



Cooperación de Múltiples Robots
- *Una Arquitectura para Sistemas Multi-robot con*
Comportamiento Emergente (AMEB) –

Ángel Eduardo Gil Pérez

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería, Doctorado en Ciencias Aplicadas
Mérida, Venezuela

2019

Cooperación de Múltiples Robots
- *Una Arquitectura para Sistemas Multi-robot con*
***Comportamiento Emergente (AMEB)* –**

Ángel Eduardo Gil Pérez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ph.D. en Ciencias Aplicadas

Centro de Microelectrónica y Sistemas Distribuidos

Director:

Ph.D. José Lisandro Aguilar Castro

Co-Director:

Ph.D. Eladio Dapena Gonzalez

Ph.D. Rafael Rivas Estrada

Universidad de los Andes

Facultad de Ingeniería, Doctorado en Ciencias Aplicadas

Mérida, Venezuela

2019

Dedicatoria

A mis abuelas y abuelos que desde otro plano siempre están presentes

A mis padres

A Dana

A Miguel Márquez

A Jose Aguilar, Rafael Rivas y Eladio Dapena

*A Ocho, Póker, Chata y a toda la manada universitaria de la Universidad Nacional
Experimental del Táchira*

Agradecimientos

Hace unos años decidí entrar como preparador al Laboratorio de Prototipos de la Universidad Nacional Experimental del Táchira, desde ese momento ocurrió un antes y un después en mi formación académica, por lo que quiero agradecer a Miguel Márquez, profesor, guía, amigo, ejemplo de vida, gracias Miguel.

A Eladio Dapena y Rafael Rivas, por confiar en mí luego de aquella primera competencia de robótica y guiarme en esto de comenzar mi doctorado y emprender este largo camino conmigo.

A Jose Aguilar, quien cambió positivamente mi vida académica, me motivó a seguir adelante cada día y me mostró un camino que va más allá de la culminación de un doctorado.

Jose, Eladio y Rafael, gracias por esta experiencia y por confiar en mí.

Los sistemas multi-robots son utilizados en la actualidad, en la realización de distintas tareas, donde un solo robot no es capaz de llevarlas a cabo, o se hace más eficiente la utilización de un equipo de ellos. Se han desarrollado distintas arquitecturas para gestionar los procesos que se dan en este tipo de sistemas, las mismas van desde arquitecturas centralizadas, hasta configuraciones totalmente distribuidas. Los sistemas multi-robots gestionados también son de diversos tipos y configuraciones, uno de ellos son los enjambres de robots, equipos formados por robots relativamente simples, con capacidades limitadas de software y de hardware, que de forma individual es poco lo que pueden hacer, pero que en conjunto pueden llegar a generar de forma emergente comportamientos inteligentes. La presente investigación se enfoca en el diseño de una arquitectura para sistemas multi-robots con comportamientos emergentes, la cual gestiona los procesos propios de este tipo de sistemas, para el caso específico de robots de propósito general, con el propósito de facilitar la aparición de la emergencia y la auto-organización en este tipo de sistemas. Para ello, se propone una arquitectura distribuida, con procesos locales de toma de decisión, una memoria compartida, y mecanismos de construcción de conocimiento a partir de las experiencias individuales. Además, en este trabajo se propone un modelo emocional simplificado para la arquitectura, el cual se implementa en los robots del sistema, con el fin de que las emociones regulen su accionar en el entorno, permitiéndoles adaptarse a la dinámica del mismo modificando sus comportamientos. De esta manera, las emociones coadyuvan en la aparición de la emergencia. Finalmente, se implementa un método de verificación de la emergencia y la auto-organización para la arquitectura, basado en una serie de conceptos relacionados con la emergencia y con la arquitectura, mediante el uso de mapas cognitivos difusos, el cual es aplicado a casos de estudios que tienen como base fenómenos biológicos presentes en la naturaleza.

The multi-robot systems are currently used in the performance of different tasks, where a single robot is not able to carry them out, or it becomes more efficient to use a team of them. There are different architectures to manage the processes that occur in these systems, they range from centralized architectures, to fully distributed configurations. The managed multi-robot systems are of different types and configurations, and one of them are the swarms of robots, teams formed by relatively simple robots, with limited software and hardware capabilities, that individually is little what they can do, but that together they can generate emergent intelligent behaviors. This research focuses on the design of an architecture for multi-robot systems with emergent behavior, it seeks to manage the processes of this type of systems, specifically one formed by general-purpose robots, with the purpose of facilitating the emergence and self-organization in this type of systems. For this purpose, a distributed architecture is proposed, with local decision-making processes, shared memory, and mechanisms for the construction of knowledge based on individual experiences. In addition, this paper presents a simplified emotional model for the architecture, which is implemented in the robots in the system, so that the emotions regulate their actions on the environment, allowing adapting to the dynamics of it and modify its behavior. In this way, the emotions contribute to the emergence. Finally, it is proposed a verification method of the emergence and self-organization for the architecture, based on a series of concepts related to the emergence and the architecture, through the utilization of fuzzy cognitive maps, which is applied to cases studies that are based on biological phenomena present in the nature.

Índice

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen.....	iv
Abstract	v
1 Introducción	1
1.1 El Problema	1
1.2 Motivación	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 General	3
1.3.2 Específicos	3
1.4 Justificación e importancia.....	3
1.5 Antecedentes	4
1.6 Arquitecturas de control para sistemas multi-robots.....	4
1.7 Cooperación en sistemas multi-robots	5
1.8 Sistemas emergentes en sistemas multi-robots	7
1.9 Emociones en sistemas multi-robots.....	8
1.10 Organización de la tesis.....	9
2 Marco Teórico.....	10
2.1 Sistemas multi-robots.....	10
2.2 Arquitectura en los sistemas multi-robots.....	12
2.3 Inteligencia de Enjambre.....	15
2.4 Sistemas emergentes	17

2.5	Tipos de emergencia.....	18
2.6	Coordinación emergente	20
2.7	Emociones	23
3	Una arquitectura para sistemas multi-Robots con comportamiento emergente (AMEB)	26
3.1	Propiedades generales de la arquitectura	27
3.2	Nivel Individual.....	28
3.2.1	Componente de percepción.....	29
3.2.2	Componente de actuación	30
3.2.3	Componente conductual.....	30
3.3	Nivel colectivo (coordinación emergente)	34
3.3.1	Gestión de interacciones en AMEB.....	36
3.3.2	Gestor de acciones	37
3.3.3	Gestor de mensajes	40
3.3.4	Gestor de canales de comunicación	40
3.4	Nivel de gestión de conocimiento y aprendizaje.....	41
3.5	Emociones en AMEB.....	42
4	Experimentación	48
4.1	Funcionamiento de la arquitectura	48
4.1.1	Transporte de un objeto	49
4.1.1.1	Gestor de Interacciones	50
4.1.1.2	Gestor de acciones:.....	51
4.1.2	Búsqueda de rutas	53
4.1.2.1	Gestor de Interacciones:	54
4.2	Verificación de la emergencia en AMEB	55
4.2.1	Casos de estudio.....	61

4.2.1.1	Plataforma de prueba.....	61
4.2.1.2	Escenario de cooperación.....	62
4.2.1.3	Escenario de consenso social	64
4.3	Reconocimiento de emociones en AMEB	68
4.3.1	Descripción formal del problema de reconocimiento de emociones en AMEB.....	68
4.3.2	Reconocimiento de emociones en AMEB utilizando el algoritmo AR2P	70
4.3.2.1	Reconocimiento de emoción tristeza en el robot	71
4.3.3	Casos de estudio.....	73
4.3.3.1	Caso 1: Recolección de Néctar.....	73
4.3.3.2	Caso 2: Transporte de un objeto.....	74
4.4	Comparación con trabajos previos	75
5	Conclusiones y trabajos futuros	78
5.1	Conclusiones	78
5.2	Trabajos futuros.....	80
6	Referencias Bibliográficas	82
7	Anexo A	92
7.1	Implementación de AMEB en una plataforma de propósito general	92
7.2	Implementación modelo emocional AMEB.....	100
8	Anexo B	107
8.1	Listado de publicaciones asociadas a la presente investigación:	107
8.2	Publicaciones aceptadas en proceso de publicación	108
8.3	Publicaciones en revisión	108

Índice de figuras

Figura 2.1 CEBOT [3]	13
Figura 2.2 ALLIANCE [6]	14
Figura 2.3 Modelo emocional MASOES (fuente [43])	25
Figura 3.1 Arquitectura AMEB	27
Figura 3.2 Nivel individual AMEB	28
Figura 3.3 Proceso sensorial	29
Figura 3.4 Módulo conductual AMEB	33
Figura 3.5 Módulo Colectivo [88]	36
Figura 3.6 Mecanismos y tipo de aprendizaje	41
Figura 3.7 Modelo emocional de AMEB. [46]	43
Figura 3.8 Proceso emocional.....	45
Figura 4.1 SMA del entorno de prueba.....	49
Figura 4.2 Escenario transporte de un objeto.....	50
Figura 4.3 Escenario de búsqueda de rutas	53
Figura 4.4 Mapa cognitivo difuso.....	59

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Reglas asociadas al gestor de acciones	38
Tabla 3.2 Relación entre las emociones y el tipo de comportamiento.....	46
Tabla 4.1 Interacciones. Caso transporte de un objeto.	51
Tabla 4.2 Relación componente AMEB – acción ejecutada.....	53
Tabla 4.3 Interacciones. Caso búsqueda de rutas.	54
Tabla 4.4 Relación componente AMEB – acción ejecutada.....	55
Tabla 4.5 Conceptos Arquitectónicos	57
Tabla 4.6 Escenario de cooperación	64
Tabla 4.7 Escenario de consenso social.....	67
Tabla 4.8 Matriz $E=\langle S,C \rangle$	69
Tabla 4.9 Emoción tristeza en AR2P	72
Tabla 4.10 Comparación con trabajos previos.....	76

INTRODUCCIÓN

“Hazlo o no lo hagas, pero no lo intentes”
– Yoda –

1.1 El Problema

En la actualidad, los robots móviles llevan a cabo tareas en diversos entornos del quehacer humano. Es común verlos actuando en actividades industriales, militares, o hasta en tareas propias del hogar. La investigación en robótica móvil es un área en franco crecimiento, a medida que esta área se fortalece, la complejidad de las tareas donde intervienen los robots móviles se ha incrementado, por lo que en muchas de ellas un solo robot ya no es capaz de llevarlas a cabo, y se requiere la participación de grupos de robots. Es acá donde se presenta un nuevo reto: ¿Cómo poder coordinar estos grupos de robots para llevar a cabo de forma organizada y óptima las tareas encomendadas? En entornos donde actúan sistemas multi-robot, se presenta la necesidad de que los robots colaboren, negocien, cooperen, planifiquen, entre otras acciones, para lograr objetivos comunes.

El problema de la cooperación en sistemas multi-robots es abordado en la actualidad desde distintos enfoques; diversas técnicas y metodologías vienen siendo propuestas e implementadas para buscar soluciones eficientes, que permitan el correcto funcionamiento de estos sistemas. En general, se busca constantemente el aprovechamiento de los recursos, la reducción de costos, la flexibilidad y adaptabilidad de estos sistemas, con el objeto de poder cumplir distintos tipos de tareas. Disciplinas como psicología, sociología, biología, economía, inteligencia artificial, zoología, entre otras, se ven involucradas en la búsqueda de soluciones para este problema.

Justamente, inspirado en la naturaleza, especialmente en las sociedades de insectos, aparecen los enjambres de robots, los cuales son sistemas multi-robots compuestos por robots, generalmente homogéneos, y simples en sus estructuras y en sus comportamientos, pero con capacidad de interactuar entre ellos, ya sea de forma directa o indirecta. De las interacciones que se dan entre los robots que conforman estos sistemas, pueden aparecer comportamientos colectivos difíciles o imposibles de predecir a priori, que les permiten al sistema ejecutar tareas, que de forma

individual, para los robots les sería imposible. Durante la ejecución de estos comportamientos colectivos, se dan entre los robots mecanismos de cooperación, colaboración, planificación y/o negociación, que les permiten resolver los posibles conflictos que se presenten. Estos comportamientos que surgen de la dinámica propia del sistema, observables a nivel macro, no son atribuidos a ningún componente en particular del sistema, y se conocen como comportamientos emergentes.

En este trabajo se propone una arquitectura para un sistema multi-robot, compuesto por robots homogéneos en su hardware, y heterogéneos en sus comportamientos, que gestione los distintos procesos que se dan en el mismo, con el objetivo de posibilitar la emergencia dentro de él. La arquitectura consta de tres niveles: un nivel individual de cada robot, que consta de tres módulos: actuación, percepción, y de comportamiento; otro nivel para la parte colectiva, conformada por una capa de coordinación emergente; y un último nivel de gestión del conocimiento y de los procesos de aprendizajes. En el nivel individual resalta el módulo de comportamiento, en el cual se gestionan un conjunto de emociones positivas o negativas, que intervienen en la generación de comportamientos del robot, esto, con el objeto de mejorar su adaptabilidad a la dinámica del entorno, y coadyuvar en la aparición de la emergencia y la auto-organización en el sistema. Finalmente, el trabajo presenta un mecanismo de verificación de la emergencia y la auto-organización para la arquitectura, basado en mapas cognitivos difusos, y se describen varios casos de estudio que siguen fenómenos en los sistemas biológicos, para mostrar el funcionamiento de la arquitectura.

1.2 Motivación

En ocasiones, un solo robot puede llevar a cabo una tarea de forma exitosa; en otras, el uso de un solo robot hace que la tarea no pueda ser ejecutada de forma eficiente, o no pueda ser llevada a cabo por sobrepasar las capacidades individuales del mismo, por lo que se requiere el uso de equipos de robots que trabajen de forma conjunta para el logro de la tarea. En este segundo caso se presentan tópicos de estudio de interés, relacionados con los mecanismos de cooperación, colaboración, comunicación, gestión de los recursos, entre otros aspectos que se hacen presentes en este tipo de sistemas [1 - 2]. En general, se han propuesto diversas configuraciones para estos equipos de robots, mejor conocidos como sistemas multi-robots, configuraciones centralizadas, distribuidas o híbridas [3-7]. Una de las tendencias más recientes son los enjambres de robots

[8], inspirados en sistemas biológicos como las colonias de hormigas o colmenas de abejas; en estos sistemas, la coordinación y la organización del grupo emerge de la propia dinámica del sistema. En dichos sistemas, los individuos poseen poca o nula información del sistema global, y aun así, en colectivo, llevan a cabo tareas complejas. Para ello, se conjugan en la dinámica del sistema procesos emergentes auto-organizados. Basado en esas ideas, en esta investigación se propone una arquitectura para gestionar los procesos que se llevan a cabo en un sistema multi-robot, con el objetivo de facilitar la aparición de la emergencia y la auto-organización en el mismo. Adicionalmente, se propone un modelo emocional simplificado, con el fin de estudiar cómo afecta al comportamiento, tanto colectivo como individual de los robots, y en la aparición de la emergencia.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Desarrollar una arquitectura para sistemas multi-robot con comportamiento emergente.

1.3.2 Específicos

1. Definir un modelo arquitectónico para la gestión de sistemas multi-robots con comportamiento emergente.
2. Proponer un modelo emocional artificial para los robots que conforman el sistema.
3. Verificar la aparición de la emergencia y la auto-organización en el sistema.

1.4 Justificación e importancia

El uso de sistemas multi-robots se ha incrementado en muchas áreas del quehacer industrial, es por ello que desde el punto de vista académico, es un tema de gran interés; aspectos como la conformación del grupo, las arquitecturas de control, los mecanismos de cooperación, etc., son de amplio interés para la comunidad científica. Este trabajo conjuga varios de estos aspectos: diseño de una arquitectura de control para sistemas multi-robots, definición de modelos de emociones para robots, etc., con el objetivo de facilitar la aparición de la emergencia en este tipo de sistemas. En particular, la inclusión de emociones en robots de propósito general, con características y funcionalidades simples, bajo el paradigma de enjambre de robots, permite su adaptabilidad a las dinámicas del entorno, en un contexto impredecible o poco predecible.

1.5 Antecedentes

Los antecedentes de la investigación están organizados en distintas sub-secciones, de acuerdo a las áreas involucradas en este trabajo: arquitecturas de control para sistemas multi-robots, cooperación en sistemas multi-robots, sistemas de robots emergentes, y emociones en robots.

1.6 Arquitecturas de control para sistemas multi-robots

En el marco de arquitecturas de control para sistemas multi-robots se han desarrollado diversos trabajos, a continuación, se mencionan trabajos que han servido de base para comportamientos emergentes. En [3] se propone la arquitectura CEBOT, inspirada en los organismos biológicos, donde cada individuo representa una célula básica, que posee conocimiento local, y puede realizar tareas de forma individual o colectiva. En [4], [9] introducen una arquitectura basada en comportamientos, donde cada robot cuenta con un conjunto de comportamientos base: seguimiento, búsqueda, exploración, agregación y dispersión, a partir de los cuales surgen comportamientos de mayor complejidad, que permiten la ejecución de tareas más complejas. Esta arquitectura ha sido la base de otros desarrollos, donde los robots basan su accionar en comportamientos. En [6] se propone una arquitectura para el control de grupos de robots heterogéneos, que trabajan en tareas débilmente acopladas, con posibilidad que existan dependencias temporales entre ellas. La arquitectura es completamente distribuida, es instanciada en cada robot, está constituida por una capa de comportamientos motivacionales, que activan una segunda capa donde se alojan un conjunto de comportamientos complejos, encargados de ejecutar tareas más específicas, y una tercera capa de comportamientos de supervivencia o reactivos. La arquitectura incluye en una siguiente versión, una capa de monitoreo, que le permite aprender a seleccionar los comportamientos más adecuados de acuerdo a experiencias pasadas.

El comportamiento de las sociedades de insectos como las hormigas y las abejas, ha inspirado un nuevo tipo de sistemas multi-robot, denominado enjambre de robots, los cuales están formados por robots generalmente simples, que de forma individual no son capaces de llevar a cabo tareas complejas, pero que su interacción y trabajo colectivo permiten la aparición de conductas inteligentes. En [10] se presenta swarm-bot, que consiste en enjambres de robots, con la capacidad de conectarse y desconectarse, con el fin de formar diferentes estructuras y configuraciones. Este sistema se inspira en la inteligencia de enjambre, e implementa algoritmos

basados en colonias de hormigas propuestos en [11]. En [12] se presenta un sistema basado en robótica de enjambre, y muestra sus funcionalidades en tareas de transporte de objetos, exploración y formación espacial. Los robots del enjambre son móviles, autónomos, homogéneos, capaces de realizar tareas simples (navegar, percibir su entorno, tomar objetos), y además, son capaces de comunicarse con otros robots, y de conectarse físicamente entre ellos.

En [63] los autores proponen una arquitectura para sistemas multi-robots basada en un modelo cliente-servidor para la inspección entornos. En ese trabajo, un robot hace el papel de líder, y los demás robots del equipo lo siguen durante la ejecución de la tarea. También, consideran cambios en el entorno que afectan el plan de navegación del robot líder. El trabajo presentado en [64], describe una arquitectura basada en la nube, donde los robots del sistema consumen servicios de la nube, a través de la cual comparten información, construyen conocimiento y planifican sus acciones. En [65] se presenta una arquitectura para robots heterogéneos autónomos, basada en el sistema operativo de robot ROS, por sus siglas en inglés, la cual está estructurada en tres capas jerárquicas, donde se gestionan los elementos de hardware y software del robot. La arquitectura facilita la comunicación entre los robots que conforman el sistema de forma directa. Por otro lado, en [66] proponen una arquitectura para sistemas multi-robots basada en internet de las cosas (IoT), enfocándose en la escalabilidad de este tipo de sistemas, y en el aprovechamiento de los mecanismos de comunicación presentes en esta tecnología. En particular, la arquitectura explota las funcionalidades de interconexión y procesamiento del IoT, para implementar mecanismos de comunicación eficientes.

En general, las arquitecturas de control para sistemas multi-robots se diseñan con el fin de gestionar los procesos que se dan a cabo de forma general en este tipo de sistemas, comenzando por las funciones básicas de los robots, hasta procesos complejos de aprendizaje y coordinación. En los últimos años han evolucionado para adaptarse a las nuevas tecnologías, así como también, para incrementar su escalabilidad y su capacidad de gestión de sistemas de mayor complejidad, debido a que cada día más los sistemas multi-robots están siendo aplicados en tareas más diversas y de mayores requerimientos.

1.7 Cooperación en sistemas multi-robots

En este apartado, se presentan algunos trabajos relacionados con la implementación de mecanismos de cooperación clásicos en sistemas multi-robots, utilizando diferentes técnicas. En

[13] se utiliza una red neuronal para implementar un mecanismo de cooperación entre los robots que conforman el sistema, específicamente, para la tarea de cacería cooperativa en entornos con incertidumbre. La red neuronal se utilizó para el ajuste de las trayectorias de los agentes, tomando en cuenta la posición de cada uno durante la persecución del objetivo. En [14] se incorpora el uso de funciones multi-objetivos en mecanismos de cooperación para tareas de exploración de entornos desconocidos, para ajustar de manera eficiente las prioridades de exploración de cada individuo, y por consiguiente, del grupo. El algoritmo busca encontrar el mejor estado final de cada robot, en función de un costo que permite determinar la ruta óptima de exploración. El estado es determinado por la celda que ocupa el robot en la rejilla que representa el mapa. En [15] se propone la utilización de un *algoritmo basado en consenso* (CBBA), para la cooperación de equipos heterogéneos de robots en misiones de rastreo y ataque. El algoritmo se divide en dos etapas: la primera permite a los agentes añadir tareas a ejecutar a su lista, a medida que cada tarea es agregada a la lista del agente, se obtiene información referente a la recompensa que obtendrá el agente al lograr los objetivos de dicha tarea, esto servirá para priorizar su ejecución. La segunda etapa es en donde se resuelven los conflictos que se puedan presentar entre los agentes del sistema. Para ello, se revisan las listas de todos los agentes, y de presentarse conflictos entre ellas, se pueden tomar tres acciones: cambiar la tarea, dejar la tarea, o reiniciar su ejecución. En [16] utilizan un control basado en lógica difusa para la coordinación de un equipo de robots, específicamente en la tarea de seguimiento de trayectorias. El objetivo es que independientemente de la velocidad de los robots durante la trayectoria, al final terminen los recorridos juntos. En [17] proponen también un control basado en lógica difusa, para la cooperación de robots en el traslado de un objeto hacia una localización específica. El control busca generar rutas libres de colisiones durante la tarea de empuje del objeto, donde tanto el entorno como el número de robots que participan son inciertos. Una estrategia cooperativa para un sistema multi-agente basada en lógica difusa es propuesta en [18], la estrategia es utilizada para el control de un equipo de robots en un juego de fútbol. Se analizan básicamente cuatro aspectos del juego: posición del balón, dirección del movimiento del balón, posición del oponente, y orientación del oponente; estos aspectos son tomados por un sistema de control difuso que define que hará cada agente.

En general, la cooperación en sistemas multi-robots puede darse de distintas formas, ya sea gestionada por mecanismos que establecen reglas dentro del sistema, que permiten que los

individuos lleven a cabo comportamientos cooperativos; o mediante procesos que coadyuvan a que la cooperación emerja de forma natural en el sistema, estos últimos, inspirados en los sistemas biológicos.

1.8 Sistemas emergentes en sistemas multi-robots

El tema de la emergencia, en sistemas multi-robots, se ha comenzado a discutir en los últimos años, debido a que el uso de sistemas de este tipo se ha extendido en diversas áreas tanto a nivel académico, como industrial. En [19] se proponen una serie de comportamientos "emergentes", que se construyen a partir de un conjunto de comportamientos primitivos, para el control de robots móviles. En [20] se propone el diseño de un dispositivo inteligente para el soporte de datos, el cual se implementa en los robots que conforman el equipo, con el objeto de intercambiar información entre ellos, y permitir la aparición de comportamientos cooperativos de forma emergente a partir de la comunicación en el grupo. En [21] se definen tópicos esenciales en la investigación en robótica emergente: algoritmos de arbitraje entre los agentes, arquitecturas que permitan a los sistemas configurarse dinámicamente, entre otros tópicos. En [22] proponen la utilización de algoritmos para la evasión de colisiones, para el control de un sistema multi-robot con comportamiento emergente, a ser usado específicamente para fútbol robótico. Además, implementan una arquitectura basada en comportamientos primitivos, que conlleva a que a través de la evasión de las colisiones que se puedan presentar, aparezcan comportamientos cooperativos en el sistema. [23] propone un método de cacería cooperativa basado en inteligencia de enjambre; en la implementación utilizan un sistema multi-robot, donde todos pueden intercambiar información. El sistema tiene tres componentes: uno basado en inercia, que contempla la última velocidad del robot y su actual posición, un componente llamado inteligencia personal, basado en el conocimiento local del robot, y un componente de inteligencia colectiva, basado en las posiciones de todos los robots en un instante dado. Bajo este método aparecen comportamientos emergentes en el sistema, durante la persecución del objetivo. En [24] los autores presenta un análisis de distintos sistemas que presentan comportamientos emergentes en su funcionamiento, y cómo funcionan a partir de reglas básicas de control. Son considerados sistemas biológicos como las termitas y los mosquitos, sistemas naturales como las avalanchas de arena, y sistemas artificiales como el juego *Bullies & Dweebs* y las carreras de autos NASCAR, como fuentes de inspiración.

En general, cuando un sistema multi-robot cumple con características como: descentralización de sus procesos, espacios compartidos de memoria, comunicación entre los robots, individuos con conocimiento local y toma decisiones a nivel local, la emergencia puede darse en el sistema, como parte de un fenómeno propio de las interacciones locales que ocurren en él.

1.9 Emociones en sistemas multi-robots

En el ámbito de los modelos emocionales artificiales se busca simplificar el espectro emocional humano, con el objeto de que las máquinas puedan reconocer o construir para sí mismas estados emocionales, generalmente, con el fin de mejorar su respuesta ante las dinámicas del entorno. Los modelos presentados en [25]–[28] definen un conjunto de emociones que el agente puede presentar en un instante t , así como el proceso emocional por el que pasa el agente. En [29] se define un modelo emocional bidimensional, basado en el grado de satisfacción/insatisfacción y de activación/relajación del agente, simplificando el espectro emocional a 8 emociones con distintos niveles de intensidad. Este modelo se implementa en una arquitectura multiagente para sistemas emergentes y auto-organizados, y es base fundamental para el modelo presentado en nuestra investigación. En [30]–[33] se describen aplicaciones donde se incluyen emociones en robots, en el primero para un agente robot implementado en un teléfono inteligente para brindar servicios empresariales, en el segundo se presenta un modelo basado en factores de personalidad, bajo un modelo de 2 dimensiones limitado a la satisfacción/agrado del agente, la tercera aplicación dota de emociones a un robot mascota para mejorar la interacción humano-robot, y por último, se utiliza un modelo cognitivo para un sistema multi-robot para la tarea de exploración de ciudades. En [67] se propone un modelo emocional para robots, que mide la voluntad de cooperación individual de cada robot en el problema de asignación de tareas de esta forma, las emociones se utilizan como un factor en la asignación de tareas, de manera que la carga de trabajo de los robots se ve afectada por sus estados emocionales. Los autores de [68] proponen un modelo cognitivo emocional para robots que cuidan personas mayores, combinando el filtro de Gabor¹, el algoritmo de patrón binario local (LBP), y el algoritmo del vecino más cercano (KNN), para extraer y reconocer las características faciales del paciente para predecir su emoción, con el objetivo de reducir su estado emocional negativo. En [69, 70] se propone un modelo de emociones artificiales para la adaptación y coordinación implícita en sistemas multi-

¹ El filtro de Gabor es un filtro lineal cuya respuesta de impulso es una función sinusoidal multiplicada por una función gaussiana.

robot. Las emociones artificiales desempeñan dos roles, parecido a como lo usan los seres vivos: son usados como moduladores del comportamiento de los robots, y como medios de comunicación para la coordinación social. Las emociones se modelan como representaciones comprimidas del estado interno, y están sujetas a una dinámica que depende de las condiciones internas y externas. Las mismas, pueden exponerse de manera eficiente a robots cercanos, lo que permite lograr una comunicación local a nivel de grupo. El modelo es instanciado en una tarea de navegación, con el objetivo de mostrar cómo la coordinación puede emerger efectivamente agregando emociones artificiales a los robots.

En general las emociones artificiales han sido usadas en los robots, con el objeto de regular el comportamiento de los agentes artificiales, y ayudar en su adaptación a las dinámicas presentes en el entorno, así como también, como mecanismo que coadyuva a procesos de coordinación que se dan en este tipo de sistemas.

1.10 Organización de la tesis

En el siguiente capítulo se presenta el marco conceptual de base para la tesis, tratándose brevemente temas relacionados con sistemas multi-robots, inteligencia de enjambre, emergencia y emociones. En el capítulo 3 se presenta la arquitectura para sistemas multi-robot con comportamiento emergente (llamada AMEB), y se detalla cada uno de sus componentes. Además, se presentan consideraciones para su implementación, y se describe su modelo emocional. Luego, el capítulo 4 describe el método de verificación de la emergencia y la auto-organización en la arquitectura, y su aplicación en casos de estudio. Por último, se presentan las conclusiones de la investigación y los trabajos futuros.

"Lo importante es no dejar de hacerse preguntas"
- Albert Einstein -

En este capítulo se describen de forma breve una serie de tópicos que son base para la investigación.

2.1 Sistemas multi-robots

Se puede definir un sistema multi-robot como un equipo de robots, homogéneo o heterogéneo, según las características de los agentes que lo componen, el cual presenta algunas de las siguientes propiedades: cooperación, conciencia, comunicación y coordinación. Son utilizados cuando una tarea no puede ser realizada por un solo robot, o cuando un trabajo se hace más eficiente si es realizada por más de un robot [34], [35]. De forma general, se pueden clasificar los sistemas multi-robots según[34]:

1. Tipos de robot: esta clasificación depende de los tipos de robots que conforman el sistema, se pueden encontrar tres grandes grupos: los *sistemas estáticos*, compuestos por elementos como manipuladores industriales, brazos mecánicos, etc.; los *sistemas móviles*, conformados por robots con capacidad de desplazamiento; y los *sistemas híbridos*, en donde los robots que pertenecen al sistema pueden presentar elementos que pertenecen a distintos tipos, ejemplo un robot móvil con un manipulador. Además, los sistemas pueden ser homogéneos, si todos los robots cuentan con las mismas capacidades; o heterogéneos, en caso contrario.
2. Interacción surgida entre los elementos del sistema: el hecho de compartir un entorno provoca la aparición de relaciones entre los componentes del sistema, en otras palabras, surge un comportamiento colectivo, el cual puede tomar diversas formas: puede ser un comportamiento de *indiferencia*, donde la tarea de cada robot es independiente de la de los demás, y puede llevarse a cabo sin necesidad de que exista relación entre los integrantes del sistema; puede ser un comportamiento *cooperativo*, ya que los robots buscan asociarse para lograr un fin común, o puede existir *competencia o antagonismo* en el sistema, en donde los objetivos de los robots son incompatibles entre sí, por ejemplo: técnicas de persecución-evasión, o juegos de fútbol robótico.

Dada la amplitud de los desarrollos en el área de sistemas multi-robot, los investigadores han propuesto distintas taxonomías que permiten organizar y facilitar la comprensión de las características de estos sistemas. A continuación se presenta una revisión de algunas de estas taxonomías propuestas en la literatura.

En [1] se establece una base para clasificar los sistemas multi-robot. En ese trabajo se basan en los *mecanismos de cooperación* presentes en un sistema y sus usos en la *resolución de problemas*, en otras palabras, se plantea cuáles son los problemas a resolver y que mecanismos se han utilizado para resolverlos. Define como ejes taxonómicos: la arquitectura del grupo, los conflictos por recursos, los orígenes de la cooperación, el aprendizaje, y los problemas geométricos. Profundizando en cada uno de estos aspectos, se encuentran características como el grado de homogeneidad del sistema, la centralización/descentralización del mismo, las formas de comunicación empleada, entre otras.

En [36] presentan una clasificación de ámbito general, que utiliza como base las propiedades del colectivo de robots como conjunto, más que las características individuales de cada robot. En esta propuesta se definen 7 ejes: tamaño del grupo, formas de comunicación, topología de comunicación, ancho de banda de la comunicación, capacidad para reconfigurarse del sistema, capacidad de procesamiento, y homogeneidad dentro del grupo. Dentro de cada uno de los ejes existe un limitado número de valores, lo que permite una clasificación bastante precisa. Por ejemplo, utilizando esta clasificación, una colonia de abejas se puede clasificar de la siguiente manera:

- Tamaño del grupo: el número de individuos se pudiese considerar infinito.
- Rango de Comunicación: los individuos solo se pueden comunicar con otros que estén lo suficientemente cerca.
- Topología de la comunicación: cada individuo se puede comunicar con los demás individuos del sistema.
- Ancho de Banda: vinculado a la capacidad de feromona que se puede depositar al moverse entre dos posiciones.
- Capacidad de Reconfigurarse: es un sistema dinámico, donde la relación entre los individuos puede cambiar arbitrariamente.
- Capacidad de procesamiento: comportamiento reactivo en base a lo que perciben en su entorno.
- Composición del grupo: es un sistema heterogéneo.

La siguiente taxonomía es bastante general, y está orientada a sistemas multiagentes, pero es aplicable a sistemas multi-robots [37]:

- Grado de homogeneidad: los agentes son homogéneos si su estructura es idéntica, en cuanto a sensores, efectores, conocimiento del dominio, funciones de decisión.
- Grado de comunicación: indica si los agentes pueden comunicarse directamente entre ellos, o mediante interacción mediada por el entorno (*estigmergía*).

De esta clasificación surgen cuatro sistemas: agentes homogéneos sin comunicación, agentes heterogéneos sin comunicación, agentes homogéneos con comunicación, y agentes heterogéneos con comunicación. Todos los sistemas multiagentes, incluidos los multi-robot, pudiesen englobarse en esta clasificación.

2.2 Arquitectura en los sistemas multi-robots

Las arquitecturas brindan un marco de organización para los procesos que se dan en un sistema; en el caso de los sistemas multi-robots, las arquitecturas gestionan tanto procesos individuales como colectivos. En la literatura, existen arquitecturas clásicas que han servido de base a las arquitecturas actuales, incluyendo la arquitectura propuesta en este trabajo. Entre las arquitecturas clásicas se encuentran las basadas en la estructura de organismos vivos, como CEBOT (ver Figura 2.1), presentada en [3], la cual se estructura en células que trabajan de forma independiente, y se pueden acoplar o desacoplar dependiendo de la tarea que esté ejecutando. Es una arquitectura distribuida y flexible, que ha ido evolucionando hasta llegar a una estructura que permite la auto-organización. Las células representan a los individuos y su agrupamiento representa el trabajo colectivo, dentro de esta arquitectura incluso se permite el reemplazo o reparación de células dañadas con el objeto de que el sistema siga trabajando.

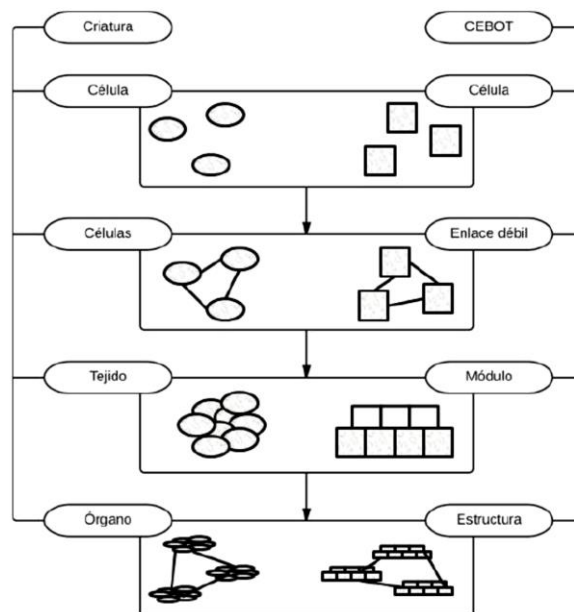


Figura 2.1 CEBOT [3]

Por otro lado, una unidad básica y fundamental en muchas arquitecturas son los comportamientos, alrededor de ellos se organizan los procesos de los sistemas que gestionan. En [4, 9] se definieron una serie de comportamientos base para una arquitectura basada en comportamientos, que sirven de base para la construcción de comportamientos complejos a ser ejecutados por los robots:

- Following: un agente/robot sigue a otro.
- Homing: búsqueda de localizaciones concretas en el entorno.
- Self-wandering: los agentes/robots vagan en el entorno, evitando colisiones con obstáculos o con ellos mismos.
- Aggregation: los robots se agrupan, manteniendo una distancia mínima entre ellos.
- Dispersion: los robots se separan, manteniendo una distancia mínima entre ellos.

A partir de estos comportamientos se construyen otros:

- Comportamientos complementarios: donde varios comportamientos se activan de forma simultánea.
- Comportamientos contradictorios: secuencias temporales de comportamientos que no pueden activarse conjuntamente.

También, basada en comportamientos se ha propuesto la arquitectura ALLIANCE [6], diseñada para equipos de robots heterogéneos de mediano tamaño, que ejecutan tareas débilmente acopladas y con dependencias temporales (ver Figura 2.2). Esta arquitectura se compone de tres capas que gestionan distintos tipos de comportamientos:

- Motivacionales: analizan la información proveniente de los sensores, así como el estado interno del robot, con el fin de seleccionar un conjunto de comportamientos de la siguiente capa.
- Específicos: buscan llevar a cabo la tarea objetivo.
- De supervivencia: buscan garantizar la supervivencia del robot en el entorno.

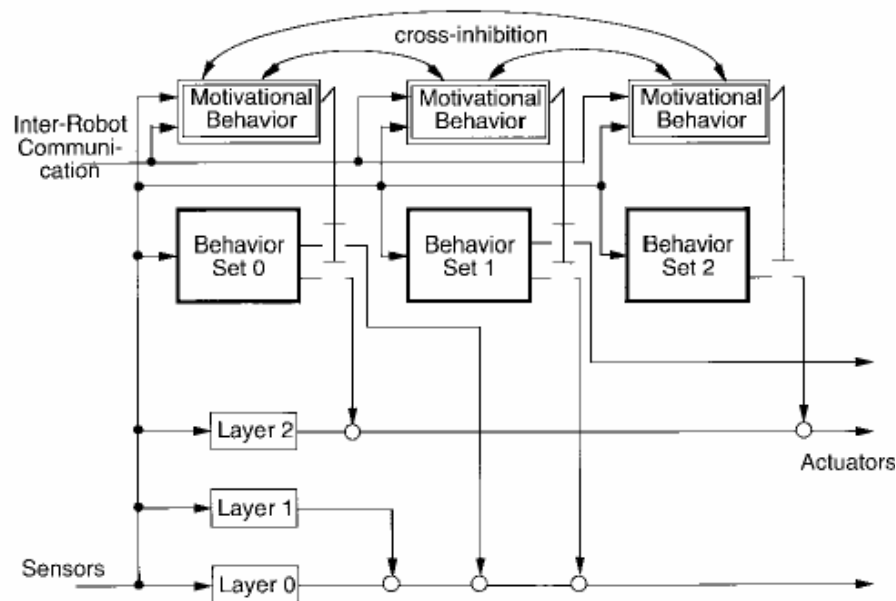


Figura 2.2 ALLIANCE [6]

De las arquitecturas anteriores se derivan otras tantas, donde la gestión de los procesos se distribuyen en capas, y básicamente gestionan dos aspectos principales: los individuales relacionados con el funcionamiento de cada robot, y los colectivos que se relacionan con el funcionamiento del grupo, resaltando de estos últimos los vinculados a procesos de coordinación y cooperación.

Del comportamiento de algunas especies de insectos, como las hormigas, las termitas y las abejas, surge un tipo de arquitectura denominada *arquitectura de enjambre*, este tipo de arquitecturas busca gestionar equipos de robots, que con su trabajo colectivo presentan comportamientos que pueden ser considerados inteligentes, para ejecutar tareas complejas [7, 8, 10, 11, 12]. En general, estas arquitecturas gestionan equipos formados por robots generalmente de funcionalidades simples, que pueden ser clasificados como robots de enjambre. A su vez, en este tipo de arquitecturas aparecen conceptos como el de emergencia, auto-organización e inteligencia de enjambre.

2.3 Inteligencia de Enjambre

La inteligencia de enjambre se inspira en el comportamiento de los sistemas biológicos, y puede ser definida como el comportamiento colectivo de grupos de individuos descentralizados y auto-organizados [48]; en donde los individuos que conforman el grupo por si solos presentan capacidades limitadas, tienen características simples, y cuando funcionan de manera colectiva emergen comportamientos complejos que pueden interpretarse como inteligentes [49]. La inteligencia de enjambre es utilizada en la actualidad en la resolución de problemas complejos, originalmente en problemas de optimización. Dentro de los algoritmos más comunes se encuentran los algoritmos de optimización por enjambre de partículas (PSO), algoritmo de optimización por colonias de hormigas (ACO), entre otros.

El concepto de enjambre sugiere multiciplidad, aleatoridad y desorden [38]. Básicamente, el concepto de inteligencia de enjambre, o inteligencia colectiva, se soporta en que de un grupo de individuos, pueda emerger un comportamiento complejo, que parezca inteligente, desde la sinergia creada por las interacciones simples entre los individuos que conforman el grupo [38]. En [50] se describen tres tipos de problemas que pueden ser resueltos por la inteligencia colectiva, estos son:

- Problemas cognitivos: se refiere a problemas que siempre tienen una solución, de no existir una única solución, hay unas mejores que otras.
- Problemas de coordinación: para la solución de este tipo de problemas, los miembros del grupo deben armonizar sus comportamientos para el logro del objetivo.
- Problemas de cooperación: este tipo de problemas suele asociarse con los anteriores, la diferencia radica en que el interés colectivo está por encima del interés particular.

La inteligencia colectiva se conoce también como sabiduría global [38], y requiere de ciertos principios a los que se les ha denominado como Paradigma de la “Sabiduría de las Multitudes” [50]:

- Diversidad de opinión: los individuos deben poseer opiniones, o conocimientos sobre un tema, lo suficientemente diversos para abarcar todo el espectro de posibles opciones.
- Independencia de opinión: cada individuo debe poder expresar su opinión libremente, sin que esta sea influenciada por los demás.
- Descentralización: este aspecto trata de que cada individuo ponga a prueba su punto de vista, y no responder a directrices de un ente central.
- Agregación: debe existir un mecanismo que exprese, resuma y convierta los aportes individuales en aportes colectivos, en otras palabras, se debe convertir el conocimiento individual en conocimiento colectivo.

Por otro lado, la inteligencia colectiva aplica la *Lógica del Enjambre*, que consiste en que las comunidades que intentan resolver colectivamente problemas, requieren de mucha flexibilidad e improvisación, aplicando las siguientes ideas [38]:

- Entre más miembros es mejor: el número de individuos del sistema influye en su capacidad de llevar a cabo comportamientos complejos; a mayor número, la oportunidad de que emerjan acciones que resuelvan un problema determinado es mayor.
- La ignorancia es útil: el desconocimiento del problema global por parte de los individuos es útil para el sistema, ya que permiten, desde el descubrimiento, una diversidad de opiniones que enriquecen las posibles soluciones a un problema.
- Se deben provocar encuentros casuales: los encuentros casuales entre los individuos posibilitan que emerjan nuevos comportamientos en el sistema.

- Se deben buscar patrones en los signos: en el sistema emergen signos que pueden representar patrones de comportamiento, que se pueden traducir en mecanismos que ayudan a resolver los problemas a los que se confrontan el sistema.
- Es importante prestar atención a sus vecinos: la interacción entre los individuos es importante para el sistema, sobre todo entre los individuos que comparten un mismo entorno de vecindad. En particular, aprender de lo que hace su vecino puede ayudar a ser eficiente en lo que se haga.

2.4 Sistemas emergentes

Antes de introducir los sistemas emergentes, es importante definir el término “emergencia”, el cual es fundamental en esta investigación. A continuación, se presentan algunas definiciones de emergencia que se encuentran en la literatura, y luego se presenta una definición propia.

Definición 1: “El término emergencia se asocia a un comportamiento de un sistema que emerge de las interacciones entre sus componentes, difíciles o imposibles de predecir” [38].

Definición 2: “Un sistema presenta emergencia cuando hay coherencias que emergen dinámicamente en el macro-nivel, derivado de las interacciones entre las partes del nivel micro” [39].

Definición 3: Clayton comenta en [40] “... que la emergencia es la teoría que incluye la evolución cósmica, la cual ha sido en varias ocasiones impredecible, irreductible,...”

Definición 4: Fernández, en [41], indica que “... las propiedades de un sistema son emergentes, si ellas no están presentes en sus componentes. En otras palabras, propiedades globales que son producidas por las interacciones locales.”

Las definiciones de emergencia coinciden en:

1. Dos niveles presentes en el sistema: nivel micro y nivel macro.
2. Es el resultado de las interacciones de los componentes del sistema, difíciles o imposibles de predecir.

Partiendo de esto, se puede decir que la emergencia es la capacidad de un sistema de generar comportamientos a nivel macro, difíciles de predecir, a partir de las interacciones a nivel micro de sus componentes, siempre y cuando los comportamientos generados puedan ser identificables, en otras palabras, sea posible de identificar el fenómeno que ocurre de forma coherente. Existen

una serie de conceptos asociados a la emergencia, a continuación se definen los más importantes para esta investigación [38]:

1. Auto-organización: es un término bastante discutido en la bibliografía, pero que en general, se refiere a sistemas que pueden organizarse sin ninguna intervención externa.
2. Auto-poyesis: se define como la propiedad de un sistema para producirse por sí mismo (o también, mantenerse o definirse a sí mismo). En otras palabras, se define como la capacidad de un sistema para generar su constitución específica: sus componentes y sus interacciones.
3. Estigmergia: se define como una forma de comunicación indirecta, que se da a través de modificaciones del ambiente, y que son percibidas por los agentes. Es un concepto introducido por Grassé para describir una forma de comunicación que observó en dos especies de termitas. El término viene de los términos griegos *stigma* (marca) y *ergon* (trabaja).

Ahora, ¿Qué es un sistema emergente?, en general, se puede definir como un sistema complejo, adaptable, donde aparecen comportamientos que no pueden ser explicados por reglas explícitas de funcionamiento. Un sistema emergente debe ser un sistema capaz de adaptarse, y de ajustarse, dependiendo el tipo de retroalimentación que reciba. Si es positiva activa el sistema y sus procesos, y si es negativa busca alcanzar puntos de equilibrio en el mismo.

2.5 Tipos de emergencia

Existen varias clasificaciones de la emergencia en la literatura [38], las cuales varían según los criterios usados para definir los tipos de emergencia.

En esta sección se describirán algunas de ellas, tomando en consideración su relación con este trabajo. La primera clasificación se define según como se relaciona con el nivel de auto-organización del sistema, relacionando a la emergencia con la auto-organización del desequilibrio. Así, esta clasificación se basa según donde pueda ser encontrada la emergencia, lejos o cerca del punto equilibrio del sistema [71]:

- Emergencia simple: esta ocurre en sistemas cercanos al equilibrio, este tipo de sistemas es común en el mundo físico, por ejemplo, en gases dentro de recipientes cerrados. Las características emergentes simples a menudo pueden ser diseñadas, calculadas, etc. Ahora bien, como en todas las características emergentes, éstas pueden ser modeladas o

predichas de forma eficiente a nivel superior (en el sistema), y no a nivel de sus componentes.

- Emergencia compleja: esta emergencia se genera en sistemas que están lejos del equilibrio. Este tipo de emergencia solo existe en los sistemas no lineales que se encuentran lejos del equilibrio, un ejemplo de este tipo de emergencia es la búsqueda de caminos en los sistemas de hormigas.

Otra clasificación es basada en la casualidad, y ha sido propuesta en [72]:

- Emergencia reduccionista: este tipo de emergencia establece que las entidades emergentes, y sus fuerzas causales, son producto de ficciones. Según el paradigma reduccionista, el conjunto no es nada más que la suma de sus partes, y las entidades emergentes y sus explicaciones son ficciones que puede ser útiles para comprender como ocurren los fenómenos en este tipo de sistemas. Además, aceptan que los objetos pueden ser descritos en términos jerárquicos.
- Emergencia física no reduccionista: de forma general, la física no reduccionista establece que el nivel más bajo es todo físico, y todo se compone de partículas físicas. Además, este punto de vista reconoce la necesidad de un substrato físico para la existencia de la emergencia. Las computadoras son buenos ejemplos de formas no reductibles de emergencia, el estudio de su funcionamiento y del funcionamiento de las aplicaciones sobre ellas, pueden explicar este tipo de emergencia.
- Emergencia radical: este enfoque rechaza el punto de vista de la física no reduccionista, donde se afirma que el conocimiento del mundo físico es completo, y hacen énfasis en el vacío explicativo que resulta cuando se intentan explicar los sistemas complejos en términos de sus componentes a más bajo nivel. El enfoque radical recuerda que se debe seguir explorando y conociendo los sistemas a mayor profundidad, a pesar de que en la actualidad se ha avanzado mucho en poder explicar los elementos que componen los sistemas complejos.

En [73] se presenta una clasificación que parte del análisis de las relaciones de causalidad presentes en la emergencia. Parten del principio de que las relaciones causales son naturales en todas las formas de emergencia debido a que la emergencia es un efecto, o un evento, donde la

causa no es inmediatamente visible, y el fenómeno emergente depende de esa causa oculta con un efecto aparente. Basado en ello, se proponen cuatro tipos de emergencias:

- Tipo I. Emergencia simple sin causalidad de arriba hacia abajo: describe la emergencia simple, sin retroalimentación de arriba hacia abajo, como efecto de la auto-organización del sistema. En este tipo de emergencia aparecen dos sub-clases:
 - Emergencia simple intencional/nominal: las nuevas funciones que emergen en el sistema son asignadas a grupos de agentes, por ejemplo, las tareas de exploración asignadas a un grupo de hormigas.
 - Emergencia simple no intencional: aparece en un sistema impreciso, desordenado y de elementos iguales. Las propiedades emergentes no tienen sentido para una sola unidad del sistema, sino que dependen de la relación de las unidades entre sí.
- Tipo II. Emergencia débil con causalidad de arriba hacia abajo: este tipo de emergencia incorpora relaciones de casualidad de arriba hacia abajo, del nivel macro al nivel micro. Corresponde a funciones flexibles que se pueden predecir, aunque no en todos sus detalles. En este tipo de emergencia, el observador se da cuenta de fenómenos emergentes a nivel macro que no están especificados en las leyes de interacción que se dan a nivel micro, y que a su vez, influyen en el comportamiento de cada agente del sistema.
- Tipo III. Emergencia con múltiples retroalimentaciones: se dan acá muchas causalidades, y existe una gran capacidad de adaptación. Corresponde a la emergencia de nuevos roles y a la desaparición de antiguos, no predecibles de ninguna manera.
- Tipo IV. Emergencia fuerte: no existe aquí causalidad, pero si relaciones de retroalimentación. No se puede predecir, ya que es un proceso creativo, contingente e impredecible, que corresponde a la apertura de nuevas funciones.

Para la presente investigación, los tipos de emergencia de interés son la emergencia compleja y la emergencia Tipo I, debido a la naturaleza de los sistemas que pretende organizar la arquitectura propuesta.

2.6 Coordinación emergente

La coordinación emergente busca la obtención de comportamientos colaborativos entre diversos agentes/robots, sin que eso implique que los individuos tengan un conocimiento global del

dominio, y sin que el mismo esté centralizado. El no poseer conocimiento global, minimiza la comunicación entre los agentes, los mismos se comportan de forma totalmente autónoma, y las interacciones surgen a través de la misma dinámica del sistema [62].

Las sociedades de insectos son un buen ejemplo donde aparece este tipo de coordinación. Estas sociedades son sistemas adaptativos complejos, en la que el conjunto de individuos forma una unidad bien integrada y coordinada, con poco o ningún nivel de control central. Los individuos coordinan sus actividades a través de la *estigmergia* [38]. Inspirados en estas sociedades, surgen modelos artificiales, como por ejemplo el de las hormigas, donde a través de una forma artificial de *estigmergia*, se busca coordinar las acciones del grupo de agentes. En las hormigas, la mayoría de las acciones de comunicación se dan a través de un producto químico, llamado feromona, la cual es depositada en el ambiente para distintos usos, por ejemplo, marcar un camino hacia la fuente de alimento. Las hormigas, mediante la detección de estas marcas, explotan fuentes de alimento [38]. Distintos modelos artificiales de insectos se basan en el siguiente procedimiento, en el cual se puede observar cómo se coordinan las acciones, a través de los cambios que se dan en el ambiente [38]:

1. *En ausencia de rastros en el medio ambiente, las hormigas recorren el entorno al azar.*
2. *Cuando una hormiga descubre algo de interés para la colonia (una fuente de alimento, por ejemplo) deja un rastro. Ese rastro, si no es reforzado por otras hormigas, entonces se evapora.*
3. *Cuando una hormiga detecta un rastro de feromona, su instinto la indica seguir ese camino.*
4. *En el momento que una hormiga llega al objetivo (por ejemplo, al alimento), se devolverá con lo que le interesa, depositando más feromona, por lo que se refuerza el camino.*
5. *Cuando se agota el objetivo, se inicia una nueva búsqueda aleatoria de nuevos rastros, y el camino actual desaparece.*

En ese proceso, las hormigas coordinan sus acciones, para la explotación de una fuente de alimento, y el traslado del mismo hasta su nido. En el paso 1, las hormigas recorren de forma individual y aleatoria el entorno; en el momento en que una consigue lo que busca, comienza a emerger la coordinación a través del ambiente. Los pasos 2, 3 y 4 permiten observar el mecanismo emergente que se presenta, y en particular, cómo un grupo de hormigas logran seguir un mismo camino sin tener contacto directo entre ellas. Bajo este esquema, cada individuo del

grupo no se expone a la complejidad de la situación, no posee información individual, y no debe sincronizarse con los demás.

Un ejemplo de formulación matemática de lo anterior, que representa un esquema de coordinación emergente, son los mecanismos de actualización y transición del modelo de colonias de hormigas artificiales (algoritmo ACO, por sus siglas en inglés), donde el arco que une dos nodos se refuerza luego de que una hormiga ha transitado por él, según la ecuación (2.1), depositando una cantidad de feromona proporcional a la calidad del recorrido.

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{si arco } (i, j) \in T_k(t) \\ 0, & \text{si arco } (i, j) \notin T_k(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

Donde Q es un parámetro ajustable, y L_k es la longitud del recorrido hecho por la hormiga k.

De la misma forma, la probabilidad de que una hormiga elija pasar de un nodo a otro viene dada por la ecuación (2.2).

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}(t)^\alpha (n_{ij})^\beta}{\sum_{l \in j_k(i)} (\tau_{il}(t))^\alpha (n_{il})^\beta}, & \text{si } j \in j_k(i) \\ 0, & \text{si } j \notin j_k(i) \end{cases} \quad (2.2)$$

Donde α y β son dos parámetros ajustables, para controlar la influencia entre la intensidad de la feromona (τ_{ij}) y una heurística de deseabilidad de un vértice (n_{ij}), para todos los vértices j no visitados por la hormiga k, los cuales son posibles de visitar desde el i donde está la hormiga.

Ese modelo basado en esas dos expresiones matemáticas, representa un esquema de coordinación emergente de búsquedas, como resultado de un proceso de inteligencia colectiva. En general, Muchos sistemas de insectos tienen mecanismos de coordinación emergente. Por ejemplo, las colonias de abejas tienen mecanismos de coordinación emergente causadas por estímulos locales, derivados de las danzas que las abejas realizan para influir en otras [38].

En general, para que surjan esquemas de coordinación emergente se requieren:

- Proceso de retroalimentación: bucles de retroalimentación, tanto positivos como negativos
- Espacio de memoria compartida: donde los agentes puedan escribir/leer información de interés colectivo.

- Reglas locales de decisión: procesos de toma de decisión local basados en los estímulos recibidos
- Mecanismos completamente distribuidos

Un punto importante es que la coordinación emergente evita la introducción de mecanismos pre-establecidos, que fallan cuando la complejidad del entorno crece, o las condiciones del ambiente cambian.

2.7 Emociones

Algunas de las definiciones de emoción, que permiten crear una visión general del concepto, se presentan a continuación:

Definición 2.1: Según Denzin, citado en [42], define la emoción como “una experiencia corporal viva, veraz, situada y transitoria que impregna el flujo de conciencia de una persona, que es percibida en el interior de y recorriendo el cuerpo, y que, durante el trascurso de su vivencia, sume a la persona y a sus acompañantes en una realidad nueva y transformada – la realidad de un mundo constituido por la experiencia emocional.”

Definición 2.2: Kemper, citado en [42], comenta que “la definición de emoción primaria de Seymour Epstein es útil: una compleja y organizada predisposición a participar en ciertas clases de conductas biológicamente adaptativas, caracterizada por unos peculiares estados de excitación fisiológica, unos peculiares sentimientos o estados afectivos, un peculiar estado de receptividad, y una peculiar pauta de reacciones expresivas.”

Definición 2.3: Lawler, citado en [42], define las emociones como “estados evaluativos, sean positivos o negativos, relativamente breves, que tienen elementos fisiológicos, neurológicos y cognitivos.”

Definición 2.4: Brody, citado en [42], define las emociones como “sistemas motivacionales con componentes fisiológicos, conductuales, experienciales y cognitivos, que tienen una valencia positiva o negativa (sentirse bien o mal), que varían en intensidad, y que suelen estar provocadas por situaciones interpersonales o hechos que merecen nuestra atención porque afectan a nuestro bienestar.”

De acuerdo a las definiciones anteriores, se puede decir que las emociones son reacciones psicológicas y fisiológicas que ocurren en los individuos, y que condicionan su comportamiento ante las situaciones que se presentan en su entorno, afectando su proceso de toma de decisiones, producto de su interacción con el ambiente o con otros individuos, por lo que condicionan la respuesta de los individuos ante las situaciones, eventos, o vivencias, que se presentan en el entorno.

El espectro emocional en los seres vivos es complejo. En los humanos [42], las emociones sentidas no deben ser entendidas como simples manifestaciones mecánicas o fisiológicas a los cambios del entorno; de acuerdo a diversas teorías, la experiencia emocional de un sujeto depende de diversos factores [42]:

- Valoración consciente o inconsciente del estímulo.
- Origen del estímulo (qué o quién).
- Expectativas individuales.
- Identificación del individuo con el colectivo.

En [74] se menciona la lista definida como emociones básicas, las cuales son: alegría, sorpresa, tristeza, ira, disgusto, desprecio, miedo, vergüenza y culpa. Además, se dice que estas emociones no pueden ser descompuestas en unidades más simples, y que a partir de sus combinaciones se da origen a emociones secundarias o derivadas. Por otro lado, las emociones pueden ser positivas o negativas. A pesar de que existe un consenso en cuanto a cuales están en un espectro y cuales en otro, muchas veces depende del individuo y de la situación. En [29] se clasifica el espectro en emociones positivas/negativas individuales y colectivas, en el primer rango se encuentran alegría, felicidad, tristeza y depresión (las dos últimas negativas), y en el segundo admiración, compasión, rechazo e ira (las dos últimas negativas).

El dotar a entes artificiales de emociones es un campo abierto de investigación. Se han planteado distintos modelos emocionales artificiales [25]–[29][43], con el objeto de simplificar este espectro, y construir aplicaciones que puedan implementar emociones en entes artificiales, como agentes o robots. Por ejemplo, en [43, 75] se define un modelo emocional artificial bidimensional, en el marco de una metodología para el modelado de sistemas emergentes y auto-organizados (MASOES), que considera un conjunto de emociones, tanto positivas como negativas, que promueven en el agente un comportamiento individual (reactivo, cognitivo) o

social (imitativo). El modelo considera en el eje X el nivel de activación de la emoción, y en el eje Y el nivel de satisfacción del agente. En la Figura 2.3 se observa el modelo, y la distribución de las emociones en el mismo. El nivel de activación indica el grado de influencia de la emoción en un instante determinado, y el nivel de satisfacción se relaciona con el estado interno del agente según los estímulos recibidos durante su actuación en el entorno.

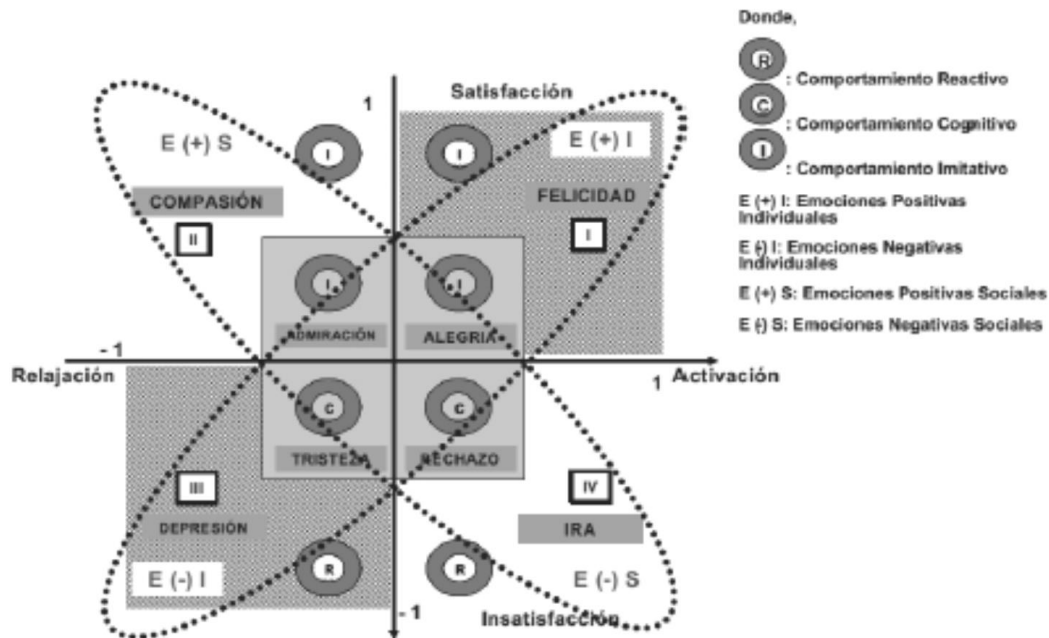


Figura 2.3 Modelo emocional MASOES (fuente [43])

Las emociones, en los sistemas artificiales, son implementadas buscando regular las interacciones entre los agentes y sus comportamientos en el entorno, en el marco del sistema complejo donde desempeñan un rol funcional [75].

UNA ARQUITECTURA PARA SISTEMAS MULTI-ROBOTS CON COMPORTAMIENTO EMERGENTE (AMEB)

“Mucho que aprender todavía tienes.”
-Yoda-

En este capítulo se presenta la *arquitectura para sistemas multi-robots con comportamiento emergente (AMEB)*, y se describen cada uno de sus componentes. El diseño de la arquitectura es genérico, y se adapta a sus aplicaciones y plataformas donde se instancie. En el caso de nuestra investigación, se toma como base un sistema multi-robots, inspirados en las sociedades de insectos, donde individuos con características simples trabajan en conjunto, y del colectivo emergen comportamientos que resuelven problemas complejos. Inspirados en este tipo de sistemas surge una clase de robots llamada robots de enjambre [44], los cuales son robots con capacidad limitadas y configuraciones simples, que de forma individual no pueden llevar a cabo tareas complejas [45]. En nuestro caso, y para este tipo de sistemas formados por robots de enjambres, se propone la arquitectura AMEB [46], la cual tiene como objetivo principal, facilitar la aparición de comportamientos emergentes en el sistema. AMEB tiene como características principales:

1. Es una arquitectura totalmente distribuida.
2. Permite el despliegue de interacciones entre los individuos.
3. Los procesos de toma de decisiones se llevan a cabo a nivel local.
4. Permite procesos de aprendizaje colectivo partiendo de lo individual.
5. Existe espacio de memoria compartida.

Estas características son elementos claves en todo proceso emergente [38]. Por otro lado, AMEB está estructurada en 3 niveles (Ver Figura 3.1): nivel individual, nivel colectivo y nivel de gestión de conocimiento y aprendizaje; cada nivel se encarga de gestionar procesos específicos del sistema.

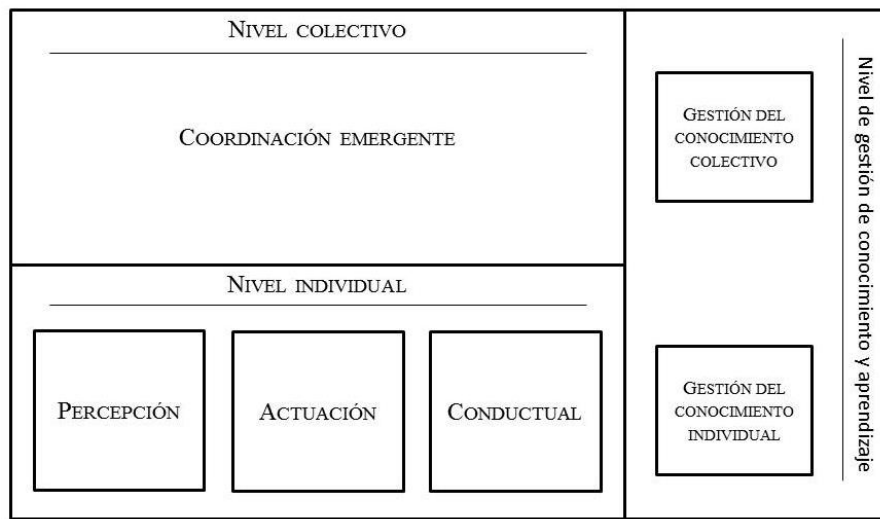


Figura 3.1 Arquitectura AMEB

3.1 Propiedades generales de la arquitectura

- Genérica: la arquitectura es general, la implementación de mecanismos de aprendizaje, razonamiento, entre otros, dependen del problema particular, y de las características particulares del sistema sobre el cual sea implementada.
- Híbrida: la arquitectura está diseñada para facilitar la generación de comportamientos reactivos, cognitivos e imitativos a nivel individual en un sistema multi-robot.
- Social: lo social es inherente a los sistemas multi-agentes, y en este caso, al sistema multi-robot (se puede considerar dentro de la clasificación de enjambre de robots). En general, en el sistema los individuos interactúan en pro de un objetivo común.
- Emocional: se incorpora un componente emocional, con el objeto de mejorar la respuesta de los individuos a la incertidumbre del sistema, así como para facilitar la aparición de comportamientos emergentes y auto-organizados en el mismo.
- Distribuida: la arquitectura es distribuida, y sus componentes se instancian en cada individuo y en la nube.
- Emergente: despliega todas las características claves de todo proceso emergente, por lo que permite que emerjan comportamientos en el sistema multi-robot.

3.2 Nivel Individual

El diseño de la arquitectura toma como base un sistema multi-robot, formado por robots de propósito general de bajo costo [45], inspirados en la filosofía de robots de enjambre [8], [44], los cuales son robots simples en su configuración, con una arquitectura básica de dos niveles: software y hardware. El nivel de software controla sus actuadores, sensores y dispositivos de comunicación, mediante un conjunto de librerías que permiten implementar rutinas en la capa de control de hardware. El nivel de hardware se estructura en cuatro capas:

1. Capa de control: esta capa es la responsable de gestionar los dispositivos físicos del robot. En esta capa de control, solo se ejecutan órdenes propias de acciones básicas del robot.
2. Capa de locomoción/actuación: esta capa controla el mecanismo de locomoción del robot, de configuración diferencial, y cualquier otro actuador que se implemente sobre la plataforma.
3. Capa de percepción: gestiona los sensores que sean implementados en la plataforma.
4. Capa de comunicación: esta capa gestiona los dispositivos de comunicación implementados en el robot.

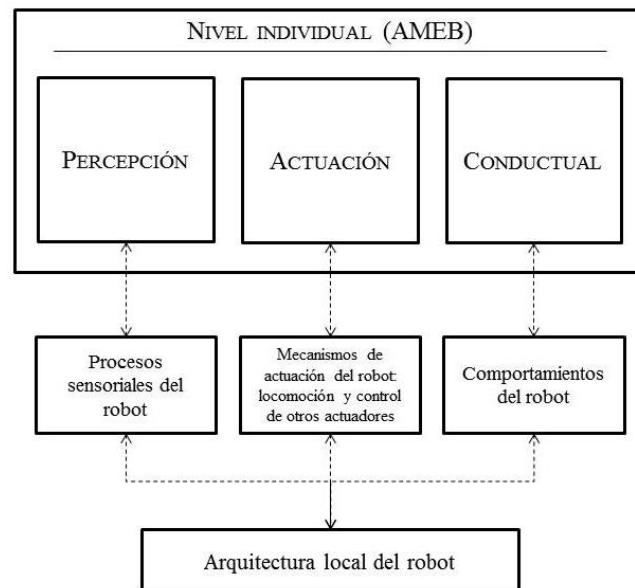


Figura 3.2 Nivel individual AMEB

Esta arquitectura local del robot está estrechamente relacionada con el nivel individual de AMEB. El nivel individual está estructurado en tres componentes (Ver Figura 3.2): percepción, actuación, conductual.

3.2.1 Componente de percepción

Este componente es el responsable de obtener los datos provenientes de los sensores del robot, procesarlos, y convertirlos en información útil para ser considerada un estímulo que active otros procesos internos de la arquitectura, que den como resultado un comportamiento a ser ejecutado por el robot (ver Figura 3.3).

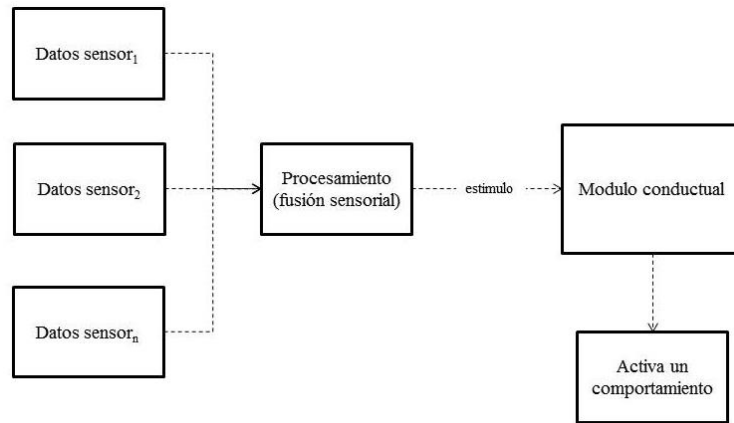


Figura 3.3 Proceso sensorial

Ese componente lleva a cabo un proceso de interpretación sensorial. En el caso de la plataforma de prueba propuesta, los robots están dotados de los siguientes sensores:

1. Sensores infrarrojos para detección de marcas en el suelo.
2. Sensor de proximidad para la detección de objetos.

Los sensores captan información distinta, por lo que el paso de asociar los datos provenientes de ellos es simple. El proceso de percepción se lleva a cabo de la siguiente forma:

1. Se aplica el factor emocional (Fe_t) activo en el instante del muestreo. El factor emocional influye en la forma como el robot percibe el estímulo del entorno; por ejemplo, influye en la distancia a la que es capaz de detectar un objeto. De forma general, se puede describir por la ecuación 3.1.

$$\text{Sensor}_i = \text{valor}_{\text{medido}} * Fe_t \quad (3.1)$$

Donde: $Sensor_i$ = valor final medido del sensor i, $valor_{medido}$ = valor real medido, Fe_t = factor emocional

1. Se capturan los datos provenientes del entorno.
2. Se clasifican según la fuente de donde provienen.
3. Se ordenan los datos recibidos según su prioridad. Esta prioridad depende del peso de cada sensor, establecido previa configuración del robot.
4. Se activa el componente arquitectónico correspondiente de acuerdo al resultado del proceso anterior.

En resumen, este componente gestiona los sensores del robot, con el objeto de generar información que sirva de insumo para los otros componentes de la arquitectura.

3.2.2 Componente de actuación

Este componente se encarga de traducir instrucciones generadas en los distintos niveles de la arquitectura, en consignas de movimiento de los diferentes actuadores que pudiese implementar el robot en su estructura. El robot presentado en [45] posee en su estructura un sistema de tracción diferencial, compuesto por dos motores, variaciones del diseño pudiesen implementar otro tipo de actuadores para funciones distintas a la tracción. La velocidad de los motores se ve afectada por el factor emocional del robot de acuerdo a la ecuación 3.2.

$$velocidad_{mi} = velocidad_{actual,i} * Fe_t \quad (3.2)$$

Donde: $Velocidad_{mi}$ = velocidad final de motor i, $velocidad_{actual,i}$ = velocidad actual del motor i, Fe_t = factor emocional

3.2.3 Componente conductual

El componente central del nivel individual es el componente conductual, este componente se encarga de gestionar los procesos que dan como resultado el comportamiento del robot. AMEB basa el funcionamiento de los robots en comportamientos, inspirado en los trabajos [4] [9]. Para ello, se definen un conjunto de comportamientos clasificados en primarios y complejos, los primeros son comportamientos básicos relacionados con las capacidades del robot. Entre ellos se encuentran: avanzar, girar, sensar, parar, entre otros. Los complejos se generan de la conjunción de dos o más comportamientos primarios, y estos, a su vez, se clasifican en:

1. Comportamiento reactivo: este tipo de comportamiento se asocia en primera instancia al *instinto* de sobrevivencia del robot, se activan cuando el estímulo recibido conlleva a una acción de forma directa, es decir, no pasa por un proceso de *razonamiento*. Ejemplo: parada del robot ante una eminente colisión.
2. Comportamiento cognitivo: el individuo pasa por un proceso cognitivo, donde mediante algún mecanismo de razonamiento toma una decisión con respecto a la acción que va a ejecutar ante un determinado estímulo.
3. Comportamiento imitativo: el individuo busca imitar los comportamientos que ejecutan los otros miembros del sistema.

Se pueden dar comportamientos híbridos, por ejemplo: imitativo – reactivo, cognitivo – imitativo, dependiendo de la dinámica del sistema. Ejemplos de este tipo de comportamientos son:

1. Explorar: mediante este comportamiento, el robot es capaz de explorar el entorno de forma aleatoria. Requiere de la capacidad de moverse y girar, y acontece cuando está alegre (comportamiento imitativo).
2. Evasión de obstáculos: permite que el robot evada obstáculos, que pueden ser objetos fijos o móviles. Requiere de las capacidades de moverse, girar y sensor, y acontece cuando tiene ira y rechazo (comportamiento reactivo).
3. Persecución: permite que el robot siga durante un tiempo determinado a otro robot. Requiere de las capacidades de moverse y sensor, y acontece cuando está alegre (comportamiento imitativo).
4. Refugio: permite al robot buscar una zona segura (representada por marcas en el suelo), y mantenerse en ella hasta alcanzar el estado deseado. Requiere de las capacidades de moverse, y acontece cuando está triste o con sentimientos de rechazo (comportamiento cognitivo).
5. Enfrentamiento: dependiendo de su estado emocional, el robot puede enfrentarse a otro, cuando se presente un conflicto por un recurso. Requiere de la capacidad de moverse, y acontece cuando se tiene ira (comportamiento reactivo).
6. Recargar: el robot puede satisfacer su necesidad de energía. Requiere de la capacidad de conectarse, y acontece cuando está alegre, triste o neutro (comportamiento cognitivo).

Los comportamientos específicos mencionados se dan en el marco de los *estados mentales* de los robots, que tienen implícito alcanzar un objetivo o meta dentro del sistema. Se definen estados mentales básicos y estados mentales que van emergiendo, a partir de la interacción de los robots con el entorno y con otros individuos, que se derivan de esas metas primarias asociadas a la búsqueda del bienestar del robot - como su sobrevivencia, por ejemplo -. Vemos así, que en los estados mentales se asocian los objetivos que en un instante t quiere alcanzar un robot, con los comportamientos necesarios para el logro del objetivo. A continuación, se presentan algunos estados mentales y los objetivos asociados a estos:

1. Sobrevivir: el robot busca mantener su integridad durante su funcionamiento.
2. Socializar: el robot busca entablar relaciones con otros individuos.
3. Competir: estado mental que mantiene al robot en disposición de luchar por recursos (zonas seguras, zonas de carga, etc.)
4. Negociar: el robot busca entablar acuerdos, con el fin de compartir recursos.

En AMEB, el estado mental del robot no solo asocia objetivos y comportamientos, un estado mental, en nuestra arquitectura, asocia, además de lo antes mencionado, una emoción que afecta la forma en que el comportamiento se ejecuta (como se mostró en la lista de tipos de comportamientos mostrada anteriormente). Por lo que en general, un estado mental se representa mediante la n-tupla:

$$EM_{i,t} = \langle C, E, M \rangle$$

Donde,

$EM_{i,t}$ = Estado mental i en un instante de tiempo t .

C = conjunto de comportamientos específicos posibles del robot en el instante t .

E = emoción en el instante t , viene dada por el índice de satisfacción en el que se encuentra el robot.

M = conjunto de objetivos que el robot desea alcanzar en el instante t . Pueden ser metas a corto o mediano plazo.

En ese sentido, para el $EM_{i,t}$ el robot tiene una emoción E , con un conjunto de comportamientos específicos C , que le permiten alcanzar las metas M planteadas en ese instante de tiempo. Así, las emociones son un factor que influye en cómo se llevarán a cabo los comportamientos asociados. En función de lo anterior, se diseña el módulo conductual, de forma tal que sea capaz de gestionar los distintos tipos de comportamiento que ocurren en el sistema. La Figura 3.4 muestra la organización del módulo conductual, la cual está estructurada en cuatro capas: una capa afectiva transversal a todas las demás, que influye en la forma como los comportamientos se ejecutan, en esa capa se implementa el modelo emocional de AMEB – que se explicará más adelante –, y es ahí donde se seleccionan los comportamientos a ejecutar; y tres capas encargadas de manejar cada uno de los tipos de comportamiento que gestiona AMEB, estas capas almacenan información en una base de conocimiento, con el fin de construir a partir de las experiencias individuales el conocimiento colectivo del sistema.

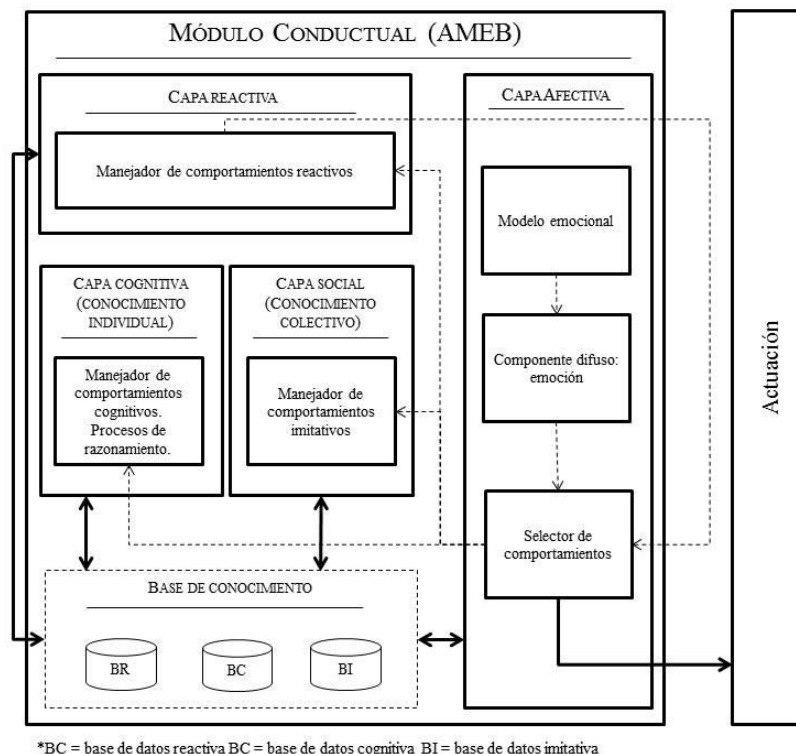


Figura 3.4 Módulo conductual AMEB

A continuación se describen las capas y otros elementos generales que conforman el componente conductual:

1. Capa reactiva: se encarga de gestionar los comportamientos reactivos del sistema, en esta capa se define el conjunto de comportamientos que el robot puede llevar a cabo, las reglas que activan cada uno de ellos, y las rutinas que implementan cada comportamiento.
2. Capa cognitiva: esta capa genera comportamientos cognitivos usando mecanismos cognitivos (razonamiento y aprendizaje), y tiene un proceso de toma de decisión (intencional, deliberativa, etc.). En esta capa se manejan, además, las metas del individuo.
3. Capa social: esta capa facilita el comportamiento social del individuo, a través del aprovechamiento del conocimiento de los otros individuos en situaciones similares. Para ello, maneja un set de comportamientos imitativos, junto con sus rutinas asociadas.
4. Capa afectiva: se propone una capa afectiva con el objeto de que los individuos del sistema puedan experimentar emociones. En esta capa se implementa un modelo emocional, el cual define el espectro emocional de los robots; un componente basado en lógica difusa que a partir de una serie de factores propios del robot, da como resultado el estado emocional del individuo; y un selector de comportamientos, que a elige el comportamiento a ejecutar según el estado emocional o la capa reactiva del módulo.

3.3 Nivel colectivo (coordinación emergente)

Este nivel se encarga de gestionar los mecanismos que permiten que los individuos del sistema se coordinen en la ejecución de sus tareas. Los robots del sistema presentan las siguientes características [88]:

- Tienen poco o ningún conocimiento del estado global del sistema: los individuos no poseen conocimiento del estado global del sistema, ni del objetivo como colectivo.
- Poca o nula información sobre los otros individuos: de forma general, los individuos no poseen información sobre el estado de los otros integrantes del sistema.
- Su proceso de toma de decisiones es local: la toma de decisión por parte del individuo está regulada por reglas locales, estas reglas pueden ser un reflejo a una acción, pueden ser generadas mediante planes pre-establecidos o algoritmos. Puede darse el caso en el que estas opciones se combinen para la toma de una decisión.

Estos aspectos son características propias de los sistemas emergentes, donde la coordinación emerge de las dinámicas que ocurren en el sistema. Así, el nivel colectivo basa su funcionamiento en el concepto de coordinación emergente, por lo que no existe un ente central que coordine al equipo de robots, sino que los procesos de coordinación emergen de las interacciones que se dan en el sistema.

Por otra parte, la emergencia aparece en el sistema, si además de lo comentado anteriormente, existe también lo siguiente [88]:

- Micro y macro niveles: A nivel micro se encuentran los robots/agentes que conforman el sistema, cada uno con sus propias capacidades y su propio comportamiento, el comportamiento del sistema macro es producto de las acciones de cada individuo a nivel micro.
- Mecanismos de comunicación a nivel micro: los elementos que componen el sistema deben poder comunicarse entre ellos, ya sea de forma indirecta o directa.
- Memoria colectiva: en la memoria colectiva se almacena información importante del sistema como un todo, y además, información específica de los subsistemas, los cuales colocan y extraen información de la memoria. La información almacenada en esta memoria está relacionada con un proceso de aprendizaje colectivo.

En la Figura 3.5 se presenta la estructura del módulo colectivo de AMEB, donde se identifican dos capas centrales: el gestor de interacciones y el gestor de acciones. Cada individuo del sistema representa un microsistema dentro del sistema global o macro, las interacciones al nivel micro permiten la aparición de fenómenos a nivel macro, que al ser observables, se puede considerar la aparición de la emergencia en el sistema.

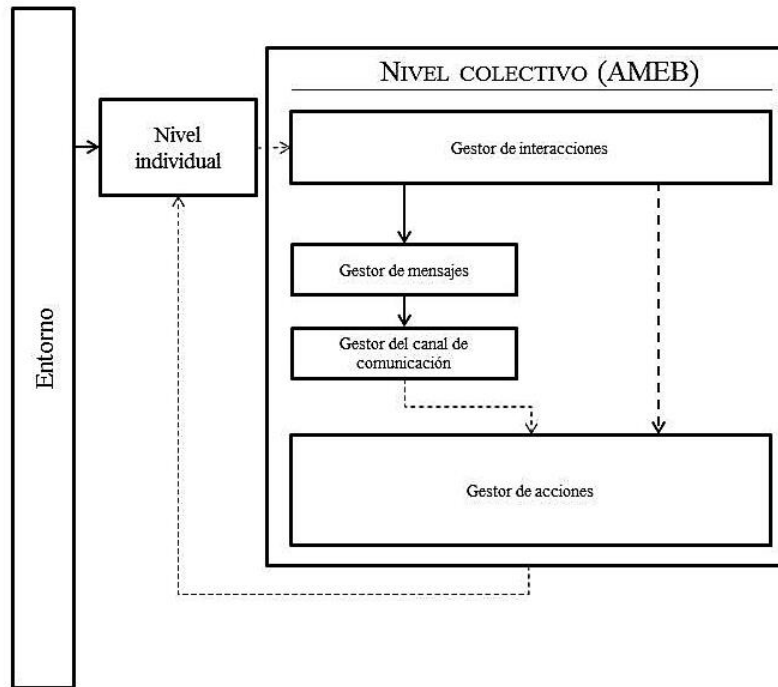


Figura 3.5 Módulo Colectivo [88]

El nivel individual se encarga de gestionar los estímulos (mensajes, marcas en el suelo, detección de obstáculos, etc.) que se generan en el entorno, y que afectan el comportamiento de los individuos. Algunos de estos estímulos se traducen en necesidades de interacción, con el fin resolver alguna situación que se presente en el entorno. Estas *necesidades de interacción* se elevan al nivel colectivo, según el siguiente proceso:

1. El gestor de interacciones recibe la información de cada individuo.
2. La información es clasificada como:
3. Interacción directa.
4. Interacción indirecta (estigmergia²).
5. En función del mensaje recibido (estímulo), se envía la información al módulo conductual del individuo para que se ejecute un proceso de toma de decisión.

3.3.1 Gestión de interacciones en AMEB

En este nivel, se manejan las interacciones entre los individuos, las cuales pueden ser [88]:

² Comunicación entre agentes a través del entorno.

- Directas: a través del pase de mensajes, que pueden ser de dos tipos:
 - Mensajes globales: son mensajes de difusión amplia, sin información específica para un tipo de receptor en particular, ejemplo: un robot envía un mensaje indicando que presenta una falla.
 - Mensajes con fines específicos: son mensajes que portan información específica para cierto tipo de receptores. Por ejemplo: un robot encuentra una fuente de recarga, y envía un mensaje con información específica para los robots que están con bajo nivel de energía.
- Indirectas: a través de marcas artificiales en el ambiente. Estas marcas pueden ser dejadas por robots (feromonas artificiales), o pueden encontrarse en el entorno (ejemplo: marcas en el suelo), que al ser detectadas por algún robot causan estímulos en él.

El componente gestor de interacciones se encarga de recibir la información proporcionada por el nivel individual de cada robot, la cual representa una necesidad de interacción [88]. Dicha información recibida puede ser:

- Un estímulo que recibe el robot causado por una modificación en el entorno (marca en el suelo, feromona artificial, etc.).
- Un estímulo causado por un mensaje enviado por otro individuo del equipo.

El gestor toma en cuenta el mecanismo de percepción que se activó con el estímulo, y lleva a cabo el siguiente proceso:

1. Recibe la información del estímulo:

$\langle \text{data}, \text{sensor_fuente}, R_i \rangle$,

Donde, data: información del estímulo, sensor_fuente: sensor que capta la información (visual, mensaje, etc.), R_i : robot que recibe el estímulo.

2. Clasifica la información de acuerdo al sensor fuente.
3. La información es enviada al gestor de acciones.

3.3.2 Gestor de acciones

Este gestor maneja una serie de reglas de actuación por defecto, de acuerdo a las capacidades del robot y del estímulo percibido. Está relacionado con el módulo conductual del nivel individual,

que como se describió anteriormente, gestiona la actuación del robot, y es donde se definen cada uno de sus comportamientos básicos. La Tabla 3.1 presenta un ejemplo de las reglas establecidas y su acción asociada. Las reglas y su consecuente, dependen directamente de las capacidades del individuo definidas en el nivel individual (módulo conductual), acorde a sus especificaciones de hardware y software.

Tabla 3.1 Reglas asociadas al gestor de acciones

Tipo de estímulo	Regla	Acción
Marcas en el suelo	Regla 1: Si representa una zona de carga, entonces revisar estado actual ^enviar mensaje de difusión.	Enviar mensaje de difusión específico. Si el estado actual indica necesidad de recarga, entonces permanecer en la zona.
	Regla 2: Si representa una zona segura, entonces revisar estado actual ^ enviar mensaje de difusión.	Si el estado actual indica necesidad de refugio, entonces permanecer en la zona. Enviar mensaje de difusión.
	Regla 3: Si representa un límite, entonces detenerse.	Detenerse. Planificar próxima acción.
Detección de obstaculo	Regla 4: Si es un objeto fijo, entonces parar.	Detenerse. Planificar próxima acción.
	Regla 5: Si es un objeto móvil, entonces planificar acción.	Planificar próxima acción.
Detección de feromona artificial.	Regla 6: Si la concentración de feromona es baja, entonces depositar feromonas.	Depositar feromona
	Regla 7: Si la concentración de feromona es alta, entonces seguir rastro.	Depositar feromona.Seguir rastro.
Mensaje recibido.	Regla 8: Si el mensaje es global, entonces analizar mensaje.	Planificar próxima acción a seguir.
	Regla 9: Si el mensaje contiene información específica, entonces revisar estado interno para decidir si debe ser atendido.	Si el mensaje debe ser atendido, planificar próxima acción a seguir. Si el mensaje no debe ser atendido, ignorar y seguir con la acción que se estaba ejecutando.

El gestor de acciones es el responsable de seleccionar los comportamientos que el robot debe ejecutar de acuerdo a las reglas de clasificación presentadas en la Tabla 3.1. Estas acciones forman parte del set de comportamientos del robot [15], y están asociadas a sus capacidades de hardware.

El gestor de acciones orquesta las acciones que cada robot debe realizar, en función del comportamiento colectivo. El comportamiento del sistema es la suma de los comportamientos individuales de los individuos que lo componen, este comportamiento es emergente si es observable a nivel macro. La coordinación se produce cuando el comportamiento de cada individuo no entra en conflicto con los comportamientos de los otros individuos, se lleva a cabo una tarea que involucra dos o más individuos, y a nivel macro se observa una acción coordinada. Esto es posible por lo siguiente:

1. Los comportamientos reactivos tienen prioridad sobre los cognitivos e imitativos, esto en busca de garantizar la supervivencia del robot en el entorno.
2. Cada robot toma decisiones locales que buscan: salvaguardar su integridad, solucionar su objetivo inmediato: desplazarse, cambiar de dirección, etc.
3. Los robots interactúan con el entorno y con otros individuos, dependiendo del estímulo que reciben.
4. La interacción, sea directa o indirecta, puede generar un comportamiento social en el individuo que puede traducirse en una necesidad de coordinación.

Al final, emerge un comportamiento global del sistema, en donde la coordinación se da de forma natural o emergente. En específico, cada individuo R_n ejecuta un conjunto $C_{R_n} = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$ de comportamientos en un intervalo de tiempo $[t_0, t_n]$, en donde los objetivos de algunos pueden coincidir, y es cuando la coordinación emergente se produce:

$$C_{\text{colectivo}} = C_{S_{R0}} \cup C_{S_{R1}} \cup \dots \cup C_{S_{Rn}}$$

Donde:

$$C_{S_{R0}} \subseteq C_{R0}, C_{S_{R1}} \subseteq C_{R1}; \dots; C_{S_{Rn}} \subseteq C_{Rn}$$

El conjunto de comportamientos $C_{\text{colectivo}}$ en un intervalo de tiempo $[t_0, t_n]$, representa el comportamiento global del sistema (es lo que emerge a nivel macro).

3.3.3 Gestor de mensajes

Cuando la interacción es clasificada como directa, este componente recibe la información del gestor de interacciones, y se encarga de construir el mensaje a ser enviado. El mensaje contiene información sobre el entorno (tipo de información sensorial captada), información sobre el estado emocional del emisor, información sobre el estado emocional del receptor objetivo (si aplica). De forma general, el mensaje es una N-tupla del tipo:

$$\langle I, S_f, E_e, E_r \rangle$$

Donde:

I: información captada por el sensor.

S_f : sensor fuente.

E_e : estado emocional emisor.

E_r : estado emocional del receptor objetivo.

Si el valor de E_r es nulo, el mensaje está dirigido a todos los individuos del grupo (difusión global), en caso contrario, va dirigido a individuos con estado emocional similar (difusión específica). Este mensaje es enviado al gestor de canales de comunicación.

3.3.4 Gestor de canales de comunicación

Los individuos que conforman el sistema pueden contar con distintos canales de comunicación según su configuración, por ejemplo: conexión wifi, conexión inalámbrica vía protocolo IEEE 802.15.4, comunicación Bluetooth®, entre otros; esto hace que los protocolos para el envío de mensajes puedan cambiar. Este componente permite seleccionar el canal de comunicación de acuerdo a la configuración de los robots/agentes, y permite construir el mensaje de acuerdo al protocolo de los dispositivos. El componente debe permitir:

- Configurar el dispositivo de hardware instalado en los robots.
- Configurar el protocolo de comunicación propio del dispositivo, con el fin de enviar el mensaje construido en el módulo anterior.

3.4 Nivel de gestión de conocimiento y aprendizaje

En este apartado se describe este nivel de forma general, el mismo debe ser implementado de acuerdo a las características de los robots y de la plataforma donde se instancie la arquitectura. El nivel de gestión de conocimiento y aprendizaje se encarga de la implementación de los mecanismos de aprendizaje del sistema. Los robots construyen su conocimiento mediante un proceso de aprendizaje individual, el cual se da mediante la interacción con el entorno y con los otros robots del sistema, a través de un mecanismo *top-down* que va lo colectivo a lo individual [43]. A su vez, existe un proceso de aprendizaje colectivo que es del tipo *bottom-up*, que va de lo individual a lo colectivo. En el mecanismo *bottom-up* es donde subyace el proceso emergente, es lo que surge desde la integración/interacción de los componentes atómicos de un contexto. En este caso, desde los componentes del sistema multi-robot ocurre un proceso de construcción de conocimiento colectivo por la integración/fusión/selección del conocimiento individual. El mecanismo *top-down*, en cambio, es un proceso de retroalimentación desde lo macro hacia lo individual, donde se usa ese conocimiento construido socialmente para decidir localmente, es decir, ese conocimiento social ahora es explotado individualmente. En la Figura 3.6 se observa el proceso de construcción de conocimiento en AMEB, inspirado en [43].

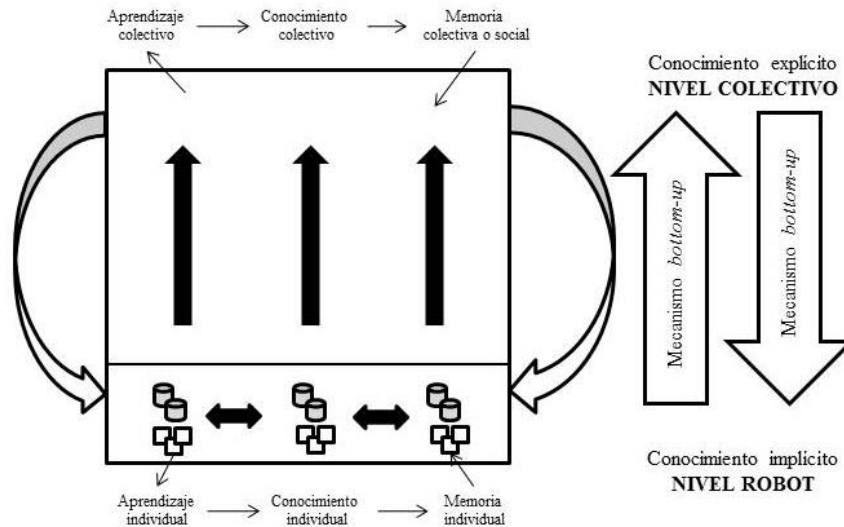


Figura 3.6 Mecanismos y tipo de aprendizaje

En este proceso se llevan a cabo 3 fases, que permiten crear, convertir, integrar y difundir el conocimiento, estas son [43]:

1. Socialización: los individuos comparten experiencias a través de procesos locales de interacción; en esta fase, el conocimiento implícito debe ser convertido a conocimiento explícito, es decir, debe ser transformado, para que pueda ser comunicado a los otros individuos del sistema.
2. Agregación: el conocimiento explícito construido en la fase de socialización debe pasar por una serie de procesos de filtrado, fusión, clasificación y ampliación, tomando en cuenta que el mismo proviene de distintas fuentes, esto con el objeto de crear conocimiento explícito que sea más confiable.
3. Apropiación: esta fase se encarga de que cada individuo se apropie del conocimiento explícito generado, transformándolo en implícito a través de mecanismos de aprendizaje individual.

En AMEB, el conocimiento individual se construye en cada robot, y se almacena en espacios de memoria compartidos, para que el mismo se propague a través de los demás individuos del sistema de acuerdo a los mecanismos de aprendizaje instanciados sobre la arquitectura.

3.5 Emociones en AMEB

AMEB implementa un modelo emocional con el objeto de dotar de emociones a los individuos del sistema. Las emociones regulan el comportamiento del individuo, modificando sus respuestas ante estímulos similares, además, sirven de mecanismo de adaptación ante las dinámicas que se presentan en el entorno. El modelo presentado se basa en los modelos propuestos en los trabajos [26, 25, 51,43], en ellos se plantean representaciones que permiten definir espectros emocionales, así como también el flujo que sigue la emoción desde que el individuo recibe un estímulo hasta que la emoción decae o cambia.

La idea central de dotar de emociones a los individuos del sistema es que la arquitectura facilite la aparición de la emergencia y la auto-organización, asumiendo que las mismas ayudan a la aparición de estos fenómenos, debido a que los individuos son heterogéneos en comportamiento, y generan respuestas impredecibles ante los estímulos que perciben del entorno, según sus estados emocionales en un momento dado. El modelo emocional propuesto toma en cuenta dos aspectos:

1. El espectro de emociones artificiales a ser implementado.
2. El proceso emocional que se da en el individuo:

- a. El individuo recibe el estímulo del entorno.
- b. El estímulo es procesado y se genera un estado emocional.
- c. El individuo genera acciones en función del estado emocional.

Se considera un espectro de 4 emociones básicas y un estado neutro:

$$\text{emociones} = \{\text{ira, rechazo, neutro, tristeza y alegría}\}$$

Se representan en un espacio unidimensional, donde el eje x representa el nivel de satisfacción o insatisfacción del individuo en el intervalo $[-1, 1]$. Este modelo es una versión simplificada y adaptada del modelo bidimensional presentado en [29], el cual considera un espectro más amplio de emociones, y se fundamenta en dos dimensiones: activación del agente y grado de satisfacción. En nuestro caso, en el espacio se consideran emociones positivas y negativas: alegría (altamente positiva), tristeza (ligeramente positiva), rechazo (ligeramente negativa) e ira (altamente negativa), además de un estado neutro o de *no emoción*. El modelo permite definir tres sub-intervalos en base a la relación emoción – comportamiento: un intervalo de comportamiento reactivo, uno de comportamiento cognitivo y otro relacionado con comportamientos de tipo colectivo. (Ver Figura 3.7)

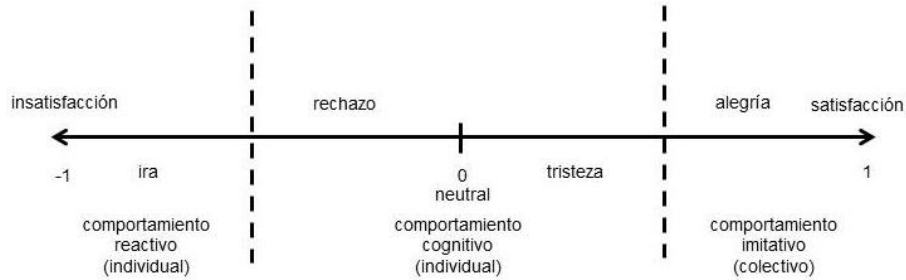


Figura 3.7 Modelo emocional de AMEB. [46]

El estado interno del robot define el estado emocional del mismo. Este es definido por su nivel de satisfacción, el cual está asociado a distintos factores relacionados a su actuación en el entorno:

1. Estado de batería: se relaciona al nivel de carga de batería en un instante t .

$$EB_t = \frac{nc_t}{cb}$$

Dónde,

nc_t = nivel de carga en un instante t .

cb = capacidad de carga de la batería.

2. Estado de operación: se refiere al tiempo efectivo de actuación en el sistema, se ve afectado por los bloqueos y demoras que afecten al robot.

$$EO_t = \frac{ta}{tt}$$

Donde,

ta = tiempo de actuación total.

tt = tiempo total de funcionamiento del sistema.

3. Estado de seguridad: relacionado a la supervivencia del robot, ese índice varía de acuerdo a las situaciones de riesgo a la que el robot se vea expuesto en el entorno: colisiones, enfrentamientos con otros robots, competencia por recursos, fallas, etc.

$$ES_t = \frac{c + f}{tt}$$

Donde:

c = número de colisiones.

f = número de fallas.

tt = tiempo total de funcionamiento del sistema.

4. Estado de interacción: mide el grado de socialización del individuo con el grupo, básicamente se mide por número de mensajes que intercambia el robot en el sistema.

$$EI_t = \frac{m_e + m_r}{tt}$$

Donde:

m_e = número de mensajes envía.

m_r = número de mensajes recibidos.

t_t = tiempo total de funcionamiento del sistema.

En general, el proceso de gestión emocional es el siguiente (ver figura 3.8). El robot recibe estímulos del entorno, los cuales afectan los parámetros que definen su estado interno. A partir de allí se define su estado emocional, que determina su índice de satisfacción, el cual finalmente es asociado a un tipo de comportamiento específico (Ver Figura 3.8). En [29, 52, 53, 54, 55] son considerados tres tipos de comportamiento: imitativo, cognitivo y reactivo, los cuales se relacionan con un estado emocional específico. En esta propuesta, se asumen los mismos principios: las emociones negativas conllevan a la resolución de los problemas desde lo individual a lo colectivo, los individuos toman decisiones basadas en procesos cognitivos e individuales; mientras que las emociones positivas llevan de lo colectivo a lo individual, los individuos buscan imitar el comportamiento del grupo, para definir sus propias acciones.

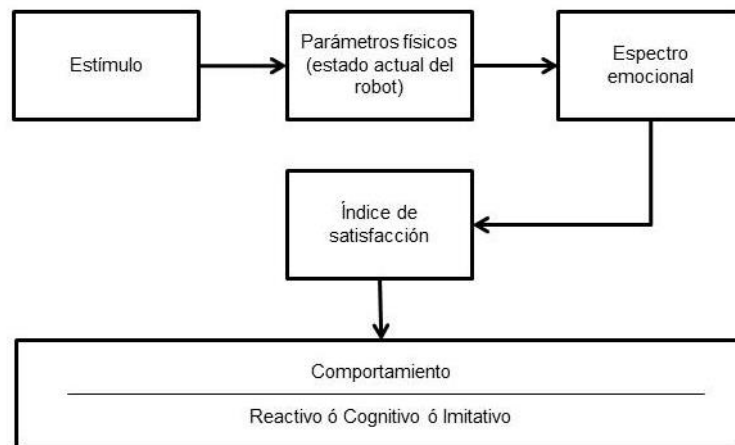


Figura 3.8 Proceso emocional

Lo anterior deriva en una estrecha relación entre el estado interno del robot, la emoción activa y su comportamiento, estos tres elementos definen las posibles acciones del robot en el entorno. La emoción, de forma general, predispone al individuo a un tipo de comportamiento en específico, y actúa como un regulador de las variables asociadas a dicho comportamiento. En la Tabla 3.2 se presentan las emociones definidas en el modelo, su clasificación, según [29], y su tipo de comportamiento asociado.

Tabla 3.2 Relación entre las emociones y el tipo de comportamiento

Emoción	Clasificación	Comportamiento
Alegría	Altamente positivo	Imitación
Tristeza	Ligeramente positivo	Cognitivo
Neutro	-	-
Rechazo	Ligeramente negativo	Cognitivo
Ira	Altamente negativo	Reactivo

En la Tabla 3.2 se observa que las emociones altamente positivas, como la alegría, predisponen al individuo a imitar el comportamiento de los otros miembros del equipo en el momento de la toma de decisiones; mientras que las ligeramente positivas, como la tristeza, conducen a un proceso donde predomina el aspecto cognitivo sobre el aspecto imitativo. Por otra parte, las emociones ligeramente negativas, llevan al individuo a un proceso de reflexión interna para la toma de decisiones. Finalmente, una emoción altamente negativa como la ira, conduce a comportamientos que son claramente reactivos, donde el individuo busca lograr su supervivencia reaccionando a los estímulos del medio ambiente sin un proceso cognitivo previo. Las emociones afectan el estado interno del robot; por ejemplo, si el robot está “triste”, entonces su capacidad de percibir el entorno se verá afectada; en cambio, si el robot es “feliz”, entonces su velocidad de desplazamiento será mayor. Los tipos de comportamientos que gestiona el modelo se definen a continuación:

- Imitativo: comportamientos en los que un individuo busca comportarse de manera similar a otro, por ejemplo: persecución.
- Cognitivo: comportamientos donde hay un proceso de razonamiento que permite la toma de decisiones por parte del individuo, por ejemplo: búsqueda de refugio.

- Reactivo: comportamientos donde el individuo busca sobrevivir, por ejemplo: evitación de obstáculos.

La inclusión de emociones en el sistema multi-robot busca mejorar su adaptabilidad a la dinámica del entorno, así como facilitar la aparición de la emergencia en el sistema, influyendo en la forma de ejecutar los comportamientos que cada individuo es capaz de llevar a cabo. La conjunción de comportamientos individuales define el comportamiento general del sistema, que por su naturaleza, no puede predecirse a priori [38].

Las consideraciones de implementación de la arquitectura AMEB y del modelo emocional en una plataforma multi-robot de propósito general, se describen en el anexo A. En el mismo se presenta, el diseño de hardware y software de la plataforma, así como la implementación del modelo emocional mediante lógica difusa.

“Nada puede existir para siempre.”
-Stephen Hawking-

En este capítulo se presentan los experimentos llevados a cabo para verificar aspectos inherentes a la arquitectura, desde el punto de vista de funcionamiento y de la posibilidad que ocurran fenómenos emergentes en ella. Además, se presenta una comparación cualitativa con otros trabajos similares.

4.1 Funcionamiento de la arquitectura

En esta sección se describen casos de estudio que permiten ver el funcionamiento de la arquitectura propuesta, y en específico, el proceso de coordinación emergente que se da en la misma. Se utilizaron para esta prueba robots construidos utilizando Lego® MindStorms con tracción diferencial y comunicación Bluetooth®. Además, se utilizó un sistema basado en visión artificial para la digitalización del entorno, y el control de los robots de AMEB, se implementó en un SMA como el que se presenta en la Figura 4.1. En general, el SMA está compuesto por los siguientes agentes:

1. Agente visión artificial: implementa un sistema de visión artificial que se encarga de operaciones sobre el entorno, y sirve de soporte a los robots del sistema.
2. Agentes físicos: son instanciados de dos formas, como robots virtuales (robots que actúan en el mismo entorno de los físicos, pero no tienen una instanciación de hardware) y como robots físicos.
3. Agente ACO: este agente se encarga de la implementación de un mecanismo de coordinación (algoritmo de optimización por colonia de hormigas), y brinda soporte a los agentes físicos.
4. Agente director de tránsito: este agente implementa mecanismos de gestión de tráfico en el entorno, con el fin de evitar colisiones entre los agentes, las cuales pueden ocurrir por las características de hardware de los robots utilizados, y las condiciones del entorno de prueba (coeficiente de roce del suelo, diferencia de velocidad de los motores, etc.); así como también, de gestión de los agentes físicos y virtuales que actúan en el entorno.

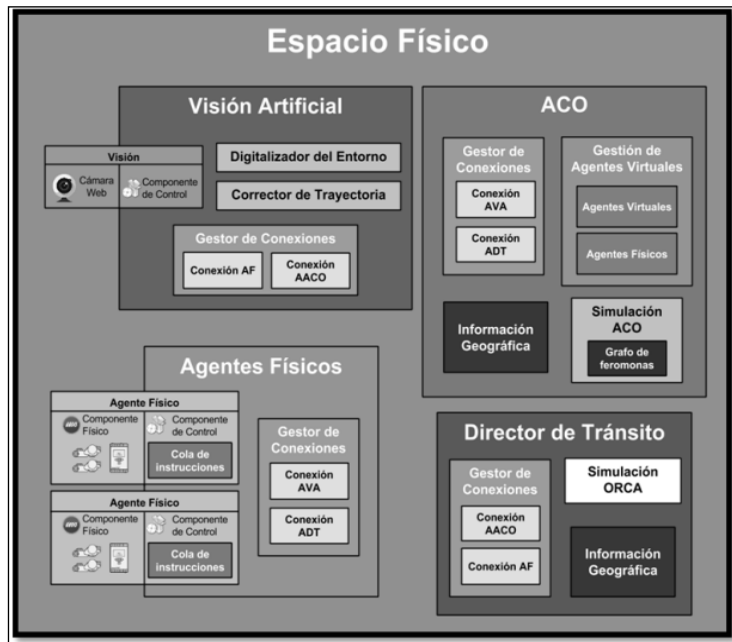


Figura 4.1 SMA del entorno de prueba

A continuación, se presentan dos casos de estudio, que serán utilizados para ilustrar el funcionamiento de AMEB, el primero emula la tarea de transporte de un objeto en las sociedades de insecto, y el segundo emula la tarea de búsqueda de rutas en un entorno con obstáculos.

4.1.1 Transporte de un objeto

El transporte de un objeto es una tarea común en algunas especies de insectos. Normalmente, las hormigas transportan objetos de gran tamaño, y para ello reclutan a otras hormigas, y coordinan una formación alrededor de los mismos que permitan trasladarlos [38]. Esta tarea de transporte ha sido utilizada por los investigadores, para evaluar las capacidades emergentes en los sistemas multi-robots [76, 77, 78]. En esta tarea en particular, ocurre el siguiente proceso:

1. La hormiga intenta mover un objeto.
2. Si el intento es exitoso, la hormiga lo lleva a la colonia.
3. Si no es exitoso, entonces la hormiga intenta reclutar otras hormigas, ya sea por marcas en el suelo (interacción indirecta) o contacto directo (interacción directa).
4. Cuando el transporte se va a realizar de forma cooperativa, entonces el método puede variar dependiendo del objeto a transportar. Por ejemplo, se pueden dar mecanismos de reposicionamiento alrededor del objeto, o descomposición del mismo.

La caracterización del proceso emergente se da de la siguiente manera:

- Objetivo del sistema macro: transportar un objeto.
- Macro nivel: sistema multi-robot.
- Micro nivel: robots de propósito general, objeto.
- Retroalimentación entre macro y micro niveles: objeto cambia de posición.
- Memoria colectiva: posición del objeto y acción realizada.
- Reglas locales de decisión: cada robot decide la próxima acción a ejecutar.

Se asume un entorno con 5 robots, un objeto, y obstáculos representados por marcas en el suelo (Ver Figura 4.2).

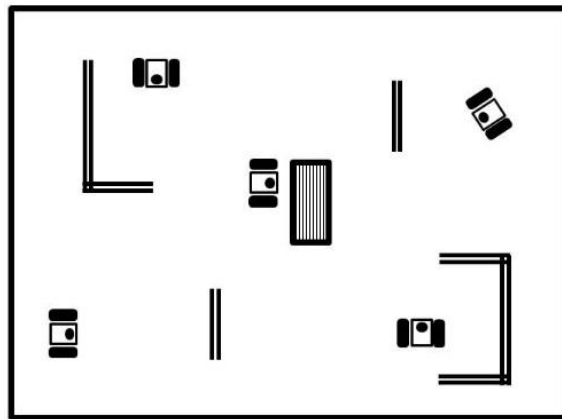


Figura 4.2 Escenario transporte de un objeto

A continuación, se describe el funcionamiento de cada uno de los módulos involucrados en el proceso de coordinación emergente de AMEB.

4.1.1.1 Gestor de Interacciones

En este caso de estudio, el módulo colectivo gestiona las interacciones que se presentan en la Tabla 4.1, las mismas se van generando a partir de la actuación de cada individuo en el sistema.

Tabla 4.1 Interacciones. Caso transporte de un objeto.

Interacción	Tipo
Percepción de marca en el suelo (obstáculo)	Interacción indirecta
Percepción de objeto (objeto a mover)	Interacción indirecta
Percepción de objeto móvil (robot)*	Interacción indirecta
Envío/recepción de mensaje	Interacción directa

*La detección de un objeto móvil (robot) para este caso, es considerado como una interacción directa (contacto directo), de acuerdo al modelo biológico en el que se inspira.

4.1.1.2 Gestor de acciones:

Cada robot explora el entorno durante un tiempo t , en donde su estado interno (como el nivel de batería) es actualizado de acuerdo a su interacción con el ambiente. El nivel individual de la arquitectura gestiona estos procesos (lo usa para definir su estado emocional, y por consiguiente, su comportamiento), usando la Tabla 4.1:

1. Si encuentra una marca en el suelo, entonces se activa el gestor de interacciones. En este caso, las marcas representan obstáculos, por lo que el robot debe tomar la decisión de qué hacer si encuentra una de estas marcas (para ello, usa su gestor de acciones):
2. Si percibe el objeto, entonces se activa el gestor de interacciones. En este caso, el robot puede (según su estado emocional):
 - a. Intentar mover el objeto.
 - b. Detenerse y esperar.

2.1 Si el intento de mover el objeto es exitoso, entonces el robot tratará de llevar el objeto hasta otro punto del entorno. Esto provoca una retroalimentación con el nivel macro, donde la posición p del objeto es actualizada.

2.2 Si el intento de mover el objeto no es exitoso, entonces el robot envía un mensaje global (gestor de mensajes y gestor de canal de comunicación), en donde informa de su incapacidad para mover el objeto. El robot espera durante un umbral de tiempo u que otro

robot llegue al objeto, para intentar moverlo. Durante esta maniobra, los robots pueden ejecutar lo siguiente:

2.2.1 Coincidir con uno de los robots en espera en el objeto (interacción directa).

Ir a punto 3 (gestor de acciones).

2.2.2 Posicionarse directamente sobre el objeto, e intentar el punto 2 (se activa el gestor de acciones).

3. Si detecta un objeto móvil en el entorno (como otro robot), entonces debe ejecutar una maniobra de evasión (gestor de interacciones, gestor de acciones).

El proceso anterior es llevado a cabo por cada robot. Como se ve, se observa que el individuo lleva a cabo procesos locales de toma de decisiones, se dan procesos de actualización de la memoria compartida, y de retroalimentación entre el nivel micro y el macro. El sistema funciona durante un tiempo t finito, o mientras existan robots activos durante ese tiempo.

En la ejecución de este caso de estudio, intervienen todos los niveles de la arquitectura: el gestor de interacciones se encarga de procesar las interacciones que ocurren, que en este caso se dan al detectar una marca o al objeto; el proceso de percepción se lleva a cabo en el nivel individual, específicamente en el módulo de percepción definido anteriormente. Por otro lado, los gestores de mensaje y de canal de comunicación se activan para construir el mensaje a enviar a los otros individuos. También, el gestor de acciones se encarga en conjunto con el nivel individual, de generar las acciones que el individuo debe ejecutar. En todo momento, el componente emocional del nivel individual, así como los componentes de actuación y percepción, están activos para gestionar el funcionamiento del individuo. En la Tabla 4.2 se resume el funcionamiento de cada componente de la arquitectura, con respecto a las acciones que llevan a cabo.

Tabla 4.2 Relación componente AMEB – acción ejecutada.

Componente	Acción
Nivel individual	- Percibe marcas en el suelo.
	- Percibe el objeto.
	- Envía mensajes a los otros individuos.
	- Gestiona las acciones que ejecutan los robots.
	- Gestiona las emociones de cada individuo.
Nivel Colectivo	- Facilita los mecanismos de coordinación que emergen al encontrar el objeto.
Nivel de gestión de conocimiento	- Procesa y almacena el conocimiento que se genera durante la tarea.

4.1.2 Búsqueda de rutas

Las hormigas, al encontrar la ruta hacia una fuente de alimento, depositan feromonas en la ruta hacia la misma, con el fin de que otras hormigas de la colonia puedan conseguir el camino [11, 38]. El presente caso de estudio se inspira en ese proceso, y utiliza el sistema multi-robots para encontrar rutas óptimas libres de obstáculos, en entornos no estructurados (Figura 4.3).

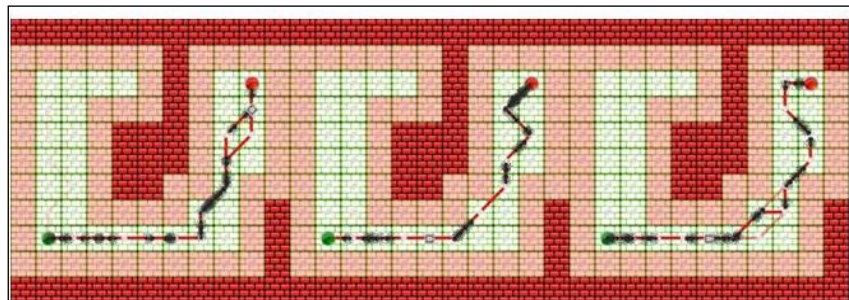


Figura 4.3 Escenario de búsqueda de rutas

En particular, se identifican los siguientes componentes:

- Objetivo del sistema macro: encontrar una ruta libre de obstáculos.
- Macro nivel: sistema multi-robot heterogéneo.

- Micro nivel: robots de propósitos generales (físicos y virtuales).
- Retroalimentación entre macro y micro niveles: camino conseguido derivado de las trazas dejadas por los robots.
- Memoria colectiva: feromona depositada.
- Reglas locales de decisión: cada robot calcula velocidad y dirección de su desplazamiento, en función de la feromona detectada y de los obstáculos en el camino.

4.1.2.1 Gestor de Interacciones:

En este caso se gestionan las interacciones que se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Interacciones. Caso búsqueda de rutas.

Interacción	Tipo
Percibir/depositar feromona artificial	Interacción indirecta
Percibir punto de llegada	Interacción directa
Percibir objeto móvil (robot)	Interacción directa
Percibir objeto fijo	Interacción directa

El nivel individual gestiona los procesos de cada uno de los robots durante la exploración del entorno en busca del punto de llegada. Por otro lado, cada robot deposita feromona artificial durante la ruta, apoyados en el componente de actuación del nivel individual. Los individuos pueden encontrar un obstáculo (nivel individual y gestor de interacciones), por lo que deben ejecutar un comportamiento de evasión activando el gestor de acciones. Además, en la ruta pueden encontrar otro robot, para este caso se utiliza el algoritmo *ORCA* [89, 90] para detectar una posible colisión entre dos individuos. Ese algoritmo toma como base la velocidad de desplazamiento de cada uno, para la generación de secuencias de movimiento que permitan evitar la misma. Para el caso de evasión de obstáculos, los mecanismos se pueden implementar de acuerdo a las necesidades de las tareas a realizar [87]. Para ello, es posible utilizar la información compartida (memoria colectiva) de posición y velocidad de los robots, para generar un comportamiento que evite la colisión. En este caso, la cooperación emerge de las

interacciones de los individuos. El gestor de interacciones, en este caso de estudio en particular, gestiona las interacciones que se generan al detectar obstáculos o a otro robot en la ruta, así como las interacciones indirectas debido a la detección de feromonas artificiales. La Tabla 4.4 resume el funcionamiento de los principales componentes de AMEB en la tarea ejecutada.

Tabla 4.4 Relación componente AMEB – acción ejecutada.

Componente	Acción
Nivel individual	- Percibe las feromonas artificiales.
	- Deposita las feromonas artificiales.
	- Percibe obstáculos.
	- Gestiona las consignas del movimiento de cada individuo.
Nivel Colectivo	- Facilita la cooperación de los individuos del sistema.
	- Facilita la coordinación de acciones entre los individuos.
Nivel de gestión de conocimiento	- Gestiona el conocimiento generado en el sistema.

4.2 Verificación de la emergencia en AMEB

AMEB está diseñada para facilitar la aparición de la emergencia en el sistema. Para que exista emergencia, ella debe ser percibida a nivel macro. En esta sección se describe un mecanismo de verificación, que permite determinar la aparición de la emergencia y la auto-organización en el sistema. Para caracterizar la emergencia en AMEB, se propone un conjunto de conceptos inspirados en [54], relacionados con las propiedades emergentes y auto-organizadas del sistema:

1. Densidad (D): Mide el grado de compacidad existente en el equipo de robots. Se mide como la cantidad de robots, y el número de interacciones, tanto directas como indirectas, en el sistema.
2. Diversidad (DI): Mide el grado de homogeneidad del grupo de robots que conforma el sistema.
3. Síntesis (S): Mide la calidad del mecanismo de agregación, en relación a la calidad del conocimiento colectivo generado, y a los mecanismos de retroalimentación empleados, que favorece el comportamiento colectivo.

4. Independencia (IN): Mide el grado de autonomía de los robots, en cuanto a sus capacidades para la toma de decisiones sin depender de otros robots. Se mide por la calidad del mecanismo de aprendizaje empleado por el robot, y por las decisiones que toma sin imitar o hacer consultas a otros robots. Se relaciona básicamente al comportamiento individual del robot (reactivo, cognitivo).
5. Emotividad (E): Mide el grado de emotividad del sistema, de acuerdo al modelo emocional implementado. Se mide por los cambios en el estado emocional que presentan los robots que conforman el sistema.
6. Auto-organización (AO): Es medida basada en tres aspectos: grado de satisfacción del sistema, su anticipación y su robustez [43]. El primero está relacionado al estado emocional de cada robot, el segundo se relaciona a la capacidad cognitiva de anticipar un cambio en el entorno, y el tercero está relacionado a la tolerancia a fallos del sistema.
7. Emergencia (EM): Mide el grado de evolución del sistema a través de la aparición de algunas propiedades emergentes, como patrones a nivel temporal y espacial, normas colectivas, etc.

Además de los conceptos anteriores, en [46] se definen un conjunto de conceptos arquitectónicos asociados al sistema modelado. En este caso, se refiere a la plataforma gestionada por la arquitectura AMEB. En la Tabla 4.5 se resumen estos conceptos, y su relación con la arquitectura propuesta [91].

Tabla 4.5 Conceptos Arquitectónicos

No	Concepto arquitectónico	Descripción	Instanciación en la plataforma	Componente AMEB
1	Número de robots (NR)	Se refiere al número de individuos del sistema	Se asocia al número de robots del sistema. Un valor Bajo es entre 3 y 6 individuos	-
2	Tipo de comportamiento (TC)	Se refiere a los distintos tipos de comportamiento que pueden tener los robots.	Comportamientos: reactivos, cognitivos e imitativos.	Nivel individual: componente conductual
3	Interacción directa (ID)	Se refiere a la cantidad de interacciones directas entre los robots.	Mecanismos de comunicación: envío de mensajes	Nivel Colectivo
4	Interacción indirecta (II)	Se refiere a la cantidad de interacciones de los robots a través del entorno.	Mecanismos de coordinación emergente. Mecanismos de comunicación.	Nivel colectivo: deposito Nivel individual: percepción/interpretación
5	Mecanismo de agregación (MA)	Relacionado a como la información que maneja el individuo puede ser útil al colectivo.	Gestión del conocimiento	Nivel de gestión de conocimiento y aprendizaje.
6	Componente reactivo (CR)	Relacionado a los comportamientos reactivos del individuo.	Asociado a la activación de comportamientos reactivos.	Nivel individual componente conductual
7	Componente cognitivo (CC)	Relacionado a los comportamientos cognitivos a través de procesos de razonamiento y aprendizaje.	Asociado a la activación de comportamientos cognitivos.	Nivel individual componente conductual
8	Componente emocional (CE)	Relacionado con las emociones del robot.	Asociado al tipo de comportamiento que se activa y la emoción que lo afecta en un instante.	Nivel individual: componente afectivo
9	Componente social (CS)	Relacionado a como interactúa el agente con los otros individuos del sistema.	Se asocia al número y tipo de interacciones entre los individuos y el uso del aprendizaje.	Nivel colectivo
10	Tipo de emoción (TE)	Relacionado al tipo de emociones presentes en el sistema.	Se asocia a las emociones activas en un instante para cada individuo.	Nivel individual: módulo afectivo

Con esos conceptos, se construye un Mapa Cognitivo Difuso (MCD) para constatar si AMEB permite la emergencia de procesos en el sistema multi-robots. En la Figura 4.4 se presenta el MCD para verificar la emergencia en AMEB, donde los nodos del 1 al 10 representan los conceptos arquitectónicos (ver Tabla 4.5), y los nodos del 11 al 17 los conceptos relacionados con las propiedades emergentes y auto-organizadas del sistema.

En general, un MCD permite describir el comportamiento de un sistema en términos de conceptos difusos [57], para ello se utilizan grafos dirigidos, en donde sus arcos representan relaciones causales entre los conceptos (nodos). Existen dos formas clásicas para establecer las relaciones entre los conceptos [57, 58, 59]: a) basado en la opinión de los expertos, o b) basados en datos históricos. En el caso concreto del modelo de verificación, en el MCD las relaciones establecen las causalidades entre los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas del sistema, y los conceptos arquitectónicos establecidos. Para este trabajo se optó por la opción basada en la opinión de los expertos, para establecer las relaciones de acuerdo al conocimiento teórico existente sobre las tareas que pudiese ejecutar el sistema, tomando como base los modelos clásicos de sistemas emergentes inspirados en las colonias de insectos, como las hormigas o las abejas [38].

De forma general, las relaciones causales (E) entre los conceptos C, son definidas, según [60], en una escala del 0 al 1, donde $E_{ji} = 0$ representa que el concepto antecedente C_j no influye sobre el consecuente C_i , mientras que $E_{ji} = 1$ indica que el concepto consecuente es muy sensible a los cambios del concepto antecedente. El signo del valor que representa el peso de la relación, indica si el concepto afecta positiva o negativamente al consecuente. Basado en ello, se utiliza la ecuación 4.1 para actualizar los conceptos [59, 61]:

$$C_i = \sum_{j=1 \text{ \& } j \neq i}^n C_j E_{ji} + C_i^{old} \quad (4.1)$$

Donde, n es el número de conceptos.

El algoritmo de ejecución del MCD es el siguiente [61]:

1. Obtener los estados iniciales para todos los conceptos (los expertos), según el sistema a modelar y el escenario a evaluar ($C = [C_0, C_1, \dots, C_n]$)
2. Obtener los valores de las relaciones causales (los expertos).

3. Mientras el sistema no converja a un estado estable:
 - a. Actualizar los estados de los conceptos usando la ecuación 4.1.

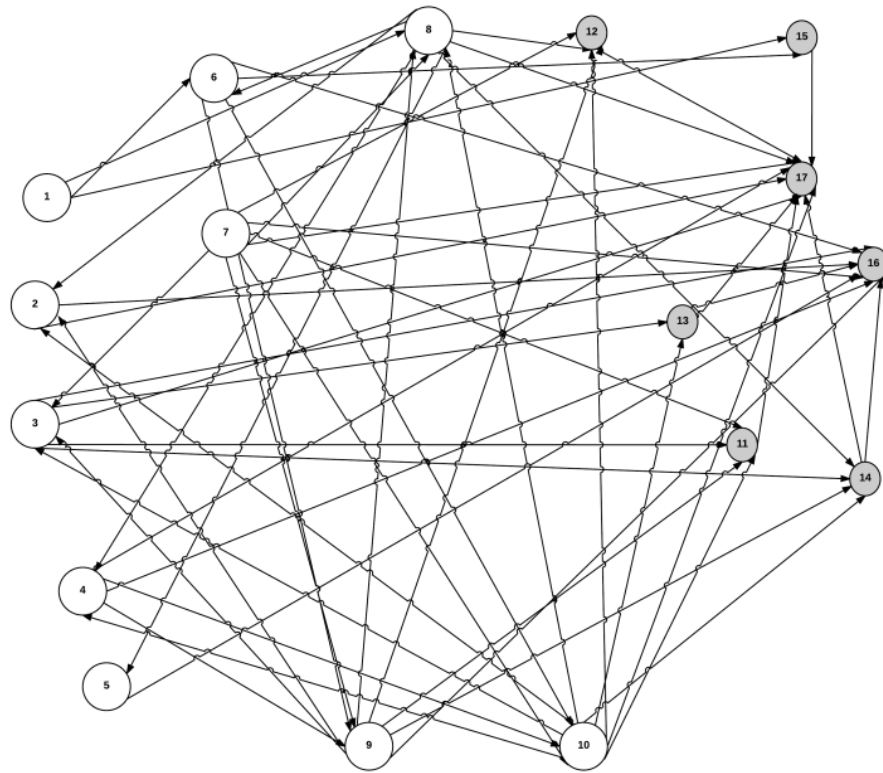


Figura 4.4 Mapa cognitivo difuso.

A continuación, se describen las relaciones de causalidad que se definieron entre los conceptos:

1. Tipo de emoción: este concepto se relaciona con otros conceptos que miden aspectos emocionales/conductuales del sistema, como son el componente emocional, tipo de comportamiento y la emotividad.
2. Componente social: se relaciona con la auto-organización y emergencia en el sistema, ya que es un concepto ligado al comportamiento colectivo.
3. Mecanismo de agregación: se relaciona con los conceptos de densidad, síntesis, independencia, auto-organización y emergencia en el sistema, ya que influye en todos ellos.
4. Componente reactivo: este concepto mide los comportamientos reactivos que se generan en el sistema, por lo que se relaciona con el concepto de interacción, tanto directa como indirecta, así como con la emergencia y la auto-organización.

5. Componente cognitivo: se relaciona con la capacidad de auto-organización del sistema, por su influencia en dicho proceso.
6. Componente emocional: se relaciona con los conceptos que miden la interacción en el sistema, debido a que el estado emocional de los agentes puede afectar la forma en como se comunican, así como con el concepto de emotividad.
7. Número de robots: se relaciona con mecanismo de agregación, tipo de comportamiento, interacción tanto directa como indirecta, densidad, diversidad, auto-organización y emergencia, los cuales se ven afectados por la cantidad de individuos que actúen en el sistema en un momento dado.
8. Tipo de comportamiento: mide los distintos tipos de comportamiento que aparecen en un momento dado en el sistema, por lo tanto, se relaciona con el componente social, componente reactivo, componente cognitivo, componente emocional, diversidad, emotividad y emergencia.
9. Interacción directa: se relaciona con el componente social, mecanismo de agregación, tipo de comportamiento, densidad, diversidad, independencia y auto-organización, porque influye en ellos.
10. Interacción indirecta: relacionado con el componente social, mecanismo de agregación, componente reactivo, tipo de comportamiento, densidad, diversidad, síntesis, independencia y emergencia, porque influye en ellos.
11. Densidad: se relaciona con el concepto de emergencia, porque influye en él.
12. Diversidad: se relaciona con la auto-organización y la emergencia, porque influye en ellos.
13. Síntesis: se relaciona con la auto-organización y la emergencia, porque influye en ellos.
14. Independencia: se relaciona con la auto-organización y la emergencia, porque influye en ellos.

Los conceptos relacionados con la emotividad, la auto-organización y la emergencia, dependen de los valores de los otros conceptos, así que no se relacionan desde ellos con nadie.

Los valores finales de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas con los que culmina el lazo del paso 3, son los usados para hacer el análisis de la emergencia en AMEB. Por otro lado, basados en [54], se asume que el estado de los conceptos se puede encontrar en tres zonas/niveles:

- En *estado alto* en el intervalo $[2/3, 1]$, cuando dicho concepto aparece en el sistema, y contribuye de forma importante en su funcionamiento.
- En *estado medio* en el intervalo $[1/3, 2/3)$, cuando dicho concepto más o menos aparece en el sistema, y, además, contribuye con poca importancia en el sistema.
- En *estado bajo* en el intervalo $[0, 1/3)$, cuando dicho concepto no aparece en el sistema, y/o no contribuye a su funcionamiento.

Finalmente, decir que un concepto *contribuye de forma importante en el sistema*, significa para el caso de AMEB, que coadyuva al funcionamiento del sistema (ayuda en sus procesos emergentes).

4.2.1 Casos de estudio

En los casos de estudio que se presentan a continuación, se muestra cómo funciona el mecanismo de verificación de emergencia en AMEB [79]. Se describe brevemente el entorno simulado de prueba, y luego se explica cada uno de los casos de estudio, y los resultados en los mismos.

4.2.1.1 Plataforma de prueba

La plataforma de prueba simula un equipo de robots de propósito general, y una aplicación que brinda un entorno para la gestión de los procesos relacionados con su funcionamiento, en un ambiente formado por paredes y obstáculos, y marcas en el suelo que representan tareas específicas [75]. Para detalles de la plataforma ver el Anexo A.

Con el fin de verificar el comportamiento emergente del sistema, se definen dos escenarios de prueba experimentales: un escenario donde se presente una tarea cooperativa, y un escenario donde los individuos deban actuar de forma cognitiva. En cada caso, se instancia el MCD definido en la sección anterior, para evaluar el comportamiento de AMEB. El MCD es especificado usando la herramienta FCM Tools, que permite crear y ejecutar un MCD de forma visual [61].

4.2.1.2 Escenario de cooperación

Como caso de estudio se utiliza la tarea de transporte de un objeto. Para ello, se inicializan los valores de los conceptos basado en lo explicado en el apartado anterior:

- Componente social: se inicializa en un nivel alto, ya que esta tarea es de carácter social. Se necesita que este concepto funcione de forma correcta.
- Componente reactivo: se inicializa en un nivel alto, para ser coherente con los comportamientos reactivos de los individuos en este tipo de tareas.
- Componente cognitivo: se inicializa en un nivel bajo, ya que en este tipo de tareas este componente no influye.
- Interacción directa: se inicializa en un nivel bajo, ya que, en este caso en particular, no contribuye en la tarea a ejecutar. Es decir, no se espera comunicación a través de mensajes.
- Interacción indirecta: se inicializa en un nivel alto, ya que debe funcionar de forma correcta; en la naturaleza, la comunicación en este tipo de tareas se da a través del entorno. En nuestro caso se asume que sea así, y que los robots a través del medio comunican a los otros robots que han encontrado el objeto, y necesitan ayuda para moverlo.
- Tipo de emoción: se inicializa en un nivel bajo, no se esperan altas variaciones en los estados emocionales del robot.
- Mecanismo de agregación: se inicializa en un nivel medio. La información sobre el objeto que posee cada robot no es útil al colectivo.
- Componente emocional: se inicializa en un nivel bajo, se asume que este concepto no contribuye al funcionamiento del sistema.
- Número de robots: se inicializa en un nivel alto, para indicar que hay muchos robots.
- Tipo de comportamiento: se inicializa en nivel bajo, este concepto no contribuye al escenario planteado.

Los conceptos relacionados con la emergencia y auto-organización se inicializan en cero, con el fin de observar que valores alcanzan cuando se estabiliza el sistema. En la Tabla 4.6 se presentan los valores iniciales y finales de cada concepto.

Al analizar los resultados, se observa que se alcanza un nivel de emergencia de 98% y de auto-organización de 97%, y el componente social se mantiene en estado alto, acorde al carácter social de la tarea de transporte. También, el componente reactivo se conserva en un estado alto, y el componente cognitivo decrece, tal cual como se esperaba de acuerdo a la naturaleza de la tarea.

En otra simulación, se inicializó en un valor medio el concepto reactivo y en un valor alto al cognitivo, con el fin de intentar mostrar que la tarea podía generar un comportamiento reactivo en los individuos. Al finalizar la simulación, se observó como el primero creció y el segundo decreció. En el transporte de un objeto, los agentes actúan preponderantemente de forma reactiva, ya que el conocimiento de cada agente sobre el objeto no afecta el comportamiento del grupo. Vemos así, que nuestra arquitectura sigue ese comportamiento.

Con respecto al resto de componentes, el componente emocional alcanza un estado alto, lo que indica que el estado emocional afecta el comportamiento de los robots, ya que las emociones influyen en la disposición o no de los robots en ejecutar la tarea. En este componente en particular, se espera que los robots con estado emocional altamente positivo –alegría- presenten una mayor disposición a actuar en la tarea, contrario a los robots con emociones negativas como ira o rechazo, cuya predisposición será mucho menor o nula. Como se explicó anteriormente, las emociones en AMEB modifican las variables internas del robot, lo que se traduce en sus capacidades de actuación y percepción, modificando sus comportamientos. La interacción indirecta mantiene un valor superior a la interacción directa, la cual se incrementó motivado a que, por ser un sistema artificial, los individuos pueden utilizar el pase de mensaje a otros robots para intentar conseguir ayuda en un momento determinado. Ahora bien, la comunicación que predomina es a través del ambiente, por lo que los valores alcanzados en el experimento son coherentes con el comportamiento natural. En la naturaleza, en el caso de las hormigas, al momento del transporte de alimento, la comunicación se basa en procesos estigmérgicos. El número de robots pasa de estado alto a medio, lo que indica que la cantidad de robots en el entorno no necesariamente afecta la ejecución de la tarea, no todos los robots van a ser necesarios para la ejecución de la tarea, todo depende de las características del objeto a transportar.

Finalmente, los conceptos asociados a las capacidades emergentes y auto-organizadas alcanzaron un estado alto, lo cual indica que AMEB soporta ese proceso emergente (Ver Tabla 4.6).

Tabla 4.6 Escenario de cooperación

Concepto	Estado inicial	Estado final
Tipo de emoción	0,25	0,5
Componente social	0,95	0,88
Mecanismo de agregación	0,5	0,90
Componente reactivo	0,95	0,85
Componente cognitivo	0,5	0,72
Componente emocional	0,25	0,81
Numero de robots	0,95	0,60
Tipo de comportamiento	0,25	0,97
Interacción directa	0,1	0,76
Interacción indirecta	0,95	0,86
Densidad	0	0,82
Diversidad	0	0,84
Síntesis	0	0,76
Independencia	0	0,82
Emotividad	0	0,83
Auto-Organización	0	0,97
Emergencia	0	0,98

4.2.1.3 Escenario de consenso social

Una de las tareas que llevan a cabo las abejas en la naturaleza, es la recolección de néctar para alimentarse. En específico, un grupo de abejas exploradoras salen de la colmena en la búsqueda de fuentes de alimento, cuando las encuentran, comunican a otras abejas (observadoras) la

ubicación de la fuente y su rentabilidad [22]. Al modelar el proceso, se definen los siguientes elementos:

- Fuente de alimento: aunque en la naturaleza el valor de una fuente de alimento depende de múltiples factores, en el modelo artificial se resume a un valor numérico.
- Abejas recolectoras empleadas: estas abejas explotan una fuente, y además, comunican a las abejas observadoras la ubicación de la misma y su rentabilidad.
- Abejas recolectoras desempleadas: este grupo de abejas está en la búsqueda de una fuente de alimento, y se dividen en dos tipos: las exploradoras, que se encargan de buscar fuentes, y las observadoras, que se quedan en la colmena esperando, para elegir una de las fuentes que ya está siendo explotada.

En este caso, las abejas son representadas por los robots, y la tarea de recolección de néctar se asocia con la recarga de energía por parte de cada robot. Los robots al entrar en estados emocionales negativos, a causa de su bajo estado de energía, tendrán la necesidad de buscar cómo recargar, por lo que comienzan la búsqueda de una fuente de alimento, o se quedan en la espera de recibir alguna información con respecto a alguna disponible. De encontrar una fuente, el robot comenzará a explotarla, y al igual que las abejas, intentará comunicar su hallazgo a otros individuos, esto a través del envío de mensajes a cada robot (interacción directa). El llamado se espera sea atendido, preferentemente por robots cuyos estados emocionales sean ligeramente negativos (tristeza), con el fin de atraerlos para recolectar, ya que al igual que en el caso de las abejas observadoras, en nuestro caso los robots con estados emocionales ligeramente negativos son los que estarán con mayor disposición a recargarse. Para este escenario, los conceptos se inicializan de la siguiente forma:

1. Componente social de los individuos: se inicializa en alto. Se estima que los robots deben socializar, para informar a los otros robots sobre las fuentes de alimento.
2. Componente reactivo: se inicializa en un nivel alto. Los comportamientos de tipo reactivo influyen en esta tarea, ya que el robot reaccionará a su falta de energía y buscará actuar en función de ello.
3. Componente cognitivo: se inicializa en un nivel bajo, ya que este concepto no influye en este escenario.

4. Interacción directa: se inicializa en un estado alto, ya que se espera que los robots se comuniquen de forma directa a través de mensajes, con la ubicación de las fuentes.
5. Interacción indirecta: se inicializa en un nivel bajo, dado que en esta tarea la comunicación no se realiza a través del entorno.
6. Tipo de emoción: se inicializa en un nivel alto. Se asume que las emociones contribuyen de forma importante en la ejecución de la tarea, debido a que el estado emocional del robot influirá en la necesidad de buscar recargar su energía.
7. Mecanismo de agregación: se inicializa en un nivel alto, ya que se debe agregar la información de los diferentes objetos (fuentes de recargas) encontrados, para tomar una decisión de adonde ir.
8. Componente emocional: este componente influye en el sistema de manera importante, ya que el estado emocional es el que predispone al agente a buscar y explotar fuentes de carga.
9. Número de robots: se inicializa en un nivel medio. Se espera que el número de robots influya medianamente en el comportamiento global.
10. Tipo de comportamiento: se inicializa en un nivel alto, ya que se espera que los robots varíen su comportamiento durante la ejecución de la tarea. En este caso en particular, pueden variar constantemente entre robots exploradores, robots recolectores y robots observadores.

Los conceptos asociados a las propiedades emergentes y auto-organizadas se inicializan en cero, para observar que valores que alcanzan. En la Tabla 4.7 se muestran los resultados obtenidos, luego de ejecutar el MCD. Los conceptos relacionados con la emergencia y auto-organización alcanzan un valor alto, así como el concepto relacionado con el mecanismo de agregación se mantiene en un estado alto.

Se observa también, como a pesar de que el concepto relacionado con la interacción indirecta se incrementa, la interacción directa continúa siendo mayor, lo que indica que los agentes comunican a otros miembros del grupo información sobre las fuentes de recarga de forma directa, principalmente. Otro concepto que presenta una variación significativa es el relacionado con el componente cognitivo. El conocimiento que van adquiriendo es usado en las decisiones que van tomando los robots. Así, robots cuya carga de batería este en descenso, estarán más interesados en buscar alimento, que robots que estén con su carga en estado normal, factor que

afecta de forma directa el estado de bienestar del individuo. Se da un proceso de toma de decisión donde el robot busca sobrevivir, y para ello, reacciona para recargarse, buscando en una fuente conocida (si la conoce). Además, informa a los demás individuos del grupo sobre la fuente que está explotando.

Tabla 4.7 Escenario de consenso social

Concepto	Estado inicial	Estado final
Tipo de emoción	0,95	0,80
Componente social	0,95	0,81
Mecanismo de agregación	0,1	0,90
Componente reactivo	0,95	0,85
Componente cognitivo	0,1	0,73
Componente emocional	0,95	0,81
Numero de robots	0,5	0,61
Tipo de comportamiento	0,95	0,98
Interacción directa	0,95	0,87
Interacción indirecta	0,1	0,76
Densidad	0	0,87
Diversidad	0	0,88
Síntesis	0	0,80
Independencia	0	0,86
Emotividad	0	0,86
Auto-Organización	0	0,99
Emergencia	0	1,00

En ambos escenarios de prueba, se plantearon dos tareas que se dan en la naturaleza, la tarea de transporte de un objeto (hormigas) y la tarea de recolección de alimento (abejas). En ambas tareas, los individuos llevan a cabo acciones complejas que exceden sus capacidades

individuales, y son el resultado de procesos de toma de decisiones descentralizados, y de reglas simples que rigen a los individuos que conforman el grupo. Estas tareas son ejemplos del fenómeno de emergencia, y han sido ampliamente discutidas en la literatura, en la cual se ha demostrado a través de modelos matemáticos, que en efecto ocurre la emergencia [38]. Se pudo observar en ambos casos, como los conceptos relacionados con la emergencia y la auto-organización alcanzan valores altos, según lo que se espera en este tipo de tareas, que en la naturaleza son tareas con un fuerte componente emergente. Para estos casos en particular, el mecanismo utilizado permite verificar la emergencia y la auto-organización en el sistema.

4.3 Reconocimiento de emociones en AMEB

En esta sección se analiza la capacidad de reconocimiento de un robot de AMEB, del estado emocional de otro robot, y a partir de allí, cómo define con quien interactuar, lo que coadyuva a la emergencia.

4.3.1 Descripción formal del problema de reconocimiento de emociones en AMEB

El mecanismo de reconocimiento de los robots de AMEB está basado en el algoritmo AR2P, el cual se estructura en un conjunto de módulos de reconocimiento, organizados jerárquicamente (desde el nivel X_1 hasta el nivel X_m) [94, 95]. En este caso, AR2P define módulos para reconocer emociones, basado en un conjunto de señales de estado que se encuentran en la memoria compartida de AMEB. De acuerdo a la combinación de las diferentes señales de estado y sus pesos (intensidad de las señales), se caracterizan a diferentes emociones. Cada nivel X_i contiene su propio conjunto de módulos de reconocimiento. Un módulo de reconocimiento Γ_{ji} (el subíndice j representa el módulo y el subíndice i el nivel al que pertenece ese módulo), se define formalmente como una tupla [95]:

$$\Gamma = \langle E, U, So \rangle,$$

Donde, E es una matriz compuesta a su vez de 2-tupla $E = \langle S, C \rangle$ (ver la Tabla 4.8), $S = \langle \text{Señal, Estado} \rangle$ es una matriz del conjunto de señales $S_{i=1,2,3,\dots,n}$ que caracterizan al patrón a ser reconocido por Γ , y sus respectivos estados. La variable de estado puede ser “verdadera” cuando la señal está presente, y “falsa” en caso contrario. El número de señales para cada patrón es específico para cada módulo Γ . El par $\langle S_i, \text{Estado} \rangle$ significa que la señal i ha sido reconocida o no (por defecto, el estado es falso). C contiene los descriptores asociados con cada señal i , de tal

forma que $|C| = |S|$, está definido por la tupla $C = \langle D, V, P \rangle$, donde D representa los descriptores de Γ , V es el vector de dominio para cada D , y W es el peso (importancia) de cada D para el reconocimiento del patrón. So es la señal de salida del módulo, para indicar si reconoció o no. Finalmente, U es el vector de umbrales utilizado por el módulo (Γ) para reconocer su patrón respectivo. Hay dos tipos de umbrales: $\Delta U1$ es el umbral para el reconocimiento por señales clave, y $\Delta U2$ es el umbral para el reconocimiento por mapeo parcial o total. El umbral $\Delta U1$ debe ser más estricto que $\Delta U2$, dado que el proceso de reconocimiento por señales clave utiliza solo unas pocas señales.

Tabla 4.8 Matriz $E = \langle S, C \rangle$

E				
S		C		
Señal ^a	State	Descriptor (D) ^a	Dominio (V) ^b	Peso (W) ^c
1	Falso	Descriptor1	<valor posible del descriptor>	[0,1]
2	Falso	Descriptor2	<valor posible del descriptor>	[0,1]
3	Falso	Descriptor3	<valor posible del descriptor>	[0,1]
...	...	...	...	...
N	Falso	Descriptor _n	<valor posible del descriptor>	[0,1]
U: < $\Delta U1$, $\Delta U2$ >				

* El valor de N depende del patrón a reconocer (son sus descriptores). El peso de importancia de cada descriptor para el reconocimiento se normaliza entre [0,1].

En [95, 96] se presenta la descripción formal del algoritmo de reconocimiento de patrones recursivos, y en [94] se presenta el algoritmo de aprendizaje de AR2P. Las estrategias utilizadas en cada Γ para reconocer un patrón son: una primera estrategia de reconocimiento por señales clave y otra estrategia por reconocimiento parcial de señales. El primero usa el peso de importancia de las señales de entrada identificadas como claves, y el segundo usa la presencia parcial o total de las señales.

Definición 4.1: una señal clave S_i . Una señal en el módulo Γ es una señal clave, si su peso de importancia tiene un valor mayor o igual al peso promedio de todas las señales en Γ (vea la ecuación (4.1)) [94].

$$\forall s_i \in S(\Gamma), \text{ if } [w(s_i) \geq w_{average}S(\Gamma)] \rightarrow Key_{\Gamma} \quad (4.1)$$

Teorema 4.1: Estrategia de reconocimiento por señales clave. Un patrón ρ se reconoce mediante señales clave, si el promedio de los pesos de las señales clave reconocidas es superior al umbral $\Delta U1$ [94]. Este reconocimiento utiliza los descriptores (señales o sub-patrones) con mayor peso de importancia. (ver Ecuación 4.2):

$$\frac{\sum_{i=1}^n \text{state}(s_i=true) \cap s_i \in Key_{\Gamma} w(s_i)}{|Key_{\Gamma}|} \geq \Delta U1 \rightarrow S_o \quad (4.2)$$

Teorema 4.2: Estrategia de reconocimiento por mapeo parcial. Esta estrategia consiste en validar que un número de señal mínimo presente en Γ es superior al umbral $\Delta U2$, cuya ecuación es [94]:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \text{state}(s_i=true) w(s_i)}{n} \geq \Delta U2 \rightarrow S_o \quad (4.3)$$

Este proceso de cálculo se lleva a cabo para cada módulo de cada nivel de reconocimiento X_i (desde X_1 hasta X_m), durante los procesos de reconocimiento.

4.3.2 Reconocimiento de emociones en AMEB utilizando el algoritmo AR2P

Para mostrar el funcionamiento de AR2P, en esta sección se describe cómo AR2P reconoce una emoción en AMEB [97]. Para este propósito, se crean instancias de las estructuras de datos necesarias, junto con las estrategias de reconocimiento. Se asume:

Suposición 4.1. El conjunto de sub-estados del estado actual de un robot (BS, OS, SS, IS) son los patrones a detectar.

Suposición 4.2. Un sub-estado puede tener tres valores posibles: Bajo, Alto o Normal. De esta manera, los patrones a descubrir son:

- Patrón de batería (BS): Patrón de batería baja (LBP), Patrón de batería alta (HBP) o Patrón de batería normal (NBP).
- Patrón de operación (OS): Patrón de operación bajo (LOP), Patrón de operación alto (HOP) o Patrón de operación normal (NOP).
- Patrón de seguridad (SS): patrón de seguridad bajo (LSP), patrón de seguridad alto (HSP) o patrón de seguridad normal (NSP).
- Patrón de interacción (IS): patrón de interacción bajo (LIP), patrón de interacción alto (HIP) o patrón de interacción normal (NIP).

Suposición 4.3. Hay dos niveles de reconocimiento en la jerarquía del algoritmo AR2P, en el primer nivel X1 están los módulos Γ_{j1} para el reconocimiento de patrón atómico (LOP, HOP, NOP, LSP, HSP, etc.), y en el segundo nivel X2 están los módulos Γ_{j2} para los patrones emocionales (como "ira", "neutral", "tristeza", "alegría").

Suposición 4. El proceso de reconocimiento recibe como entrada el archivo "file_robot" desde la memoria compartida de la arquitectura. El archivo "file_robot" contiene la información sobre los sub-estados (BS, OS, SS, IS), que determinan la emoción de cada robot en un momento dado.

A continuación, se describe el proceso de reconocimiento de tristeza utilizando AR2P.

4.3.2.1 Reconocimiento de emoción tristeza en el robot

En el caso de reconocimiento de la tristeza, AR2P debe recibir el siguiente archivo como entrada $s() = \text{"file_robot1"}$:

```
<file_robot1>
  <body>BS= LBP</body>
  <body>OS= LOP</body>
  <body>SS= HSP</body>
  <body>IS = LIP </body>
</file_robot1/>
```

Se supone que los módulos del nivel X_1 son instanciados. El superíndice de cada valor en el dominio (V) está relacionado con el peso de la columna (W). Por ejemplo, para el descriptor BS, $LBP = 0.8$ (Señal 1) significa que este descriptor es importante para reconocer la emoción de la

tristeza, y HBP = 0.1 y NBP = 0.5 indican que esos descriptores no lo son. La misma descripción es para los otros descriptores OS, SS e IS (Ver Tabla 4.9).

Tabla 4.9 Emoción tristeza en AR2P

E				
S		C		
Sig	State	D	Domain (V)	Weight (W)
1	T	BS	< LBP, HBP, NBP>	[0.8,0.1,0.5]
2	T	OS	<LOP, HOP, NOP>	[0.7,0.1,0.5]
3	T	SS	< LSP, HSP, NSP>	[0.1,0.8,0.7]
4	T	IS	< LIP, HIP, NIP>	[0.9,0.1,0.5]
U< $\Delta U1=0.85$, $\Delta U2=0.75$ >				

El proceso general para el reconocimiento de la emoción de tristeza desde la entrada “file_robot1” es el siguiente: Primero, los sub-patrones de entrada (LBP, LOP, HSP y LPI) se reconocen en (X_1), y luego, el resultado del reconocimiento de estos descriptores se envía al siguiente nivel en la jerarquía. A continuación, AR2P reconoce o no un patrón de (X_2), utilizando los teoremas presentados en la sección anterior. Más detalladamente, las señales del patrón de tristeza de (X_2) se activan (T). Luego, se aplica el Teorema 1. Según este teorema, es necesario determinar cuáles de las señales son las claves. Para eso se usa la Ecuación (4. 1):

$$W_average\ S\ (\Gamma_{<SADNESS>}) = (0.8 + 0.9 + 0.8 + 0.7)/4 = 0.8$$

Una vez que el promedio se calcula, se determinan las señales claves. Las señales claves para la entrada “file_robot1” son las señales 1, 3 y 4 (definición 1). Ahora, se usa la Ecuación (4. 2) para reconocer el patrón de entrada por medio de señales claves. Este valor no excede el umbral (0.83 < 0.85). A continuación, la segunda alternativa es reconocer mediante señales parciales utilizando la Ecuación (4.3) y $\Delta U2 = 0.75$. En este caso (0.8 > 0.75), se logra reconocer la coincidencia de patrones, y cómo es el último nivel de la jerarquía $X_i = 2$, produce la señal de salida S_o , que se convierte en la señal de salida del sistema: “robot1 (triste)”.

4.3.3 Casos de estudio

El propósito de los siguientes casos de estudio, es mostrar el comportamiento emergente en el sistema multi-robot, según las capacidades del robot para reconocer emociones en los otros individuos del sistema. Para llevar a cabo las pruebas, se consideraron los siguientes escenarios: el primero, la recolección de néctar por parte de las abejas, y el segundo, el transporte de un objeto por parte de las hormigas. Las tareas de recolección de néctar y transporte de objetos son ejemplos clásicos de procesos emergentes [38]. En ambas situaciones, se supone que las emociones influyen en la ejecución de las tareas de los robots. Es decir, los robots adaptan su comportamiento según su estado emocional.

4.3.3.1 Caso 1: Recolección de Néctar

En este caso se considera el siguiente proceso: de la colmena, un grupo de abejas exploradoras sale en busca de fuentes de alimento que puedan ser explotadas. Cuando se localiza una fuente, las abejas exploradoras comunican a otras abejas la ubicación de la fuente y su rentabilidad. Al modelar este proceso en el sistema multi-robot, se definen los siguientes elementos:

- Fuente de alimento: aunque en la naturaleza el valor de una fuente de alimento depende de múltiples factores, en el modelo artificial, se define por un valor numérico. La necesidad de obtener energía por parte del robot está relacionada con la necesidad de alimento de la abeja. Cuando el sub-estado BS explicado en la sección 4.3.2 está en un valor bajo, el robot necesita recargarse, y esto afecta los valores de los otros sub-estados.
- Abejas recolectoras: están representadas por robots cuyo estado emocional tiende a ser positivo, donde sus sub-estados de BS y OS se encuentran con valores normales o altos.
- Abejas recolectoras desempleadas: este grupo de abejas permanece en la colmena a la espera de elegir una fuente de alimento. En este caso, se considera que algunos robots observan a otros robots, si sus BS y OS están en niveles bajos. Debido a esto, sus estados emocionales son tristes (similar a la necesidad de una fuente de alimento), porque requieren una recarga de energía.
- Las abejas exploradoras: son responsables de la búsqueda de fuentes de alimento. De acuerdo con el modelo emocional descrito en la sección 3.5, las emociones positivas (por ejemplo, la alegría) generan un comportamiento colectivo en los individuos, como por ejemplo, buscar alimentos. En este caso, los robots exploradores pueden enviar el

mensaje a las recolectoras desempleadas directamente, si reconocen la tristeza de la emoción en ellos. Para el reconocimiento de emociones se utilizó el algoritmo AR2P [94].

En este escenario, cuando los valores de OS y BS decaen, los robots no pueden operar normalmente, degradando su rendimiento, y su estado emocional se define como triste. De esta manera, esperan recibir un mensaje que les notifique sobre una fuente de recarga (en la tarea de recolección de néctar, las abejas exploradoras realizan una danza [38], para comunicarse e informar sobre la calidad de las fuentes y su ubicación). En este escenario, cuando los robots descubren una fuente de recarga, entonces *comunican el descubrimiento* a los robots que necesitan recargar su batería (robots tristes).

4.3.3.2 Caso 2: Transporte de un objeto

En el segundo caso, el transporte de un objeto es una tarea común en varias especies de insectos. Por ejemplo, las hormigas pueden transportar objetos de gran tamaño de forma colectiva. En general, el proceso comienza cuando una hormiga encuentra un objeto e intenta moverlo; si no puede moverlo, entonces trata de reclutar a otras hormigas, que se forman alrededor del objeto para moverlo [38].

En este caso, los robots con un estado emocional de alegría (sus sub-estados están en niveles normales o altos) estarían dispuestos a llevar un objeto. Según el modelo emocional planteado en esta investigación, una emoción altamente positiva (alegría) coadyuva a la generación de comportamientos colectivos en los individuos. De esta manera, el robot que encuentra un objeto intenta reclutar a otros robots que se encuentran en el mismo estado emocional, para ayudarlo a mover el objeto. El reclutamiento se realiza a través de *mensajes directos* a los robots con el mismo estado. Para ello, el robot debe reconocer la emoción de la alegría (ver sección 4.3.2). Es similar en el caso de la construcción de formaciones en un enjambre de robots, donde los robots con un estado emocional altamente positivo estarían dispuestos a participar en la formación. Así, en el caso del escenario de transporte de un objeto, el robot que está reclutando intentará reclutar a los robots con estado emocional similar.

El poder dotar a los robots de la capacidad de reconocer las emociones de los otros individuos del sistema, permite optimizar la ejecución de las tareas por parte del sistema multi-robot, debido a que se incrementa la posibilidad de que los robots que atiendan ciertas tareas sean los que

presenten una mayor disposición a ellas. En apartados anteriores (ver sección 3.5), esta suposición se realizaba tomando en cuenta solo el estado emocional individual. En este apartado se describe como a partir de lo que un robot reconoce como los estados emocionales de los otros robots, organiza sus interacciones directas, para interactuar con robots con necesidades similares, y/o con disposición a actuar en un determinado momento (todo lo anterior está relacionado con la emoción reconocida). Esto, a su vez, supone un incremento de la probabilidad de ocurrencia de fenómenos emergentes y auto-organizados en el sistema.

4.4 Comparación con trabajos previos

En esta sección, se realiza una comparación cualitativa entre AMEB con otros trabajos que proponen arquitecturas para sistemas multi-robots. Particularmente, son de interés las investigaciones que incluyan emociones en sus propuestas. Se establecen los siguientes criterios para llevar a cabo la comparación:

- Componente emocional (CE): se propone este criterio, para evaluar si los modelos implementan emociones en los individuos que los componen.
- Verificación de la emergencia y auto-organización (VE): este criterio está relacionado con la inclusión de algún mecanismo de verificación en el sistema.
- Adaptabilidad (A): se relaciona con la diversidad de tareas que puede realizar el sistema y la adaptación del sistema a esas tareas.
- Diversidad del grupo (D): se relaciona con la heterogeneidad del grupo de robots.
- Aprendizaje social (AS): se establece para evaluar si los modelos tienen mecanismos de aprendizaje social.

En la Tabla 4.10 se presenta un resumen de los trabajos evaluados según los criterios propuestos. En [67, 69, 70, 82, 83] se incluye un componente emocional en los individuos, se utiliza para afectar la asignación de tareas, así como también en la coordinación de las mismas y la regulación de los comportamientos en los agentes. Estos trabajos buscan estudiar cómo afectan las emociones estos mecanismos de asignación, coordinación y regulación; las emociones en AMEB buscan regular el comportamiento de los agentes, influyendo en todos los procesos que estos lleven a cabo en el sistema. En [86], el modelo emocional implementado busca mejorar la interacción humano-robot, llegando incluso a lograr persuadir al usuario del robot a llevar a cabo algunas tareas. En los trabajos [10, 84, 85], se presentan arquitecturas para sistemas multi-

robots, capaces de gestionar los procesos que se dan a cabo en este tipo de sistemas, incluyendo en el caso de [84] gestionar procesos de aprendizaje. Estos trabajos en particular no incluyen emociones. En general, los trabajos estudiados no toman en cuenta el análisis del fenómeno emergente, aunque por la naturaleza propia de esos sistemas, los mismos pueden aparecer.

Al mismo tiempo, las arquitecturas presentadas son adaptables y pueden actuar en la ejecución de diferentes tareas, esto motivado a que los sistemas multi-robots suelen ser configurables, y por su propia naturaleza, se pueden adaptar a diversas tareas de similar naturaleza. En general, los sistemas descritos son heterogéneos. AMEB incluye un componente de comportamiento, que utiliza un componente emocional para mejorar la adaptabilidad del sistema y la gestión de grupos heterogéneos.

Tabla 4.10 Comparación con trabajos previos

TRABAJO	Criterio de Comparación				
	CE	VE	A	D	AS
AMEB	Si	Si	Si	Heterogéneo	Si
[10]	No	No	Si	Heterogéneo	No
[84]	No	No	Si	Homogéneo	Si
[85]	No	Si	Si	Heterogéneo	Si
[86]	No	No	Si	Homogéneo	No
[82, 83]	Si	No	Si	Heterogéneo	No
[67]	Si	No	Si	Homogéneo	Si
[81]	Si	No	Si	Homogéneo	Si
[69, 70]	Si	Si	Si	Heterogéneo	No

AMEB [45, 46, 47, 75, 79, 80, 88] busca facilitar la aparición de la emergencia y la auto-organización en el sistema, a través de la distribución de los procesos que se pueden dar en un sistema multi-robot, y la gestión de los mismos a través de las capas de la arquitectura. Otro aspecto diferenciador es la inclusión de emociones, con el fin de regular los comportamientos de los individuos; de esta forma, los mismo pueden determinar los comportamientos a realizar

según su estado actual, coadyuvando a la aparición de fenómenos emergentes. Así, no se utilizan las emociones para mejorar la interacción entre los individuos, ya que la misma se da de manera natural. El modelo utilizado se basó en modelos anteriores [29, 55], pero se simplificó, con el objeto de tomar en cuenta un conjunto básico de emociones, relacionados a dos aspectos fundamentales de este tipo de sistemas, el comportamiento individual y el colectivo. AMEB se pensó de forma genérica, con el objeto de permitir su implementación en distintos tipos de sistemas, con distintos objetivos.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

“La mente necesita libros como la espada necesita una piedra de afilar si quiere mantener su agudeza.”

- Tyrion Lannister-

5.1 Conclusiones

La presente investigación cubrió los siguientes objetivos planteados al inicio del trabajo doctoral: propone el diseño de una arquitectura para sistemas multi-robot con comportamiento emergente; implementa un modelo emocional para los robots del sistema, que influyen en el comportamiento global del mismo; y por último, define un método de verificación de los fenómenos emergentes y auto-organizados para el sistema multi-robot.

La arquitectura AMEB organiza los procesos del sistema multi-robot de forma tal, que facilita la aparición de comportamientos emergentes en el sistema. AMEB presenta las características propias de los sistemas emergentes: es distribuida, permite la toma de decisiones a nivel local, posibilita procesos de aprendizaje colectivo a partir de la retroalimentación de los componentes del sistema, y posee espacios de memoria compartidas [80, 92].

Por otro lado, los componentes de la arquitectura se implementan de forma distribuida, con el objeto de gestionar los procesos inherentes al funcionamiento de cada robot del sistema de manera individual, pero a su vez, gestiona las interacciones entre ellos, para posibilitar los procesos que emergen entre ellos. En particular, el *nivel individual* gestiona el comportamiento de cada robot, sus procesos de percepción, actuación, y su componente afectivo [47, 80]. Este nivel interactúa estrechamente con el *nivel colectivo* [88, 93], donde se gestionan las interacciones que se dan entre los robots y de cada robot con el ambiente. Finalmente, el *nivel de gestión de conocimiento* permite construir el conocimiento a partir de las experiencias individuales. En concreto, cada robot que hace parte del sistema gestionado por AMEB, instancia la arquitectura de forma individual, en dos niveles: uno local y uno en la nube, y sus comportamientos son gestionados de forma individual.

La arquitectura introduce un componente conductual [47] basado en emociones, que modifica el comportamiento de cada robot y su respuesta ante los estímulos que recibe del entorno, lo que hace que su comportamiento ante una situación dada, no pueda ser determinado a priori. Este componente implementa un modelo emocional simplificado, que se soporta en el índice de

satisfacción de los individuos ante su actuación en el entorno. El componente conductual de los robots permite diferentes comportamientos e intenciones hacia la ejecución de una tarea, o hacia la interacción con otros robots, lo que permite el estudio de sus comportamientos a nivel colectivo, y particularmente, cómo esto afecta la aparición de la emergencia y la auto-organización.

La arquitectura incluye un nivel de coordinación [88] basado en el paradigma emergente, el cual facilita la coordinación entre los individuos a través de procesos de interacción social, de tal manera que la coordinación surge de la dinámica propia del sistema, gestionando las interacciones, tanto directas como indirectas, que se dan entre los robots.

Las propiedades emergentes de AMEB se verificaron en tareas que ocurren en la naturaleza: la tarea de transporte de un objeto (hormigas), la tarea de búsqueda de rutas óptimas (hormigas), y la tarea de recolectar alimentos (abejas). Estas tareas son ejemplos del fenómeno de la emergencia, y se han discutido ampliamente en la literatura [38]. Los resultados obtenidos en la experimentación muestran que la arquitectura es capaz de gestionar tareas de este tipo, con el fin de facilitar la aparición de la emergencia y la auto-organización [79, 91].

La arquitectura es escalable en cuanto a la cantidad de robots, esto se debe a que cada individuo actúa de manera independiente en el entorno, muchos de sus procesos se realizan en la nube, y los procesos colectivos aparecen por la propia dinámica del sistema, y no por configuraciones definidas a priori. Cada vez que se incluye un robot en el sistema, se crea una instancia en la arquitectura de forma individual. La arquitectura también permite la inclusión de robots con hardware diferente (no hay suposiciones al respecto). Finalmente, el sistema es robusto y flexible, ya que la falla, reemplazo o adición de un robot, no afecta la estructura general del mismo [45, 46, 75].

La inclusión de emociones en el sistema multi-robot ayuda a su adaptación en entornos dinámicos, mejorando su toma de decisiones en un momento determinado. La emoción define la predisposición de un robot hacia como responder en un momento determinado a un estímulo específico. De esta manera, los robots pueden responder de manera diferente ante el mismo estímulo, lo que convierte el comportamiento individual y colectivo en impredecible pero adaptable, facilitando la emergencia y la auto-organización en el sistema. La emoción es utilizada en esta tesis de dos maneras: para que cada robot, según su estado emocional, decida

cuándo y cómo actuar; y también, para definir, según la emoción que reconoce en sus robots vecinos, como interactuar con ellos.

Por otro lado, se modeló el sistema utilizando un MCD, el cual permite verificar los fenómenos de emergencia y auto-organización en el sistema. Para este trabajo, se establecieron una serie de conceptos asociados a la arquitectura propuesta, y otro conjunto asociado a las propiedades emergentes y auto-organizadas. Los valores de las relaciones entre conceptos se establecieron mediante la opinión de un experto, con base al comportamiento teórico esperado del sistema durante la ejecución de determinadas tareas. Utilizando una herramienta para la construcción y ejecución de MCD, se validó el comportamiento de la arquitectura en dos escenarios, el primero relacionado con un problema de cooperación, y el segundo con un problema de consenso social. En ambos casos, se obtuvieron valores de los conceptos de emergencia y auto-organización acorde a lo esperado. También se realizaron experimentos para validar la capacidad de un robot para reconocer las emociones en otros robots, y como esto afecta los procesos de cooperación en el sistema, y particularmente, las dinámicas emergentes en un entorno dado [79].

Se comparó la arquitectura propuesta con otros trabajos relacionados, para ello se definieron un conjunto de criterios que permiten evaluar distintos aspectos en los trabajos estudiados. En AMEB resalta la inclusión de un componente emocional en los robots, la posibilidad de permitir procesos emergentes-auto-organizados, y la utilización de un método para verificar la aparición de estos fenómenos.

En general, los diferentes aspectos considerados en la investigación son muy relevantes, lo que se evidencia con la publicación de 11 artículos (ver Anexo B).

5.2 Trabajos futuros

Como trabajos futuros se plantean los siguientes tópicos de investigación:

- Ampliación del modelo emocional, con la finalidad de buscar similitud con el modelo emocional humano, y sus implicaciones en sus comportamientos individuales.
- Implementación de mecanismos multimodales de reconocimiento de las emociones en los robots del sistema. Aunque se realizó una primera implementación, basado en un enfoque unimodal, poderlo ampliar permitirá explotar el conocimiento del entorno, y ejecutar más eficientemente las tareas que llevan a cabo.

- Implementación de mecanismos de aprendizaje, coordinación y gestión de comportamientos colectivos, bajo un paradigma diferente a los *enjambre de robots*. La arquitectura de control del sistema multi-robots fue pensada para ese paradigma, pero podrá ser extendida para otros contextos, donde la noción de enjambre no sea una propiedad del sistema, o los elementos del sistema no sean robots. Eso implicará el estudio y elaboración de mecanismos específicos a esos entornos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Y. U. Cao, A. S. Fukunaga, A. B. Kahng, and F. Meng, "Cooperative Mobile Robotics : Antecedents and Directions," en *Autonomous robots*, 4(1), pp. 7-27, 1997.
- [2] A. Gautam, "A Review of Research in Multi-Robot Systems," en *IEEE 7th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, pp. 1-5, 2012.
- [3] F. T. Kawauchi Y., Inaba M., "A Strategy of Self-organization for Cellular Robotic System (CEBOT)," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1558–1565, 1992.
- [4] M. J. Mataric, "Designing and Understanding Adaptive Group Behavior," en *Designing and understanding adaptive group behavior. Adaptive Behavior*, 4(1), pp. 51-80, 1995.
- [5] C. Jones and M. J. Mataric, "Automatic Synthesis of Communication-Based Coordinated Multi-Robot Systems," *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*(*IEEE Cat. No. 04CH37566*), vol. 1, pp. 381-387, 2004.
- [6] L. E. Parker, "ALLIANCE : An Architecture for Fault Tolerant Multirobot Cooperation," vol. 14, no. 2, pp. 220–240, 1998.
- [7] E. Sahin, "Swarm Robotics : From Sources of Inspiration," en *Swarm Robot. Work. state-of-the-art Surv.*, pp. 10–20, 2005.
- [8] M. Dorigo, "Swarm-Bots and Swarmanoid: Two Experiments in Embodied Swarm Intelligence," en *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology - Workshops*, pp. 2–3, 2009.
- [9] M. J. Mataric, "Coordination and learning in multirobot systems," en *IEEE Intelligent Systems and their Applications*, 13(2), pp. 6-8, 1998.
- [10] M. D Sahin, Thomas Labella, Vito Trianni, Jean-Louis Deneubourg, Philip Rasse, Dario Floreano, Luca Gambardella, Francesco Mondada, Stefano Nolfi, "SWARM-BOT : Pattern

Formation in a Swarm of Self- Assembling Mobile Robots,” en *IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, vol. 4, pp. 6–12, 2002.

[11] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni, "Ant System : Optimization by a Colony of Cooperating Agents," en *IEEE Transactions on Systems, man, and cybernetics, Part B: Cybernetics*, 26(1), pp. 29-41, 1996.

[12] M. Dorigo, "SWARM-BOT : an experiment in swarm robotics," *Proceedings 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium, 2005. SIS 2005*, pp. 192-200, 2005.

[13] J. Ni and S. X. Yang, “Bioinspired neural network for real-time cooperative hunting by multirobots in unknown environments.,” en *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 22, no. 12, pp. 2062–77, 2011.

[14] J. Butzke, “Planning for Multi-Robot Exploration With Multiple Objective Utility Functions,” en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3254-3259, 2011.

[15] H. Choi, A. K. Whitten, and J. P. How, “Decentralized Task Allocation for Heterogeneous Teams with Cooperation Constraints,” *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, pp. 3057-3062, 2010.

[16] H. Mehrjerdi, M. Saad, S. Member, and J. Ghommam, “Cooperation Control for a Team of Mobile Robots Based on Fuzzy Logic,” en *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 581-586, 2010.

[17] Y. Cai and S. X. Yang, “Fuzzy Logic-based Multi-robot Cooperation,” en *IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 273-278, 2011.

[18] Q. Wang, Y. Liu, W. Li, and Y. Yang, “Cooperation Strategy for Robot Soccer Based on Defuzzification,” *Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, vol. 2, pp. 659-664, 2010.

[19] T. L. Anderson and M. Donath, “autonomous robots and emergent behavior: A Set of Primitive Behaviors for Mobile Robot Control,” en *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications*, pp. 723-730, 1990.

- [20] T. Fujii, A. Hajime, T. Fujita, H. Kaetsu, A. Matsumoto, and I. Endo, "Intelligent Data Carrier System for Cooperative Behaviors Emerged among Collective Robots," en *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*, vol. 1, pp. 299-304, 1997.
- [21] D. Kurabayaslui, "Toward Realization of Collective Intelligence and Emergent Robotics," *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 99CH37028)*, vol. 4, pp. 748-753, 1999.
- [22] R. Polesel, R. Rosati, a. Speranzon, C. Ferrari, and E. Pagello, "Using collision avoidance algorithms for designing multi-robot emergent behaviors," en *Proceedings IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113)*, vol. 2, pp. 1403–1409, 2000.
- [23] N. Mininath, "Multi-Robot hunting based on Swarm Intelligence," *12th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS)*, pp. 203-206, 2012.
- [24] J. Roach, W. Ewert, R. J. M. Li, and B. B. Thompson, "Unexpected Emergent Behaviors From Elementary Swarms," en *45th Southeastern Symposium on System Theory*, pp. 41-50, 2013.
- [25] C. Ma, "The Construction of an Emotion Model of Agent Based on the OCC Model," en *International Conference on Computational and Information Sciences (ICCIS)*, pp. 940–943, 2011.
- [26] A. Ortony, G. L. Clore, and A. Collins. "The cognitive structure of emotions," Cambridge university press, 1990.
- [27] M. M. R. Kashani, M. Jangjou, N. Khaefinejad, and T. Laleh, "Adventurous robots equipped with basic emotions," en *IEEE Int. Multi-Disciplinary Conf. Cogn. Methods Situat. Aware. Decis. Support. CogSIMA 2012*, pp. 117–120, 2012.
- [28] Y. W. Y. Wang, "On the cognitive processes of human perception," en *Fourth IEEE Conf. Cogn. Informatics, (ICCI 2005)*, vol. 1, no. December, pp. 1–13, 2005.
- [29] N. Perozo, J. Aguilar, O. Terán, and H. Molina, "An affective model for the multiagent architecture for self-organizing and emergent systems (MASOES)," en *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 35(1), pp. 080-090, 2012.

- [30] J. Botzheim and N. Kubota, “Spiking neural network based emotional model for robot partner,” en *IEEE Symposium on Robotic Intelligence in Informationally Structured Space (RiiSS)*, pp. 1-6, 2015.
- [31] N. Masuyama and C. K. Loo, “Robotic Emotional Model with Personality Factors based on Pleasant-Arousal Scaling Model,” en *24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp. 19-24, 2015.
- [32] J.-S. H. Chia-Ming Hsu, Ting-Ting Chen, “Emotional and Conditional Model for Pet Robot based on Neural Network,” en *7th International Conference on Ubi-Media Computing and Workshops*, pp. 305–308, 2014.
- [33] K. Zia, A. Din, K. Shahzad, and A. Ferscha, “A Cognitive Agent-based Model for Multi-Robot Coverage at a City Scale,” en *Complex Adaptive Systems Modeling*, 5(1), 1, 2017.
- [34] S. Verret, “Current state of the art in multirobot systems,” *Defence Research and Development Canada-Suffield*, 2005.
- [35] L. Parker, “Current research in multirobot systems,” en *Artificial Life Robot.*, vol. 7, pp. 1–5, 2003.
- [36] G. Dudek, M. R. M. Jenkin, E. Milios, and D. Wilkes, “A Taxonomy for Multi-Agent Robotics,” en *Autonomous Robots*, 3(4), pp. 375-397, 1996.
- [37] P. Stone, P. Ave, and F. Park, “Multiagent Systems : A Survey from a Machine Learning Perspective,” en *Autonomous Robots*, 8(3), pp. 345-383, 2000.
- [38] J. Aguilar, *Introducción a los Sistemas Emergentes*, primera edición, vol. 1. Talleres Gráficos, Universidad de Los Andes, Mérida, 2014.
- [39] T. H. T. de Wolf, “Emergence Versus Self-organisation: Different Concepts but Promising when Combined,” en *Lect. Notes Artif. Intell.*, vol. 3464, pp. 1–15, 2005.
- [40] P. Clayton, “Emergence from Physics to Theology: toward a panoramic view,” *Zygon*, vol. 39, pp. 615–635, 2004.
- [41] N. J. Fernández Parada, “Modelado Multi-agentes de Sistemas Dinámicos -Un enfoque Auto-organizado, Emergente, Homeostático y Autopoiético-,” Tesis Doctoral, Universidad de los Andes, 2015.

- [42] E. Bericat, "Emociones," *Sociopedia.isa*, pp. 1–13, 2012.
- [43] N. Perozo, "Modelado multiagente para sistemas emergentes y auto-organizados," Tesis Doctoral, Universidad de los Andes, Venezuela, 2011.
- [44] V. K. Pilania, S. Mishra, S. Panda, and A. Mishra, "A novel approach to swarm bot architecture," en *International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, CAR'09, pp. 418–422, 2009.
- [45] A. Gil, J. Aguilar, R. Rivas, E. Dapena, and K. Hernandez, "Diseño de una plataforma multi-robot de proposito general," en *XIII Simulación y aplicaciones recientes para ciencia y tecnología*, pp. 785–796, 2016.
- [46] A. Gil, J. Aguilar, R. Rivas, E. Dapena, and K. Hernandez, "Architecture for Multi-robot Systems with Emergent Behavior," en *Proceedings on the International Conference on Artificial Intelligence (ICAI)*, pp. 41–47, 2015.
- [47] A. Gil, J. Aguilar, R. Rivas and E. Dapena, "Módulo conductual inmerso en una arquitectura de control para sistemas multi-robots," *Ingeniería al Día*, vol. 2, pp. 40-57, 2016.
- [48] Y. Zhang, P. Agarwal, V. Bhatnagar, S. Balochian, and J. Yan, "Swarm Intelligence and Its Applications," en *Sci. World Journal, Hindawi Publ. Corp.*, vol. 2013, 2013.
- [49] K. Loayza, P. Lucas, and E. Pelaez, "A centralized control of movements using a collision avoidance algorithm for a swarm of autonomous agents," en *IEEE 2nd Ecuador Tech. Chapters Meet. ETCM 2017*, vol. 2017–January, pp. 1–6, 2018.
- [50] J. Surowiecki, "Wisdom of Crowds," Random House, 2005.
- [51] K. Riahi, M. Jangjou, N. Khaefinejad y T. Laleh, "Adventurous Robots Equipped with Basic Emotions," en *International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support*, pp. 117-120, New Orleans, USA, 2012.
- [52] N. Perozo, J. Aguilar y O. Terán, "Proposal for a Multiagent Architecture for Self-Organizing Systems (MA-SOS)," en *Intelligence and Security Informatics, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5075, pp. 434-439, 2008.
- [53] R. Levenson, "The Intrapersonal Functions of Emotion," *Cognition and emotion*, vol. 13, no. 5, pp. 481-504, 1999.

- [54] N. Perozo, J. Aguilar, O. Terán, H. Molina "A Verification Method for MASOES," en *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part B*, Vol. 43, no. 1, pp. 64-76, 2013.
- [55] S. Piña, N. Perozo. "Implementation of an Affective Model for MASOES," en *Latin American Journal of Computing Faculty of Systems Engineering*, vol.4, no. 3, pp. 17-22, 2017.
- [56] T. L. Anderson y M. Donath. "Autonomous Robots and Emergente Behavior: A Set of Primitive Behaviors for Mobile Robot Control," en *EEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications*, pp. 723-730, 1990.
- [57] J. Aguilar. "Different dynamic causal relationship approaches for cognitive maps," *Applied Soft Computing*, vol. 13, no. 1, pp. 271-282, 2013.
- [58] J. Aguilar. "A fuzzy cognitive map based on the random neural model." en *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems*, Springer, pp. 333-338, 2001.
- [59] J. Aguilar. "Dynamic Fuzzy Cognitive Maps for the Supervision of Multiagent Systems," *Fuzzy Cognitive Maps: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Application*, Springer, pp. 307-324, 2010.
- [60] J. Aguilar, M. Cerrada, G. Mousalli, F. Rivas & F. Hidrobo. "A Multiagent Model for Intelligent Distributed Control Systems," *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, vol. 3681, pp. 191-197, 2005.
- [61] J. Aguilar & J. Contreras. "The FCM designer tool, " *Fuzzy Cognitive Map*, Springer, pp. 71-87, 2010.
- [62] F. Fernandez, G. Gutierrez, J.M. Molina, "Cooperación en sistemas distribuidos de robots reactivos minimizando la cantidad de información comunicada," en *Actas del simposio de informática distribuida SEID*, pp. 61-68, 2000.
- [63] T. Hayet and K. Jilani, "A navigation model for a multi-robot system Based on Client/Server model," en *2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, St. Julian's, 2016, pp. 644-648.016.
- [64] Y. Duan and X. Yu, "Multi-robot system based on cloud platform," en *2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*, Nanjing, pp. 614-617, 2016.

- [65] M. Alberri, S. Hegazy, M. Badra, M. Nasr, O. M. Shehata and E. I. Morgan, "Generic ROS-based Architecture for Heterogeneous Multi-Autonomous Systems Development," en *2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, pp. 1-6, 2018.
- [66] G. B. D. Efraín, V. C. A. del Carmen, E. C. L. Fernando and L. M. D. Cesar, "Implementation of an IoT Architecture based on MQTT for a Multi-Robot System," en *2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, pp. 1-6, 2018.
- [67] B. Fang, L. Chen, H. Wang, S. Dai, and Q. Zhong. "Research on Multirobot pursuit task allocation algorithm based on emotional cooperation factor," *The Scientific World Journal*, 2014.
- [68] J. Han, L. Xie, D. Li, Z. He, Z. Wang, "Cognitive emotion model for eldercare robot in smart home", *China Communications*, vol. 12, pp. 32–41, 2015.
- [69] J. Guzzi, A. Giusti, L. Gambardella and G. Di Caro, "A model of artificial emotions for behavior-modulation and implicit coordination in multi-robot systems," en *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference on - GECCO '18*, pp. 21-28, 2018.
- [70] J. Guzzi, A. Giusti, L. Gambardella and G. Di Caro, "Artificial Emotions as Dynamic Modulators of Individual and Group Behavior in Multi-robot System," en *The 17th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, pp. 2189-2191, 2018.
- [71] J. Halley, D. Winkler, "Classification of emergence and its relation to self-organization," *Complexity*, vol. 13, pp. 10-15, 2008.
- [72] P. Teller, "A contemporary look at Emergence," en *Emergence or reduction. A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim Eds., Walter de Gruyter*, pp. 139-153, 1992.
- [73] J. Fromm, "Types and Forms of Emergence," Informe Técnico, Distributed Systems Group, Electric Engineering / Computer Science, Universität Kassel, Alemania, 2006.
- [74] S. C. Danús, I. P. Rodríguez, V. V. Symmes, F. Ceric, E. Hurtado, and A. Ibáñez, "Reconocimiento de emociones: Estudio neurocognitivo/Recognizing emotions: A neuro-cognitive study," *Praxis*, (18), 29-64, 2017.
- [75] K. Hernández, A. Gil, J. Aguilar, R. Rivas & E. Dapena. "Diseño de una plataforma multi-robot de propósito general," in *Simulación y aplicaciones recientes para ciencia y tecnología*, vol.8, pp. 785-796, 2016.

- [76] Y. Tohyama & H. Igarashi. "Cooperative transportation by multi-robots with selecting leader," en *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, pp. 4179-4184, 2009.
- [77] S. Moon, D. Kwak & H. J. Kim. "Cooperative control of differential wheeled mobile robots for box pushing problem," en *12th International Conference IEEE on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 140-144, 2012.
- [78] A. Ghosh, A. Konar & R. Janarthanan. "Multi-robot cooperative box-pushing problem using multi-objective particle swarm optimization technique," en *IEEE World Congress on Information and Communication Technologies (WICT)*, pp. 272-277, 2012,
- [79] A. Gil, J. Aguilar, E. Dapena y R. Rivas. "Verification of the emergence in an architecture for multi-robot systems (AMEB)," *Latin American Journal of Computing Faculty of Systems Engineering Escuela Politécnica Nacional Quito-Ecuador*, 5(2), 41-52, 2018.
- [80] A. Gil, J. Aguilar, E. Dapena y R. Rivas. "A Control Architecture for Robot Swarms (AMEB)," *Cybernetics and Systems an International Journal*, 1-23, 2019.
- [81] J. Han, L. Xie, D. Li, Z. He, Z. Wang. "Cognitive emotion model for eldercare robot in smart home," *China Communications*, 12, 32–41, 2015.
- [82] S.C. Banik, K. Watanabe y K. Izumi, K. "Task Allocation with a Cooperative Plan for an Emotionally Intelligent System of Multi-Robots," en *Proceedings of the 46th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan*, 1004–1010, 2007.
- [83] S.C. Banik, K. Watanabe, M.K Habib y K. Izumi, K. "An emotion-based task sharing approach for a cooperative multiagent robotic system," en *Proceedings of the IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom.*, 77–82, 2008.
- [84] S. Sang-Wook, Y. Hyun-Chang y S. Kwee-Bo, "Behavior learning and evolution of swarm robot system for cooperative behavior," en *2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Singapore, pp. 673-678, 2009.
- [85] F. De la Rosa y M. E. Jiménez."Simulation of Multi-robot Architectures in mobile Robotics" en *IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, pp. 199-203, 2009.

- [86] Zhang, X., Alves, S., Nejat, G., & Benhabib, B. "A Robot Emotion Model with History," en *IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors*, 230-235, 2017.
- [87] H. Cheng, Q. Zhu, Z. Liu, T. Xu y L. Lin, "Decentralized navigation of multiple agents based on ORCA and model predictive control," en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, BC, pp. 3446-3451, 2017.
- [88] A. Gil, J. Aguilar, E. Dapena y R. Rivas. "Coordinación emergente en sistemas multi-robots," *UIS Ingenierías, Universidad Industrial de Santander*, vol 18(3), pp. 75-86, Colombia, 2019.
- [89] J. van den Berg, S. J. Guy, M. Lin, and D. Manocha, "Reciprocal n-body collision avoidance," en *The 14th International Symposium of Robotics Research (ISRR)*. Springer, 2011, pp. 3–19.
- [90] J. van den Berg, S. J. Guy, J. Snape, M. C. Lin, and D. Manocha, "Rvo2 library: Reciprocal collision avoidance for real-time multi-agent simulation," Available at <http://gamma.cs.unc.edu/RVO2/>, 2016.
- [91] A. Gil, J. Aguilar, E. Puerto y E. Dapena. "Emergence analysis in a Multi-robot System," en *Proceeding of the XLIV Conferencia Latinoamericana en Informática (CLEI 2018)*, San Pablo, Brasil, Octubre 2018.
- [92] A. Gil, J. Aguilar, E. Dapena y R. Rivas. "Arquitectura Adaptativa de Cooperación para Múltiples Robots: Primera aproximación al diseño conceptual," en *Primera Conferencia Nacional de Computación, Informática y Sistemas (CoNCISA)*, pp. 154-161, Venezuela. Octubre 2013.
- [93] A. Gil, J. Aguilar, E. Dapena y R. Rivas. "Implementación de Mecanismos de Cooperación en una Arquitectura Adaptativa para Sistemas Multi-robots," en *XII Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, pp. EC 7 - EC 12, Venezuela, 2014.
- [94] E. Puerto, and J. Aguilar, "Un Algoritmo Recursivo de Reconocimiento de Patrones", *Revista Técnica de Ingeniería de la Universidad del Zulia*, vol.40, no.2, pp. 95-104, 2017.
- [95] E. Puerto, and J. Aguilar, "Learning Algorithm for the Recursive Pattern Recognition Model," *Applied Artificial Intelligence*, vol. 30, no 7, pp. 662-678, 2016.

- [96] E. Puerto, J. Aguilar, D. Chávez “A Recursive Patterns Matching Model for the Dynamic Pattern Recognition Problem,” *Applied Artificial Intelligence*, vol. 32, no 4, pp 419-432, 2018.
- [97] A. Gil, E. Puerto, J. Aguilar, E. Dapena. “Emotions in a Multi-robot System in the Context of Emergent Behaviors,” en *CLEI Electronic Journal*, 2019. (en revisión)

*“El caos no es un pozo... es una escalera”
- Petyr Baelish-*

7.1 Implementación de AMEB en una plataforma de propósito general

Se plantea la implementación de la arquitectura en una plataforma experimental de hardware y software, compuesta por robots de propósito general, y una aplicación de control que gestiona procesos básicos del sistema. Los robots de propósito general (Ver Figura A.1) son gestionados por una arquitectura de hardware de cuatro capas:

- **Control:** El robot, cuenta con una tarjeta Arduino® UNO, basada en un micro-controlador ATmega 328. En este dispositivo se implementan los procesos básicos de control del robot.
- **Locomoción/actuación:** Esta capa es responsable de gestionar el sistema de locomoción del robot, así como los actuadores que se incorporen en el diseño del mismo. El robot cuenta con un sistema de locomoción diferencial con rueda loca, implementado mediante una caja de engranajes que transmite la potencia de dos motores DC a las ruedas.
- **Percepción:** El sistema de percepción del robot consta de sensores infrarojos Qtr 8A, que le permiten leer patrones en el suelo, un sensor ultrasónico, modelo HC-SR04, para la detección de objetos, y además, un sensor virtual con soporte de visión artificial, que le permite percibir información adicional, que físicamente no le sería posible.
- **Comunicación:** El robot cuenta con un dispositivo Xbee®, basado en el protocolo IEEE 802.15.4, el cual permite la comunicación punto a punto o multipunto entre dispositivos de la misma clase.



Figura A.1 Robot de propósito general

El esquema general del robot se presenta en la Figura , donde se detallan los componentes que conforman su estructura.

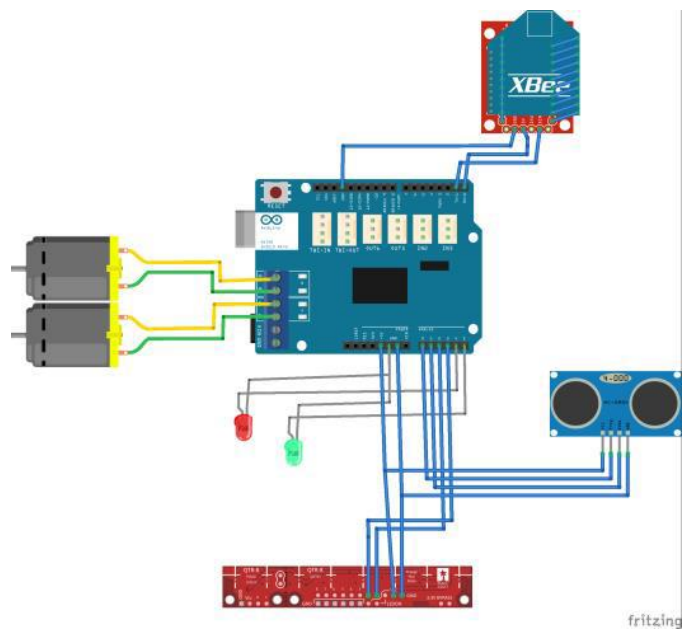


Figura A.2 Esquema de hardware del robot

En cuanto a la arquitectura de software, el robot posee una arquitectura de software de tres niveles, que controlan los actuadores, sensores y dispositivos de comunicación del mismo (Ver Figura). Cada nivel implementa un conjunto de librerías que controlan los sistemas del robot de forma individual. Esta arquitectura brinda la posibilidad de desarrollar rutinas, que se traducen en comportamientos del robot y en aplicaciones que se ejecutan sobre el mismo. En las capas de locomoción y percepción, se implementan las librerías para la gestión de los actuadores y sensores del robot, las mismas permiten incorporar nuevos dispositivos al sistema, y en la capa de comunicaciones, se gestionan los canales de comunicación del robot, permitiendo el envío de mensajes entre ellos, o la comunicación con la aplicación principal.

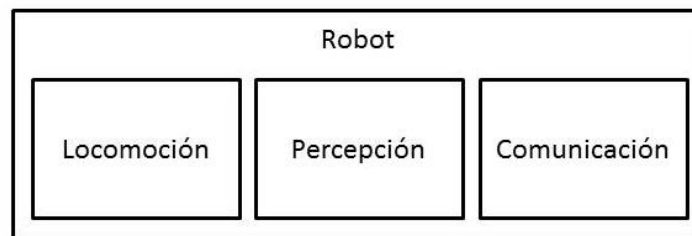


Figura A.3 Arquitectura de software del robot

Para que los robots puedan contar con cierta autonomía, el mismo debe ser capaz de exhibir ciertos comportamientos básicos, definiendo como comportamiento, aquellos procesos llevados a cabo por el individuo, que le permiten captar información del entorno y de su propio estado interno, y en consecuencia, dar respuesta a los cambios que percibe. A partir de la activación concurrente de estos comportamientos básicos, se construyen comportamientos de mayor complejidad [56]. Es en la arquitectura de software local del robot, que se implementan los comportamientos básicos que el robot puede llevar a cabo. A continuación, se describen una serie de comportamientos primarios para el robot utilizado en este trabajo:

1. Comportamientos funcionales:

Son comportamientos operacionales, que preparan al robot para su actuación en el entorno:

- a) Calibrar: este comportamiento permite que el robot calibre sus sensores y actuadores al momento de su puesta en marcha, con el fin de adecuarse a las condiciones del entorno.
- b) Comportamientos de base

Los comportamientos de base, representan la unidad atómica de funcionamiento del robot. A partir de ellos, se generan los comportamientos de mayor complejidad, que el mismo puede realizar:

- Mover: permite que el robot se desplace en diferentes direcciones y a diferentes velocidades.
- Percibir: comportamiento que permite que el robot perciba información de su entorno: detectar objetos, marcas en el suelo, feromonas, etc.
- Comunicar: el robot puede enviar y recibir mensajes.

A partir de la ejecución conjunta de comportamientos de base, con diferentes parámetros de funcionamiento, se construyen comportamientos de más alto nivel, que le permiten al robot ejecutar acciones de mayor complejidad, entre los que se tienen:

- Explorar: Este comportamiento permite que el robot recorra el entorno de manera aleatoria, hasta que encuentra un estímulo (marca, robot, etc.) que activa un cambio de comportamiento.
- Evadir: Comportamiento que permite al robot evitar una colisión, ya sea contra un obstáculo u otro robot que se encuentre en el entorno.
- Persecución: Permite que el robot inicie la persecución de un objeto móvil dentro del entorno.
- Refugio: El robot, al detectar una marca que le indique que se encuentra en una zona segura, busca mantener la posición por un tiempo determinado.
- Enfrentar: El robot se enfrenta a otro, por algún recurso disponible en el entorno.
- Recarga: El robot, al detectar una marca que le indique recarga de energía, permanece en ella, hasta satisfacer su necesidad.
- Seguimiento de caminos: el robot sigue un camino en particular, por ejemplo, marca de feromonas virtuales, que son depositadas y/o detectadas, utilizando sensores externos, basados por ejemplo, en visión artificial.

Para la gestión del sistema multi-robot se desarrolló una aplicación de control (Olympus), que gestiona el funcionamiento de un robot o de un grupo de ellos. La aplicación permite distribuir los procesos de control entre el robot de forma local y la estación de control principal, para esto se instancian copias virtuales de cada robot en la aplicación, que se comunican directamente con los robots físicos. La aplicación permite implementar y probar aplicaciones sobre la plataforma, de forma tal, que permita realizar experimentos sobre ella. En la Figura , se muestra el esquema general de la plataforma, así como la instanciación sobre ella de AMEB [46, 47], la cual en esta aplicación en particular, funciona de manera transversal al sistema, y tiene como objeto facilitar los procesos que permitan la aparición de la emergencia en el sistema multi-robot.

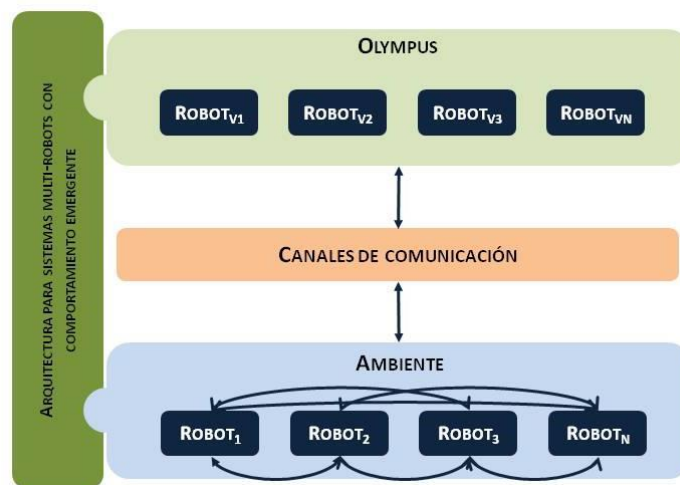


Figura A.4 Arquitectura de software Olympus

Olympus, funciona como un gestor de los procesos de comunicación, actuación y monitoreo de cada robot, no centraliza el funcionamiento del sistema, tal que cada robot actúa de forma independiente en la aplicación. La idea es gestionar un ambiente totalmente distribuido, donde cada robot actúe autónomamente, y que a la vez le permita al usuario supervisor, controlar y monitorear todas las variables presentes en el sistema, así como recopilar datos, que sean de interés para la aplicación instanciada en cada situación en particular.

En la Figura se muestra la interfaz general de la aplicación, la misma permite configurar cada robot conectado al sistema, así como supervisar en tiempo real su funcionamiento, brindando información de sus sensores en tiempo real, así como de los comportamientos que ejecuta en cada momento.

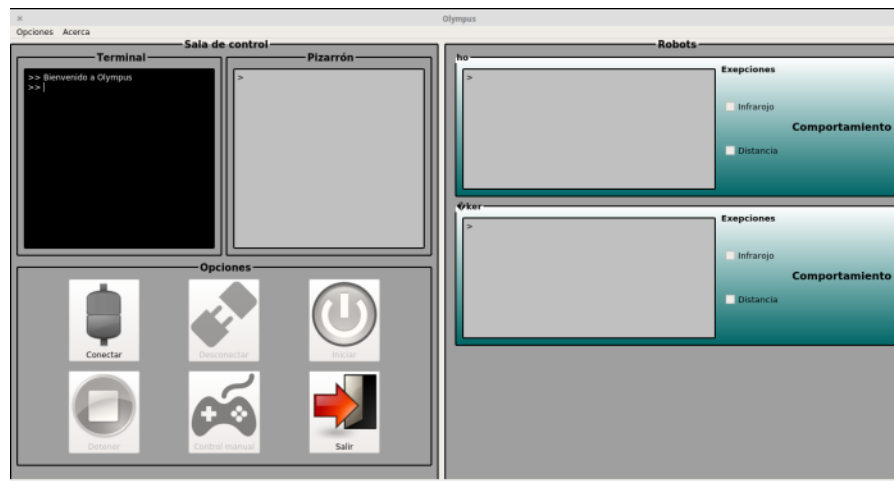


Figura A.5 Interfaz aplicación

La aplicación está estructurada en tres capas: base, percepción y robot, cada una con funciones específicas. (Ver Figura).

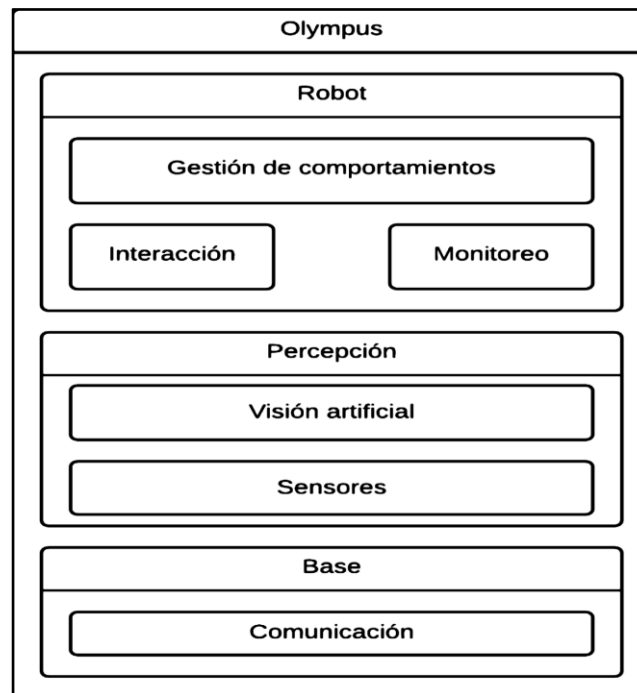


Figura A.6 Estructura de Olympus

A continuación se describe cada una de las capas de la aplicación:

1. Capa base: la capa base se encarga del manejo de los canales de comunicación entre el programa de control y él o los robots, así como la comunicación entre los individuos del sistema. En esta capa se define el protocolo de comunicación a utilizar:
 - Dispositivo de comunicación: la aplicación se comunica con los robots mediante un dispositivo XBee®, que funciona como nodo central de una red, donde cada robot es un nodo.
 - Protocolo: se estableció un protocolo para la comunicación que consiste en una n-tupla compuesta por los comportamientos, eventos y parámetros de configuración, que le indican a un robot, una acción en un momento determinado. El primer parámetro del mensaje indica a qué robot del sistema va dirigido, luego que comportamiento, y por último, que opciones ejecutar. Las opciones son parámetros de configuración del comportamiento (Ver Figura). Por ejemplo, el mensaje: <A:C:1>, indica al robot A que debe ejecutar el comportamiento C, con la opción 1 del mismo.

<	Nombre del robot	:
	Comportamiento/Evento	:
	Opción 1	:
	Opción 2	:
	Opción N-ésima	>

Figura A.7 Estructura del mensaje

2. Capa de percepción: La capa de percepción gestiona los sensores, tanto físicos como virtuales, del robot, soportándose en las librerías locales del robot. En esta primera versión de Olympus, el sensor virtual implementado se soporta en visión artificial, y complementa la capacidad de percepción del robot, al aumentar las capacidades sensoriales del mismo. Este sistema le permite al robot localizarse en un momento determinado, así como simular el depósito o lectura de marcas en el entorno, lo que le permiten la toma de decisiones en un momento determinado. Un ejemplo de estas marcas son las feromonas que dejan las hormigas en el ambiente, cuando se encuentran en la tarea de búsqueda de alimento.

3. Capa de robot: en ésta capa se instancia cada robot físico del sistema, con el fin de monitorear cada una de sus funciones, permitiendo:
 - Gestión de comportamientos: en este nivel se instancian los comportamientos complejos del robots. Además, se implementa acá el control manual, el cual permite al usuario supervisor tele-operar de forma directa al robot en un momento determinado. Los comportamientos son implementados utilizando la capa de software del robot.
 - Interacción: en esta capa se facilita la interacción entre robots, mediante la implementación de mecanismos que permitan el intercambio de información entre ellos, apoyándose en la capa base.
 - Monitoreo: los robots son monitoreados en tiempo real en esta capa.

Se llevaron a cabo pruebas para verificar la funcionalidad de la aplicación, a continuación se resumen las pruebas realizadas:

1. Monitoreo de los robots: La aplicación permite monitorear la activación de comportamientos en los robots, así como el estado de sus sensores. A través de la aplicación, se puede observar los cambios de comportamientos que ocurren en cada individuo que conforma el sistema. En la Figura A.8 se observa un cambio de comportamiento en los robots, y como, en este caso, el supervisor activa o desactiva sensores. La Figura muestra dos robots, siendo monitoreados de forma paralela.

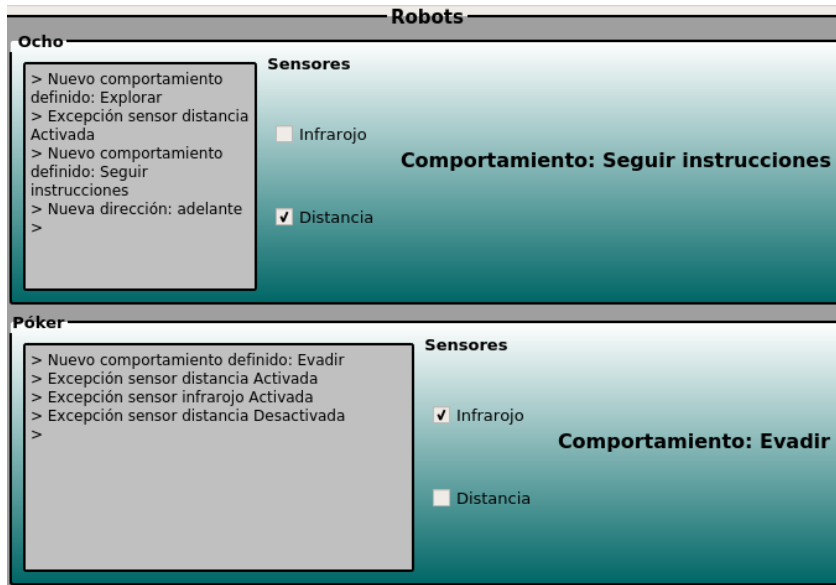


Figura A.8 Monitoreo de comportamientos

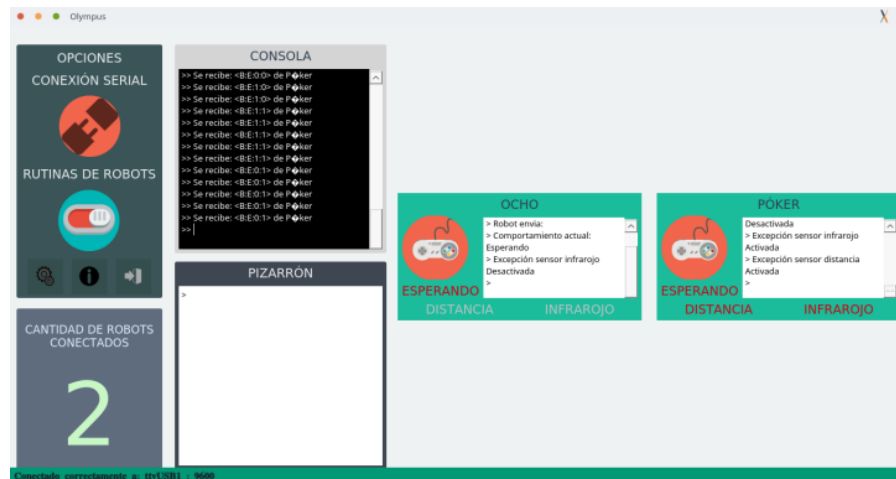


Figura A.9 Monitoreo de 2 robots en paralelo

7.2 Implementación modelo emocional AMEB

El modelo emocional es implementado en el módulo conductual descrito en [47], el cual está estructurado en cuatro capas (ver Figura), en las cuales se gestionan los procesos relacionados con el modelo:

1. *Capa reactiva*: gestiona los comportamientos reactivos del individuo, los cuales son generados por un proceso estímulo - reacción.
2. *Capa cognitiva*: comportamientos deliberativos del individuo son gestionados en esta capa, de acuerdo al conocimiento individual del mismo.
3. *Capa social*: esta capa utiliza el conocimiento colectivo para el proceso de toma de decisiones del individuo. Básicamente, gestiona los mecanismos de interacción entre el individuo y el grupo, se asocia a los comportamientos colectivos del sistema.
4. *Capa afectiva*: es la responsable de gestionar los estados emocionales del individuo.

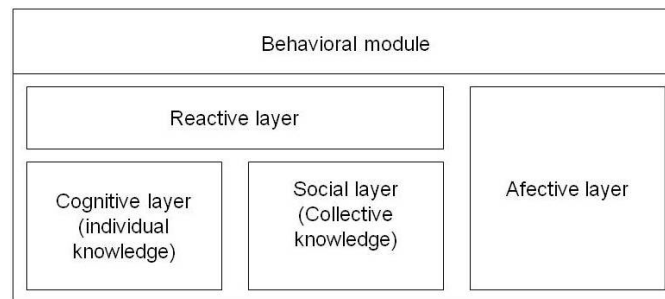


Figura A.10 Módulo conductual [47]

Las fases involucradas en el proceso emocional son descritas a continuación, basadas en la propuesta planteada en [52]:

1. Clasificación:

En esta propuesta se utilizan en el modelo cuatro emociones básicas y un estado neutro o de no emoción, considerando emociones positivas y negativas, que conllevan a comportamientos individuales y colectivos.

2. Módulo de comportamiento:

Las capas reactiva, cognitiva y social implementan un conjunto de comportamientos del individuo que son ejecutados en el entorno [47]. Estos comportamientos son construidos a partir de la conjunción de dos o más comportamientos/habilidades básicas del robot, y están relacionados con sus capacidades de hardware y software:

- **Mover**: el robot se puede mover hacia adelante o hacia atrás, lo puede hacer durante cierto tiempo, o por una distancia determinada.

- Rotar: el robot puede rotar hacia la derecha o hacia la izquierda un número de grados determinado, o durante cierto tiempo.
- Percibir: el robot percibe información de su entorno a través de sus sensores, así como de su estado interno.
- Parar: el robot puede parar en un determinado momento.

A partir de estas habilidades básicas se construyen comportamientos de mayor complejidad, que definen el comportamiento del robot. Entre estos comportamientos se encuentran:

- Explorar: este comportamiento permite que el robot explore el entorno de forma aleatoria.
- Evasión de obstáculos: permite al robot evadir obstáculos, tanto objetos fijos como móviles.
- Persecución: permite al robot perseguir a otro durante un tiempo determinado.
- Refugio: el robot busca un área segura (representada por marcas en el suelo), y permanece en ella mientras alcanza el estado deseado.
- Confrontación: dependiendo del estado emocional, el robot puede enfrentar a otro por el uso de algún recurso.
- Recarga: el robot tiene la habilidad de recargar su batería en la zona establecida para ello.

Estos comportamientos están asociados, como se mencionó anteriormente, a un estado emocional específico, para lo cual se definen las siguientes reglas [47]:

Regla 1: Si <estado emocional> es altamente positivo, entonces <comportamiento_imitativo>

Regla 2: Si <estado emocional> es positivo, entonces <comportamiento_imitativo>

Regla 3: Si <estado emocional> es ligeramente positivo, entonces <prioridad_comportamiento_cognitivo>

Regla 4: Si <estado emocional> es neutro, entonces <comportamiento>

Regla 5: Si <estado emocional> es ligeramente negativo, entonces <prioridad_comportamiento_cognitivo >

Regla 6: Si <estado emocional> es negativo, entonces < prioridad_comportamiento_cognitivo >

Regla 7: Si <estado emocional> es altamente negativo, entonces <prioridad_comportamiento_reactivo>

3. Configurador emocional:

Determinar la emoción del robot en un instante t es una etapa fundamental del proceso emocional, la cual depende del nivel de satisfacción del robot, que viene dado por los factores descritos en la tesis. A continuación, se describe este proceso:

- Evaluar la ocurrencia de un estímulo externo o interno que afecta los parámetros involucrados en el índice de satisfacción del robot (SI).
- Determinar los valores de los parámetros.
- Calcular el índice de satisfacción (SI) utilizando un modelo difuso.
- Determinar la emoción actual.

En esta fase, el índice de satisfacción se calcula utilizando un sistema difuso compuesto por cuatro variables de entrada y una variable de salida. Las variables de entrada, como se explicó en la tesis, representan el estado interno del robot, y están relacionadas con los parámetros operativos del mismo. La variable de salida está relacionada con el estado de satisfacción del robot, y está asociada con un estado emocional (Ver Tabla A.1).

Tabla A.1 Variables de entrada y salida del sistema difuso

Variables de entrada	Variable de salida
BS: estado de batería	
OS: estado de operación	
SS: estado de seguridad	SI: índice de satisfacción
IS: estado de interacción	

Las variables de entrada están definidas por tres conjuntos difusos: {bajo, normal, alto}, y la variable de salida están definidas por cinco conjuntos difusos: {ira, rechazo, neutral, tristeza, alegría}.

Algunas de las reglas que rigen el sistema son:

Regla 1: si BS es bajo y OS es bajo y SS es alto y IS es bajo, entonces SI es tristeza.

Regla 2: Si BS es bajo y OS es bajo y SS es normal y IS es bajo, entonces SI es tristeza.

Regla 3: Si BS es bajo y OS es normal y SS es normal y IS es bajo, entonces SI es tristeza.

Regla 4: Si BS es bajo y OS es normal y SS es normal y IS es normal, entonces SI es rechazo.

La Figura muestra un ejemplo de la implementación del modelo difuso en MATLAB®. En este caso, el conjunto de entrada se define de la siguiente forma: {BS: alto, OS: normal, SS: bajo, IS: alto}, y la salida obtenida: {joy}. Esto, según el modelo, describe lo siguiente:

- Carga de batería: óptima.
- Estado operativo: normal, el robot ha estado ejecutando alguna tarea durante buena parte del período operativo del sistema.
- Factor de seguridad: bajo, lo que indica que hay pocas o ninguna colisión y/o bloqueos.
- Factor de interacción: alto, el robot ha interactuado con los otros miembros del equipo.

De acuerdo a estos parámetros el robot tiene un estado de satisfacción alto, por lo que la emoción activa es alegría.



Figura A.11 Implementación del modelo difuso

La Figura muestra la relación entre las variables estado de la batería (BS) y estado de operación (OS) con las otras variables del sistema, y cómo influyen en la variable de salida (SI). Se puede observar, por ejemplo, que para los valores normales de BS y OS, sin considerar los

otros estados, el índice de satisfacción puede alcanzar un valor máximo cercano a lo normal, lo que implica que la emoción activa sería ligeramente positiva.

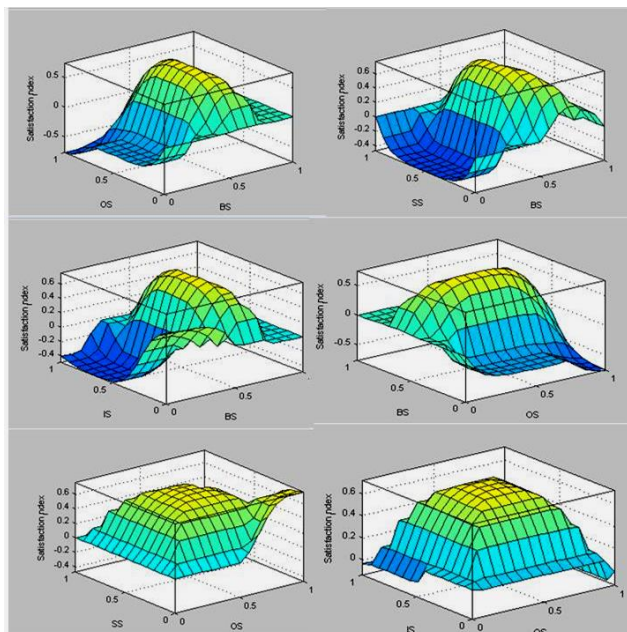


Figura A.12 Relación del estado de la batería y el estado de operación con los otros factores y con el índice de satisfacción.

4. Selector de comportamiento:

En esta fase se modifica el comportamiento actual del robot, como consecuencia del proceso anterior. Esta modificación implica la asociación de una emoción a un comportamiento, de acuerdo con las reglas establecidas en la fase 2. El desempeño del robot se ve afectado por el estado emocional en dos formas específicas:

- El comportamiento seleccionado (imitativo, cognitivo o reactivo) del conjunto de comportamientos del robot.
- Los parámetros de rendimiento que se modifican por el índice de satisfacción del robot, que influyen en la forma en que se ejecuta el comportamiento.

Los parámetros de rendimiento que pueden modificarse, están relacionados con las características de los robots que debe gestionar la arquitectura [45]:

- Velocidad de desplazamiento.

- Rango de detección de objetos delante.
- Gama de detección de marcas en el suelo.
- Capacidad de toma de decisiones (Tiempo para decidir)

Lo que implica que para el mismo comportamiento, se obtendrán diferentes resultados. Por ejemplo: si el robot está en una persecución y se encuentra en un estado emocional de alegría, entonces se desplazará más rápido y sus habilidades sensoriales funcionarán mejor que si el robot tiene un estado emocional de tristeza.

“El hombre que teme a la derrota ya ha sido derrotado.”
- Syrio Forel-

8.1 Listado de publicaciones asociadas a la presente investigación:

A. Gil, J. Aguilar, E. Dapena y R. Rivas. “Arquitectura Adaptativa de Cooperación para Múltiples Robots: Primera aproximación al diseño conceptual,” *Primera Conferencia Nacional de Computación, Informática y Sistemas (CoNCISA)*, pp. 154-161, Venezuela. Octubre 2013.

A. Gil, J. Aguilar, E. Dapena y R. Rivas. “Implementación de Mecanismos de Cooperación en una Arquitectura Adaptativa para Sistemas Multi-robots,” *XII Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, pp. EC 7 - EC 12, Venezuela, 2014.

A. Gil, J. Aguilar, R. Rivas, E. Dapena, and K. Hernandez, “Architecture for Multi-robot Systems with Emergent Behavior,” in *Proceedings on the International Conference on Artificial Intelligence (ICAI)*, 2015, pp. 41–47.

A. Gil, J. Aguilar, R. Rivas, E. Dapena, and K. Hernandez, “Diseño de una plataforma multi-robot de proposito general,” in *XIII Simulación y aplicaciones recientes para ciencia y tecnología*, 2016, pp. 785–796.

K. Hernández, A. Gil, J. Aguilar, R. Rivas & E. Dapena. “Diseño de una plataforma multi-robot de propósito general,” in *Simulación y aplicaciones recientes para ciencia y tecnología*, vol.8, pp. 785-796, 2016.

A. Gil, J. Aguilar, R. Rivas and E. Dapena, “Módulo conductual inmerso en una arquitectura de control para sistemas multi-robots”. *Ingeniería al Día*, vol. 2, pp. 40-57, 2016.

A. Gil, J. Aguilar, E. Dapena y R. Rivas. “Verification of the emergence in an architecture for multi-robot systems (AMEB),” *Latin American Journal of Computing Faculty of Systems Engineering Escuela Politécnica Nacional Quito-Ecuador*, 5(2), 41-52, 2018.

A. Gil, J. Aguilar, E. Puerto y E. Dapena. "Emergence analysis in a Multi-robot System,” *Proceeding of the XLIV Conferencia Latinoamericana en Informática (CLEI 2018)*, San Pablo, Brasil, Octubre 2018.

A. Gil, J. Aguilar, E. Dapena y R. Rivas. “Coordinación emergente en sistemas multi-robots,” *UIS Ingenierías*, Universidad Industrial de Santander, vol 18(3), pp. 75-86, Colombia, 2019.

A. Gil, J. Aguilar, E. Dapena y R. Rivas. “A Control Architecture for Robot Swarms (AMEB),” *Cybernetics and Systems an International Journal*, 1-23, 2019.

8.2 Publicaciones aceptadas en proceso de publicación

Gil, D. Juliao, J. García, J. Aguilar, E. Dapena, R. Rivas. “Un sistema multi-robot heterogéneo basado en el algoritmo ACO para tareas de exploración y búsqueda,” *Avances y Retos de la Ciencia e Ingeniería*, Universidad de los Andes, pp. 122-129, Venezuela, 2019.

8.3 Publicaciones en revisión

A. Gil, E. Puerto, J. Aguilar, E. Dapena. “Emotions in a Multi-robot System in the Context of Emergent Behaviors,” *CLEI Electronic Journal*, 2019. (en revisión)