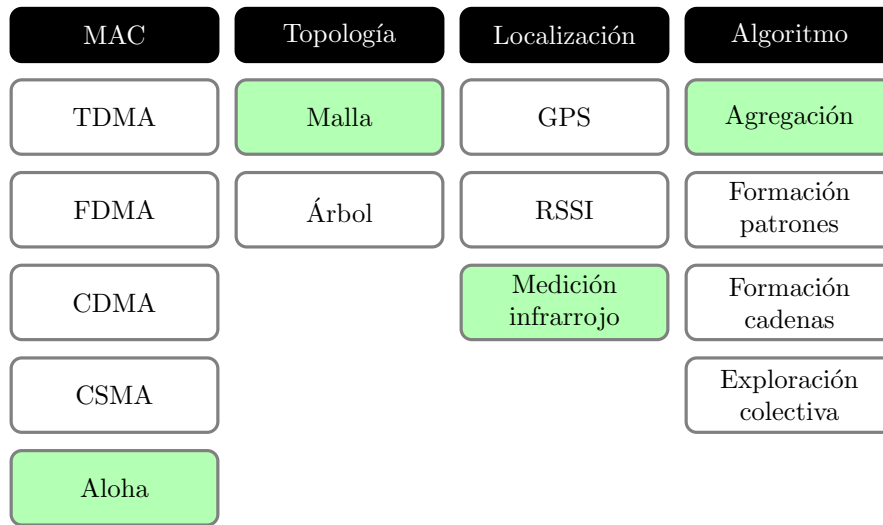


Figura 4.22. Concepto de solución H.

Ya que se presentaron las ideas generales de los conceptos y se expusieron puntos relevantes para su selección, se debe elegir el mejor o los dos mejores para proseguir con su implementación.

4.4. Selección de conceptos

Continuando con la metodología de diseño, es necesario filtrar las soluciones con el fin de encontrar las mejores, para ello se va a utilizar un primer filtro por medio de una matriz de selección de conceptos.

4.4.1. Matriz selección de conceptos

Una matriz de selección de conceptos consiste en utilizar un concepto de referencia, compararlo con las soluciones propuestas e indicar si el concepto es mejor o peor en comparación

con la referencia, al final se van a elegir los cuatro mejores conceptos para realizar un análisis a mayor detalle, tal como se presenta en la tabla 4.6. Para este caso vamos a utilizar como referencia la condición actual de los Atta-bots, además la tabla 3.2 presenta la escala de evaluación para esta matriz.

Tabla 4.6. Matriz de selección de conceptos

Criterios de selección	Conceptos							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Escalabilidad del enjambre	0	+	-	0	+	-	0	-
Exactitud de distancia	+	+	-	0	-	+	-	0
Distancia de comunicación	0	-	0	0	0	0	0	0
Cantidad de componentes comprados	-	-	0	0	-	-	0	0
Tasa de bits elevado	0	+	-	0	+	-	0	0
Comunicación fácil de modificar	0	-	+	+	-	+	+	-
La programación requiere un conocimiento técnico elevado	0	-	-	+	-	-	0	-
Integración de comportamientos colectivos	+	+	0	+	+	+	+	0
Suma +	2	4	1	3	3	3	2	0
Suma -	1	4	4	0	4	4	1	3
Suma 0	5	0	3	5	1	1	5	5
Evaluación neta	1	0	-3	3	-1	-1	1	-3
Lugar	2	4	7	1	5	6	3	8
¿Continuar?	Sí	Sí	No	Sí	No	No	Sí	No

De la tabla de selección de conceptos obtuvimos cuatro conceptos con una evaluación neta positiva, estos conceptos se van a analizar con más detalle.

4.4.2. Evaluación de conceptos

Con el fin de poder seleccionar el mejor concepto para la solución se desarrolla una matriz de evaluación de conceptos, en este caso se utilizan los criterios de selección y se les asigna un peso de importancia.

Para este proyecto es de suma importancia que la solución propuesta utilice los componentes que cuenta el Atta-bot, como se ha mencionado anteriormente uno de los objetivos de PROE es desarrollar un robot de enjambre de **bajo costo**. De esta forma, los elementos que representan un factor para la selección es la escalabilidad del enjambre, la cantidad de componentes a comprar y la integración de futuros algoritmos de comportamiento colectivo, como se presenta en la tabla 4.7. Al igual que en la matriz anterior, se utiliza como referencia

el estado actual de los Atta-bots y la tabla 3.3 para la evaluación de los conceptos.

Tabla 4.7. Evaluación de conceptos

		Conceptos							
		A		B		D		G	
Criterios de selección	Peso	C	C_w	C	C_w	C	C_w	C	C_w
Escalabilidad del enjambre	15 %	3	0.45	4	0.60	3	0.45	3	0.45
Exactitud de distancia	10 %	4	0.40	4	0.40	3	0.30	2	0.20
Distancia de comunicación	15 %	2	0.30	2	0.30	3	0.45	3	0.45
Cantidad de componentes comprados	25 %	2	0.50	1	0.25	3	0.75	3	0.75
Tasa de bits elevado	5 %	3	0.15	4	0.20	3	0.15	3	0.15
Comunicación fácil de modificar	10 %	3	0.30	2	0.20	3	0.30	3	0.30
La programación requiere un conocimiento técnico elevado	5 %	3	0.15	2	0.10	3	0.15	3	0.15
Integración de comportamientos colectivos	15 %	4	0.60	5	0.75	4	0.60	4	0.60
Total de puntos		2.85		2.80		3.15		3.05	
Lugar		3		4		1		2	
¿Continuar?		No		No		Sí		Sí	

Al realizar la evaluación se obtienen dos conceptos que cumplen en mayor medida con las especificaciones del proyecto, los cuales se presentan en la figura 4.17 para el concepto D y figura 4.21 para el concepto G.

Ya que la diferencia entre el puesto 1 y 2 es tan reducido se van a elegir para continuar con el proceso, pero el primer paso es determinar cual de ambos se ajusta mejor a las condiciones del proyecto.

4.5. Prueba de conceptos

En esta sección se van a desarrollar el concepto ganador de la sección anterior. Sin embargo, primero se debe filtrar entre el concepto D y G cual es el mejor, para ello se realizaron pruebas preliminares para determinar la precisión al determinar la localización de los Atta-bots.

4.5.1. Localización

Primero se analiza el método de localización por medio de RSSI, para ello se realizan pruebas con el fin de determinar la curva RSSI en función de la distancia entre los Atta-

bots.

El experimento se realiza con los robots en un espacio despejado, cuidando que no haya interferencias en la comunicación, para este experimento los factores controlables son la distancia entre los robots y la potencia de transmisión de los mensajes y la variable respuesta es el valor RSSI, en el experimento se tomaron 300 muestras por cada cambio de la distancia, como se presenta en la figura 4.23, la distancia entre los robots se determinó por medio de una cinta métrica.

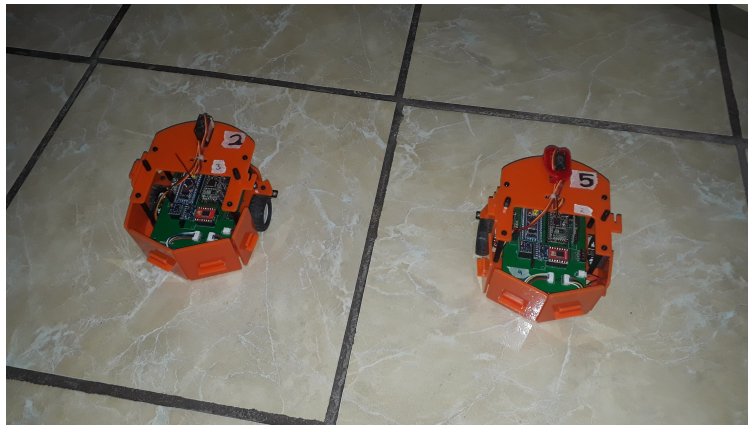


Figura 4.23. Experimento realizado para obtener el valor RSSI en función de la distancia

La figura 4.24 presenta un ejemplo de la medición de RSSI de un Atta-bot a una distancia de 30cm y 70cm entre el robot. Al observar la gráfica se observa un ruido esperado en la mediciones del RSSI pero existe una tendencia en las mediciones. Sin embargo, esto nos indica que para obtener una mayor precisión en las distancias es necesario utilizar herramientas estadísticas para filtrar el ruido de las mediciones, por ejemplo, realizar varias mediciones y obtener la moda de las mediciones. Para el experimento realizado se tomaron 300 muestras por distancia y se calculó la moda, de esta forma se obtuvo una curva de comportamiento más precisa.

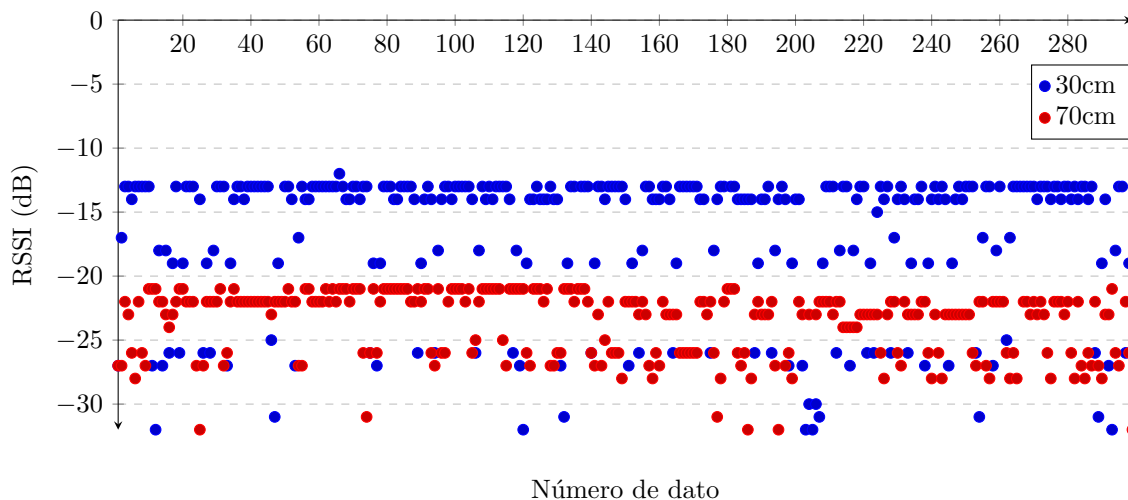


Figura 4.24. Valores RSSI recibidos a lo largo del experimento.

La figura 4.25 muestra el diagrama de cajas del experimento, en este caso se observa que a lo largo del experimento existen momentos en que los valores medidos de RSSI son atípicos, lo cual puede perjudicar el desempeño de los Atta-bots al realizar comportamientos en tiempo real.

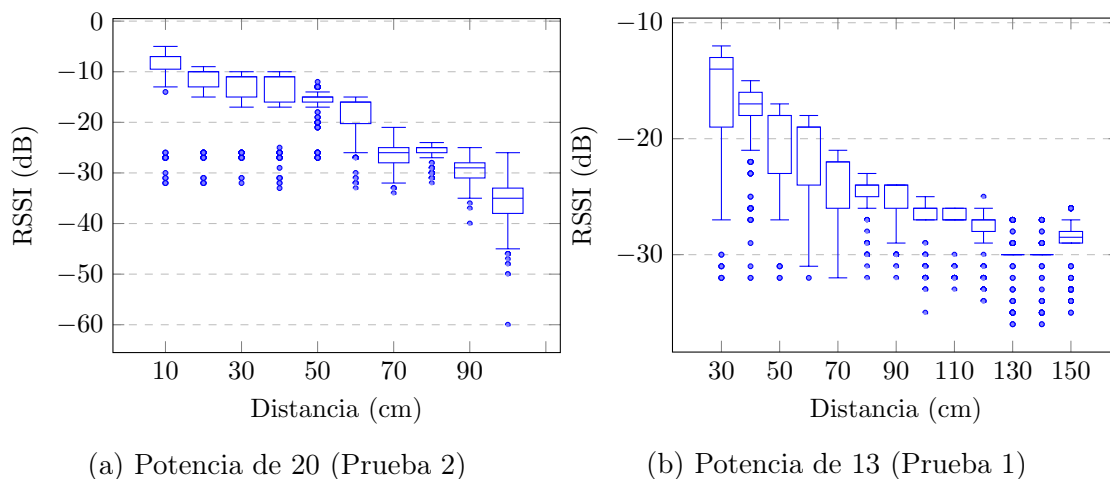


Figura 4.25. Diagrama de cajas del experimento RSSI.

La figura 4.26 muestra la respuesta del RSSI al configurar una potencia de 20 en Radio-Head. Como se puede observar, el valor de RSSI no presenta una derivada elevada, lo cual es un problema ya que los Atta-bots van a estar en un espacio reducido de 3m por 3m y no se está aprovechando al máximo el rango de medición.

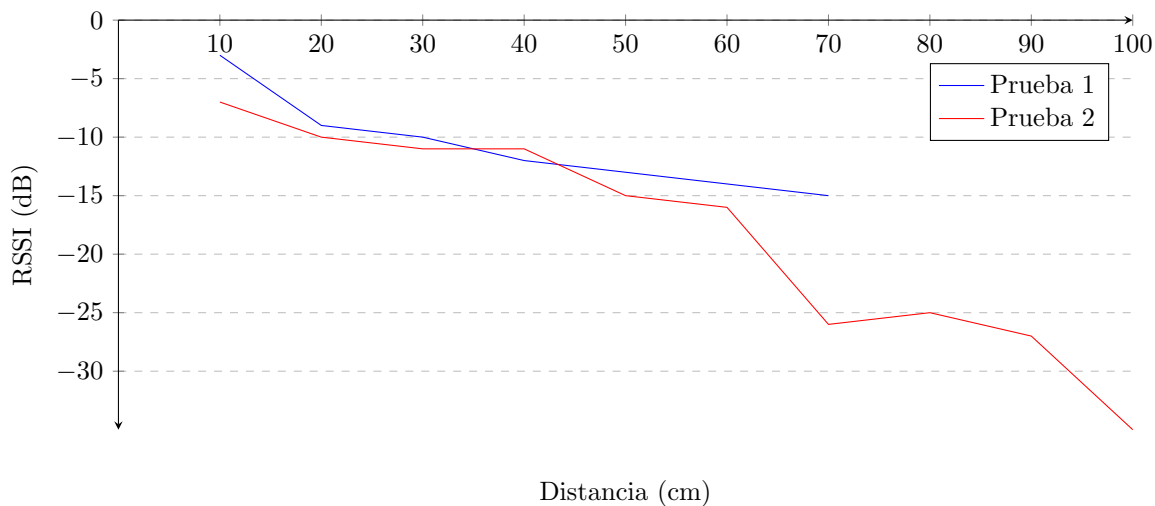


Figura 4.26. RSSI en función de la distancia con una potencia de 20.

Por otro lado, la figura 4.27 presenta la respuesta del RSSI al configurar una potencia de 13 en RadioHead. En este caso se tiene una derivada mayor, sin embargo se presenta otro problema, conforme se alejan los robots el valor de RSSI no disminuye y existen puntos en donde una diferencia de 10cm no supone un cambio en el valor de RSSI lo cual nos daría una precisión baja. En otras palabras, la curva exponencial se estabiliza más rápido de lo necesario para el rango a trabajar.

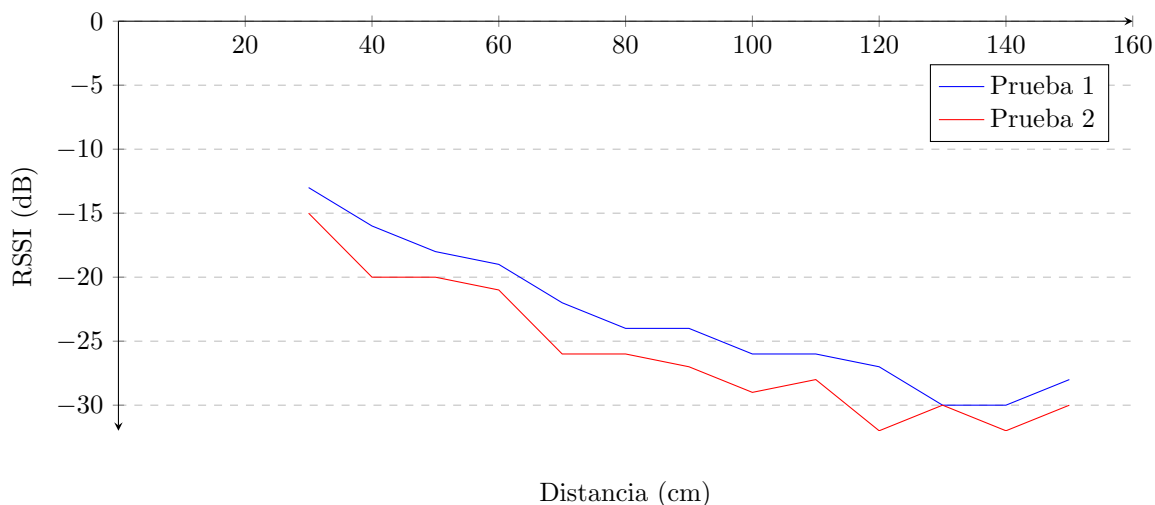


Figura 4.27. RSSI en función de la distancia con una potencia de 13.

Por esa razón, se proceden a realizar los experimentos con el sensor de distancia infrarrojo para comparar los resultados. En este caso primero se debe obtener el valor medido por el

sharp en función de la distancia, para ello se plantea el escenario presentado en la figura 4.28, en este caso se coloca el robot en una posición fija y se coloca un obstáculo a leer la distancia, la distancia teórica se determina por medio de una cinta métrica.



Figura 4.28. Experimento realizado para obtener los valores del sharp en función de la distancia.

Como era de esperar, los valores del sensor de distancia sharp presentan una alta precisión y el comportamiento de los valores medidos en función de la distancia presentan un comportamiento exponencial como se presenta en la hoja de datos, la figura 4.29 presenta los resultados experimentales de los valores medidos por el sharp en función de la distancia.

Al tomar en consideración el área de funcionamiento de los Atta-bots, la precisión de las mediciones y la facilidad de implementación se elije utilizar el sensor sharp para realizar un protocolo de inicio y permitir realizar la transformación de coordenadas entre los robots del enjambre. De esta forma se va a proseguir con el concepto D para la resolución del problema.

Una vez que se tiene el comportamiento del sharp en función de la distancia, se debe acondicionar la señal. La señal se va a condicionar por medio del microcontrolador para reducir espacio de componentes electrónicos en la Printed Circuit Board (PCB). La figura 4.30 muestra la medición de distancia del sharp una vez que se ha acondicionado.

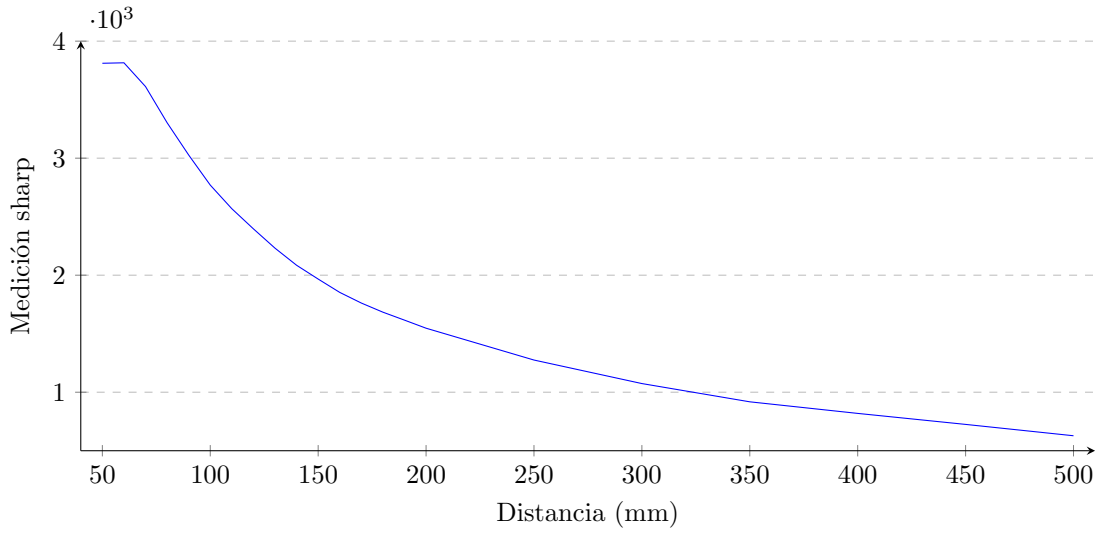


Figura 4.29. Valores del sharp en función de la distancia

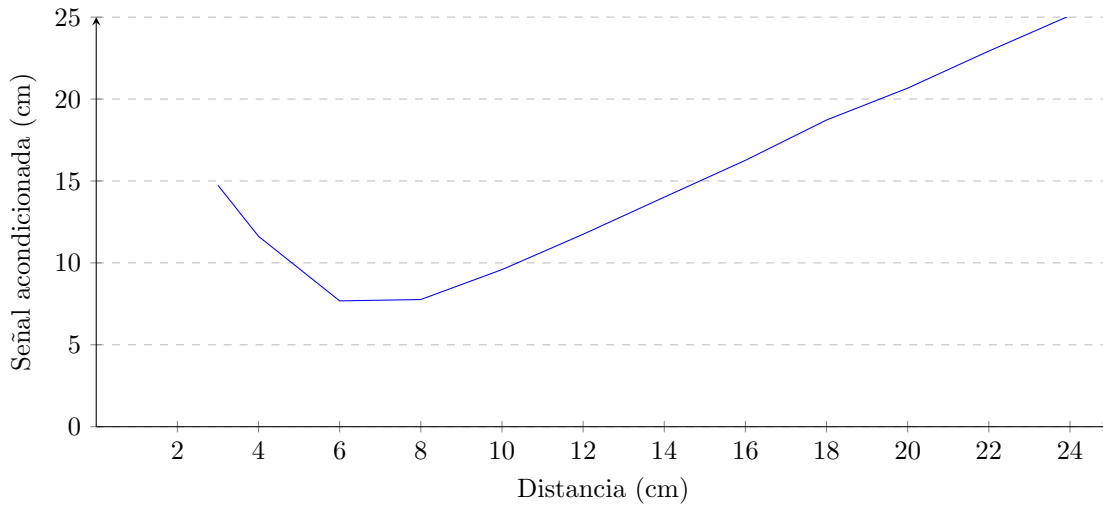


Figura 4.30. Medición de distancia del sensor sharp acondicionado.

Como se observa de la figura 4.30, en mediciones menores a 8cm los resultados son incorrectos. Por esa razón, en el protocolo de inicio se debe asegurar que los Atta-bots se encuentran a una distancia mayor de 8cm.

Ya definido el método para realizar la transformación de coordenadas se prosigue con los objetivos del proyecto, la transformación de coordenadas va a presentarse en más detalle en la sección 4.5.3.

4.5.2. Sistema de comunicación

Como se ha presentado, en un sistema de enjambre una de las mayores limitaciones es el manejo de la información. Por otro lado, al esperar tener los datos casi en tiempo real y compartir un medio para el envío de datos, la implementación del protocolo de comunicación se vuelve una tarea desafiante. Tomando en consideración los protocolos de comunicación presentados en la sección 2.2 se opta por seguir utilizando TDMA.

Este protocolo tiene la ventaja de poder implementarse con el hardware actual, el microcontrolador no requiere de gran potencia computacional para implementarlo y es fácil de interpretar por alguien que no cuente con conocimientos profundos de comunicación inalámbrica.

Para el sistema de comunicación, la solución tomó como base el trabajo realizado previamente con los Atta-bots [35]. Actualmente los Atta-bots utilizan el protocolo TDMA con una ventana de tiempo de 50ms y solo se pueden comunicar con la base, con el fin de reducir la ventana de tiempo en la comunicación TDMA se realiza una depuración del código y se detecta que el sistema de comunicación está enviando más bytes de los requeridos.

Para el nuevo sistema de comunicación se reorganiza el mensaje que envía los robots, la figura 4.31 presenta la composición del mensaje enviado por los Atta-bots. Para este caso se incorpora un encabezado que contiene el ID único para cada robot, el cual nos va a permitir configurar nuevos comportamientos colectivos. Por otro lado, el largo del mensaje pasó de ser de 224 bits a 88 bits, existía mucha información en cero que se estaba compartiendo.

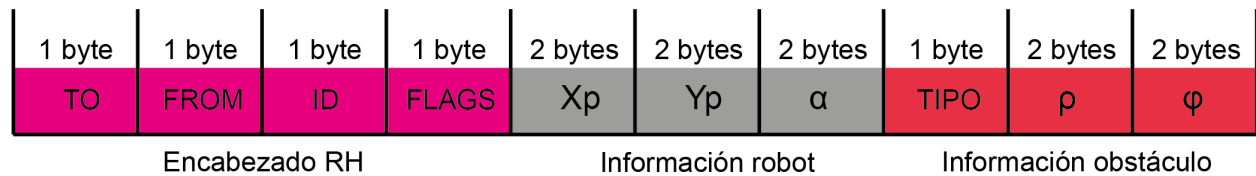


Figura 4.31. Composición del mensaje enviado por los Atta-bots.

Además, tomando en consideración que la programación debe ser lo suficientemente “sencilla” para que alguien que no posea un conocimiento muy técnico de comunicación pueda modificar el código, se opta por elegir una biblioteca para la configuración de la comunicación. En este caso se utiliza RadioHead, debido a que es altamente utilizada y cuenta con documentación clara y completa, facilitando el estudio del código en futuros proyectos.

Esta depuración permitió reducir la ventana de tiempo de 50ms a 30ms, de la figura 4.32 se puede observar el impacto que supone reducir la ventana de tiempo en 20ms. Con esta nueva ventana de tiempo la escalabilidad incrementa un 66.7% en comparación con la

anterior. Por ejemplo, PROE utiliza 4 robots para hacer pruebas, ahora se pueden utilizar 7 y esperar el mismo rendimiento en la transmisión de la información.

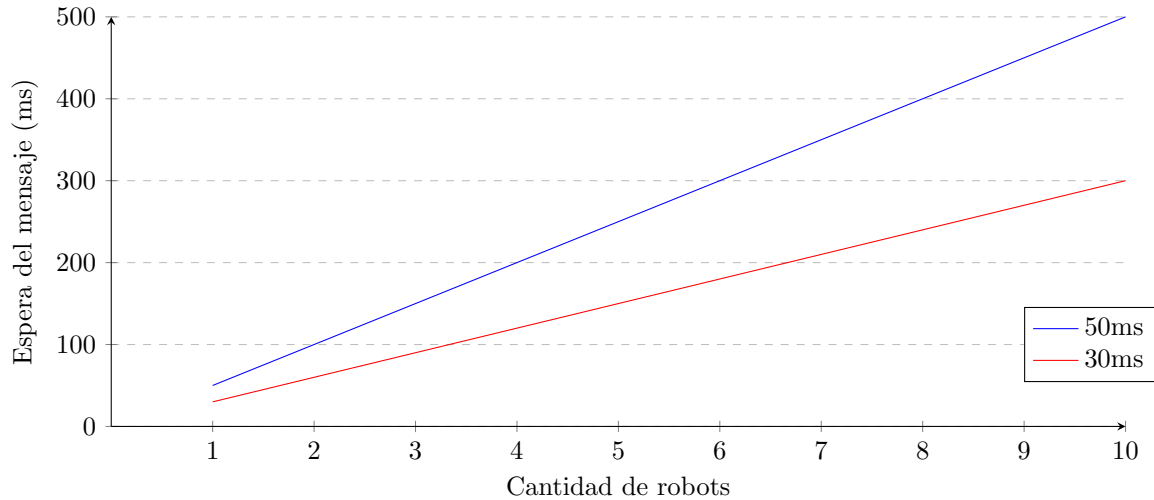


Figura 4.32. Comparación del tiempo de espera para enviar el mensaje en función de la cantidad de robots en el enjambre.

Por último, al utilizar TDMA es de gran importancia que los robots estén sincronizados y ya que la base sigue siendo necesaria para recopilar información se utiliza en el proceso de arranque para sincronizar los robots.

El proceso de arranque en la comunicación debe iniciar con el encendido de los nodos (Atta-bots), de esta forma se inicializan los sensores y una vez realizada la configuración inicial se espera la señal de sincronización. Se debe esperar que todos los robots estén encendidos para iniciar la base, el proceso de inicio para el sistema de comunicación se presenta en la figura 4.33. La base verifica que la comunicación serial esté conectada, lee el valor actual del reloj de la base y lo envía a todos los nodos de la red.

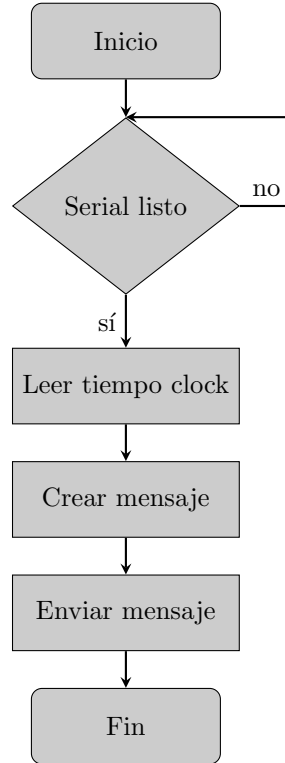


Figura 4.33. Diagrama de flujo de la base para la comunicación.

Para el caso de los nodos el proceso de arranque de comunicación se presenta en la figura 4.34, el proceso inicializa configurando el reloj que se va a utilizar y se configuran las interrupciones del SAMD21, una vez que se tiene la configuración inicial el nodo se espera a recibir el mensaje de sincronización, cuando detecta el mensaje reconstruye el mensaje y configura el registro del reloj. Luego de realizar la configuración en el registro y activar las interrupciones el programa continua la transformación de coordenadas, la cual se va a presentar en la sección 4.5.3.

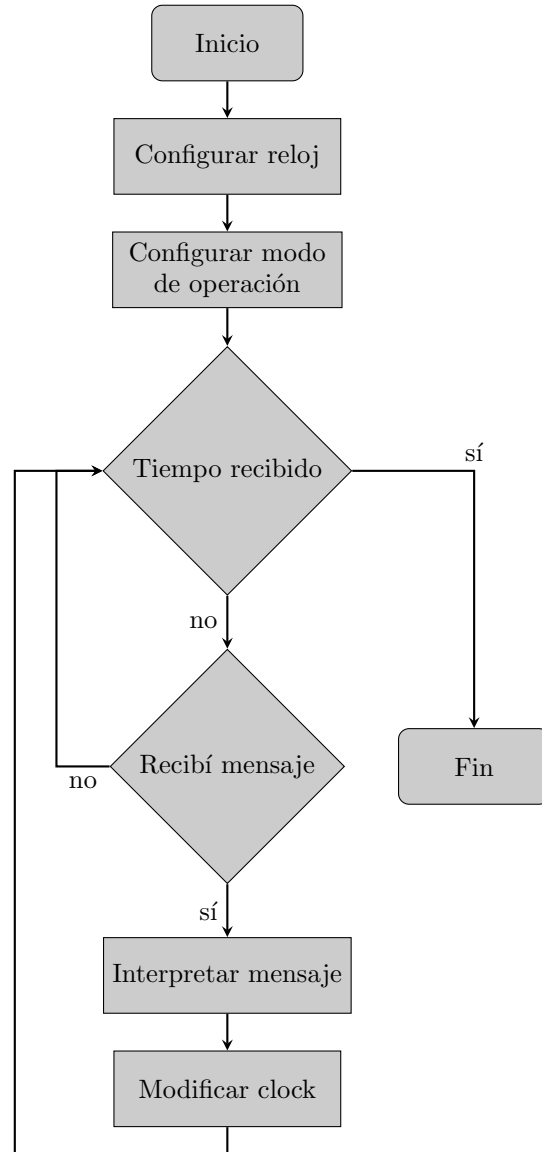


Figura 4.34. Diagrama de flujo del nodo para la comunicación.

Por último, dentro de las métricas del proyecto se especifica que los robots deben ser capaces de comunicarse al doble de distancia actual en la que trabajan los Atta, para ello se realiza un experimento. El experimento consiste en colocar los Atta-bots de forma estática a 6 metros cada uno y enviar una cantidad definida de paquetes a cada robot. En este caso el factor controlable es la cantidad de paquetes que va a enviar el robot o también se puede visualizar como el tiempo de operación del robot. Los factores no controlables son el ruido del ambiente y la interferencia que realizan los componentes del Atta. La variable de respuesta es el porcentaje de paquetes recibidos por robot.

Se realizaron tres pruebas diferentes, la primera con un tiempo de operación de 1 minutos, la segunda con un tiempo de operación de 5 minutos y por último con un tiempo de operación de 10 minutos. La tabla 4.8 muestra la primer prueba, en este caso se observa que para todos los casos el porcentaje de recepción es mayor al 90 %, que es el valor marginal de la métrica.

Tabla 4.8. Envío y recepción de paquetes con un tiempo de prueba de 1 minuto.

	Cantidad de paquetes			
	Base	Atta 1	Atta 2	Atta 3
Enviado	-	1334	1333	1333
Recibido de 1	1293	-	1291	1293
Recibido de 2	1195	1302	-	1303
Recibido de 3	1300	1297	1304	-
% Recepción	94,7	97,5	97,3	97,3

Para la segunda prueba, tabla 4.9, se tiene un porcentaje de recepción mínimo de 97 % aproximadamente, lo cual es mayor al valor marginal de la métrica.

Tabla 4.9. Envío y recepción de paquetes con un tiempo de prueba de 5 minuto.

	Cantidad de paquetes			
	Base	Atta 1	Atta 2	Atta 3
Enviado	-	3333	3333	3333
Recibido de 1	3253	-	3263	3272
Recibido de 2	3230	3245	-	3241
Recibido de 3	3242	3252	3250	-
% Recepción	97,3	97,5	97,7	97,7

Finalmente, la tabla 4.10 presenta los resultados del porcentaje de recepción al ejecutar el experimento por 10 minutos y de igual forma, los porcentajes de recepción son mayores al 90 %.

Tabla 4.10. Envío y recepción de paquetes con un tiempo de prueba de 10 minuto.

	Cantidad de paquetes			
	Base	Atta 1	Atta 2	Atta 3
Enviado	-	6667	6667	6666
Recibido de 1	6416	-	6512	6539
Recibido de 2	6267	6514	-	6481
Recibido de 3	6501	6510	6484	-
% Recepción	95,9	97,7	97,5	97,6

Por tanto, se concluye que el sistema de comunicación es capaz de operar a 6m entre nodos, lo que va a permitir en un futuro incrementar el área de operación de los Atta-bots.

4.5.3. Transformación de coordenadas

Para que los Atta-bots puedan identificar la posición de los demás robots es necesario que tengan un punto de referencia. Debido a las limitaciones del hardware se debe implementar una solución que sea lo suficientemente flexible para realizar los experimentos pero que no requiera un gasto económico considerable. Por esa razón se utiliza el sensor de distancia infrarrojo sharp.

La solución consiste en colocar los Atta-bots en fila, de forma que el Atta 1 lea la distancia a la que se encuentra el Atta 2, el Atta 2 lea la distancia a la distancia que se encuentra el Atta 3 y así sucesivamente hasta completar la cantidad total de robots, note que la distancia leída por el robot con el ID mayor no es necesaria. La figura 4.35 presenta el arreglo de posición para el protocolo de inicio.

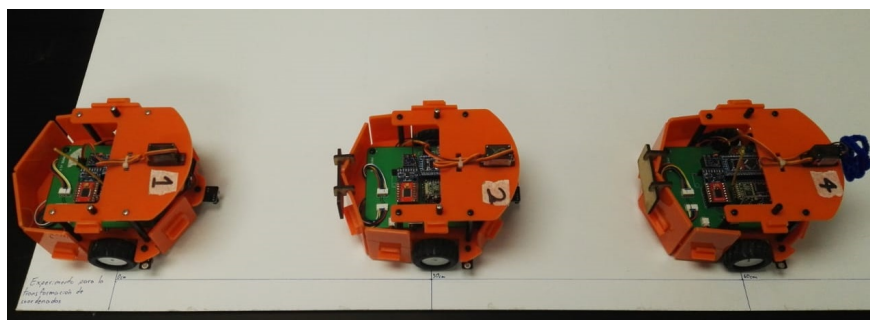


Figura 4.35. Arreglo inicial de los Atta-bots

Cuando cada robot lee la distancia se procede a enviar esa información a cada robot por medio del protocolo de comunicación TDMA y una vez que cada robot recibió todas las distancias se calcula la posición teórica a la que se encuentran los demás robots con respecto al él.

Al colocar los robots en fila y solo leer una dimensión de la distancia la transformación de coordenadas solo se realiza para la coordenada Y. La figura 4.36 presenta el protocolo de inicio de un Atta-bot para poder realizar la transformación de coordenadas. Este diagrama contempla la interacción que deben realizar los tres integrados, el proceso comienza con el STM32 realizando 100 lecturas de la distancia con el fin de estabilizar el filtro y mitigar el ruido, el Feather realiza la configuración inicial y espera la sincronización, un aspecto

importante es que antes de iniciar la base se debe esperar 3 segundos para que el protocolo inicial esté completado.

Cuando se activa la base se envía el clock de sincronización de todos los Atta y en este punto el Feather pide la distancia leída por el sharp y envía esa información por mensaje broadcast. Luego continúa un proceso en donde verifica que toda la información haya sido recibida y continúa con la creación de la matriz de transformación. Una vez que todos los cálculos están completados se procede a girar el Atta 90° y continuar con el funcionamiento normal.

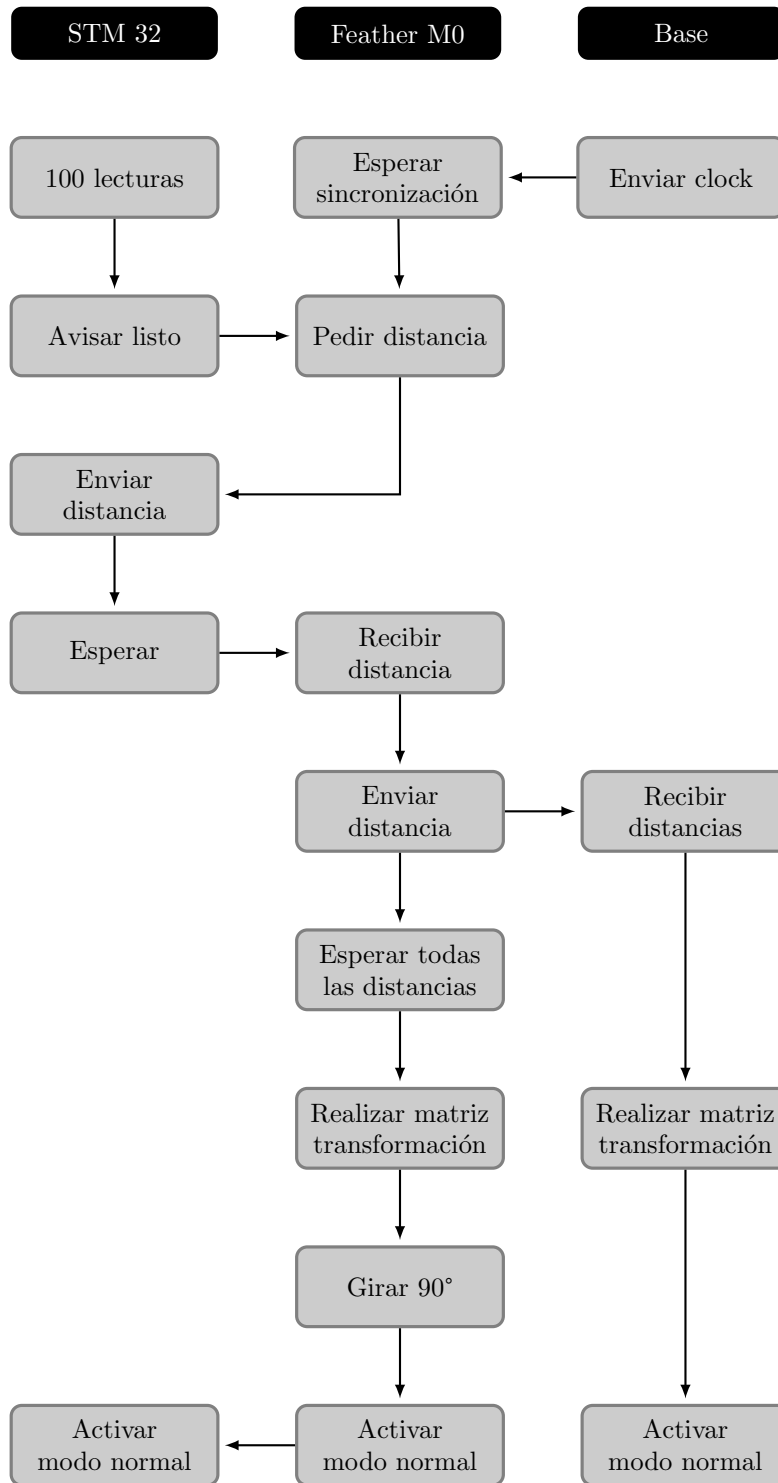


Figura 4.36. Secuencia de inicio de un robot del enjambre.

Por otro lado, dentro de los indicadores del proyecto se tiene que la posición calculada del robot tiene que tener un error menor al 5%, por ello se realiza un experimento para ver el comportamiento del sensor de distancia. El experimento consiste en colocar tres robots en la posición inicial de funcionamiento y obtener la distancia del sensor infrarrojo sharp, la figura 4.37 presenta un diagrama de cajas que resume los resultados del experimento.

Para este experimento todos los Atta fueron colocados a una distancia de 30cm y se realizaron 10 mediciones, los resultados del Atta 3 fueron omitidos ya que al estar midiendo distancia al aire los resultados no son relevantes, como se puede observar el promedio de la distancia medida para el Atta 1 es de 313mm y para el Atta 2 es de 303mm. Lo cual nos da un error del 4,3% para el Atta 1 y un error del 1% para el Atta 2, por tanto se concluye que el proceso para realizar la transformación de coordenadas cumple con los objetivos.

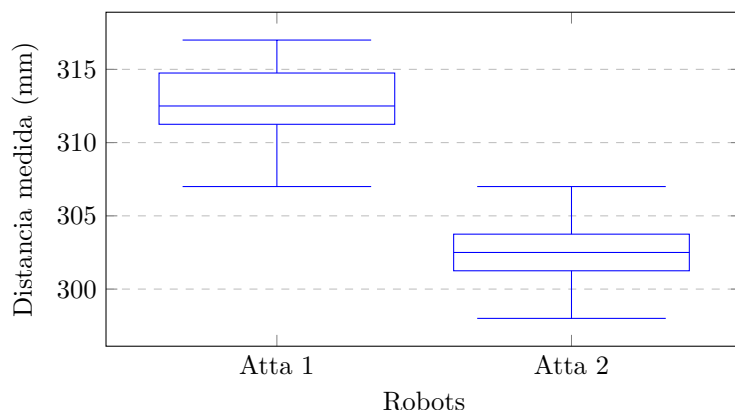


Figura 4.37. Determinación de precisión de la medición inicial para la transformación de coordenadas.

Sin embargo, para garantizar que la transformación se realice con buena precisión se requiere verificar que la actualización de la posición del Atta sea precisa. Sin embargo, los robots utilizan un movimiento diferencial y para calcular la posición actual del robot se requiere conocer la distancia avanzada y la orientación del robot con la mayor precisión posible.

Como se presentó en la sección 4.1, dentro de los sensores del robot se encuentran encoders para medir la velocidad de las ruedas y un magnetómetro, el cual es utilizado para medir la orientación del robot. Cuando se realizaron pruebas preliminares para determinar la precisión de las mediciones se observa que los datos de los encoders pueden ser utilizados para los cálculos. Pero, las mediciones del magnetómetro son altamente ruidosas y es imposible realizar cálculos con la medición actual del magnetómetro.

Este ruido se debe a la interferencia de los motores y un filtro paso baja no es suficiente para minimizar el ruido, por esa razón se opta por utilizar un filtro de Kalman, ya que es un método más robusto. La figura 4.38 presenta los resultados de la implementación del filtro de Kalman en contraste con las mediciones del magnetómetro sin filtrar cuando el robot se mueva en línea recta.

Para la implementación del filtro de Kalman se tomaron resultados experimentales de la mediciones del magnetómetro y a partir de esta información se determinaron los valores P y Q del filtro de forma interactiva, buscando reducir el ruido del sistema y a su vez tener una rápida respuesta en la actualización de la medición.

Es notorio que el ruido de la señal del magnetómetro es considerable, ya que se obtienen errores de hasta 5° . Pero con el filtro de Kalman se consigue un error de 2° y además es robusto ante grandes perturbaciones. Por otro lado, con el fin de aumentar el tiempo de estabilización de la señal medida se agrega un filtro complementario, donde se toma en consideración la señal del giroscopio.

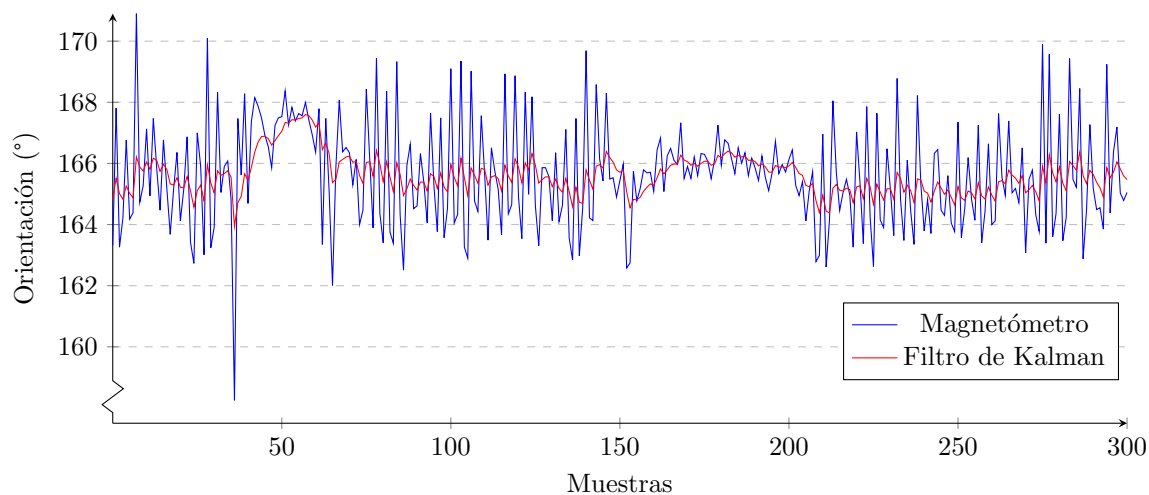
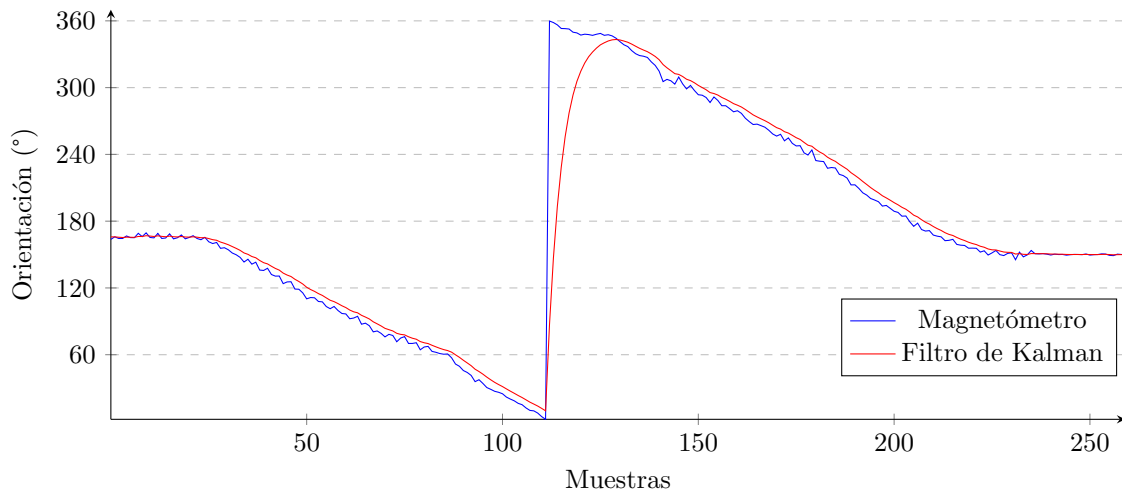


Figura 4.38. Lectura del magnetómetro en movimientos rectos con el uso del filtro de Kalman.

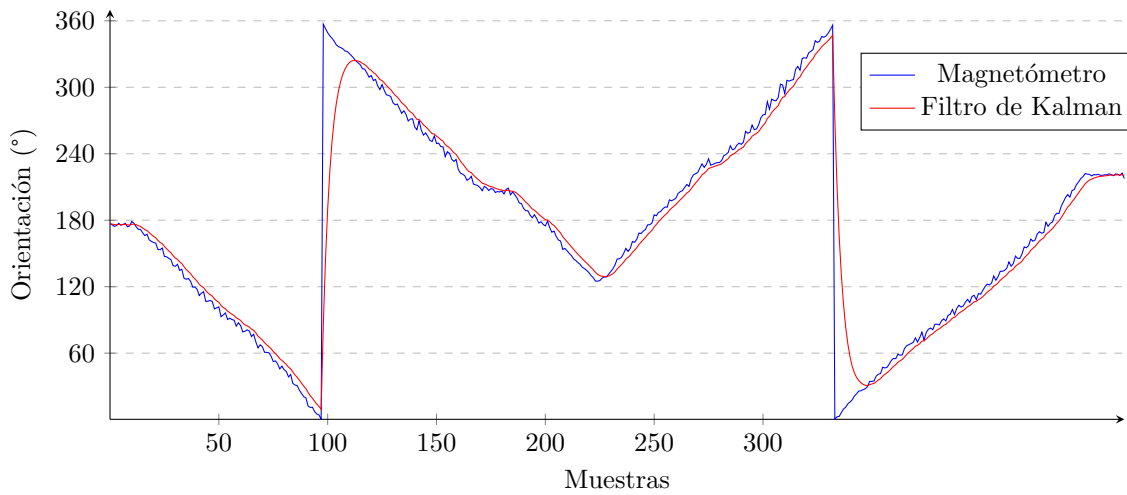
De forma similar, se realizaron pruebas para validar el comportamiento de las mediciones ante giros, la figura 4.39 presenta los resultados del experimento. Es notorio que el ruido del magnetómetro cuando realiza el giro es menor en comparación cuando se mueve en línea recta. Esto es en gran parte debido al movimiento que realizan los motores.

Cuando el Atta se mueve en línea recta el campo magnético generado por los motores se suma y aumenta el ruido de la señal, sin embargo, cuando los motores giran en dirección contraria este campo magnético se resta y por esa razón el ruido es menor en comparación

con movimientos rectos.



(a) Giro continuo



(b) Giro discontinuo

Figura 4.39. Lectura del magnetómetro al girar con el uso del filtro de Kalman.

Una vez que el nivel de ruido es aceptable en la actualización de posición del Atta, se realiza el experimento para determinar el error de la posición real con respecto a la que indica el Atta, esta validación va a ser presentado en la sección 5.2.

4.5.4. Algoritmo de exploración colectiva

Continuando con el desarrollo del objetivo específico número 4, se requiere de la implementación de un comportamiento colectivo que integre todos los aspectos tratados en

el proyecto, el concepto D ganador de la figura 4.17 presenta un algoritmo de exploración colectiva. Sin embargo, se tiene un rango muy amplio de algoritmos por implementar, por ello se toma como base el algoritmo propuesto por Cindy Calderón y Rebeca Solís. [1]

Los Atta-bots utilizan el algoritmo de caminata aleatoria con dirección, este algoritmo en su forma más simple consiste en movimientos rectos y cambios en la dirección. Los Atta-bots avanzan una distancia determinada, después seleccionan una dirección para girar de forma aleatoria y continúan avanzando la distancia indicada. En caso de detectar un obstáculo estos se detienen e indican la ubicación relativa en la que detectaron el obstáculo, luego determinan una dirección de giro aleatoria y continúan avanzando, esto de forma cíclica hasta indicarles que se detengan, tal como se presenta en el algoritmo 4.1.

Algoritmo 4.1: Algoritmo de exploración por caminata aleatoria con dirección. [1]

entrada: ρ

$\alpha \leftarrow$ posición de la celda ρ ;

$\tau \leftarrow$ dirección ρ ;

mientras *condición de parada no satisfecha* **hacer**

para cada ρ **hacer**

$\omega^t(\rho_i) \leftarrow i$ – estado de los vecinos al tiempo t ;

si $\exists \omega^t(\rho_i) = 0$ **entonces**

j : escoger una dirección vecina aleatoria;

$\alpha \leftarrow \rho_j$;

en otro caso

 Obstáculo detectado;

$\tau \leftarrow$ escoger nueva dirección;

fin

fin

fin

Para la validación se hizo una modificación de este algoritmo y se incorporó un objetivo común al sistema de enjambre el cual va a consistir en encontrar una fuente de calor, para ello se utilizó el sensor de temperatura, esto nos permite simular el comportamiento de las hormigas cuando están buscando alimento. La modificación del algoritmo consiste en lo siguiente: los Atta-bots van a tomar como base el algoritmo de exploración y van a realizar el mismo procedimiento, sin embargo, van a leer los datos del sensor de temperatura y cuando se detecte que la temperatura supera un límite establecido le indica a los demás robots que ha encontrado una fuente de calor.

Una vez que el robot detecta la fuente de calor este se detiene, por otro lado, los robots del sistema de enjambre van a recibir información de ese robot sobre la posición en la que se encuentra y que ha detectado el objetivo del enjambre, en nuestro caso es encontrar esa fuente de calor, cuando los robots reciben la notificación realizan la transformación de coordenadas y se dirigen de forma autónoma a la posición donde se encuentra la fuente de calor, tal como se presenta en el algoritmo 4.2.

Algoritmo 4.2: Algoritmo de detección fuente de calor
y agrupación de los robots.

entrada: ρ

$\alpha \leftarrow$ posición de la celda ρ ;

$\tau \leftarrow$ dirección ρ ;

mientras *no encuentra fuente de calor* **hacer**

para cada ρ **hacer**

$\omega^t(\rho_i) \leftarrow i$ – estado de los vecinos al tiempo t ;

si $\exists \omega^t(\rho_i) = 0$ **entonces**

j : escoger una dirección vecina aleatoria;

$\alpha \leftarrow \rho_j$;

en otro caso

si *fente calor detectada* **entonces**

 salir ciclo;

en otro caso

 Obstáculo detectado;

$\tau \leftarrow$ escoger nueva dirección;

fin

fin

fin

fin

Ir a la fuente de calor;

$\alpha \leftarrow$ posición de la fuente de calor;

La validación de este algoritmo se presenta con más detalle en la sección 5.3.

Resultados y análisis

Ya que se tiene la prueba de conceptos es necesario implementar una metodología de experimentos para validar las soluciones implementadas, para ello se utiliza la metodología presentada en la sección 3.7.1. Para cada diseño de experimento se realizan 5 repeticiones de cada configuración, este valor se toma a partir de la bibliografía consultada, en la cual Humberto Gutiérrez recomienda utilizar 5 repeticiones ya que este valor permite tener variabilidad en las muestras y se reduce la cantidad de recursos requeridos en el experimento, a lo largo de su libro esta es la cantidad de repeticiones que se trabaja. [38]

Por otro lado, el número de muestra está asociada a la cantidad de factores y repeticiones utilizadas, lo cual está descrito por la siguiente fórmula:

$$Muestra = 2^k \cdot n \quad (5.1)$$

- k : Cantidad de factores controlables.
- n : Cantidad de repeticiones.

5.1. Validación del sistema de comunicación

Este experimento consiste en determinar el porcentaje de recepción de paquetes del sistema de comunicación implementado, la prueba consiste en analizar los Atta-bots mientras realizan el comportamiento colectivo, para tener un comportamiento cercano a la realidad. Se van a definir una cantidad específica de paquetes que se van a enviar durante el experimento por cada Atta-bot y al final se cuenta la cantidad de paquetes que recibió cada Atta-bot y la base.

Los **factores controlables** son la **cantidad de paquetes** a enviar y la **cantidad de robots** en el enjambre. Como **factores de ruido** se tiene el ambiente en donde se realiza el experimento. La **variable de respuesta** estudiada será el porcentaje de paquetes recibidos. El tipo de experimento es factorial completo lo cual nos da 4 posibles combinaciones, en este caso se van a realizar 5 réplicas por combinación lo cual nos da un total de 20 muestras, en la tabla 5.1 se presenta un resumen del experimento.

Para este caso se va considerar dos agentes importantes, por un lado se tiene la base de control y por el otro los nodos de comunicación o Atta-bots. Por tanto, es necesario determinar el porcentaje de recepción para cada cada uno de ellos, en esta sección se va a analizar ambos casos. La presentación de todos los datos y resultados del experimento se encuentra en la sección de apéndices B.1.1.

Tabla 5.1. Resumen de factores controlables para el experimento factorial completo del sistema de comunicación.

Factor	Nivel bajo	Nivel alto
Cantidad de paquetes	1333	6666
Cantidad de robots	2	4

5.1.1. Modelo porcentaje de recepción de paquetes en la base

Primeramente, se va a analizar el porcentaje de recepción de paquetes en la base, para ello se utiliza el software Minitab 20. Para la determinación del modelo se parte del supuesto que la interacción entre la cantidad de paquetes y la cantidad de robots ($A \cdot B$) no es significativo. A partir de esa suposición se realiza una gráfica de residuos para validar el experimento.

Histograma de residuos

El histograma de residuos se utiliza para determinar si existe algún valor atípico en los datos o si los datos son asimétricos. [40] De la figura 5.1 se determina que no hay valores que se consideren atípicos e incluso se observa que el histograma tiene una distribución normal, fortaleciendo la validez del experimento.

Gráfica de probabilidad normal de residuos

Anteriormente se mencionó que el histograma tiende a una distribución normal, para verificar esa tendencia se utiliza la gráfica de distribución normal en el cual se traza una línea roja y se trazan los valores para determinar la distribución de los datos. En este caso

se observa que la mayoría de los datos están cerca de la línea roja indicando la normalidad del experimento.

Gráfica residuos vs ajustes

Esta gráfica se utiliza para verificar el supuesto de que los residuos tiene una covarianza constante. [40] Para ello se observa la distribución de los datos entre la sección superior e inferior, para este caso se observa que la distribución se realiza de igual manera en ambas secciones y no se ve una tendencia en los resultados garantizando la aleatoriedad de los residuos.

Gráfica residuos vs orden de datos

En este caso se observa que la gráfica no presenta una tendencia marcada y no es posible predecir los resultados, del cual se puede concluir que no existe una correlación entre los residuos. [40]

Por tanto, se concluye que el experimento es válido para el modelo planteado y se procede a analizar los factores que representan un efecto principal para el sistema de comunicación.

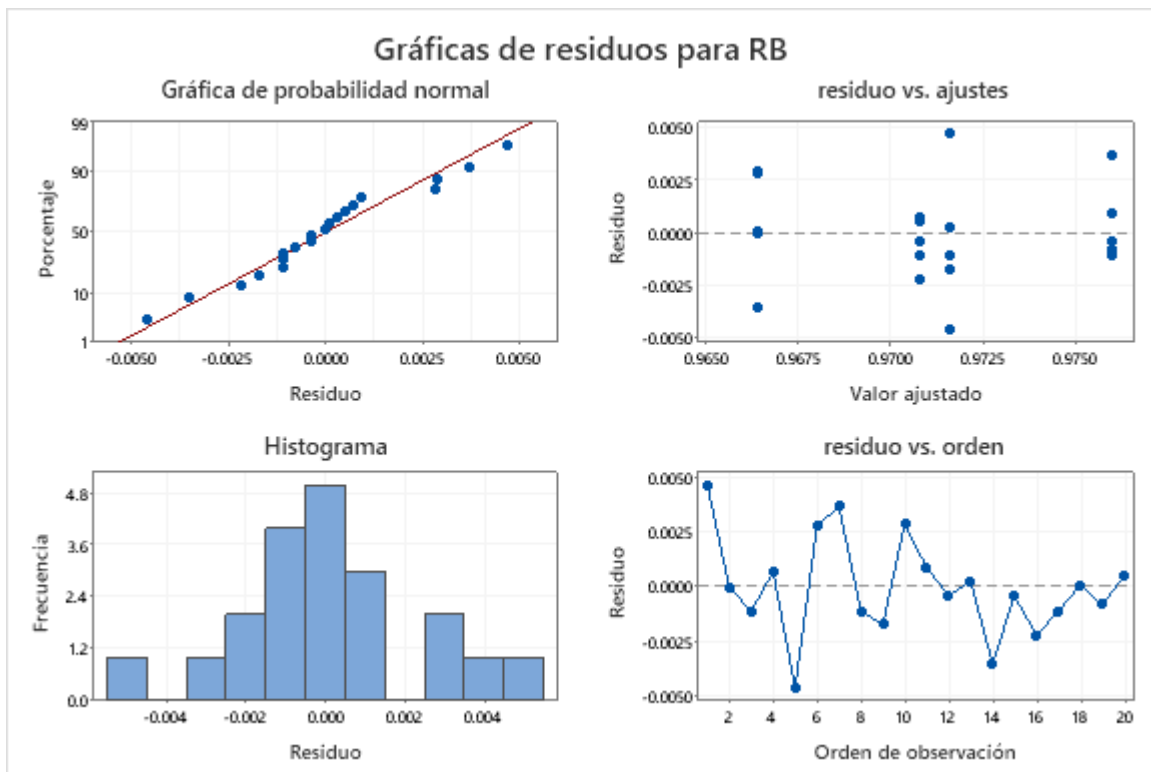


Figura 5.1. Gáfica de residuos del modelo de comunicación de la base

Para ello, se realiza un diagrama de Pareto en donde se determina si todos los factores del experimento son importantes para el modelo. En este caso se tiene que tanto la cantidad de paquetes y de robots son significativos para el modelo, indicando que no es necesario plantear otro modelo.

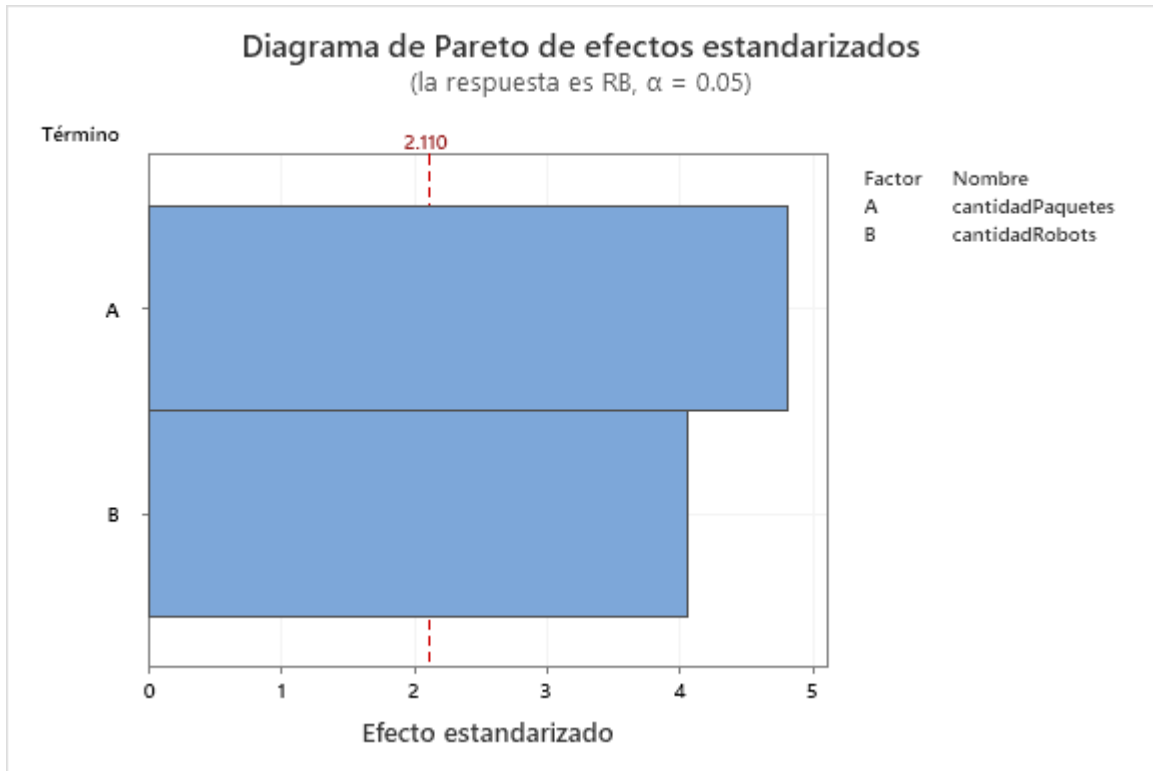


Figura 5.2. Diagrama Pareto del modelo de comunicación de la base

De igual forma, la figura 5.3 nos muestra cual factor presenta un mayor efecto respecto al otro. En el cual se determina que la cantidad de paquetes tiene más relevancia sobre el porcentaje de recepción exitosa de paquetes.

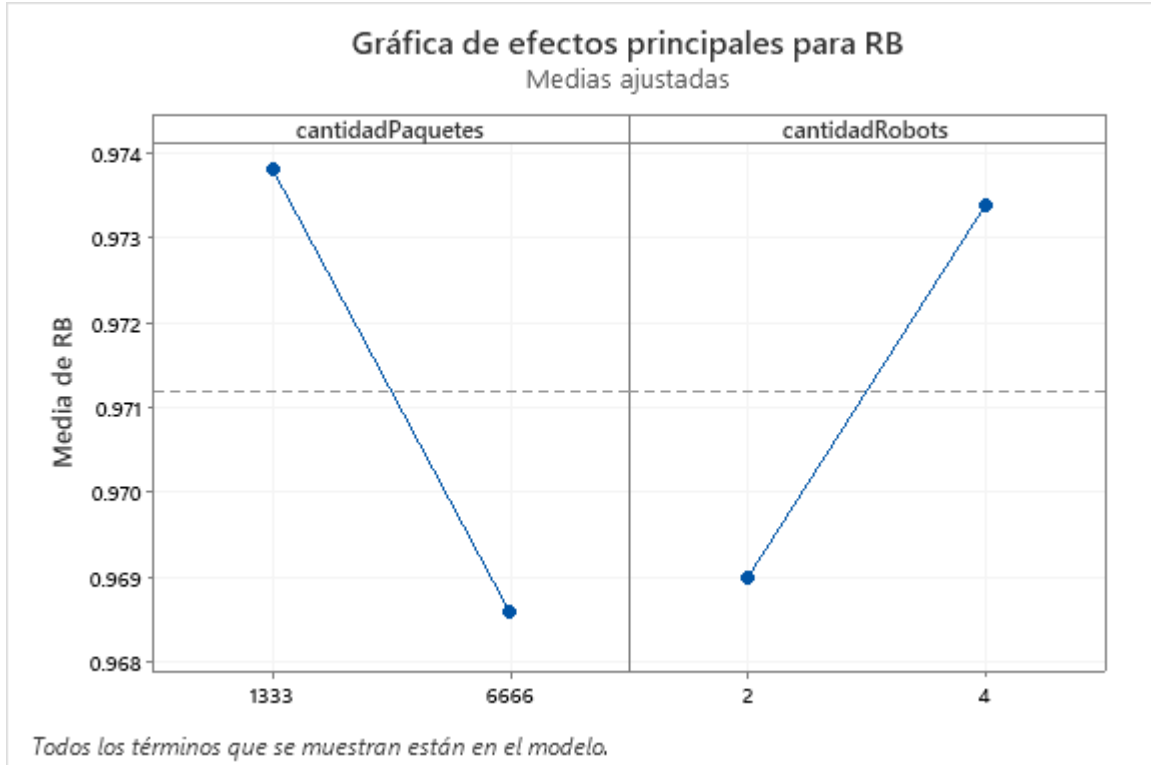


Figura 5.3. Diagrama de efectos principales del modelo de comunicación de la base

De esta forma se procede a analizar el modelo, ecuación 5.2, en el cual se observa un valor constante de 96,85 % seguido de los factores del modelo. Sin embargo, cuando se analiza el efecto en términos reales se observa que la cantidad de paquetes debe incrementar a 1 000 000 para que el porcentaje de recepción disminuya 1 %.

$$RB = 0,96851 - 0,000001 \cdot cantidadPaquetes + 0,002195 \cdot cantidadRobots \quad (5.2)$$

Por tanto, se concluye que el sistema de comunicación tiene en promedio un 96,85 % de recepción exitosa de paquetes, el cual es mayor al valor marginal planteado como objetivo validando la implementación del sistema de comunicación.

5.1.2. Modelo porcentaje de recepción de paquetes en un nodo (Atta-bot)

Ahora se debe analizar el porcentaje de recepción exitosa de paquetes para los nodos, igual que en el análisis anterior se debe demostrar la validez del experimento. Para la determinación

del modelo se parte del mismo supuesto, interacción entre la cantidad de paquetes y la cantidad de robots ($A \cdot B$) no es significativo.

Histograma de residuos

El histograma de residuos se utiliza para determinar si existe algún valor atípico en los datos o si los datos son asimétricos. [40] De la figura 5.4 se determina que el histograma está sesgado a la derecha, así que debemos observar las demás gráficas para obtener una respuesta completa.

Gráfica de probabilidad normal de residuos

Con el fin de contrastar los resultados del histograma se utiliza la gráfica de probabilidad normal de los residuos. En este caso se observa que la mayoría de los datos están cerca de la línea roja a excepción de un dato, lo cual genera que el histograma se sesgue a la derecha. Sin embargo, al ser un punto se determina que la distribución del experimento es normal.

Gráfica residuos vs ajustes

Con esta gráfica se utiliza para verificar el supuesto de que los residuos tiene una covarianza constante. [40] Para ello se observa la distribución de los datos entre la sección superior e inferior, para este caso se observa que la distribución se realiza de igual manera en ambas secciones y no se ve una tendencia en los resultados garantizando la aleatoriedad de los residuos.

Gráfica residuos vs orden de datos

En este caso se observa que la gráfica no presenta una tendencia marcada y no es posible predecir los resultados, del cual se puede concluir que no existe una correlación entre los residuos. [40]

En conclusión, a partir de las gráficas de la figura 5.4 se determina que el experimento para el modelo planteado es válido y se prosigue con el análisis.

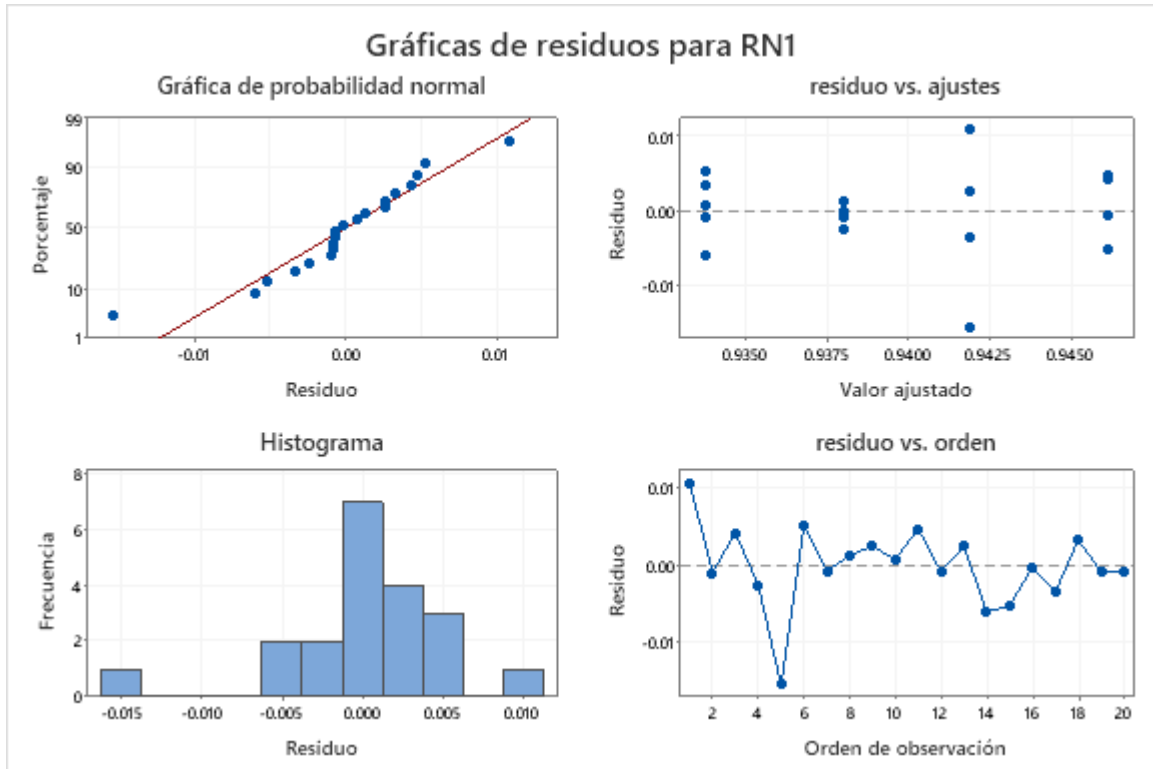


Figura 5.4. Gráfica de residuos del modelo de comunicación de un nodo

Ahora se debe determinar la importancia de los factores, en este caso se observa un resultado similar al análisis de la base, tanto la cantidad de paquetes como de robots representan factores importantes para el modelo.

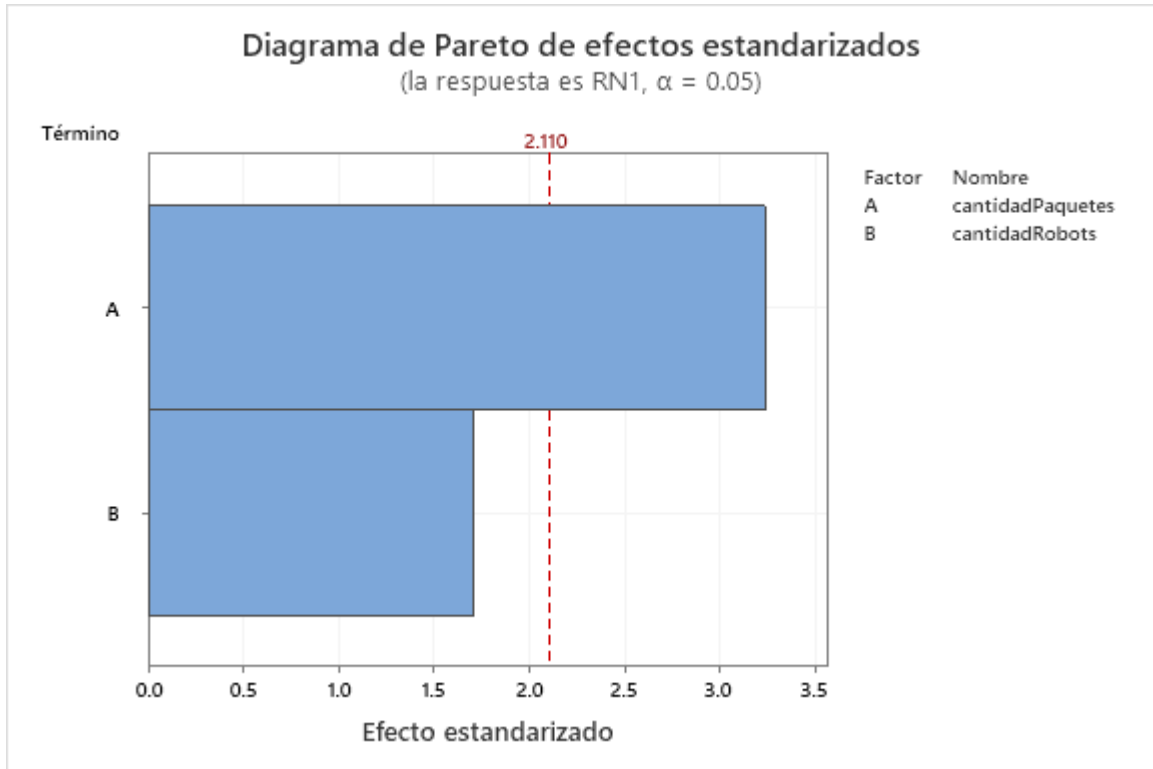


Figura 5.5. Diagrama pareto del modelo de comunicación de un nodo

Por otro lado, de la figura 5.6 se determina que la cantidad de paquetes tiene un mayor efecto que la cantidad de robot, esta conclusión es importante cuando se analice el modelo obtenido.

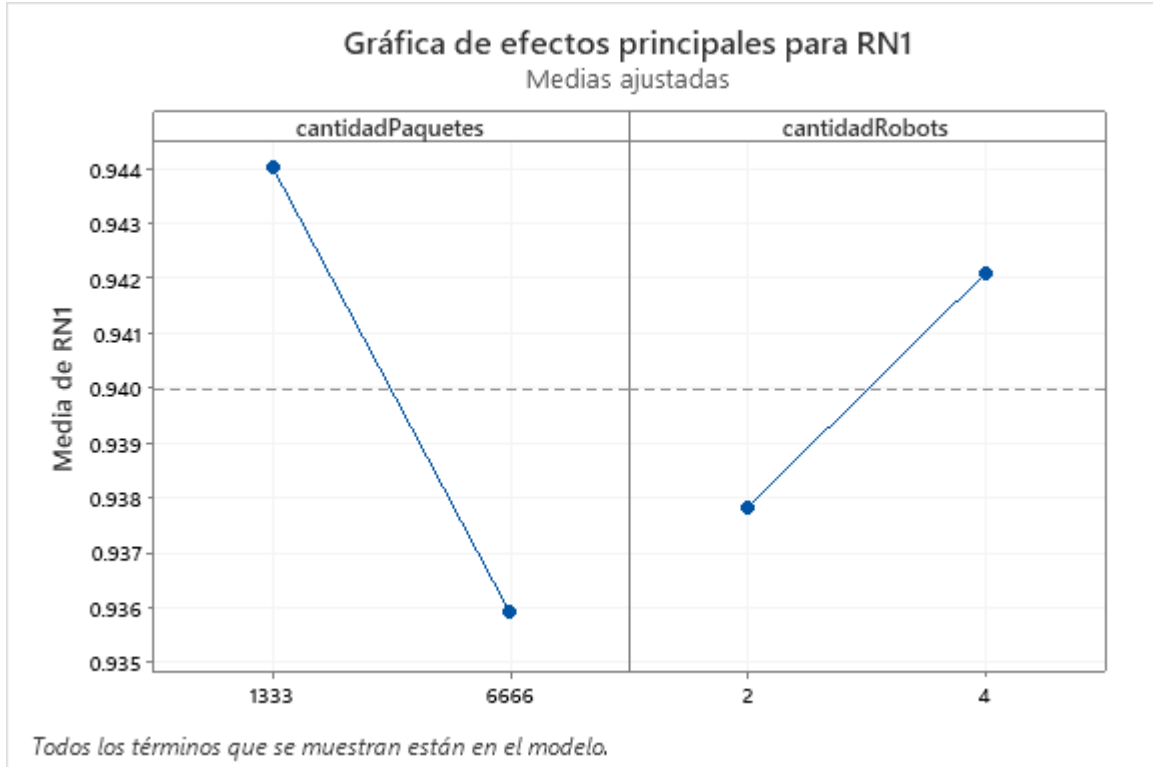


Figura 5.6. Diagrama de efectos principales del modelo de comunicación de un nodo

Ya que se comprobó la validez del experimento y el análisis de efecto de los factores se procede a analizar el modelo. Para este caso se observa una constante de 93,96 % en el modelo y para que este valor tenga un cambio del 1 % es necesario que la cantidad de paquetes sea de al menos 500 000. En otras palabras, aunque la cantidad de paquetes es importante se necesita que este valor sea extremadamente alto para que produzca un cambio significativo en el porcentaje de recepción exitosa en el Atta-bot.

$$RN1 = 0,93963 - 0,000002 \cdot cantidadPaquetes + 0,00214 \cdot cantidadRobots \quad (5.3)$$

Por tanto, se concluye que el promedio de recepción exitosa para los Atta-bots es de 93,96 %. Lo cual está dentro del valor marginal planteado del 90 %, dando como válido el sistema de comunicación implementado. Lo cual cumple con el segundo indicador del proyecto.

5.2. Validación de actualización de ubicación

Este experimento consiste en determinar el desempeño del robot al actualizar la ubicación que ha avanzado, la prueba consiste en indicarle al robot que avance hacia cierta posición y comparar el resultado que indica el robot con la posición real que tiene el robot.

Los **factores controlables** son la **velocidad de movimiento** del robot, **tipo de movimiento** que realiza, **desplazamiento máximo** de movimiento. Los **factores de ruido** son la vibración del robot, el ruido de los sensores o interferencia de componentes. La **variable de respuesta** a estudiar es la **distancia** ente el punto XY que el robot indica y la posición XY real. El tipo de experimento es factorial completo, de esta forma se generan 8 posibles combinaciones y se van a realizar 5 réplicas por combinación, dando 40 muestras. La tabla 5.2 muestra un resumen de los factores controlables para el experimento.

Tabla 5.2. Resumen de factores controlables para el experimento factorial completo de actualización de ubicación.

Factor	Nivel bajo	Nivel alto
Velocidad	120mm/s	170mm/s
Tipo de movimiento	Lineal	Curvilíneo
Desplazamiento	400mm	1000mm

Para este experimento la relación entre los factores controlables no es clara, por tanto se realiza un primer modelo con todas las posibles relaciones de los factores para determinar cuales son importantes en el modelo. Como primer paso se determina que el experimento sea válido, de la figura 5.7 se realiza el análisis de residuos, el cual da como resultado que el experimento tiene un comportamiento normal y no se presenta una tendencia en los residuos del experimento. De esta forma se valida el modelo y se procede a analizar la importancia de los factores.

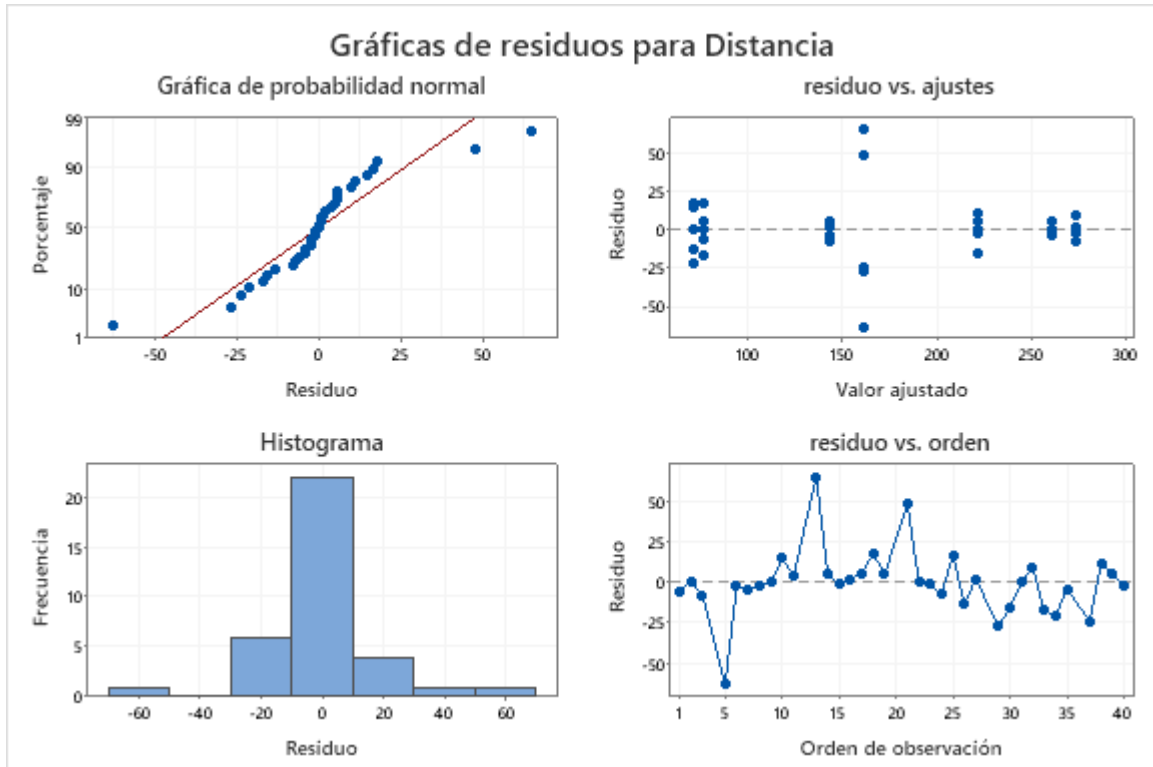


Figura 5.7. Gráfica de residuos del primer modelo de actualización de ubicación

Para determinar la importancia se utiliza el diagrama de pareto, figura 5.8, en el cual se observa que el factor velocidad no es importante para el modelo. Por tanto, con el fin de simplificar el modelo se elimina el factor velocidad en el modelo.

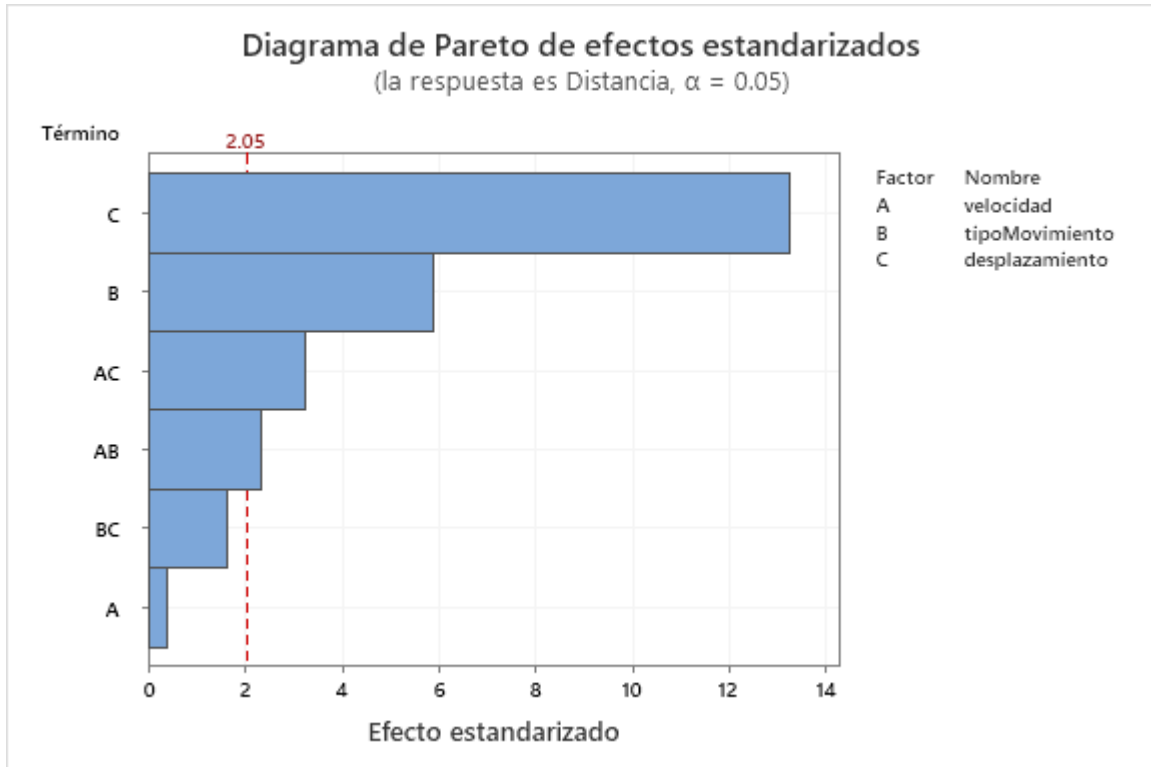


Figura 5.8. Diagrama pareto del primer modelo de actualización de ubicación

Para el nuevo modelo se debe determinar si es válido, para ello se utilizan las gráficas de residuo de la figura 5.9. En este caso se determina que existen puntos los cuales no están dentro de la línea de normalidad, sin embargo, del histograma se observa que no existen valores atípicos y la distribución del histograma es normal. Así mismo, cuando se analiza el residuo vs ajuste y orden se determina que no existe una tendencia en los residuos y hay una covarianza constante, por tanto se determina que el modelo es válido.

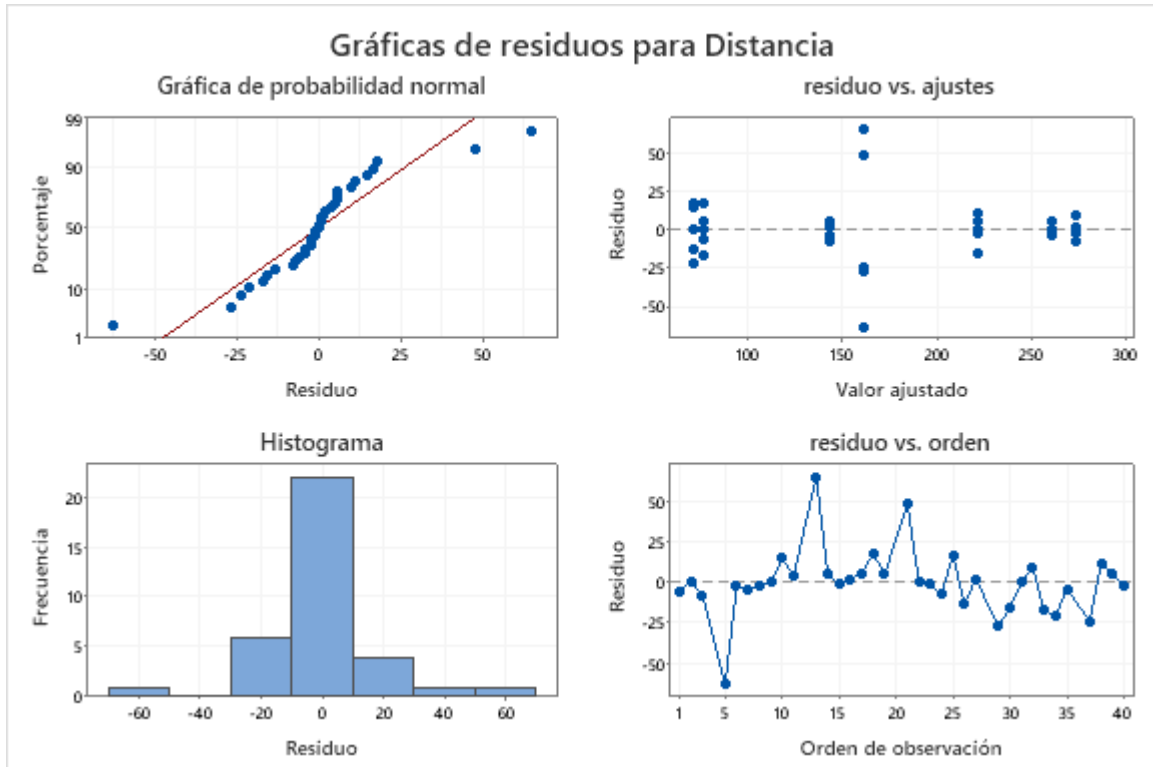


Figura 5.9. Gráfica de residuos del segundo modelo de actualización de ubicación

Ya que se determina que el modelo es válido se observa la importancia de los factores en el digrama de pareto, figura 5.10, donde se tiene como resultado que los factores del tipo de movimiento realizado y el desplazamiento son importantes. Otro dato a considerar es que el modelo tiene un $R^2 = 80,04\%$ lo cual nos indica que el modelo predice con suficiente precisión el comportamiento de la distancia de error entre el valor dicho por el robot y el valor real.

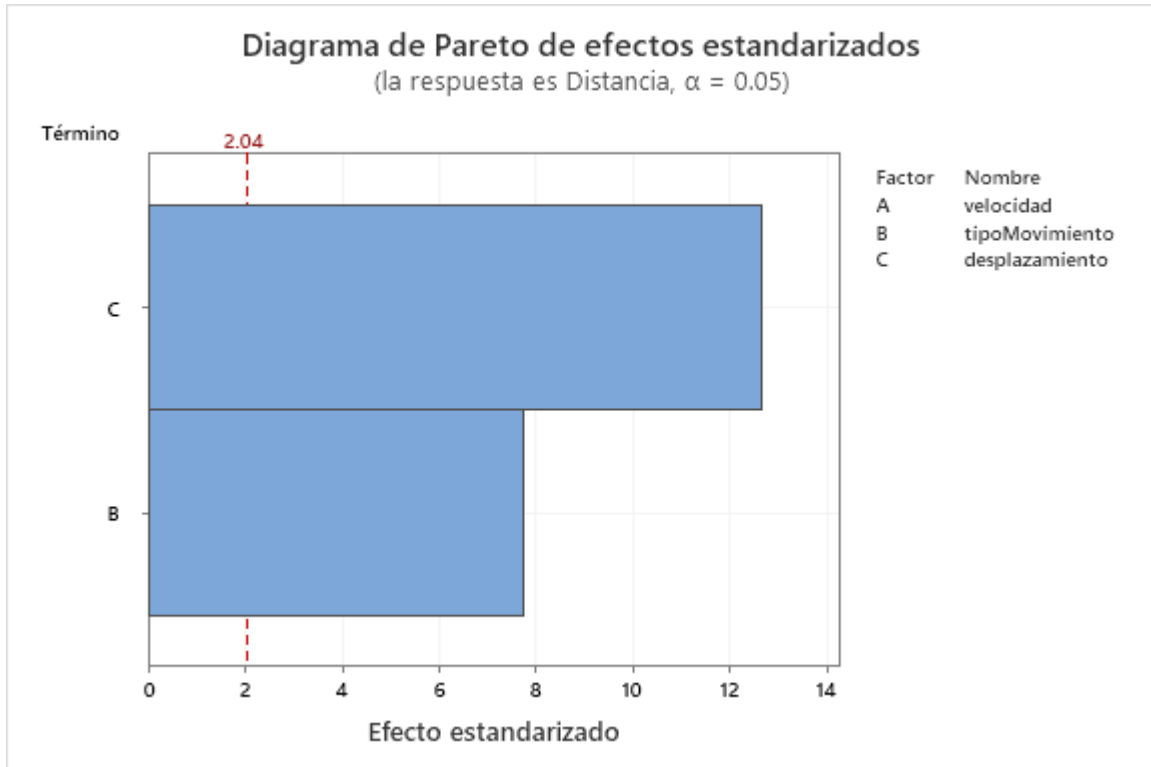


Figura 5.10. Diagrama pareto del segundo modelo de actualización de ubicación

Por último, se determina cual factor tiene un mayor efecto en el modelo, de la figura 5.11 se obtiene que el desplazamiento presenta la mayor relevancia. Por otro lado, también se obtiene que movimientos lineales y desplazamientos pequeños generan el menor error de distancia. Del cual se concluye que para tener el mejor desempeño en la actualización de la ubicación real es necesario implementar movimientos lineales con un desplazamiento corto, lo cual disminuirá el tiempo de exploración.

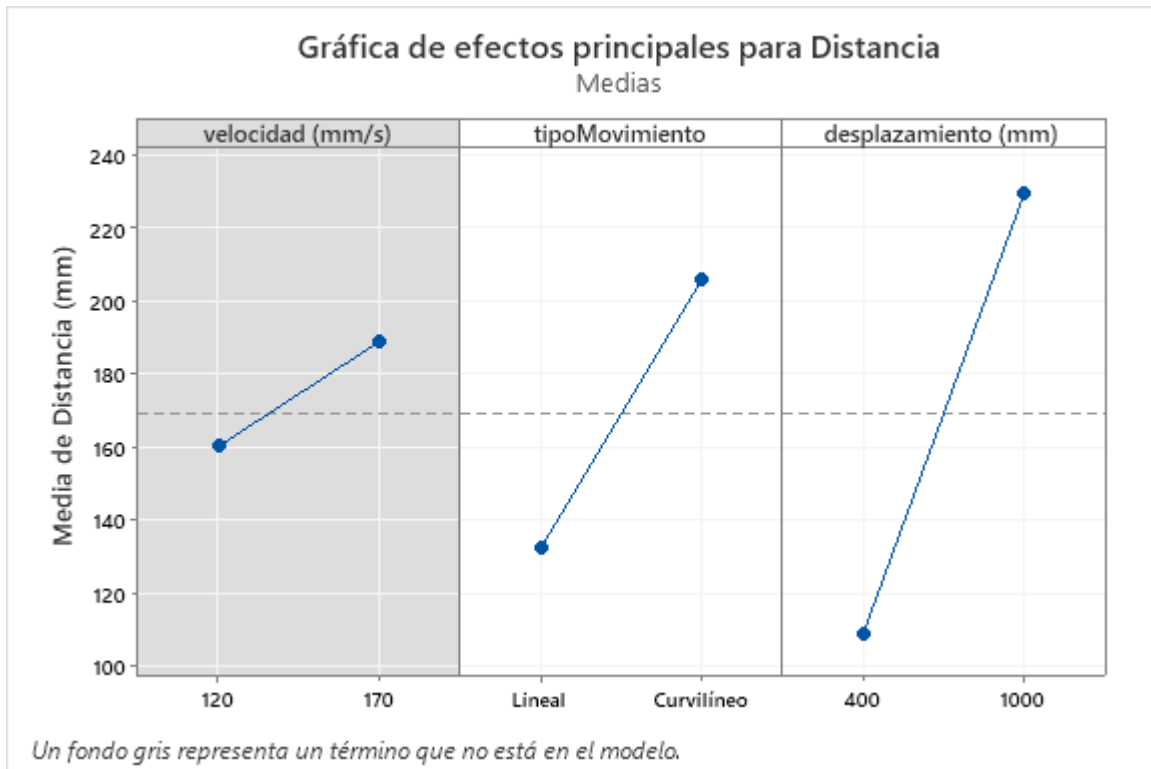


Figura 5.11. Diagrama de efectos principales del segundo modelo de actualización de ubicación

5.3. Validación del algoritmo de exploración colectiva

Ya que se han determinado las limitaciones de los Atta-bots, se debe medir el desempeño del algoritmo de comportamiento colectivo. Para ello se realiza un experimento donde solo se varía un factor controlable, la velocidad de movimiento. Para este experimento se utilizaron tres robots, se realiza de esta manera debido al espacio del escenario del experimento y también tomando en consideración los experimentos que ha realizado PROE históricamente. Los factores de ruido son el ambiente, las interferencias que pueda existir por el entorno o los componentes del robot.

La **variable de respuesta** es el porcentaje de robots que realizan de manera exitosa el comportamiento colectivo, en esto se toma en cuenta que el robot envíe la información que ya encontró la fuente de calor y que los demás robots lleguen a la ubicación sin algún problema. Se realizaron 5 repeticiones para cada valor de velocidad de avance. La tabla 5.3 presenta un resumen de los resultados presentados en el experimento.

Tabla 5.3. Porcentaje de éxito del comportamiento colectivo

Velocidad	Cantidad robots	% Éxito
120 mm/s	3	80,00
170 mm/s	3	66,67

Con el objetivo de analizar el comportamiento colectivo a detalle se graban las pruebas por medio de una cámara que se encuentra en la parte superior del escenario, estos videos también pueden ser utilizados para utilizar un procesamiento de imágenes y trabajar en el sistema de visión que se está desarrollando para validaciones futuras en PROE. Los videos se encuentran disponibles en el siguiente [enlace](#).

Así mismo, la figura 5.12 presenta una línea de tiempo de una de las validaciones realizadas. En este caso la figura 5.12a presenta el inicio de los robots, como se ha comentado todos los robots inician en línea recta y una vez que han medido la distancia de su vecino giran 90° y comienzan el comportamiento colectivo. Después de un tiempo los robots se distribuyen a lo largo del escenario hasta que un Atta-bot encuentra una fuente de calor, figura 5.12c, y le indica a sus vecinos donde se encuentra la fuente y calor. El experimento termina cuando los robots han llegado a la posición donde se encuentra la fuente de calor como se muestra en la figura 5.12d.

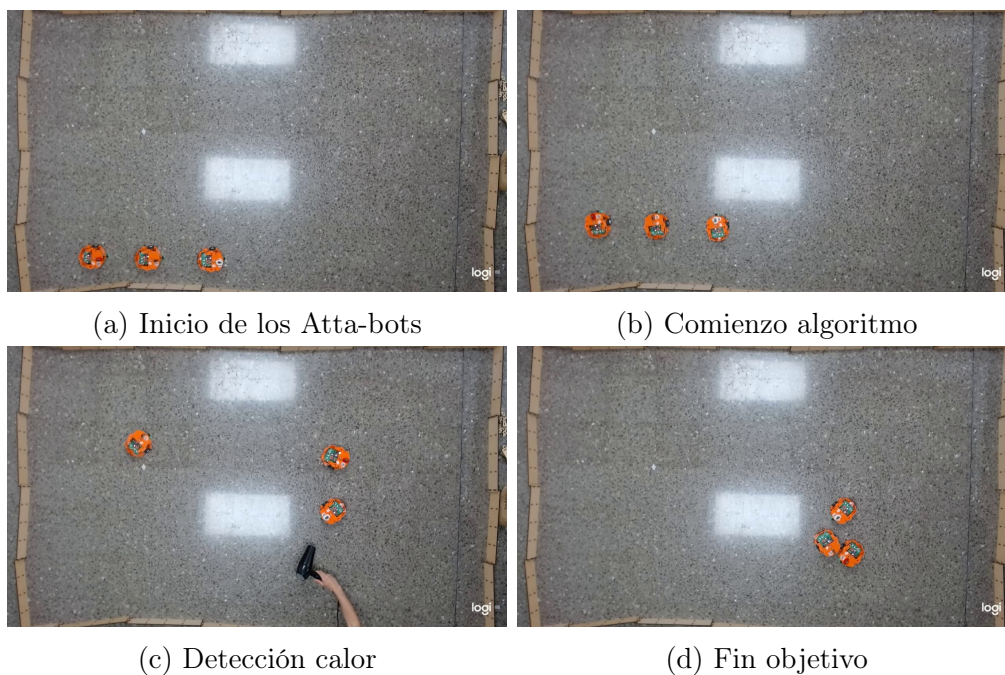


Figura 5.12. Línea de tiempo de una validación del comportamiento colectivo.

Al final del experimento se obtuvo que con una distancia de avance de 120mm/s el 80 % de los Atta-bots lograron cumplir satisfactoriamente con el objetivo del algoritmo de comportamiento colectivo, lo cual es mayor a la métrica que se debía alcanzar. Por otro lado, con una velocidad de 170mm/s se obtuvo un porcentaje de éxito de 67 %, lo cual es un poco menor al valor margina deseado. Por tanto, se determina que para una velocidad de avance de 120mm/s el comportamiento colectivo cumple con las especificaciones requeridas.

Por último se presenta la tabla 5.4 con un resumen de los objetivos con sus indicadores desarrollados en la secciones 4.1, 5.1, 4.5.3 y 5.3. Como se puede observar, todos los objetivos cumplen con los indicadores y se da por finalizado el desarrollo del proyecto.

Tabla 5.4. Resumen con los indicadores del proyecto

Objetivo	Indicador	Valor obtenido
Objetivo 1	>5 comportamientos colectivos	7
Objetivo 2	>90 % recepción	93.96 %
Objetivo 3	<5 % error	4.3 %
Objetivo 4	>70 % robots realizan la tarea	80 %

5.4. Análisis económico

Cuando se piensa en un análisis económico, la opción clásica es realizar un análisis financiero de forma que se pueda comparar los gastos del proyecto en contraste con las ganancias a futuro. Sin embargo, debido a la naturaleza de este proyecto, realizar ese análisis no es posible debido a que en proyectos de investigación la cantidad de ingresos que se puedan tener debido a una mejora del método varía mucho y no siempre se cuantifica de forma monetaria.

Por esa razón, entendiendo que la economía se define como la ciencia social que estudia la producción, la distribución y el consumo de bienes y servicios [41], que por su definición son escasos, el análisis económico se va a enfocar en presentar como se partió de los recursos que contaba PROE y por medio de la solución del proyecto, cuales recursos va a obtener el proyecto PROE. [42]

A lo largo del planteamiento de la solución del problema se encontraron opciones de componentes que aunque hubieran incrementado la precisión de los resultados hubiera supuesto un gasto considerable para el proyecto y una reestructuración de los Atta-bots. Por eso, el análisis económico va a presentar una comparación de la solución actual con diferentes robots de la industria y diferentes componentes que se pudieron utilizar para la solución del problema.

A partir de la búsqueda de información se obtuvieron diversas opciones de robots para realizar comportamientos colectivos, como primer paso se realiza una comparación del Atta-bot, las funciones que es capaz de realizar y los robots que existen en el mercado. La tabla 5.5 presenta un resumen de esa comparación.

Tabla 5.5. Comparación precio-funcionalidad de robots de enjambre

Función	Atta-bot	Jasmine	E-puck	Kilobot	Khepera IV	Colias
Detecta distancia	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Comunicación	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Proximidad	✗	✗	✓	✓	✓	✗
Cámara	✗	✗	✓	✗	✓	✗
Para exteriores	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Total funciones	3	2	4	3	5	2
Precio	\$155	\$92.11	\$667.81	\$13.82	\$2 700	\$28.79

De la tabla 5.5 se observa que los Atta-bots no son los más baratos, sin embargo tampoco son los más simples al contar con sensores que le permite desarrollar diferentes algoritmos de comportamiento colectivo, como se presentó en la sección 4.1.4.

Un aspecto importante es que los robots más baratos utilizan comunicación infrarroja, la cual debe estar en espacios controlados con iluminación controlada, debido a que es altamente ruidoso, pero los Atta-bots están pensados para ir a espacios exteriores semi controlados. Por tanto, se concluye que los Atta-bots están en gama media dentro de los robots de enjambre analizados y es un punto intermedio entre funcionalidad y precio.

Por otro lado, en el mercado se obtuvieron diferentes opciones para la solución del problema, hay dos componentes que podrían servir para aumentar la precisión, figura A.5 y A.7. Así mismo, dentro de la búsqueda de información se encuentra el módulo MPU9250, el cual es un sensor IMU que contiene acelerómetro, giroscopio y magnetómetro juntos. Reduciendo el espacio en los Atta-bots y además el tener 9 ejes se pueden utilizar filtros robustos para detectar la inclinación del robot. La tabla 5.6 muestra un resumen del balance final en caso de utilizar esos sensores.

Tabla 5.6. Precio del Atta-bot con esos sensores

Sensor	Precio	Impacto Atta-bot
NRF905	\$25.32	\$25.32
GPS GTU7	\$40.13	\$40.13
MPU9250	\$16.88	\$0.02
Total	\$82.33	\$65.43

Del análisis de estos componentes se observa que el comprar el módulo MPU9250 no genera un impacto económico considerable, así que no es justificado realizar un cambio en el diseño solo por agregar ese módulo. Por otro lado, si se quiere aumentar la precisión de los Atta-bots en la actualización de ubicación e incorporar un GPS y un mejor módulo de comunicación se elevaría el precio en \$65.45, esto supone un incremento del 42 % del precio actual. Y considerando que los Atta-bots son para realizar pruebas semicontroladas no es recomendable realizar la compra y es más factible invertir el dinero en un prototipo para espacios no controlados.

Por último, se va a realizar un cálculo del costo de realización de este proyecto, aunque no se tuvieron compras de equipos existe una depreciación de equipos más la remuneración económica por el proyecto. Para la depreciación del equipo se utilizó una computadora Acer Nitro 5 el cual tiene una vida útil de 5 años y un precio de ₡670 000, lo que da una depreciación de ₡44 668 en el transcurso de estos 5 meses. Para la remuneración económica en total se recibió ₡384 000.

Tabla 5.7. Costos de desarrollo del proyecto

No.	Detalle	Costo (₡)
1	Depreciación equipo	44 668
2	Remuneración	384 000
	Total	428 668

De la tabla 5.7 se obtiene que la realización del proyecto tuvo un costo total de ₡428 668 o \$695.26 a la tarifa de cambio de este mes. Ya que se presentaron todos los costos del proyecto se va a presentar los beneficios del mismo.

PROE al final del proyecto recibió un sistema de comunicación descentralizado, en donde se presenta el porcentaje de pérdidas de paquetes, se le presenta el protocolo de inicio de los robots para la transformación de coordenadas y se implementa un algoritmo de comportamiento colectivo para realizar la validación del sistema con los resultados de los experimentos.

Estas mejoras en los Atta-bots supone un gran avance para la investigación. Actualmente, el proyecto PROE no ha realizado publicaciones científicas debido a que no se ha podido validar el comportamiento colectivo de los robots, sin embargo, gracias a esta inversión de \$695 la validación es más robusta y permite una mayor ampliación de experimentos y el inicio de publicaciones científica.

Por otro lado, la depuración de comunicación y la mejora de la actualización de ubicación permite explorar al menos 6 nuevos algoritmos de comportamiento colectivos, como se pre-

sentó en la sección 4.1.4. El tener la capacidad de implementar nuevos algoritmos es un gran impulso y permite formular la realización de nuevos trabajos de investigación, el proyecto plantea trabajar el próximo año con la integración de dos algoritmos de comportamiento colectivo de forma simultánea, al igual que la integración de feromonas artificiales por medio de ferrofluidos [36]. De esta forma, el equipo tiene dos publicaciones en mente para el año 2023, uno donde se muestre los Atta-bots a la comunidad científica y otra publicación donde se implemente un nuevo algoritmo de comportamiento colectivo.

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Al final de este proyecto se implementó un sistema de comunicación que permite obtener la posición relativa de los robots del enjambre, de esta forma el objetivo principal del proyecto queda completado satisfactoriamente, lo cual va a permitir la implementación de nuevos comportamientos de enjambre extendiendo el alcance de investigación del laboratorio. Las conclusiones del proyecto son:

- A partir del análisis de partes se determina que los Atta-bots son capaces de realizar al menos siete comportamientos colectivos de todos los analizados (Agregación, Formación de patrones, Formación de cadenas, Exploración colectiva, Movimiento Coordinado, Consenso de logro y Asignación de tareas) lo cual va a permitir incorporar nuevas investigaciones en el proyecto.
- Se implementa un sistema de comunicación semi descentralizado que mejora la tasa de bits actual del robot y se obtuvo un promedio de recepción del 93.96 % para los nodos y un 96.85 % de recepción en la base de control, de esta forma los Atta-bots pueden ser utilizados en espacios más grandes y ampliar los experimentos realizados.
- Se contribuyó a la reducción del error en la orientación del robot, mejorando la función de avance autónomo del robot, en el cual se obtuvo un error lineal de 150mm en promedio. Por otro lado, la medición para realizar la transformación de coordenadas obtuvo un error del 5 %. Esto repercute en la precisión de las mediciones y la posibilidad de incorporar los Atta-bots en espacios más amplios y requerir de sistemas de visión para verificar la posición del enjambre.

- Por último, se implementa un nuevo algoritmo de comportamiento colectivo que contempla dos enfoques, por un lado la exploración colectiva y por el otro la agregación de robots, en el cual se obtuvo un promedio de éxito del 80 %. De esta manera, se abre la posibilidad de validar comportamientos colectivos y realizar publicaciones científicas al respecto.

6.2. Recomendaciones

- En caso de llevar el robot a exteriores se recomienda incluir un GPS con el fin de tener una mejor precisión.
- Se recomienda utilizar filtros más potentes para el tratamiento del ruido, por ejemplo filtros complementarios o filtros de Kalman con el fin de aumentar la precisión.
- El ruido de los sensores no se puede tratar como trivial, ya que afecta directamente en la actualización de la ubicación. Generando un error acumulado conforme pasa el tiempo y ocasionando que la función de avance autónomo no funcione.
- Con el objetivo de mejorar la tasa de bits del enjambre se recomienda explorar opciones más técnicas. Por ejemplo la implementación del CDMA.
- Se debe realizar una revisión del cableado, ya que algunos ya están deteriorados y afectan la medición de los sensores.
- Durante los experimentos se observa que el robot no determina la distancia avanzada de manera correcta, al utilizar dos encoders con interrupciones leyendose al mismo por un solo microcontrolador es probable que se estén perdiendo pasos o las ruedas estén deslizando. Por tanto, se recomienda incorporar métodos más robustos para la actualización de ubicación.
- Los sensores están sujetos a perturbaciones por los motores y sumado a la precisión de los mismos, se recomienda utilizar métodos de procesamiento de señales que permita combinar la información de los sensores, como el filtro Kalman. Actualmente algunas mediciones cuentan con más de un método para medir la misma variable física.
- En caso de no querer invertir en un GPS se recomienda buscar opciones de módulos de radio frecuencia con una mejor precisión en la medición del RSSI de esta forma se puede

medir la distancia entre los robots y la orientación por medio de un magnetómetro. Lo que da todos los datos necesarios para realizar la transformación de coordenadas.

Bibliografía

- [1] C. Calderon-Arce y R. Solis-Ortega, “Swarm Robotics and Rapidly Exploring Random Graph Algorithms Applied to Environment Exploration and Path Planning,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 10, n.º 5, 2019. DOI: 10.14569/IJACSA.2019.0100586. dirección: <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100586>.
- [2] B. Khaldi y C. Foudil, “An Overview of Swarm Robotics: Swarm Intelligence Applied to Multi-robotics,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 126, págs. 31-37, sep. de 2015. DOI: 10.5120/ijca2015906000.
- [3] G. Beni y J. Wang, “Swarm intelligence in cellular robotic systems,” en *Robots and biological systems: towards a new bionics?* Springer, 1993, págs. 703-712.
- [4] M. Dorigo, G. Theraulaz y V. Trianni, “Swarm Robotics: Past, Present, and Future,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, págs. 1152-1165, jul. de 2021. DOI: 10.1109/JPROC.2021.3072740.
- [5] C. Calderón-Arce, J. C. Brenes-Torres y R. Solis-Ortega, “Swarm Robotics: Simulators, Platforms and Applications Review,” *Computation*, vol. 10, n.º 6, 2022, ISSN: 2079-3197. DOI: 10.3390/computation10060080. dirección: <https://www.mdpi.com/2079-3197/10/6/80>.
- [6] C. Calderón, J. C. Brenes y R. Solís. “PROE 1.0,” Tecnológico de Costa Rica. (2019), dirección: <https://www.tec.ac.cr/proyectos/proe-10> (visitado 19-07-2022).
- [7] Tecnológico de Costa Rica, *Cartera de proyectos*. 2021.

- [8] S. Barquero-Meléndez, “Desarrollo de sistema de locomoción y odometría en un robot móvil para navegación en espacios no uniformes,” 2020.
- [9] M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari y M. Dorigo, “Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective,” *Swarm Intelligence*, vol. 7, págs. 1-41, mar. de 2013. DOI: 10.1007/s11721-012-0075-2.
- [10] E. A. Favret, “Biomimética, tecnología inspirada en la naturaleza,” *Museo*, 2016.
- [11] K. Hartnett. “The Simple Algorithm That Ants Use to Build Bridges.” (2 de mayo de 2022), dirección: <https://www.quantamagazine.org/the-simple-algorithm-that-ants-use-to-build-bridges-20180226/>.
- [12] M. Bhanabhai. “Collective Intelligence For Teams Inspired From Nature.” (2 de mayo de 2022), dirección: <https://bioteams.com/2019/12/11/collective-intelligence-for.html>.
- [13] A. R. Cheraghi, S. Shahzad y K. Graffi, “Past, Present, and Future of Swarm Robotics,” *CoRR*, vol. abs/2101.00671, 2021. dirección: <https://arxiv.org/abs/2101.00671>.
- [14] G. Beni, “From Swarm Intelligence to Swarm Robotics,” *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3342, págs. 1-9, jul. de 2004. DOI: 10.1007/978-3-540-30552-1_1.
- [15] M. S. Tortosa, “Agentes y enjambres artificiales: modelado y comportamientos para sistemas de enjambre robóticos,” Tesis doct., Universitat d’Alacant-Universidad de Alicante, 2014.
- [16] I. Navarro y F. Matía, “An Introduction to Swarm Robotics,” *ISRN Robotics*, vol. 2013, ene. de 2013. DOI: 10.5402/2013/608164.
- [17] U. of Stuttgart. “Open-source micro-robotic project.” (2005), dirección: <http://www.swarmrobot.org/> (visitado 31-10-2022).
- [18] IRIDIA. “Swarm-bots project.” (2005), dirección: <http://www.swarm-bots.org/> (visitado 31-10-2022).
- [19] S. Wilson, R. Gameros, M. Sheely y col., “Pheeno, A Versatile Swarm Robotic Research and Education Platform,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, n.º 2, págs. 884-891, 2016. DOI: 10.1109/LRA.2016.2524987.
- [20] K-Team. “Khepera IV.” (2022), dirección: <https://www.k-team.com/khepera-iv> (visitado 31-10-2022).

- [21] É. P. F. D. Lausanne. “e-puck education robot.” (2018), dirección: <https://e-puck.gctronic.com/> (visitado 31-10-2022).
- [22] K-team. “kilobot.” (2022), dirección: <https://www.k-team.com/mobile-robotics-products/kilobot> (visitado 31-10-2022).
- [23] WEVOLVER. “Colias robot.” (2022), dirección: <https://www.wevolver.com/specs/colias.robot> (visitado 31-10-2022).
- [24] J. Kahn y J. Barry, “Wireless infrared communications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, n.º 2, págs. 265-298, 1997. DOI: 10.1109/5.554222.
- [25] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson educación, 2003.
- [26] IEEE Geoscience and Remote Sensing Society. “Database of Frequency Allocations.” (2020), dirección: http://www.classic.grss-ieee.org/frequency_allocations.html.
- [27] S. Sachs, “Alternative local area network access protocols,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 26, n.º 3, págs. 25-45, 1988. DOI: 10.1109/35.437.
- [28] R. Rom y M. Sidi, *Multiple access protocols: performance and analysis*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [29] D. Tse y P. Viswanath, *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge university press, 2005.
- [30] J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, ép. Addison-Wesley series in electrical and computer engineering: control engineering. Pearson/Prentice Hall, 2005, ISBN: 9780201543612. dirección: <https://books.google.co.cr/books?id=MqMeAQAAIAAJ>.
- [31] Y. Kim y H. Bang, “Introduction to Kalman Filter and Its Applications,” en nov. de 2018, ISBN: 978-1-83880-536-4. DOI: 10.5772/intechopen.80600.
- [32] Y. Pei, S. Biswas, D. Fussell y K. Pingali, “An Elementary Introduction to Kalman Filtering,” *Communications of the ACM*, vol. 62, oct. de 2017. DOI: 10.1145/3363294.
- [33] A. Chakraborty y A. Kar, “Swarm Intelligence: A Review of Algorithms,” en mar. de 2017, págs. 475-494, ISBN: 978-3-319-50919-8. DOI: 10.1007/978-3-319-50920-4_19.
- [34] J. L. Farrugia y S. G. Fabri, “Swarm Robotics for Object Transportation,” en *2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL)*, 2018, págs. 353-358. DOI: 10.1109/CONTROL.2018.8516829.

- [35] C. A. Barrantes-Jiménez, “Diseño e implementación de rutinas de navegación y comunicación para un robot móvil utilizado en sistemas multirobot de enjambre,” 2019.
- [36] J. C. Brenes-Torres, F. Blanes y J. Simo, “Magnetic Trails: A Novel Artificial Pheromone for Swarm Robotics in Outdoor Environments,” *Computation*, vol. 10, n.º 6, 2022, ISSN: 2079-3197. DOI: 10.3390/computation10060098. dirección: <https://www.mdpi.com/2079-3197/10/6/98>.
- [37] K. T. Ulrich y S. D. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*, 5.ª ed. McGraw-Hill, 2013, ISBN: 9786071509444.
- [38] H. G. Pulido, R. De la Vara Salazar, P. G. González, C. T. Martínez y M. d. C. T. Pérez, *Análisis y diseño de experimentos*, 2.ª ed. McGraw-Hill New York, NY, USA: 2008.
- [39] K. Lynch y F. Park, *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*. Cambridge University Press, 2017, ISBN: 9781316609842. dirección: <https://books.google.co.cr/books?id=86G0nQAACAAJ>.
- [40] Minitab. “Gráficas de residuos incluidas en Minitab.” (2022), dirección: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/supporting-topics/residuals-and-residual-plots/residual-plots-in-minitab/> (visitado 29-10-2022).
- [41] R. Wells, K. Graddy y P. R. Krugman, *Fundamentos de economía*. Reverte, 2020.
- [42] J. L. C. Marino. “Estudio económico de proyectos especiales,” Instituto Tecnológico de Costa Rica. (10 de ago. de 2021), dirección: https://tecnube1-my.sharepoint.com/personal/jcrespo_itcr_ac_cr/_layouts/15/stream.aspx?id=%5C%2Fpersonal%5C%2Fjcrespo%5C%5Fitcr%5C%5Fac%5C%5Fcr%5C%2FDocuments%5C%2FOTROS%5C%2FESTUDIOECONOMICODEPROYECTOSESPECIALES%5C%2Emp4&ga=1.
- [43] S. S. Lam, “A carrier sense multiple access protocol for local networks,” *Computer Networks (1976)*, vol. 4, n.º 1, págs. 21-32, 1980, ISSN: 0376-5075. DOI: [https://doi.org/10.1016/0376-5075\(80\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0376-5075(80)90026-4).
- [44] S. Rackley, *Wireless Networking Technology: From Principles to Successful Implementation*. Elsevier, Newnes, 2007.
- [45] K. Zigangirov, *Theory of Code Division Multiple Access Communication*, ép. IEEE Series on Digital & Mobile Communication. Wiley, 2004, ISBN: 9780471655480. dirección: https://books.google.co.cr/books?id=33N_sEDdybMC.

- [46] N. Aslam, W. Robertson, S. Sivakumar y W. Phillips, "Reservation based medium access control protocol for wireless sensor networks," en *CCNC 2006. 2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2006.*, vol. 2, 2006, págs. 969-973. DOI: 10.1109/CCNC.2006.1593182.
- [47] P. Bose, J. D. Carufel, A. Shaikhet y M. H. M. Smid, "Art Gallery Localization," *CoRR*, vol. abs/1706.06938, 2017. arXiv: 1706.06938. dirección: <http://arxiv.org/abs/1706.06938>.
- [48] A. M. Khalel, "Position location techniques in wireless communication systems," 2010.
- [49] A. Pozo-Ruz, A. Ribeiro, M. García-Alegre, L. García, D. Guinea y F. Sandoval, "Sistema de posicionamiento global (GPS): descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro," *ETS ingenieros de Telecomunicaciones. Universidad de Malaga*, 2000.
- [50] K. Heurtefeux y F. Valois, "Is RSSI a Good Choice for Localization in Wireless Sensor Network?" En *2012 IEEE 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, 2012, págs. 732-739. DOI: 10.1109/AINA.2012.19.
- [51] S. Wang, Y. Li, S. Zhang, B. Wang y H. Yang, "Relative localization of swarm robotics based on the polar method," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 19, n.º 1, pág. 17 298 806 221 080 634, 2022. DOI: 10.1177/17298806221080634.

A.1. Necesidades

A.1.1. Entrevistas

Tabla A.1. Necesidades interpretadas del cliente.

#	Enunciado del cliente	Necesidad interpretada
1	“Los robots en el estado actual, le mandan mensajes cada uno individualmente a la base... Me gustaría que no solo le hablen a la base, sino que se puedan hablar entre ellos.”	El sistema de enjambre permite enviar información entre los robots y enviar información entre los robots y la base.
2	“Si queremos un algoritmo de enjambre descentralizado tenemos que dejar de depender tanto de la base.”	El sistema de enjambre es descentralizado.
3	“También me duele que a veces los mensajes que se transmiten son pequeños, bueno, transmiten muy separados, que me gustaría que se me que ojalá en el mismo mensaje se mandaran más datos o que el mensaje fuera más pequeño para que entonces la ventana de tiempo de cada uno fuera más pequeña y pudieran enviarlos más seguido.”	La comunicación del sistema de enjambre tiene una tasa de bits elevada.
4	“Cada robot tiene que enviar un dato. Y ahorita el problema que tenemos es que cada robot envía un dato desde su marco de referencia, dice yo avancé tanto, yo avancé tanto. Entonces cuando el otro robot lo escuche, es como que estuviera hablando otro idioma.”	Cada robot del sistema de enjambre interpreta la información recibida de manera correcta.
5	“Ese robot va a tener que hacer una conversión a su propio marco de referencia para entender las posiciones que lo que le indica el otro. Muy probablemente eso, esa conversión, va a requerir que los robots a priori sepan dónde están los otros para poder hacer conversiones de sistemas de referencia entre robots.”	Cada robot del sistema de enjambre es capaz de conocer la posición de sus vecinos respecto a él.
6	“Entonces ahora queremos aprovechar este enjambre y hacer comportamientos nuevos, no solo el que te dije de exploración aleatoria y rutas óptimas, sino inventar otra cosa. Primero, que empieza uno bueno, voy a tratar de implementar otro comportamiento, pero que ya esté conocido.”	El sistema de enjambre permite configurar diferentes algoritmos de exploración.

Continúa en siguiente página

Tabla A.1. Necesidades interpretadas del cliente. Continuación

#	Enunciado del cliente	Necesidad interpretada
7	“Entonces, lo primero que vamos a hacer en este proyecto es hacer un comportamiento nuevo... Los robots después toman decisiones en base, sabiendo si el robot está y sabe dónde está en el mundo y dónde están los demás. Ya podemos empezar a tomar decisiones para nuevos comportamientos.”	El sistema de enjambre permite configurar diferentes algoritmos de exploración
8	“Entonces no solo saber que lo escuchamos, sino buscarlo. Ahí están las funciones de la biblioteca digital. Quiero que eso que almacenado también cuando el otro interprete los mensajes, quiero que eso quede almacenado. ¿Por qué? Porque creo que eso podría incluso hasta darnos un indicativo de cuán cerca o cuán lejos está el robot.”	Cada robot del sistema de enjambre es capaz de conocer la posición de sus vecinos respecto a él.
9	“...pues por algo lo pusimos, porque en teoría Radio Frecuencia logran decenas de metros. Infiere muchas cosas. No es lo mismo digamos en el gimnasio y que todo es abierto. Si es un edificio con puertas y paredes y cosas. Pero Radio Frecuencia, por ejemplo, logra más alcance que wifi o bluetooth. Entonces, idealmente sería decenas de metros, pero por ahora el escenario que tiene como 4X4 metros es una cosa así.”	El sistema de enjambre es capaz de trabajar en áreas extensas.
10	“Bueno, otro problema que te dije. Que todavía el. La frecuencia de muestreo, por así decirlo, que le toca a cada robot hablar. Yo la siento lenta, es decir, cuando la vemos no mandan demasiados mensajes. Entonces quisiera hacer las ventanas más pequeñas y que por ende cada robot le toque más rápido o que con las mismas ventanas de tiempo los robots manden más datos.”	La comunicación del sistema de enjambre tiene una tasa de bits elevada.
11	“...un problema que tenemos es que el muchacho que nos ayudó a implementar esto hizo muy bien un algoritmo de comunicación y funciona y todo, pero modificó la biblioteca de Radio Head, que es como una biblioteca que utiliza la radiofrecuencia del chip que utilizamos del fader. Entonces estamos atados a utilizar esa versión modificada. El problema con eso es que tenemos que estarlo moviendo cada vez que un asistente nuevo llega y va a usar eso, tenemos que pasarle la biblioteca modificada y en el momento que actualicen es porque hay algo nuevo. No vamos a poder participar de esas actualizaciones porque tenemos una versión modificada. Entonces, si pudiéramos esos cambios no hacer que estén en la biblioteca, sino que estén en nuestro propio código, ya podríamos estar usando la biblioteca genérica y vivir de eso.”	La programación del protocolo de comunicación del sistema de enjambre permite que sea fácilmente duplicada o modificada.
12	“Ahora los robots cuando iniciamos pruebas los ponemos random y whatever. Si vas a proponer alguna manera en que un robot interprete la posición de otra. Creo que tal vez estamos dispuestos a dé. Tenemos que a que nos sugieras un método de cómo arrancar. Es decir, no sé. Podes decir ponga todos los robots viendo el mismo lado, separados diez centímetros. Tal vez es un poco tieso.”	Cada robot del sistema de enjambre es capaz de conocer la posición de sus vecinos respecto a él.

A partir de conversaciones con los miembros del laboratorio se determinan dos necesidades:

- Las pruebas del laboratorio son fáciles y rápidas de configurar en el sistema de enjambre.
- Los robots del sistema de enjambres evitan colisiones.

A.2. Especificaciones

A.2.1. Métricas

Tabla A.2. Tabla de métricas

#	Nec.	Métrica	Imp.	Unidad	V. marginal	V. ideal
1	1	Porcentaje de recepción de datos en los nodos	4	%	>90	>95
2	2	Cantidad de operaciones en el enjambre que requieren una unidad central	4	Subjetiva	<5	0
3	3	Tasa de bits enviados a la base	4	Bytes/s	>100	>250
4	3	Tases de bits recibidos en la base y nodos	4	Bytes/s	>600	>800
5	4	Porcentaje de bits recibidos con errores	5	%	<5	<1
6	5	Exactitud de la distancia calculada	4	%	>90	>95
7	6	Cantidad de algoritmos de comportamiento colectivo que se pueden configurar	4	Lista	Lista 1*	Lista 2*
8	7	Distancia máxima de comunicación	3	m	>3	>6
9	8	La comunicación es fácil de modificar	5	Subjetiva	>3	=5
10	9	Cantidad de componentes comprados	5		0	0
11	10	Tiempo requerido para configurar el experimento y obtener resultados	3	min.	<5	<2
12	11	Porcentaje de robots detectados como obstáculos en los resultados	5	%	<20	<5

*Lista 1: Organización espacial, agregación, formación de patrones

*Lista 2: Exploración colectiva, organización espacial, agregación, formación de patrones, formación de cadenas

Tabla A.3. Comentario de métricas.

#	Métricas	Comentario
1	Porcentaje de recepción de datos en los nodos	Estos valores se toman como referencia del trabajo de Carlos Barrantes [35], ya que son los rangos propuestos y presentados en la primera versión de la comunicación.
2	Cantidad de operaciones en el enjambre que requieren una unidad central	Esta métrica se refiere a operaciones que de otra manera no se pueden realizar en el enjambre durante el funcionamiento de este y se necesita tener un nodo central.
3	Tasa de bits enviado a la base	Se toma la tasa de bits actuales que tiene Atta-bot 32 bytes en cada mensaje. Para este proyecto el mejor escenario es duplicar esa tasa.
4	Tasa de bits recibidos en la base y nodos	Se toma la tasa de bits actuales que tiene Atta-bot 32 bytes en cada mensaje. Los robots no reciben información por el momento, pero se va a tomar la misma referencia de recepción que tiene la base.
5	Porcentaje de mensajes recibidos que están dañados	No se tiene un histórico del porcentaje de errores que se puede tolerar, así que se toma u valor recomendado.
6	Exactitud de la distancia calculada	Debido a las limitaciones del Atta-bot este valor puede cambiar. Se inicia con este valor considerando la resolución del RSSI, que es de 0.5dB y considerando el sensor de distancia infrarrojo actual.
7	Cantidad de algoritmos de comportamiento colectivo que se pueden configurar	En un futuro se pretenden implementar nuevos algoritmos, por esa razón se eligen algoritmos teóricos que los Atta-Bots pueden correr en su código, para la elección de los algoritmos se realizó una búsqueda externa.
8	Distancia máxima de comunicación	La métrica se basa en el tamaño máximo del área de trabajo y se pretende duplicar esa distancia en este proyecto.
9	La comunicación es fácil de modificar	Esta métrica es completamente subjetiva, ya que depende de la persona que lea el código y el entendimiento que tenga sobre protocolos de comunicación. De forma general se espera que una persona con un conocimiento técnico básico pueda entender el código.
10	Cantidad de componentes comprados	En este proyecto se espera no comprar componentes, sin embargo, se podrían hacer pequeñas modificaciones siempre que se ajuste al presupuesto.
11	Tiempo requerido para configurar el experimento y obtener resultados	Esta métrica pretende hacer más sencillo los experimentos, sin embargo, no es una necesidad necesaria y se puede dar un producto sin esta necesidad resuelta.

Tabla A.3. Comentario de métricas. Continuación

#	Métrica	Comentario
12	Porcentaje de robots detectados como obstáculos en los resultados	Debido a que los experimentos pueden contar con una cantidad variable de robots, se utiliza un porcentaje. Lo mínimo que se ha trabajado es de 3 robots, el 20 % da lugar a detectar un robot como obstáculo, así que se puede tolerar detectar un robot como obstáculo en esta primera versión de detección de colisiones.

A.3. Búsqueda de información

Para esta sección se procede a buscar información de proyectos similares, tomando en consideración las técnicas que aplicaron, literatura utilizada y libros de texto que faciliten la generación de múltiples soluciones para el problema. Para ello se divide la búsqueda en 4 pilares: sistema de comunicación, topología de comunicación, posicionamiento y algoritmo de comportamiento colectivo.

A.3.1. Sistema de comunicación

Random Access Protocol

En este tipo de protocolo el ancho de banda del canal se utiliza por completo y cada estación determina el tiempo en el que quiere utilizar el canal sin ningún tipo de coordinación entre ellas. [27].

El principal problema de este tipo de protocolos es la posibilidad de existir colisiones entre los mensajes, por esa razón este tipo de protocolos es recomendado para redes con una baja transferencia de datos. Así mismo, las detección de colisiones requieren de un hardware especial que les permita enviar y escuchar su propia transmisión o tengan una confirmación del envío de los datos. [27]

- Aloha: este es probablemente el protocolo más popular de entre los protocolos de múltiple acceso, debido a que fue uno de los primeros en realizarse y es muy sencillo de implementar. Es comúnmente utilizado en redes de área local y se divide en dos tipos: Pure Aloha y Slatted Aloha.

En general el protocolo Aloha considera que se tiene una cantidad infinita de usuarios, los mensajes a enviar tienen un tamaño fijo y los nodos pueden enviar el mensaje cuando

ellos quieran sin ningún tipo de restricción. Cuando se envía el mensaje pueden existir dos casos, el primero es donde el mensaje se envía de forma correcta y el segundo es cuando existe una colisión entre n nodos. Un aspecto importante de este protocolo es que el emisor debe **recibir confirmación si el mensaje se envió con éxito**. [28]

Si se produce una colisión, cada nodo que tuvo la colisión programa un envío del paquete en un tiempo aleatorio, este proceso se vuelve a repetir por el nodo hasta que haya enviado el paquete.

- CSMA: para este protocolo cada individuo de la red “siente” si el canal está siendo utilizado y solo se permite enviar información si el canal está inactivo. Este protocolo tiene más probabilidades de éxito cuando se compara con Aloha, el cual es un protocolo completamente aleatorio. [43]

Sin embargo, la colisión entre nodos no se puede evitar y para resolver este problema se emplea un método similar a Aloha. En este caso se parte del supuesto que los nodos están sincronizados y solo pueden enviar un dato al inicio de las ventanas de tiempo. Cuando sucede una colisión el nodo emisor utiliza un algoritmo adaptativo para volver a enviar el mensaje, por ejemplo retroceso exponencial. [28]

Chanelization Protocols

Para este protocolo se crean subcanales asignando particiones en el canal principal por medio del tiempo, frecuencia o por medio de códigos. Estos subcanales son creados con anterioridad y ocupan ancho de banda ya sea que tenga o no tráfico de datos. La principal desventaja de estos medios de comunicación es la falta de flexibilidad y la ineficiencia de manejar un tráfico de datos elevados. [27]

- TDMA: En este protocolo se asigna una ventana de tiempo a cada nodo en el cual puede enviar la información, al inicio de la transmisión se sincroniza el reloj de cada nodo y a partir de la cantidad de nodos y la cantidad de bytes por paquete se asigna la ventana de tiempo para la transmisión. [44]

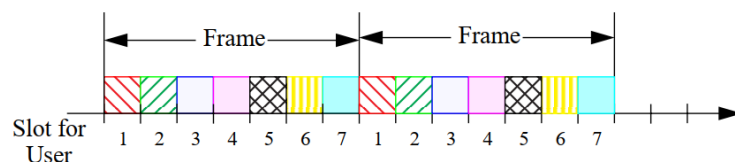


Figura A.1. Activación del nodo en el espacio tiempo. [28]

- FDMA: Por otro lado, en lugar de dividir el espacio tiempo en ventanas donde se envían los datos se puede tomar el ancho de banda y dividirlo en la cantidad de dispositivos que se van a tener en la red. En este caso se está hablando del protocolo de acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA del inglés). En la práctica muchas veces se combina FDMA con TDMA para incrementar la capacidad de un canal de FDMA. [44].

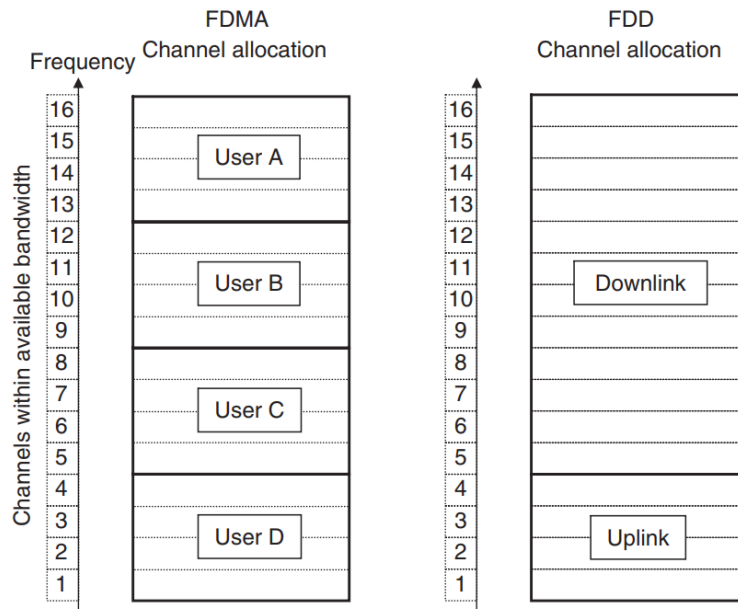


Figura A.2. División de la frecuencia por nodo y duplexación del nodo receptor. [44]

- CDMA: Los protocolos anteriores “aislan” a los nodos, evitando que hayan colisiones en la transmisión. Sin embargo, estos protocolos no son escalables y con una gran cantidad de usuarios no es práctica. Para ello se diseñó una nueva aproximación en el cual todos los recursos se comparten entre los nodos, el mensaje es multiplicado por un código único de cada nodo y esa información se puede enviar al mismo tiempo que otros nodos envían datos. [45]

Controlled Access Protocols

Este protocolo, como su nombre lo sugiere, tiene un nodo (maestro) que se encarga de brindar permisos para que los nodos puedan enviar la información. Tiene la ventaja que trabaja bien con un tasa de bytes media y elevada, específicamente en aplicaciones en donde el acceso al canal es predecible en el tiempo. [27]

Sin embargo, la desventaja de aplicar un método de estos es que requiere un nodo central, generando que el sistema de enjambre pierda la característica de descentralización. Aún así, se van a tomar en consideración para evaluar las ventajas y desventajas de estos.

- **Reservation:** Este método se basa en que el nodo indica al maestro que necesita enviar un mensaje y de esta forma “reserva” un campo para enviar la información. Uno de estos métodos es el Mini Slotted Alternating Priority (MSAP), el cual está basado en TDMA, como se muestra en la figura A.3 existen intervalos de tiempo en los cuales se puede enviar la información. [28]

Al inicio los nodos indican que deben enviar información y el maestro se encarga de asignar el orden de ellos y por medio de un mensaje tipo broadcast indica el orden a enviar los mensajes. Luego de ello cada nodo tiene una ventana de tiempo en el cual envía el mensaje. [46]

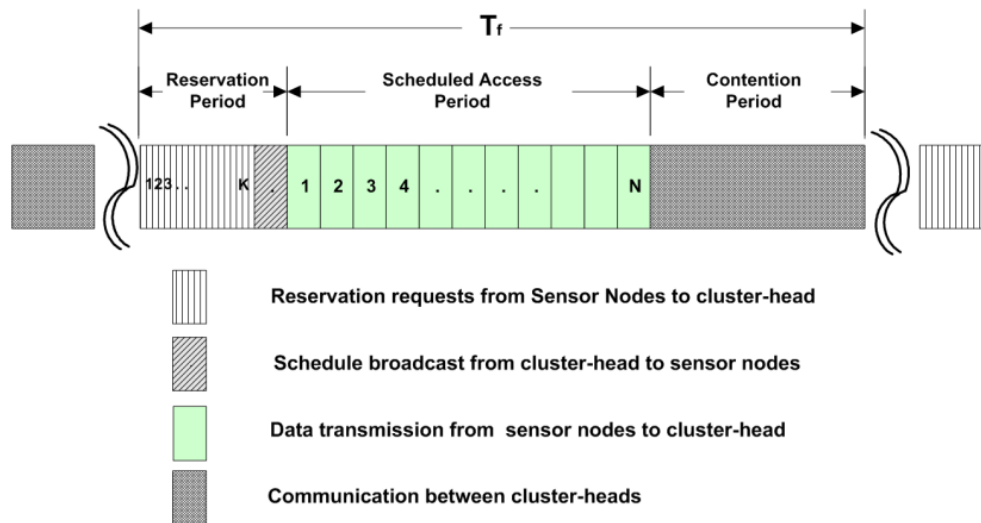


Figura A.3. Ejemplo del protocolo MSAP. [46]

A.3.2. Topología de comunicación

Un enjambre de robot tiene como característica tener una comunicación descentralizada, sin embargo, la topología de la comunicación puede tener nodos “padres” siempre que esté justificado y el procesamiento de información de ese nodo no sea muy elevado. De esta forma, para esta comunicación se propone las siguientes topologías de red.

ya que una red inalámbrica envía la información por medio de ondas electromagnéticas la información llega a todos los nodos y ellos pueden interpretarlo siempre y cuando compartan el mismo protocolo de comunicación.

Por esta razón, esta topología puede ser implementada con un protocolo TDMA, CDMA, CSMA o incluso un protocolo de reservación.

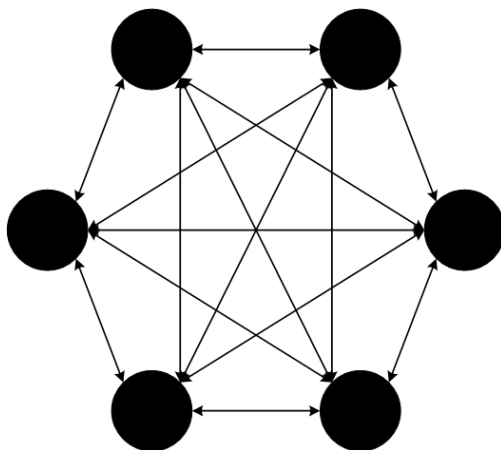


Figura A.6. Topología de red inalámbrica.

A.3.3. Posicionamiento

Trilateración

Esta técnica de posicionamiento se basa en determinar la localización absoluta o relativa de puntos por medio de la medición de distancias. Esta técnica es la base a los sistemas de posicionamiento que conocemos actualmente, por ejemplo, la navegación con la implementación del GPS o la agrimensura, el cual es una disciplina o técnica de medición de tierras. [47]

- GPS: Esta es una técnica que provee información tridimensional de la localización y velocidad de un objeto, típicamente consiste en un arreglo de 24 satélites que son controladas para que mantengan su órbita y periodo de forma correcta. [48], [49]

Para poder implementar este sistema de posicionamiento es necesario agregar un módulo al robot del enjambre, la figura A.7 muestra un posible módulo, el cual es compatible con el microcontrolador STM32 que cuenta el robot de enjambre.



Figura A.7. Módulo GPS GTU7.

- RSSI: Como su nombre lo indica, este método se basa en determinar la distancia entre nodos utilizando la energía recibida de una señal. Para ello, las características del canal deben ser clasificados y cada nodo debe saber la potencia con que se envía la señal. Para utilizar esta técnica se necesitan al menos 3 nodos de referencia en el cual se conoce su posición para un espacio 2D. [48], [50].

Esta técnica resulta atractiva ya que está ampliamente estudiada y es posible implementarla en los robots con el módulo RFM69 que se ha estado utilizando.

- Infrarrojo: Esta técnica está basada en el robot Khepera desarrollado por Jim Pugh en la Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza. En este caso se utiliza un arreglo de transmisores y receptores infrarrojos a lo largo del robot para enviar la información a través de los robots. [51]

Medición directa

Este método de medición se utiliza una vez que se realizan las pruebas de verificación de RSSI del módulo actual, figura 4.24 y 4.25, y se tuvo que realizar una nueva búsqueda de opciones. En el cual se presenta la opción de realizar mediciones directas por medio de sensores con el fin de tener mejor exactitud.

- Ultrasónico: El sensor ultrasónico es altamente conocido por ser de bajo costo, así que se considera que puede ser una opción para futuras versiones de los Atta-Bots. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la resolución no es la mejor si se compara con otros métodos propuestos.

- Infrarrojo: Actualmente los Atta-Bots cuentan con el sensor infrarrojo sharp, en comparación con el sensor ultrasónico tiene mejor exactitud y tiene una mayor tasa de refresco, lo cual permite que se pueda utilizar en objetos en movimiento.
- Láser: En el extremo se tiene utilizar la mayor exactitud, así mismo, los sensores de distancia por medio de láser tiene una tasa alta de lectura y permite utilizarse en aplicaciones móviles y la figura del objeto a medir no va a tener una influencia considerable en las mediciones. Se debe considerar que incrementaría el costo de los Atta-Bots considerablemente.

A.3.4. Algoritmos de comportamiento colectivo

Refiérase a la sección 2.5.



Experimentos

B.1. Datos del diseño de experimentos

Continuando la metodología de diseño se requirió realizar la validación de la solución, considerando las métricas del diseño se desarrollan tres experimentos, los cuales se explican en detalle en la sección 5.1 5.2 5.3, a continuación se presentan los resultados de las muestras corridas.

B.1.1. Experimento desempeño del sistema de comunicación

Para determinar los factores que influyen en el porcentaje de recepción de paquetes en el sistema de comunicación se plantea un DOE tipo factorial completo, a continuación se presenta los resultados del experimento.

- **RB:** Recepción base
- **RN1:** Recepción nodo 1
- **RN2:** Recepción nodo 2
- **RN3:** Recepción nodo 3
- **RN4:** Recepción nodo 4

Tabla B.1. Diseño de experimento factorial completo para el sistema de comunicación, con las respuestas de cada agente.

# réplica	# paquetes	# robots	% recepción				
			RB	RN1	RN2	RN3	RN4
1	1333	2	0.9763	0.9527	0.9542	*	*
1	6666	2	0.9664	0.9329	0.935	*	*
1	1333	4	0.9749	0.9505	0.9462	0.9495	0.9385
1	6666	4	0.9715	0.9356	0.9381	0.9347	0.9324
2	1333	2	0.9670	0.9265	0.9407	*	*
2	6666	2	0.9692	0.9391	0.9374	*	*
2	1333	4	0.9797	0.9455	0.9475	0.9477	0.9487
2	6666	4	0.9697	0.9394	0.9394	0.934	0.9407
3	1333	2	0.9699	0.9445	0.9422	*	*
3	6666	2	0.9693	0.9346	0.9376	*	*
3	1333	4	0.9769	0.951	0.9465	0.947	0.9492
3	6666	4	0.9704	0.9373	0.9391	0.9306	0.934
4	1333	2	0.9719	0.9445	0.9505	*	*
4	6666	2	0.9629	0.9278	0.9373	*	*
4	1333	4	0.9756	0.941	0.9385	0.9415	0.931
4	6666	4	0.9686	0.9379	0.9377	0.9378	0.9365
5	1333	2	0.9705	0.9385	0.9415	*	*
5	6666	2	0.9665	0.9371	0.9379	*	*
5	1333	4	0.9752	0.9455	0.9492	0.9482	0.9392
5	6666	4	0.9713	0.9373	0.9422	0.9331	0.9396

Tabla B.2. Porcentaje de recepción de la base del sistema de comunicación

# paquetes	# robots	% recepción				
		1	2	3	4	5
1333	2	97.63	96.70	96.99	97.19	97.05
6666	2	96.64	96.92	96.93	96.29	96.65
1333	4	97.49	97.97	97.69	97.56	97.52
6666	4	97.15	96.97	97.04	96.86	97.13

Tabla B.3. Porcentaje de recepción de un nodo del sistema de comunicación

# paquetes	# robots	% recepción				
		1	2	3	4	5
1333	2	95.27	92.65	94.45	94.45	93.85
6666	2	93.29	93.91	93.46	92.78	93.71
1333	4	95.05	94.55	95.10	94.10	94.55
6666	4	93.56	93.94	93.73	93.79	93.73

B.1.2. Experimento actualización de ubicación real

Tabla B.4. Distancia de error entre posición real y presentada por el robot

Velocidad	Tipo Movimiento	Desplazamiento	Distancia (mm)				
			1	2	3	4	5
120	Lineal	400	70	76	82	93	59
170	Lineal	400	72	86	89	58	50
120	Curvilíneo	400	135	147	148	145	139
170	Curvilíneo	400	*	*	*	*	*
120	Lineal	1000	98	226	209	134	137
170	Lineal	1000	219	227	222	206	233
120	Curvilíneo	1000	257	260	206	261	267
170	Curvilíneo	1000	272	276	267	284	272

B.1.3. Experimento algoritmo de exploración colectiva

Tabla B.5. Porcentaje de éxito del algoritmo de comportamiento colectivo

Velocidad	Cant. robots	% Éxito				
		1	2	3	4	5
120 mm/s	3	100	66,67	100	66,67	66,67
170 mm/s	3	100	0	100	66,67	66,67