

# Robot swarm development as a learning tool

## Desarrollo de enjambre de robots como herramienta de aprendizaje

Freddy S. Pincay, Msc.<sup>1</sup>, Annabelle S. Lizaraburu, MG.<sup>1</sup>, Sandra E. Tello, MG.<sup>1</sup>, Zoila A. Vera, MG.<sup>1</sup>, Eduardo F. Baidal, MG.<sup>1</sup>, Oswaldo O. Arauz, MG.<sup>1</sup>, Angel M. Plaza, Msc.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Guayaquil, Ecuador, [freddy.pincayb@ug.edu.ec](mailto:freddy.pincayb@ug.edu.ec), [annabelle.lizaraburum@ug.edu.ec](mailto:annabelle.lizaraburum@ug.edu.ec), [sandra.telloar@ug.edu.ec](mailto:sandra.telloar@ug.edu.ec), [zoila.verap@ug.edu.ec](mailto:zoila.verap@ug.edu.ec), [eduardo.baidalb@ug.edu.ec](mailto:eduardo.baidalb@ug.edu.ec), [oswaldo.arauza@ug.edu.ec](mailto:oswaldo.arauza@ug.edu.ec), [angel.plazav@ug.edu.ec](mailto:angel.plazav@ug.edu.ec)

*Abstract— Robotics presents essential opportunities and tools for educational purposes, which allows students to be involved in learning within heterogeneous knowledge environments, and helps to relate domains such as computer science, artificial intelligence, human sciences, social sciences and art. Robots can be used for different purposes, from simple tools to program with some specific behavior, to being companions with whom to engage in fruitful interaction for the purpose of collaborative learning. The objective of this research is to develop a swarm prototype of autonomous robots as an educational tool to improve the learning of robotics and programming. Low-cost equipment and materials based on the Node MCU Esp8266 microcontroller were used for the construction of the swarm. At the end of the work, a basic robust, scalable and flexible swarm model is available that allows combining several specific behaviors, which can be selected autonomously depending on the environment, and that can be transferred to physical robotic systems with the aim of solve different tasks related to different application areas in real environments*

**Keywords--** Robots, swarm, robotics, learning, esp8266

*Resumen – La robótica presenta oportunidades y herramientas esenciales para fines educativos, lo que permite involucrar a los estudiantes en el aprendizaje dentro de ambientes heterogéneos de conocimiento, y permite relacionar dominios como la informática, inteligencia artificial, ciencias humanas, sociales y arte. Los robots se pueden utilizar con diferentes propósitos, desde simples herramientas para programar con algún comportamiento específico, hasta ser compañeros con los que entablar una interacción fructífera con un propósito de aprendizaje colaborativo. La presente investigación tiene como objetivo el evaluar un prototipo de enjambre de robots autónomos como herramienta educativa para el mejoramiento del aprendizaje de la robótica y programación. Para la construcción del enjambre se usaron equipos y materiales de bajo costo basados en el microcontrolador Node MCU Esp8266. Al concluir el trabajo se dispone de un modelo básico de enjambre robusto, escalable y flexible que permita combinar varios comportamientos específicos, los cuales puedan ser seleccionados de manera autónoma en función del entorno, y que pueda ser transferido a sistemas robóticos físicos con el objetivo de resolver en entornos reales diferentes tareas relacionadas con distintas áreas de aplicación.*

**Keywords—** Robots, enjambre, robótica, aprendizaje, esp8266.

### I. INTRODUCCIÓN

Determinamos como robótica de enjambres una rama de la robótica colectiva, que abarca desde el diseño de piezas, movimientos, patrones, secuencias, iteraciones, estrategias hasta la coordinación y desempeño de pequeños o grandes grupos de robots, tomando de referencia o inspiración el comportamiento de enjambres naturales. La misma que se origina a partir de la idea de que se puede crear y replicar comportamiento de especies en un sistema multi-robot, así pudiendo buscar que estos exhiban las mismas cualidades de supervivencia y flexibilidad observado en la naturaleza real de los enjambres. Desde la perspectiva de vista de la Ingeniería, se desea que estos pequeños grupos replicados, cumplan con múltiples propósitos y resolver problemas del mundo real trabajando de manera colectiva, reduciendo así pruebas exhaustivas con especies de animales reales. [1]

El uso de múltiples robots que interactúan para resolver un problema común puede apoyar el aprendizaje de conceptos relacionados con la cooperación y las acciones colectivas y puede hacer accesibles nociones sobre sistemas complejos que son comunes en las ciencias físicas, biológicas, económicas y sociales. Además, la posibilidad de interactuar y participar en el comportamiento colectivo que muestra el enjambre de robots puede aumentar considerablemente la comprensión y el compromiso con el concepto propuesto. De acuerdo con esta propuesta, se plantea un conjunto de procesos para la aplicación de la robótica de enjambre con fines educativos, el diseño del prototipo robótico tiene como base el denominado Micromouse [2] [3] [4], adaptado como un robot educativo simple pero versátil y que presenta todas las características necesarias para la experimentación de la robótica de enjambre.

Los principios de la robótica en enjambre son inspirados normalmente en el comportamiento de insectos sociales que trabajan en grupo; como abejas, hormigas, etc. Para un solo fin como ejemplo la búsqueda de comida o exploración del área en el cual se encuentran o habitaran en un futuro, cada una de ellas usando distintas maneras de marcar, reconocer y memorizar áreas, como el uso de sustancias que ellas mismas segregan para atraer a otra de su especie, o feromonas. [5]

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.621>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

Se ha verificado que determinadas especies hacen uso natural de feromonas como estrategia para reconocer el rastro del camino entre una fuente de alimento. De esta manera, aplicado al desarrollo del enjambre se entiende que en cadena de trabajo colectivo lo principal es que siempre exista una auto organización entre los mismos, y un principal líder (reina) o encargado de ejercer la mayor parte de la función, el mismo que actuará como el principal responsable de delegar cada orden, y el resto de individuos que conforman el enjambre se encargará de ejecutarla con algunas decisiones individuales, no obstante evaluando los factores que influyen en el entorno en el que se encuentra y puedan alterar dicha decisión. [6] [7]

Un factor importante en la propuesta es la aplicación de algoritmos de Machine Learning en el proceso de la toma de decisiones de los elementos del enjambre [8], como propósito complementario dentro de la investigación se pretende mostrar ejemplo del uso de un agente computacional entrenado por otro grupo de investigación, de tal forma que los estudiantes de este nivel usen el conocimiento generado por un curso más avanzado como parte de la evaluación de sus prototipos de enjambre, aplicando sus conocimientos de electrónica, robótica y programación.

Como parte de planteamientos adicionales que se proponen desarrollar como complementos en la presente investigación se mencionan la opción de implementar una posible red de comunicación interna, reconocible y asociable para el entendimiento mutuo de los integrantes del enjambre [1] [7] y prepara el campo de acción para evaluar el uso de algoritmos y herramientas de programación para basados en aprendizaje reforzado, para experimentar con diferentes escenarios usando los prototipos de enjambre. [9]

## II. ANTECEDENTES

Durante estos últimos años, el aporte a la investigación en el área de la robótica ha tenido como objetivo buscar arduamente y encontrar soluciones a necesidades técnicas de la robótica aplicada y colectiva, la evolución de los campos en la que esta se aplica.

### A. *Enjambre de robots*

Tomando en consideración la organización de los insectos sociales, tales como las hormigas, abejas y termitas, y en la formación de los cardúmenes de peces y bandadas de aves en vuelo, la robótica de enjambres es un campo de estudio que pretende desarrollar los mejores caminos computacionales para que los robots puedan intercambiar información entre sí y actuar en conjunto, de acuerdo con un objetivo común para el cual fueron programados. La robótica de enjambres ofrece perspectivas de uso tanto en sitios cerrados como abiertos, como por ejemplo en el mar, para la inspección y la reparación de plataformas submarinas y en el monitoreo marítimo y aéreo, con drones dotados de sistemas para vigilar las fronteras.

Una definición cercana de enjambre de robots afirma que “La robótica de enjambre es el estudio de cómo se puede diseñar una cantidad relativamente simple de agentes físicamente encarnados en un sistema de comportamientos colectivos deseados”, y estos desarrollan interacciones locales entre los individuos que se encuentran en el medio en el que se desenvuelven. Es importante que se emplee una forma eficiente de comunicación, requisito necesario para permitir la cooperación y trabajo en conjunto entre los miembros del enjambre. [10]

### B. *Autonomía de robots*

Durante el proceso llamado “autonomía” los robots participan y producen interacciones inteligentes con los otros involucrados en su entorno, a través de movimientos preestablecidos que involucran una detección y percepción de un objeto que se interponga. Estas capacidades están directamente involucradas con la capacidad de procesamiento de la información que recibe el individuo. Los sensores son el factor principal para la operación de la autonomía en robots, debido a que los mismos asemejan a los sentidos de percepción de los seres vivos. [11] [12]

### C. *Robótica colectiva*

Esta tendencia consiste en el trabajo colectivo de robots que formando un sistema multiagentes, buscan resolver algún tipo de problema. Este puede ser colectivo, es decir, que requiera más de un robot para ser resuelto, o simplemente verse beneficiado por una solución colectiva, aunque no se requiera de forma específica. Este enfoque se basa en una serie de mecanismos, como por ejemplo, objetivos colectivos, que actúan a modo de control del comportamiento de un grupo de individuos, y estos interactúan entre sí utilizando la información de su entorno.

Aunque en última instancia la utilidad de este tipo de sistemas dependa de la tarea a realizar, existen numerosos casos en que es beneficioso utilizar este tipo de enfoque. Las principales ventajas de este tipo de sistemas serían:

- Resolución de tareas que ser la imposibles para un solo robot.
- Resolución de tareas complejas mediante su división en tareas más sencillas.
- Sensorización y realización de acciones distribuidas.
- Aumento del rendimiento global.
- Mejorar la robustez y la tolerancia ante fallos.
- Versatilidad, flexibilidad y escalabilidad.
- Mayor adaptabilidad ante cambios en el entorno.

De acuerdo con lo que menciona Daniel López Enseñat, este tipo de robótica se refiere a un grupo de robots que interactúan entre sí pero no necesariamente han de colaborar explícitamente para realizar una tarea. La solución del problema está ligado al concepto de inteligencia colectiva, es decir, que el problema es resuelto gracias al comportamiento como grupo de los individuos implicados. Esta inteligencia

hace que el sistema desarrollado sea más robusto, ya que al existir varios robots pueden repartirse las tareas y conseguir solucionar el problema con una mayor tasa de éxito. Por consiguiente, es más eficiente tener varios robots simples realizando una tarea que un único robot más complejo. En robótica colectiva, cada individuo puede ser programar de forma diferente, es decir, cada uno tiene su propia inteligencia. Además, tienen capacidad de comunicación y, por tanto, de coordinación y cooperación. [9]

#### D. Aprendizaje por Refuerzo

El aprendizaje por refuerzo o aprendizaje reforzado es un tipo de algoritmos de Machine Learning del área del aprendizaje automático, inspirado en la psicología conductista, intenta determinar qué acciones debe escoger un agente de software en un entorno dado con el fin de maximizar alguna noción de "recompensa" o premio acumulado. El problema, por su generalidad, se estudia en muchas otras disciplinas, como la teoría de juegos, teoría de control, investigación de operaciones, teoría de la información, la optimización basada en la simulación, estadística y algoritmos genéticos. [12]

Desde cierto punto de vista este tipo de algoritmos puede considerarse una forma de algoritmos supervisados, donde el agente va a recibir una "etiqueta" (la recompensa). Sin embargo, esta etiqueta no es la "verdad fundamental" (ground truth) asociada a su comportamiento, solo es un indicador de cuan bien o mal ha realizado su acción. A medida que recibe recompensas, el agente debe desarrollar la estrategia correcta denominada como política (policy), que le permite obtener recompensas positivas en todas las situaciones posibles. [13] [14]

Una de las particularidades que han repercutido en el uso tan extendido de esta familia de algoritmos es su flexibilidad para modelar arquitecturas diferentes, característica que proviene de su carácter modular. Su funcionamiento se basa en el uso de unidades funcionales básicas dispuestas de forma organizada en capas, conectando las salidas y entradas entre dichas capas. [15].

La configuración escogida para las unidades funcionales y la conexión que se establezca entre las distintas capas establece una arquitectura particular que, sometida a un entrenamiento, implementará una superficie n-dimensional específica. Los entornos de trabajo para Aprendizaje Automático existentes en la actualidad aprovechan esta naturaleza modular y combinatoria para permitir implementar de manera ágil y flexible diferentes arquitecturas de forma parametrizada, de forma además optimizada para que tanto su entrenamiento como posterior uso como modelos sea eficiente y paralelizable, optimizando el tiempo de ejecución. Tanto es así hasta el punto en que un gran cantidad de proyectos de investigación y/o de desarrollo se centra parcial o íntegramente en el análisis exhaustivo de distintas configuraciones y arquitecturas para estudiar su rendimiento en la resolución de un problema particular. [16] [17]



Figura 1 - Esquema del aprendizaje por refuerzo

El aprendizaje por refuerzo propone un nuevo enfoque para hacer que el sistema computacional aprenda, para ello, postula los siguientes componentes:

- El Agente: Consiste en el modelo que se quiere entrenar y que aprenda a tomar decisiones.
- Ambiente: Consiste en el entorno en donde interactúa y "se mueve" el agente, el ambiente contiene las limitaciones y reglas posibles a cada momento.

Entre estos dos elementos del aprendizaje por refuerzo [12], hay una relación que se retroalimenta y cuenta con los siguientes nexos (Figura 1):

- Acción: las posibles acciones que puede tomar en un momento determinado el agente.
- Estado (ambiente): son los indicadores del ambiente de cómo están los diversos elementos que lo componen en ese momento.
- Recompensas: Por efecto de cada acción tomada por el Agente, se determina un premio castigo de valor numéricos de tal forma que el sistema de cómputo lo pueda cuantificar y determinar si la acción fue correcta o incorrecta.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del prototipo de enjambre y la evaluación del uso de las redes neuronales en el proceso de toma de decisiones del enjambre se caracteriza por ser un estudio de carácter cuasiexperimental, que se enmarcó en los siguientes pasos:

- 1) Diseño de los robots autónomos mediante los software TinkerCAD y SolidWorks.
- 2) Evaluación de equipos y materiales de bajo costo para el desarrollo del prototipo.
- 3) Construcción del conjuntos de robots autónomos a usar en la evaluación.
- 4) Desarrollo de la interface de control.
- 5) Validación del sistema de comunicaciones.
- 6) Pruebas de ensayos
- 7) Adquisición y análisis de datos
- 8) Generación De resultados

#### A. Componentes del robot

La placa principal de desarrollo del proyecto "enjambre autónomo", de uso esencial en IoT similar a Arduino, esta

tarjeta está totalmente basada en el SoC (System on Chip), posee un chip de procesamiento integrado de arquitectura de 32 bits y dualidad con el sistema de WiFi, de esta manera convirtiéndolo en una potente placa a un precio económico.

**Tabla 1 - Elementos que integran el robot**

COMPONENTE	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
Node MCU ESP8266	Voltaje de Entrada: 5v DC Voltaje de Salida: 3.3 v DC CPU: Tensilica Xtensa LX3 (32 bits) Frecuencia de Reloj: 80MHz/160MHz Data RAM: 96KB Memoria Flash Externa: 4MB Pines Digitales GPIO: 17 UART: 2 Chip USB – Serial: CP2101 Antena: En PBC Estándar: 802.11 b/g/n Tipo de trabajo: Wi-Fi Direct (P2P), soft-AP
Servo Motor sg90	Velocidad de avance: 0.1 seg/60 grados Torque: 1.2 Kg por cm Ancho de pulso actuador: 4useg Voltaje de operación: 3 – 5V Peso de servo: 9g Engranajes: Plástico Dimensión: 22*11.5*27mm
Sensor FC-51 Modulo detector de obstáculos	Número de modelo: FC-51 Ángulo de cobertura: 35 ° Voltaje de funcionamiento: 3.0V – 6.0V Rango de detección: 2 cm – 30 cm (ajustable con el potenciómetro) Dimensión total: 4,5 cm (L) x 1,4 cm (W), 0.7cm (H) Consumo actual: en 3.3V: ~ 23 mA Consumo actual: en 5.0V: ~ 43 mA
Batería LIPO 3C 500 mAh	Batería Lipo Turnigy 11.1V – 500mAh Lipo 3S 20C
Estabilizador de energía Integrado 7805	Capacidad de regular el voltaje positivo de 5V a 1A de corriente, reduciendo daños por oscilaciones en los niveles de tensión.

**B. Diseño del robot**

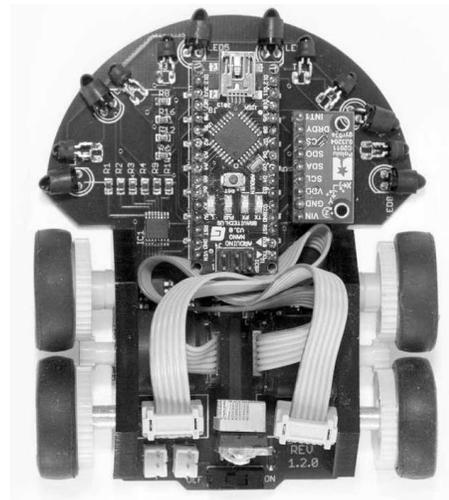
Para la configuración del movimiento se optó por un diseño similar a los robots Micromouse de competencias de laberintos, este se muestra a continuación para nuestros individuos del enjambre. [18] [19] [20].

Los Micromouse se encuentran entre los robots autónomos con mejor rendimiento, son extremadamente ágiles y veloces que pueden llegar a alcanzar velocidades de alrededor de 5 m/s, dependiendo del diseño del ambiente donde se desenvuelvan. Los diseños de robots más recientes han sido equipados con un ventilador capaz de generar un vacío parcial debajo del Micromouse, permitiendo el incremento del rendimiento de forma notable (Figura 2).

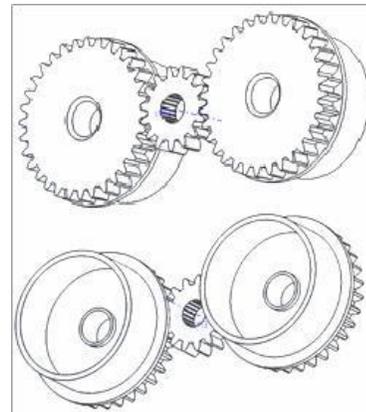
Un Micromouse está formado por un conjunto de componentes relativamente simple, pero que debe estar perfectamente estudiado para obtener un sistema equilibrado y

competente, entre los componentes principales del robot se mencionan:

- **Sensores:** Se seleccionó el modelo FC -51 por su relación calidad – precio y sensibilidad de respuesta en su funcionamiento, el mismo que a pesar de carecer precisión comparado al resto, con un perfecto encaje al individuo.
- **Motores:** Uno de los problemas al momento de seleccionar los motores, fue que la mayoría son de funcionamiento independientes (necesitan una fuente externa para ser controlados y no obstante un controlador que le permite saber qué dirección tomar), en este caso se optó por un servo.
- **Llantas:** Se elaboraron las llantas mediante un molde de silicona y el uso de algunos catalizadores, se tomó como base el diseño de los engranajes (Figura 3). [21]



**Figura 2 - Tracción Micromouse**



**Figura 3 - Modelado 3D de las llantas**

Cada robot que pertenece al enjambre dispone de los siguientes componentes:

- 2 servo motores sg90.
- 1 modulo Esp8266.

- 4 sensores Infrarrojos FC-51.
- 1 Shield de Esp8266 con regulador incluido.
- 1 kit de llantas.
- 1 kit de engranajes y piñones clonados.

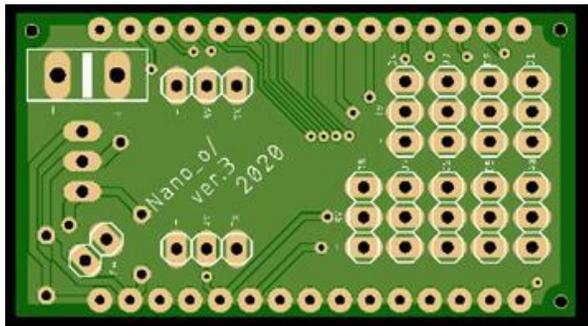


Figura 4 - Placa PCB del controlador

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266WiFiMulti.h>
ESP8266WiFiMulti wifiMulti;
#endif

//Protocolo de comunicacion
#include <MQTT.h>

//Podemos agregar varias redes
//esto nos permitirá tener mas
//cobertura en un area muy extenso
const char ssid1[] = "ARLR";
const char pass1[] = "08032020";
const char ssid2[] = "LTSL";
const char pass2[] = "220000";
const char ssid3[] = "NANO";
const char pass3[] = "pass";

WiFiClient net;
MQTTClient client;
unsigned long lastMillis = 0;
int ejecucion = 5;

void Conectar() {
  Serial.print("Conectando a Wifi...");
  while (wifiMulti.run() != WL_CONNECTED) {
    Serial.print(".");
    delay(1000);
  }
  Serial.print("\nConectado a MQTT...");

  //La variedad de clientes que podemos agregar
  while (!client.connect("Neuronas", "Nano")) {
    Serial.print(".");
    delay(1000);
  }

  Serial.println("\nConectado MQTT!");

  client.subscribe("/ALSW/Clasificar");
}
```

Figura 5 – Codificación de conexiones

Como complemento final en el desarrollo de los prototipos de robots para el enjambre, se usaron las placas PBC ya elaboradas en proyectos anteriores (figura 4). El

diseño de estas placas corresponde al desarrollo de prototipos de robots para futuras competencias a nivel nacional.

```
Serial.println("\nConectado MQTT!");

client.subscribe("/ALSW/Clasificar");
}

void RecibirMQTT(String &topic, String &payload) {
  Serial.println("Recivio: " + topic + " - " + payload);
  if (payload == "Alertar") {
    Serial.println("Movimiento de robot lider");
    digitalWrite(Led, 0);
  } else if (payload == "Apagar") {
    Serial.println("Off en lider");
    digitalWrite(Led, 1);
  }
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(Led, OUTPUT);
  digitalWrite(Led, 1);
  Serial.println("Iniciando Wifi");
  WiFi.mode(WIFI_STA); //Cambiar modo del Wi-Fi
  delay(100);
  wifiMulti.addAP(ssid1, pass1);
  wifiMulti.addAP(ssid2, pass2);
  wifiMulti.addAP(ssid3, pass3);

  client.begin("broker.shiftr.io", net);
  client.onMessage(RecibirMQTT);

  Conectar();
}

void loop() {
  client.loop();
  delay(10);

  if (!client.connected()) {
    Conectar();
  }
}
```

Figura 6 – Codificación del proceso inicial

### C. Desarrollo de la Interfaz

Con la gran popularidad que han adquirido los diferentes algoritmos de Aprendizaje basados en Machine Learning han surgido gran cantidad de librerías y frameworks que recopilan capas, estructuras y funciones implementadas de la temática para facilitar el diseño, las pruebas e incluso el despliegue de diferentes entornos y arquitecturas.

En este trabajo se ha empleado algunas de ellas para llevar a cabo las implementaciones y analizar su efectividad previo a una integración en dispositivos de bajo consumo. Durante el desarrollo de la Interfaz a utilizar se ha especificado cuáles serán los parámetros que darán ventajas o desventajas al momento de empezar su ejecución.

Para llevar a cabo el entrenamiento y análisis de los modelos, se requiere del uso de unidades de procesamiento de alto rendimiento que aceleren el proceso a unos niveles viables para la investigación. Las unidades de procesamiento gráfico de NVIDIA con tecnología CUDA son unos de los recursos más usados en la actualidad para estos fines. Sin embargo, el desarrollo de tecnología aplicada a microcontroladores como los ARM, para los cuales se ha desarrollado un conjunto de utilidades para la conversión e integración optimizada de

modelos de Redes Neuronales Artificiales generados a partir de otros frameworks de diseño y entrenamiento, entre los que se encuentra Tensorflow y Keras. [22] [23]

El framework permite la creación de proyectos adaptados al microcontrolador empleado, y el paquete lo complementa con funcionalidades para la conversión de los modelos pre entrenados en versiones anteriores y su posterior compilación para el microcontrolador. En los estudios presentados se han empleado estos frameworks y herramientas, e integrado los modelos en placas ARM. [22] [23]



Figura 7 Interfaz del sistema agente

#### D. Arquitectura de comunicación



Figura 8 - Sistema de identificación de Objetivos

La arquitectura de software (figura 5) abarca desde la conexión interna o externa que permitirá el correcto funcionamiento y desempeño del prototipo. Se cuenta con un equipo portátil como centro de control del enjambre. La comunicación de nuestro control (ordenador) a los individuos (Microcontrolador) será por medio de comunicación inalámbrica Wi-Fi, los mismos que tiene preestablecidos movimientos acorde a sus sensores y situaciones. Los datos serán interpretados por el ordenador y ejecutará a cada individuo una orden, estos a su vez cumpliendo su comportamiento colectivo como enjambre. [24] [25] [26]

#### E. Proceso de adquisición de datos

Mediante gráficos se representa la ejecución de pequeñas pruebas que determinará el comportamiento del enjambre por cada individuo, así verificando la respuesta de comportamiento o ejecución de tarea acorde al desempeño del mismo. En la figura 2, se observa el área en el cual se desenvolverán los elementos del enjambre, corresponde desde el punto del círculo exterior de medidas de 90 cm de diámetro, el círculo medio de 60 cm y el interno de 10 cm.

Por medio de ejecución pruebas y errores se conoce el correcto desempeño de los primeros modelos, se observa el funcionamiento del sistema corriendo y ejecutado a cada elemento que corresponde al enjambre, a continuación, damos una descripción de los tiempos que estos tardan en realizar una operación preestablecida en su sistema de procesamiento.

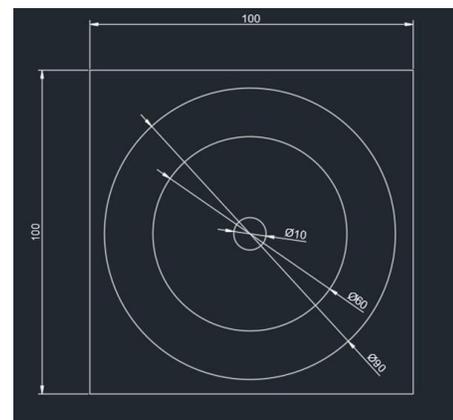


Figura 9 - Sistema de identificación de Objetivos

Por lo tanto, se podrán obtener parámetros como posibles resultados, a su vez estos podrían ser modificados para una mejora continua de sus movimientos, estos podrán variar según las circunstancias en las que se encuentren. No pretendemos guardar información alguna de circunstancias debido a que las mismas pueden ser aleatorias en cualquier momento o situación, así reduciendo las operaciones que este pueda realizar.

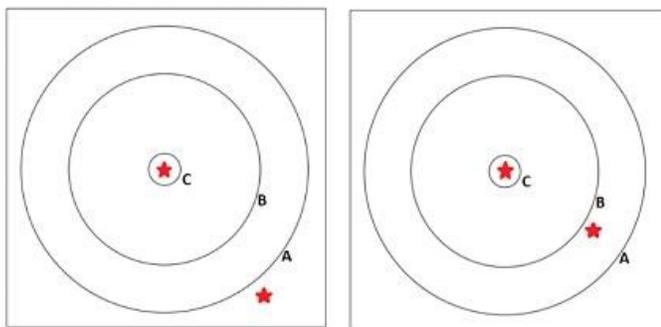
Los datos serán descritos con medidas de variables lingüísticas para reducir valores que solo son válidos para la elaboración y mejora del mismo, como parte de las pruebas.

**Tabla 2 - Variables lingüísticas para simplificar valores**

Variable	Descripción
R	Rapido
NA	Medio
NO	Normal
LI	Bajo
BI	Super bajo

**E. Análisis de pruebas individuales**

En las pruebas realizadas al primer robot, desde el punto A al punto C observamos que la respuesta de ejecución de realizar un movimiento para emprender la trayectoria aleatoria apenas se detecta o envía la información desde la central. Resultado: BI.

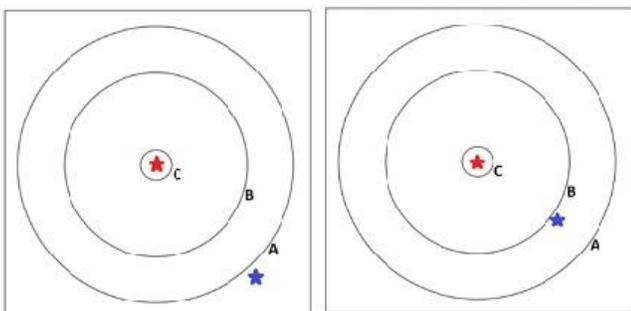


**Figura 10 - Pruebas individuales robot 1**

En las pruebas realizadas al primer robot, desde el punto B al punto C observamos que en respuesta después de detectar la información, este realiza un movimiento de trayectoria aleatoria. Resultado: NO

En las pruebas realizadas al segundo robot, luego de tomar en consideración los problemas del primero, este emplea la trayectoria desde el punto A al punto C dando así que en respuesta a la ejecución de la orden por parte del sistema central. Resultado: LI.

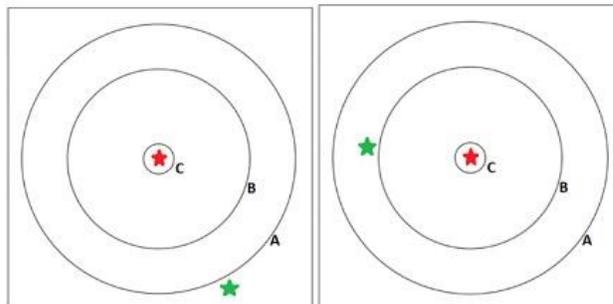
En la segunda prueba al robot dos tratando de mejorar los resultados, se observa que en ejecución en trayectoria del punto B al punto C sigue siendo aleatoria pero logra llegar a su punto destino. Resultado: NO.



**Figura 11 - Pruebas individuales robot 2**

En las pruebas realizadas al tercer robot, con consideraciones de los anteriores modelos, este realiza la

trayectoria desde el punto A al punto C, dando así una mejor respuesta a la ejecución de la orden por parte del sistema central. Resultado: NO. En la segunda prueba se evidencia mayores cambios, mejorando su rendimiento. Resultado: NA.

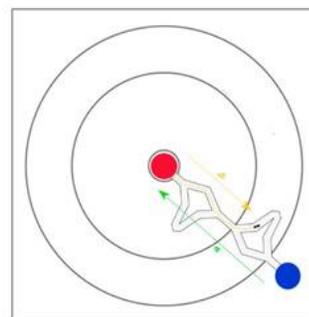


**Figura 12 - Pruebas individuales robot 3**

En consideración al diseño Cuasi experimental de las pruebas que se realizaron a los bots que conforman el enjambre, se realizan algunas modificaciones durante las pruebas. Estas modificaciones mejoran el proceso de búsqueda de solución para que estos pueden generar una mejor coordinación de movimientos en respuestas a las acciones que son tomadas por el usuario por medio del mando principal del ordenador, el mismo que toma las instrucciones por determinación del algoritmo que se usó para la experimentación.

Los resultados durante las pruebas son de óptimas condiciones lo cual hace que los robots del enjambres se comporten de forma adecuada y mantengan movimientos coordinados para cumplir un objetivo en específico. Los valores que corresponden a cada individuo solo pertenecen al usuario dado que los mismos son solo para el desarrollo y mejoramiento de los prototipos, cada uno mostró errores al principio que fueron solucionados en cada prueba hasta así dar con una mejora final.

**III. RESULTADOS**

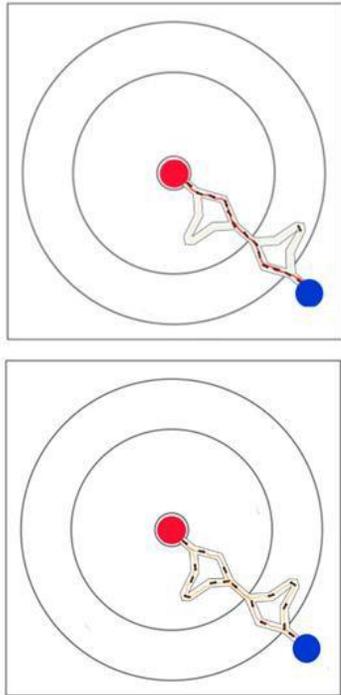


**Figura 13 - Proceso de marcado el recorrido**

Como se especificó al principio de la propuesta, los enjambres están basados en movimientos colectivos que realizan los individuos que pertenecen a él, estos

comportamientos son patrones que naturalmente son parte de las especies que lo conforman, para el control de este proceso los insectos segregan feromonas para que los demás miembros puedan seguir su ruta.

Tomando este comportamiento en consideración para el desarrollo del proyecto se replicó este comportamiento, un robot principal se encargó de fijar una ruta a seguir y el resto de elementos del enjambre, como se muestra en la figura 10.



**Figura 14 - Ejemplos de seguimiento de la ruta especificada por cada uno de los individuos del enjambre**

Como se puede observar en la figura 11, se evaluó el comportamiento de los robots que conforman el enjambre, dentro de su proceso de aprendizaje basado en la ruta ya planificada por el “robot reina”, gracias al entrenamiento previo el resultado obtenido fue adecuado a los objetivos planteados al inicio del proyecto.

Dentro de la propuesta planteada a los estudiantes que formaron parte del estudio, se cumplió con los siguientes retos planteados como proceso de colaboración:

- Probar los diferentes microcódigos propuestos en el proyecto, evaluando, modificando y ejecutando en el ambiente de prueba.
- Se comprobó la carga de código en el micro de cada uno de los robots del enjambre.
- Utilizar librerías y frameworks proporcionados como parte del entrenamiento y revisión de los modelos de algoritmos ya elaborados de aprendizaje por refuerzo.
- Unificar y evaluar resultados usando los prototipos de prueba proporcionados.

- Presentar resultados y proponer mejoras.

## II. CONCLUSIONES

Como planteamiento inicial para el desarrollo del presente proyecto, se pretendía usar los prototipos y los elementos elaborados en tres áreas específicas del proceso de enseñanza aprendizaje dentro de nuestra unidad académica, los cuales menciono a continuación:

- Se cumplió con la propuesta de desarrollo de un diseño de bajo costo para el desarrollo de pequeños robots programables como parte del enfoque práctico de la materia del área de electrónica y programación microcontroladores, las mejoras propuestas al diseño permitirán ahorrar en componentes y mejorar los movimientos.
- Se cumplió con la propuesta de evaluar microcódigos dentro de la programación de los elementos del enjambre, esto permitirá ampliar prácticas donde el estudiante proponga cambios en este código funcional, el grupo de programación empezó la construcción de un repositorio de códigos para futuros grupos y pruebas.
- Se cumplió con el desarrollo de diseños de elemento 3D, la prueba de diversas opciones y materiales y el uso de la impresora 3D disponible, al mejorar el diseño electrónico del prototipo se pretende disminuir los costos de materiales de las impresiones 3D.
- Se pudo validar la interfaz desarrollada por el grupo del semestre pasado para controlar y validar las órdenes enviadas al enjambre. Se recopiló un conjunto de propuestas por parte de los estudiantes para mejorar la comunicación y el entrenamiento.
- Se pudo aplicar un conocimiento básico del uso de algoritmos de aprendizaje por refuerzo, se espera ampliar su uso en diversas áreas en los cursos superiores, se concluyó que se requiere más espacio de tiempo para emplear en otros ambientes las propuestas de código. Este ámbito se ampliará en los próximos semestres en la materia respectiva.
- El siguiente paso es ampliar el número de elementos del enjambre y el uso de una red P2P en el proceso de comunicación inalámbrico.

## REFERENCES

- [1] Rais Martínez, Jasmina. "Computación evolutiva en comportamientos de robótica de enjambre." (2021).
- [2] Eckert, L., Piardi, L., Lima, J., Costa, P., Valente, A., & Nakano, A. (2019, April). 3d simulator based on simtwo to evaluate algorithms in micromouse competition. In World Conference on Information Systems and Technologies (pp. 896-903). Springer, Cham.
- [3] Chivarov, N., Yovkov, S., Chivarov, S., Tosheva, I., Pleva, M., & Hladek, D. (2021, November). NITRO Educational Mobile Robot Platform for Maze Solving and Obstacle Avoidance. In 2021 19th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA) (pp. 70-75). IEEE.

- [4] Zawadniak, P. V., Piardi, L., Brito, T., Lima, J., Costa, P., Monteiro, A. L., ... & Pereira, A. I. (2021). Micromouse 3D simulator with dynamics capability: a Unity environment approach. *SN Applied Sciences*, 3(2), 1-11.
- [5] Long, Nathan K., et al. "A comprehensive review of shepherding as a bio-inspired swarm-robotics guidance approach." *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence* 4.4 (2020): 523-537.
- [6] Hamann, Heiko. "Swarm robotics: A formal approach." (2018).
- [7] Díaz, Álvaro Díez. "Aprendizaje por Refuerzo para Robótica de Enjambre."
- [8] Nedjah, Nadia, and Luneque Silva Junior. "Review of methodologies and tasks in swarm robotics towards standardization." *Swarm and Evolutionary Computation* 50 (2019): 100565.
- [9] Reyes, Bryan, et al. "Diseño de un agente robótico especializado en búsqueda de objetivo común basado en sistemas de robótica de enjambres." *UTCiencia* "Ciencia y Tecnología al Servicio del pueblo" 5.1 (2018): 21-29.
- [10] Dorigo, Marco, et al. "Evolving self-organizing behaviors for a swarm-bot." *Autonomous Robots* 17.2 (2004): 223-245.
- [11] Sam, Shuzhi, Ge Frank, and L. Lewis. "Autonomous Mobile Robots: Sensing Control." *Decision Making and Applications* (2006).
- [12] López Enseñat, Daniel. "Desarrollo de herramientas para aplicaciones de coordinación en robótica colectiva." (2019).
- [13] OJHA, Varun Kumar; ABRAHAM, Ajith; SNÁSEL, Václav. Metaheuristic design of feedforward neural networks: A review of two decades of research. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2017, vol. 60, p. 97-116.
- [14] BUHRMESTER, Vanessa; MÜNCH, David; ARENS, Michael. Analysis of explainers of black box deep neural networks for computer vision: A survey. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 2021, vol. 3, no 4, p. 966-989.
- [15] Sarikhani, R., & Keynia, F. (2020). Cooperative spectrum sensing meets machine learning: Deep reinforcement learning approach. *IEEE Communications Letters*, 24(7), 1459-1462.
- [16] ALOYSIUS, Neena; GEETHA, M. A review on deep convolutional neural networks. En 2017 international conference on communication and signal processing (ICCSP). IEEE, 2017. p. 0588-0592.
- [17] Mason, K., & Grijalva, S. (2019). A review of reinforcement learning for autonomous building energy management. *Computers & Electrical Engineering*, 78, 300-312.
- [18] YADAV, Samir S.; JADHAV, Shivajirao M. Deep convolutional neural network based medical image classification for disease diagnosis. *Journal of Big Data*, 2019, vol. 6, no 1, p. 1-18.
- [19] SUN, Ziheng; DI, Liping; FANG, Hui. Using long short-term memory recurrent neural network in land cover classification on Landsat and Cropland data layer time series. *International journal of remote sensing*, 2019, vol. 40, no 2, p. 593-614.
- [20] MA, Chenhao, et al. Machine learning surrogate models for Landau fluid closure. *Physics of Plasmas*, 2020, vol. 27, no 4, p. 042502.
- [21] SURYANARAYANA, S.; AKHILA, V. Autonomous maze solving robot using arduino. *Technology (IJARET)*, 2021, vol. 12, no 3, p. 595-603.
- [22] DIANA, Della, et al. Implementación del sensor Compas HMC5883L Terhadap Gerak Robot Micromouse dengan Menggunakan Algoritma PID. *Jurnal Teknik Elektro*, 2017, vol. 6, n° 2, pág. 120-124.
- [23] SAJID, Khan Aqsa, et al. Una reseña sobre: Robot de resolución de laberintos con Arduino Uno. 2019.
- [24] NURUL IRAWAN, Guntur Bagus. PENERAPAN OMNI RUEDAS DIRECCIONALES UNTUK PERGERAKAN ROBOT MICROMOUSE . 2021. Tesis Doctoral. Universitas 17 Agustus 1945 vokasi.
- [25] Abadi, Martín y col. (2015). TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems. Software available from tensorflow.org. URL: <https://www.tensorflow.org/>.
- [26] Chollet, François y col. (2015). Keras. <https://keras.io>.
- [27] ROBLES GÓMEZ, Juan Roberto. Sistema para el control en tiempo real de un enjambre de drones basado en pilotaje manual. 2021. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València.
- [28] SOLÍS-ORTEGA, Rebeca. Enjambres de robots y sus aplicaciones en la exploración y comunicación. En *Memorias de congresos TEC*. 2017.
- [29] CHAVEZ CHAVEZ, John Jairo. Diseño de un sistema de coordinación para enjambres de robots móviles heterogéneos. Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial.