

Verificación de la emergencia en una arquitectura para sistemas multi-robots (AMEB)

Verification of the emergence in an architecture for multi-robot systems (AMEB)

A. Gil , J. Aguilar, E. Dapena, R. Rivas

Resumen— El presente artículo analiza el comportamiento emergente de un sistema multi-robot gestionado por una arquitectura estructurada en tres capas: la primera brinda soporte local al robot, gestiona sus procesos de actuación, percepción y comunicación, así como su aspecto conductual, el cual considera los aspectos reactivos, cognitivos y sociales del robot. Además, introduce un componente afectivo que influye en su comportamiento y en la forma en que se relaciona con el ambiente y con los otros individuos del sistema, basado en un modelo emocional que toma en cuenta cuatro emociones básicas. La segunda brinda soporte a los procesos colectivos del sistema, basándose en el concepto de coordinación emergente. La última se encarga de la gestión del conocimiento y de los procesos de aprendizaje, tanto a nivel individual como colectivo, en el sistema. En este artículo se definen las métricas para verificar la emergencia en el sistema, mediante la utilización de un método de verificación de comportamientos emergentes basado en Mapas Cognitivos Difusos.

Index Terms— Sistemas emergentes, emociones, control de robots y sistemas multi-robot, Mapas Cognitivos, modelado de robots y sistemas multi-robot, Arquitecturas de control distribuido y descentralizado.

Abstract- This article analyzes the emerging behavior of a multi-robot system managed by an architecture structured in three layers: the first provides local support to the robot, manages its processes of action, perception and communication, as well as its behavioral aspect, which considers the reactive, cognitive and social aspects of the robot. In addition, it introduces an affective component that influences its behavior and the way it relates to the environment and to the other individuals in the system, based on an emotional model that takes into account four

basic emotions. The second provides support to the collective processes of the system, based on the concept of emerging coordination. The latter is responsible for knowledge management and learning processes, both individually and collectively, in the system. In this article the metrics are defined to verify the emergency in the system, by means of the use of a method of verification of emergent behaviors based on Fuzzy Cognitive Maps.

Index Terms- Emergent systems, emotions, control of robots and multi-robot systems, Cognitive maps, robot modeling and multi-robot systems, Distributed and decentralized control architectures.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de arquitecturas para sistemas multi-robots es un campo de investigación de interés [9-18]. Son varios los procesos que se dan en este tipo de sistemas, desde la gestión individual de cada robot, hasta los procesos colectivos que surgen en los mismos. En estos tipos de sistemas, se pueden presentar procesos emergentes que surgen de la interacción entre los robots, por lo que es importante contar con mecanismos que permitan verificar dicho fenómeno, para determinar el comportamiento de sus componentes en la resolución de problemas complejos.

En general, en la literatura hay un importante número de trabajos alrededor de la definición de arquitecturas para el control de robots. Algunas consideran las emociones [9, 10], contextos heterogéneos [15, 16, 18], y muy pocas soportan sus procesos emergentes y/o autoorganizados [12, 13, 14]. Ahora bien, en ninguno de los trabajos previos se establecen mecanismos para verificar la emergencia en un sistema multi-robot.

En este trabajo, se definen un conjunto de métricas, que permiten determinar la emergencia en un sistema multi-robot, gestionado por una arquitectura que tiene como objeto brindar

Article history:

Received 12 September 2018

Accepted 08 November 2018

A Gil, pertenece al Laboratorio de Prototipos en la Universidad Nacional Experimental del Táchira y a Tepey R+D Group. Artificial Intelligence Software Development. Mérida, Venezuela (email: agil@unet.edu.ve)

J. Aguilar pertenece al CEMISID en la Universidad de los Andes y a Tepey R+D Group. Artificial Intelligence Software Development. Mérida, Venezuela (email: aguilar@ula.ve).

E. Dapena, pertenece a LASDAI en la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela (email: eladio@ula.ve).

R. Rivas, pertenece a LASDAI en la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela (email: rafael@ula.ve).

soporte al sistema en sus dinámicas emergentes. La arquitectura se estructura desde tres ejes principales [1, 2]: lo individual, lo colectivo y el aprendizaje.

En el nivel individual, se gestionan los procesos de percepción, actuación y los comportamientos del robot, así como también, se implementa un componente afectivo. El nivel colectivo, se encarga de los procesos de coordinación del sistema, bajo el enfoque emergente. Finalmente, un tercer nivel, se encarga de la gestión del conocimiento, tanto a nivel individual como colectivo. En general, la arquitectura gestiona los procesos presentes en un sistema multi-robot heterogéneo, compuesto por robots de propósito general, enmarcados en lo que es conocido en la literatura como enjambre de robots [3, 4, 5]. El fin de la arquitectura, es facilitar la emergencia de comportamientos en el grupo de robots.

Con el objeto de validar la aparición de comportamientos emergentes en el enjambre de robots, se definen una serie de conceptos, los cuales se inspiran en [6, 7], donde se proponen un conjunto de conceptos para verificar la emergencia y auto-organización en un sistema dado. A partir de esos conceptos, en este trabajo se presenta un modelo de verificación de comportamientos emergentes para dicha arquitectura, usándolos en un Mapa Cognitivo Difuso desarrollado para tal fin [7, 8].

El artículo está dividido en seis secciones, una sección donde se resumen algunos trabajos previos vinculados a la propuesta; la siguiente sección presenta un resumen del diseño de la arquitectura; luego, se definen las métricas que permiten medir la aparición de la emergencia; la siguiente sección es de experimentación, donde se plantean casos de estudio para mostrar cómo funciona el método de verificación; en seguida, se presenta una sección donde se lleva a cabo una comparación de la arquitectura con otros trabajos; y por último, se presentan las conclusiones de la investigación.

II. TRABAJOS PREVIOS

En trabajos anteriores, se han desarrollado diversas arquitecturas para el control de robots. En los trabajos [9, 10, 11] se presentan diseños de agentes autónomos, donde sus comportamientos son gobernados por emociones básicas y estados emocionales. Las emociones pueden modificar la intensidad de la motivación de un agente en un instante dado, evitando que ejecute alguna acción, o modificando su sistema de percepción, entre otras cosas. Así, según [9, 10] las emociones influyen en el comportamiento de un agente y en cómo actúa ante una misma situación, generando comportamientos emergentes en él, ya que no se puede predecir cómo será su actuación ante las dinámicas del sistema.

En [8] se presenta una arquitectura para sistemas emergentes y auto-organizados (MASOES), la cual es una herramienta para el modelado no formal de sistemas, donde el funcionamiento de los agentes se rige por los comportamientos que emergen de las interacciones entre ellos; además, los mismos autores proponen también un método de verificación, con el fin de evaluar las características emergentes y auto-organizativas del sistema [7].

En [12], un grupo de robots es utilizado para inspeccionar un entorno, con la misión de detectar múltiples objetivos (puntos de contaminación o enemigos), móviles o fijos, y, según sea el caso, capturarlos. Los comportamientos de este sistema

emergen a través de las interacciones de los individuos con su entorno.

Una arquitectura neuro-endocrina (combina un perceptrón clásico con un sistema endocrino artificial, que afecta los pesos de la red neuronal) para enjambres de robots, es presentada en [13]. El objetivo del sistema es que los robots colaboren en tareas de búsqueda de fuentes de alimento. Particularmente, ellos analizan el comportamiento emergente que aparece en el sistema.

En [14] se presenta un dispositivo experimental, que define y estudia la auto-organización en un sistema donde existen interacciones físicas. En este caso, se utilizaron robots móviles modelo Kheperas III, y se estudió la aparición de formaciones emergentes: rutas de transporte de recursos, formación de cadenas entre los robots, entre otros. En ese trabajo, la comunicación entre los robots se da de forma indirecta, a través del uso de feromonas artificiales.

Por otro lado, en [15] se presenta un método basado en máquinas de soporte vectorial y algoritmos genéticos para el aprendizaje y la evolución de un grupo de robots, con el fin de que puedan adaptarse a entornos dinámicos. En [16] se presenta una arquitectura para el desarrollo de sistemas multi-robots, brindando una plataforma que permite gestionar sistemas escalables, compartir recursos entre los robots que conforman el grupo, y la reutilización de componentes para su uso en diferentes aplicaciones. En [17] describen una arquitectura basada en comportamientos para la coordinación de sistemas multi-robots, se analiza la aparición de comportamientos emergentes en el sistema, como consecuencia de las acciones individuales de los robots.

En [18] se presenta una arquitectura de control de movimiento unificada para múltiples robots. Para esa arquitectura, los autores proponen mecanismos de coordinación de tareas y de asignación de recursos, basados en los estados de los movimientos de los robots y en las metas. Ellos presentan una discusión sobre la construcción de los elementos de la arquitectura de control, hacen un análisis de estabilidad que abarca varias tareas y configuraciones, y proporcionan ejemplos de uso.

El trabajo de [19] describe una arquitectura que permite la interacción de humanos y robots para trabajar colaborativamente en un entorno. Se basa en un modelo de actor, el cual permite procesar de forma separada información de distintas entidades (humano, robot, algoritmo). Esta arquitectura maneja problemas como la asignación y descomposición de tareas, la colaboración entre múltiples robots, entre otras cosas.

En [20] se presenta una arquitectura para sistemas robóticos distribuidos heterogéneos, basada en el paradigma de arquitectura orientada a servicios y en la representación ontológica del entorno. En este trabajo se proponen protocolos genéricos para publicar, descubrir y organizar servicios, y para crear servicios compuestos que permitan llevar a cabo tareas de forma automática. Además, toma en cuenta el monitoreo de las ejecuciones en el sistema, para realizar proceso de recuperación de fallas.

Una primera conclusión, es que la emergencia ha sido poco estudiada en la literatura para sistemas multi-robots, y normalmente, en contextos muy controlados (inspeccionar un entorno, búsqueda de alimento, transporte, etc.). En este

trabajo, se analiza el comportamiento emergente de una arquitectura para sistemas multi-robots [1,2], que soporta robots heterogéneos, sin que se definan en ella las posibles formaciones emergentes que pueden aparecer, sino que las mismas surgen producto de la propia dinámica del sistema.

La arquitectura incluye un componente emocional, que implementa en cada robot un modelo emocional, que le permite experimentar cuatro emociones: ira, rechazo, tristeza y alegría. El componente colectivo esta soportado en el principio de coordinación emergente, e implementa, además, un mecanismo de aprendizaje colectivo.

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

La arquitectura objeto de estudio en este trabajo fue propuesta en [1, 2]. Su objetivo es gestionar los procesos de un sistema multi-robot, y particularmente, facilitar la aparición de comportamientos emergentes en el sistema.

La arquitectura AMEB, por sus siglas en inglés *Architecture for Multi-robot with Emergent Behavior*, está dividida en tres capas (Ver Figura 1), las cuales han sido presentadas en detalle en [1, 2]. A continuación, se describen, de forma general, cada uno de los niveles de AMEB.

A. Nivel individual

El nivel individual gestiona los procesos relacionados con los mecanismos de percepción y actuación, así como también, el comportamiento del robot. Este nivel funciona en estrecha relación con la arquitectura local implementada en cada individuo del sistema [5].

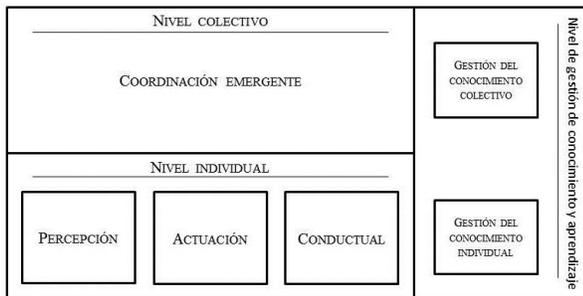


Fig. 1: Arquitectura AMEB.

Se divide en tres módulos:

Percepción/interpretación

En este módulo se gestionan los datos captados por los sensores del robot, con el fin de filtrar la data, priorizarla, y llevar a cabo un proceso de fusión sensorial para compartir dicha información con los demás niveles de la arquitectura. Con esta información, pueden ser activados comportamientos de carácter reactivo o deliberativo (Ver Figura 2).

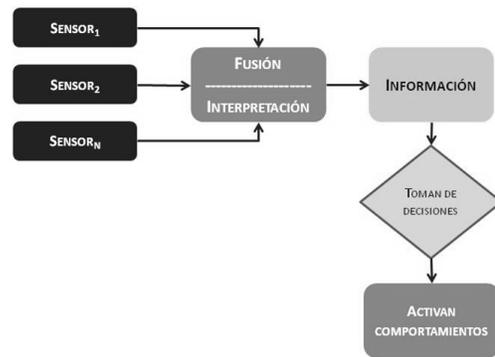


Fig. 2: Módulo de percepción e interpretación.

Actuación

Se gestiona aquí la acción de los actuadores del robot. Básicamente, se envían instrucciones relacionadas con desplazamientos del robot, giros, etc. El procesador local del robot, se encarga de convertir estas instrucciones en acciones concretas de los actuadores.

Conductual

Este módulo tiene dos tareas principales (Ver Figura 3). La primera es gestionar los comportamientos del robot, que se dividen en comportamientos básicos relacionados a las capacidades del robot, que representan la unidad primaria de acción; y comportamientos complejos que se construyen de la unión de comportamientos básicos, con la ayuda de otros niveles de la arquitectura. La otra tarea se enfoca en la implementación de un componente afectivo, que dota al robot de emociones básicas que influyen en la forma cómo actúan individualmente, y cómo interactúa con los demás individuos del sistema [2].

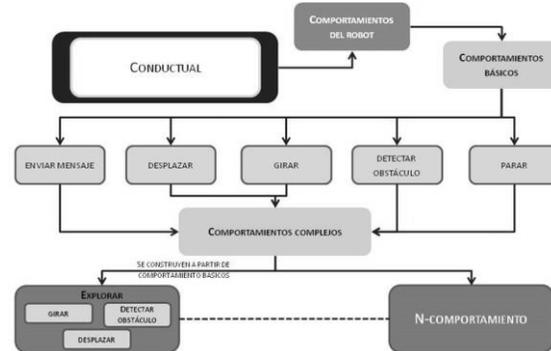


Fig. 3: Comportamientos asociados al robot.

B. Nivel colectivo

En este módulo ocurren los procesos inherentes a la gestión de las interacciones entre los individuos que actúan en el sistema, los cuales sirven para informar sobre sus quehaceres, buscar información de sus intereses, entre otros aspectos. En este módulo, la coordinación se maneja bajo el enfoque emergente, ya que a priori no se establecen las acciones a realizar. Bajo este enfoque, la división y asignación de tareas y la negociación, por ejemplo, emergen de forma natural en el sistema [21, 22]. Dependiendo de la necesidad de la comunidad de agentes/robots en un instante dado (objetivo colectivo), se pueden dar procesos de comunicación (directa o indirecta),

reclutamiento, búsqueda, entre otros, los cuales permiten la aparición de comportamientos emergentes en el sistema.

Este nivel gestiona básicamente dos tipos de interacciones:

- Directas: se generan mediante el pase de mensajes entre los robots, a través de redes inalámbricas.
- Indirectas: se realizan a través de marcas artificiales en el ambiente, las cuales pueden ser dejadas por sensores virtuales (feromonas artificiales), o pueden encontrarse en el entorno (ejemplo: marcas en el suelo), que, al ser detectadas por un robot, le permiten tomar una decisión.

En el nivel colectivo de AMEB se dan procesos propios de los sistemas emergentes, por lo que aparecen los siguientes aspectos:

- Emergencia de Patrones: En el sistema global como un todo, van apareciendo comportamientos genéricos, derivados de los comportamientos individuales, de los robots/agentes que conforman el sistema. Esos patrones se visualizan en este nivel colectivo.
- Memoria Compartida: en ella se almacena la información importante del sistema como un todo, para ser compartida por sus diferentes componentes. La información almacenada en esta memoria está relacionada con el proceso de aprendizaje colectivo.
- Aprendizaje Colectivo: los elementos que componen el sistema actualizan la información colectiva, basada en los objetivos alcanzados, de manera a reforzar o debilitar comportamientos.

C. Nivel de gestión de conocimiento y aprendizaje

Este nivel es responsable de la gestión del conocimiento del sistema, que se construye a medida que los robots actúan en el entorno. Gestiona los procesos de aprendizaje que se requieren para construir conocimiento, mediante procesos que se dan tanto a nivel individual como colectivo. A continuación, se describen las fases involucradas en la gestión del conocimiento en el sistema [7]:

- Socialización: Mecanismos para compartir el conocimiento individual con el colectivo; esta fase requiere la conversión del conocimiento implícito a explícito, de forma tal que pueda ser comunicado a los otros.
- Agregación: Mecanismos para clasificar, filtrar, fusionar y ampliar el conocimiento explícito, que se genera desde distintas fuentes (individuos). En esta fase se genera un conocimiento explícito más depurado, que facilita su difusión y almacenamiento en la base de datos colectiva.
- Apropiación: Mecanismos para la traducción del conocimiento explícito a implícito. Se requiere en esta fase, un proceso de aprendizaje individual.

IV. CARACTERIZACIÓN DE LA EMERGENCIA

La arquitectura propuesta, gestiona distintos procesos que tienen como fin facilitar la emergencia en el sistema, por lo que es necesario contar con métricas que permitan caracterizar los fenómenos emergentes que aparecen.

En [7, 8] se presenta una metodología para el modelado de sistemas emergentes y auto-organizados y un método de verificación para la misma, basado en el paradigma de la sabiduría de las multitudes. Particularmente, en este trabajo estamos interesados en la inteligencia colectiva (conocimiento global) que emerge de los conocimientos de los individuos que conforman el grupo [23], la cual se puede asociar a situaciones que pudiese gestionar la arquitectura propuesta, estos son:

- *Problemas de tipo cognitivo*: Se refiere a aquellos problemas en los que siempre hay al menos una solución y de existir varias, hay unas mejores que otras. Para encontrar una solución a este tipo de problemas se trabaja de forma colectiva, promediando el proceso de análisis de los individuos involucrados, o llegando a un consenso social.
- *Problemas de coordinación*: En este tipo de problemas, los miembros del grupo tienen la necesidad de concertar las acciones entre ellos, a pesar de no tener un objetivo en común. Por ejemplo, en la plataforma se pueden presentar problemas al compartir recursos, espacios, caminos, etc. En estos casos, los robots deben coordinarse para evitar conflictos, eventualmente negociando.
- *Problemas de cooperación*: Los miembros del grupo deben trabajar en forma conjunta con el objeto de alcanzar el logro de un objetivo en común. Un ejemplo clásico es el transporte de un objeto, en esta tarea, los robots deben cooperar.

En [23] se describen las dificultades que pueden presentarse, que provoquen que la emergencia de la inteligencia colectiva del grupo no aparezca. Por tal razón, es importante considerarlas en el momento de definir los conceptos para evaluar el sistema. Algunas de esas razones son: demasiada homogeneidad, mucha centralización, excesiva imitación, entre otras.

En la arquitectura, estos aspectos tratan de resolverse presentando un equipo de robots heterogéneos en un ambiente totalmente distribuido, con un modelo emocional simplificado basado en la satisfacción de cada individuo.

Para la evaluación de la emergencia en el sistema se proponen una serie de conceptos, inspirados en [7], relacionados a las propiedades emergentes y auto-organizadas, y a los componentes propios de la arquitectura. En particular, se adecuan los conceptos definidos en [7] a la arquitectura propuesta, vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas de estos tipos de sistemas:

- *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.
- *Diversidad (DI)*: Mide el grado de homogeneidad del grupo de robots que conforma el sistema.
- *Síntesis (S)*: Mide la calidad del mecanismo de agregación, en relación a la calidad del conocimiento colectivo generado y los mecanismos de retroalimentación empleados, que favorece el comportamiento colectivo.

- *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).
- *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.
- *Auto-organización (AO)*: Es medida desde tres aspectos: grado de satisfacción del sistema, su anticipación y robustez. 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.
- *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 [1] se definen un conjunto de conceptos arquitectónicos asociados al sistema modelado, que en nuestro caso se refiere a la plataforma gestionada por la arquitectura AMEB. En la Tabla 1 se resumen estos conceptos, y su relación con la arquitectura propuesta.

En la Figura 4, se muestra un Mapa Cognitivo Difuso (MCD) que establece las relaciones entre las propiedades emergentes y auto-organizadas del sistema, y los conceptos arquitectónicos establecidos. En particular, el concepto D, que está vinculado a las propiedades emergentes y auto-organizadas, corresponde al nodo 11, DI al nodo 12, y así para el resto de conceptos. Un MCD permite describir el comportamiento de un sistema en términos de conceptos difusos [24], para ello se utilizan grafos dirigidos, en donde sus arcos representan relaciones causales entre los conceptos (nodos).

TABLA 1
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: depósito 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

Existen dos formas clásicas para establecer las relaciones entre los conceptos [24, 25, 26]: a) basado en la opinión de los expertos, o b) basados en datos históricos. Para este trabajo se optó por la opción basada en la opinión de los expertos, tal que se establecen 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 [22].

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

- *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.
- *Componente social*: se relaciona con la *auto-organización* y *emergencia* en el sistema, ya que es un concepto ligado al comportamiento colectivo.
- *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.
- *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.

- *Componente cognitivo*: se relaciona con la capacidad de auto-organización del sistema, por su influencia en dicho proceso.
- *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*.
- *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 actúan en el sistema en un momento dado.
- *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.
- *Interacción directa*: se relaciona con el componente social, mecanismo de agregación, tipo de comportamiento, densidad, diversidad, independencia y auto-organización, porque influye en ellos.
- *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.
- *Densidad*: se relaciona con el concepto de emergencia, porque influye en él.
- *Diversidad*: se relaciona con la auto-organización y la emergencia, porque influye en ellos.
- *Síntesis*: se relaciona con la auto-organización y la emergencia, porque influye en ellos.
- *Independencia*: se relaciona con la auto-organización y la emergencia, porque influye en ellos.

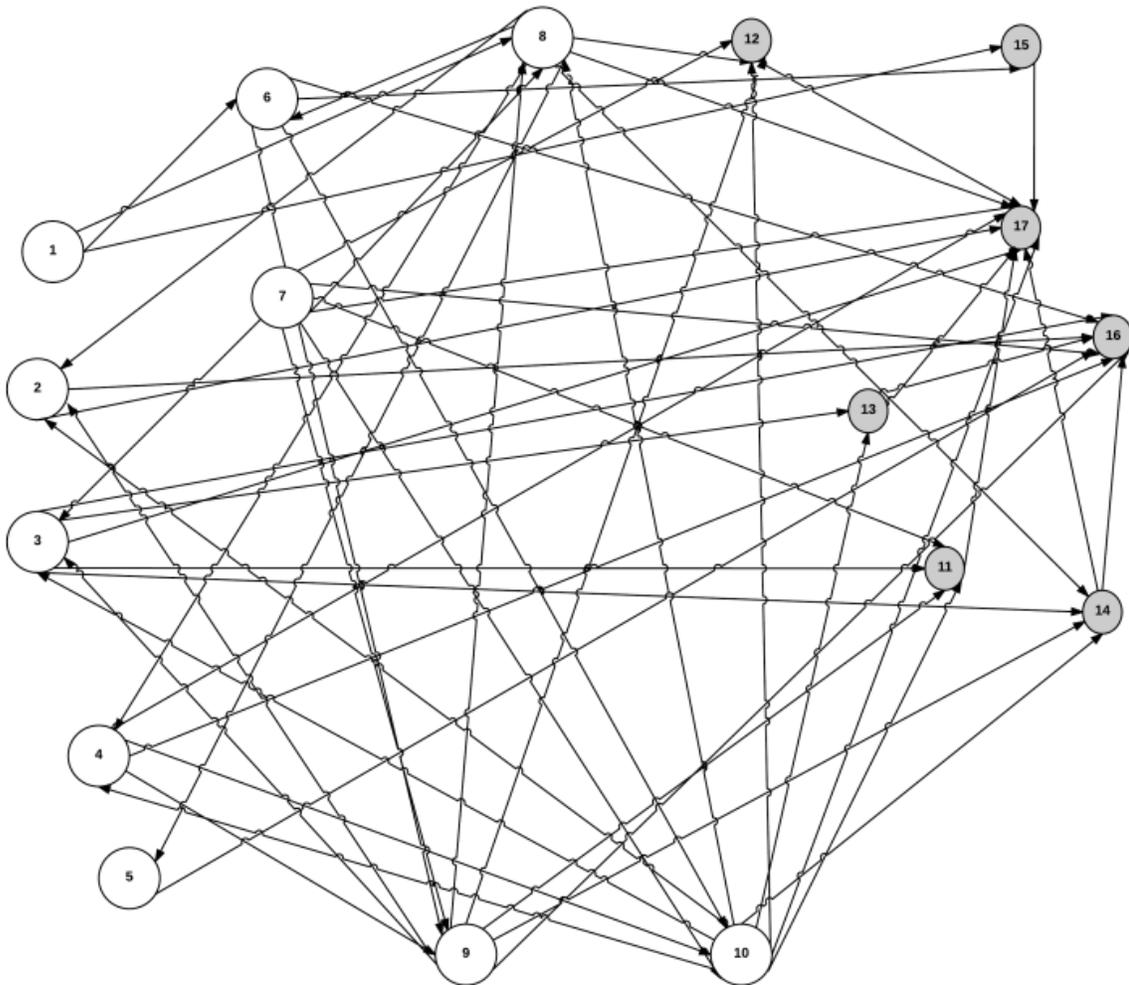


Fig. 4. Mapa cognitivo difuso.

Los conceptos relacionados con la emotividad, la auto-organización y la emergencia, dependen de los valores de los otros conceptos.

Basados en [7], 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).

De forma general, las relaciones causales (E) entre los conceptos C, son definidas, según [26, 27], 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 1 para actualizar los conceptos [26, 28]:

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

Donde, n es el número de conceptos.

El algoritmo de ejecución del MCD, en nuestro caso, es el siguiente [28]:

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 Eq. 1.

Los valores finales de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas con los que sale el lazo del paso 3, son los usados para hacer el análisis de la emergencia en AMEB (ver sección 5).

V. EXPERIMENTACIÓN

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 [5].

Cada robot posee una arquitectura de control local que gestiona sus componentes de hardware y software. Esta arquitectura le permite instanciar componentes del nivel individual de la arquitectura AMEB, que gestionan sus procesos de percepción y actuación. En la nube se encuentra la aplicación de control [5], donde cada robot se instancia de manera virtual. Es en este nivel donde se despliegan los otros niveles de AMEB: el colectivo, el de gestión de conocimiento y

aprendizaje, y el módulo conductual del nivel individual donde se generan los comportamientos de mayor complejidad del robot (ver Figura 5).

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 [28].

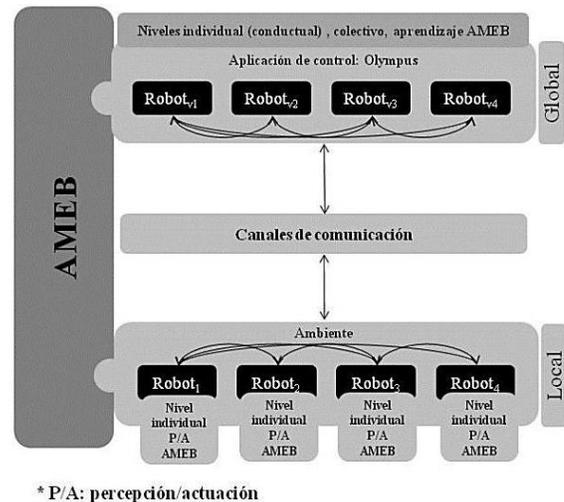


Fig. 5. Estructura de la plataforma de prueba.

A. Escenario de cooperación

El transporte de un objeto es una tarea común en algunas especies de insectos. Comúnmente, 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 [22]. Esta tarea de transporte ha sido utilizada por los investigadores, para evaluar las capacidades emergentes en los sistemas multi-robots [29, 30, 31]. Para esta prueba, se plantea un escenario donde el sistema debe encontrar y transportar 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, este concepto debe funcionar de forma correcta.
- *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 2 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 colocó el valor medio al concepto reactivo y alto al cognitivo, y se vio 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. Se observó, que la 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. 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.

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

B. 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:

1. 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.
2. Abejas recolectoras empleadas: estas abejas explotan una fuente, y además, comunican a las abejas observadoras la ubicación de la misma y su rentabilidad.
3. 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:

TABLA 2.
ESCENARIO DE COOPERACIÓN

Concepto	Estado inicial	Estado final
----------	----------------	--------------

- *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.
- *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.
- *Componente cognitivo*: se inicializa en un nivel bajo, ya que este concepto no influye en este escenario.
- *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.
- *Interacción indirecta*: se inicializa en un nivel bajo, dado que en esta tarea la comunicación no se realiza a través del entorno.
- *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.
- *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.
- *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.
- *Número de robots*: se inicializa en un nivel medio. Se espera que el número de robots influya medianamente en el comportamiento global.
- *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 3 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 infiere que el conocimiento que cada individuo posee acerca de la fuente de alimento es útil para el colectivo (caso de las abejas y la danza para comunicar información).

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 los usan 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. 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 3.
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
Número 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 los dos 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 [22].

VI. COMPARACIÓN CON TRABAJOS PREVIOS

Con el objetivo de comparar este trabajo con otras investigaciones, se definieron ciertos criterios. A continuación, se describe cada uno de ellos:

- *Número de robots (NR)*: este criterio evalúa los modelos, en función del tamaño del grupo. Está relacionado con la escalabilidad del sistema.
- *Componente emocional (CE)*: este criterio se propone, para evaluar si los modelos implementan emociones en los individuos que los componen.
- *Verificación de la emergencia y de la auto-organización (VE)*: este criterio se relaciona con la inclusión de algún mecanismo de verificación en el sistema.
- *Adaptabilidad (A)*: se relaciona con la diversidad de tareas que puede llevar a cabo el sistema, y la adaptación del grupo a las mismas.
- *Diversidad del grupo (D)*: relacionado con la heterogeneidad del grupo de robots.
- *Aprendizaje social (AS)*: se establece para evaluar, si los modelos poseen mecanismos de aprendizaje social.

En la Tabla 4 se presenta un resumen de las arquitecturas evaluadas, en base a los criterios propuestos. Se seleccionaron trabajos, con características y objetivos similares al sistema objeto de estudio. En general, se observa que las arquitecturas estudiadas presentan componentes basados en comportamientos. Además, los robots/agentes poseen

conjuntos de comportamientos, que, de acuerdo a los estímulos recibidos, se activan en un instante de tiempo. Ahora bien, en estos trabajos no se presenta un componente emocional que influya en dichos comportamientos. Por otro lado, la verificación de la emergencia no se menciona en la mayoría, aunque implícitamente se presume que existe emergencia en el sistema, sin presentar un método para verificarla. A su vez, son adaptables y pueden actuar en la ejecución de diferentes tareas, y en general son heterogéneos, y algunos cuentan con un mecanismo de aprendizaje colectivo. Finalmente, el número de robots varía, de acuerdo al tipo de sistema multi-robot, presentándose en un nivel alto cuando son sistemas bajo la filosofía de enjambres. Nuestra propuesta incluye un componente conductual que gestiona un componente emocional, es adaptable, puede gestionar grupos heterogéneos, cuenta con un componente de aprendizaje, y puede gestionar grupos de robots a diferente escala [1, 2]. Algunos de los criterios considerados aquí (NR, A, D), serán validados experimentalmente en nuestra arquitectura en otros trabajos, pero en principio, a nivel teórico, no existe ninguna restricción.

En general, se puede concluir que los mecanismos de verificación del comportamiento emergente en un sistema multi-robots han sido poco estudiados. En este trabajo se presenta un modelo de verificación adecuado para la arquitectura propuesta en [1, 2].

TABLA 4.
COMPARATIVA CON TRABAJOS PREVIOS

Arquitectura	Criterios de comparación					
	NR	CE	VE	A	D	AS
AMEB	Medio	Si	Si	Si	Heterogéneo	Si
SWARM-BOT [14]	Medio	No	No	Si	Heterogéneo	No
Swarm Robot System [15]	Alto	No	No	Si	Homogéneo	Si
ACROMOVI [16]	Bajo	No	No	Si	Heterogéneo	No
Arquitectura basada en comportamiento [17]	No se define	No	Si	Si	Hibrido	Si

VII. CONCLUSIONES

La arquitectura para sistema multi-robots propuesta, se caracteriza por distribuir sus procesos, de forma tal que faciliten la aparición de la emergencia y la auto-organización en el sistema. Cada individuo 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 basado en emociones, que modifica el comportamiento de cada individuo y su respuesta ante los estímulos que recibe del entorno, lo que hace que su comportamiento ante una situación, no pueda ser determinado a priori.

La arquitectura incluye un nivel de coordinación 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 individuos.

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, basado en los trabajos [6, 7, 8]. 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.

Se comparó la arquitectura propuesta con otros trabajos relacionados, para ello se definieron un conjunto de criterios. En nuestra arquitectura resalta la inclusión de un componente emocional en los robots, y la utilización de un método para verificar la emergencia en el sistema.

Se plantea como trabajo futuro, la ampliación del modelo emocional con el objeto de considerar un espectro emocional que se acerque más al humano, además de la inclusión de un mecanismo en los robots, que le permita reconocer emociones en los otros individuos del sistema. Además, se realizarán simulaciones con nuestra arquitectura, para validar el comportamiento de sus componentes.

REFERENCIAS

- [1] A. Gil, J. Aguilar, R. Rivas, E. Dapena & K. Hernandez. "Architecture for Multi-robot Systems with Emergent Behavior," in *International Conference on Artificial Intelligence (ICAI)*, 2015, pp. 41-46.
- [2] A. Gil, J. Aguilar, R. Rivas & E. Dapena, "Behavioral Module in a Control Architecture for Multi-robots," *Revista Ingeniería al Día*, 2016, vol. 2, No. 1, pp. 40-57.
- [3] M. S.Couceiro, C. M Figueiredo, J. M. A. Luz, N. M. Ferreira & R. P. Rocha. "A Low-Cost Educational Platform for Swarm Robotics," *International Journal of Robots, Education & Art*, 2012, vol. 2, no 1.
- [4] V.K. Pilonia, S. Mishra, S. Panda & A. Mishra. "A novel approach to swarm bot architecture," in *International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 2009, pp. 418-422.
- [5] 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*, 2016, vol.8, pp. 785-796.
- [6] N. Perozo, J. Aguilar & O. Terán. "Proposal for a Multiagent Architecture for Self-Organizing Systems (MA-SOS)," *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, 2008, vol. 5075, pp. 434-439.
- [7] N. Perozo, J. Aguilar, O. Terán & H. Molina. "A verification method for MASOES," *IEEE transactions on cybernetics*, 2013, vol. 43, no 1, pp. 64-76.
- [8] N. Perozo, J. Aguilar, O. Terán & H. Molina. "An affective model for the multiagent architecture for self-organizing and emergent systems (MASOES)," *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 2012, vol. 35, no. 1, pp. 080-090.
- [9] D. Cañamero. "Modeling motivations and emotions as a basis for intelligent behavior," in *Proceedings of the first international conference on Autonomous agents*, 1997, pp. 148-155.
- [10] D. Cañamero. "Designing emotions for activity selection in autonomous agents," in *Emotions in humans and artifacts*, 2003, pp. 115-148.
- [11] O. Simonin, T. Huriaux, F. Charpillet. "Interactive surface for bio-inspired robotics, re-examining foraging models," in *23rd IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, 2011, pp. 361-368.
- [12] J. Sebestyénová & P. Kordel. "Multi-robotic system with self-organization for search of targets in covered area," in *11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, 2014, vol. 2, pp. 451-458.
- [13] J. Timmis, L. Murray & M. Neal. "A neural-endocrine architecture for foraging in swarm robotic systems," in *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization*. Springer, 2010, pp. 319-330.
- [14] E. Sahin, T.H. Labella, V. Trianni, J.L. Deneubourg, P. Rasse, D. Floreano, & M. Dorigo. "SWARM-BOT: Pattern formation in a swarm of self-

- assembling mobile robots,” in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2002.
- [15] S. Sang-Wook, Y. Hyun-Chang & S. Kwee-Bo. “Behavior learning and evolution of swarm robot system for cooperative behavior,” in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2009, pp. 673-678.
- [16] P. N. Rogla & E. C. Mateu. “La arquitectura Acromovi: una arquitectura para tareas cooperativas de robots móviles,” *Una perspectiva de la inteligencia artificial en su 50 aniversario: Campus Multidisciplinar en Percepción e Inteligencia*, 2006, pp. 365-376.
- [17] F. De la Rosa & M. E. Jiménez. “Simulation of Multi-robot Architectures in mobile Robotics,” in *IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, 2009, pp. 199-203.
- [18] J. Shepard & C. Kitt. “A Multirobot Control Architecture for Collaborative Missions Comprised of Tightly Coupled, Interconnected Tasks,” *IEEE Systems Journal*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 1435-1446.
- [19] A. Singhal, H. Singh, A. Penumatsa, N. Bhatt, A. Prakash, S. Kumar & R. Sinha R. “An Actor Based Architecture for Multi-Robot System with Application to Warehouse,” in *ACM 1st International Workshop on Internet of People, Assistive Robots and Things*, 2018, pp. 13-18.
- [20] K. Skarzynski, M. Stepniak, W. Bartyna & S. Ambroszkiewicz. “SO-MRS: a multi-robot system architecture based on the SOA paradigm and ontology,” in *Annual Conference Towards Autonomous Robotic Systems*, Springer, 2018, pp. 330-342.
- [21] J. Aguilar. “A Survey about Fuzzy Cognitive Maps Papers,” *International Journal of Computational Cognition*. Yang’s Scientific Research Institute, 2005, vol. 3, no. 2, pp. 27-33.
- [22] J. Aguilar, *Introducción a los Sistemas Emergentes*. Mérida: Talleres Gráficos, Universidad de los Andes, Venezuela, 2014.
- [23] J. Surowieck, “Wisdom of Crowds”, *Random House*, USA, 2005.
- [24] J. Aguilar. “Different dynamic causal relationship approaches for cognitive maps,” *Applied Soft Computing*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 271-282.
- [25] J. Aguilar. “A fuzzy cognitive map based on the random neural model.” in *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems*. Springer, 2001, pp. 333-338.
- [26] J. Aguilar. “Dynamic Fuzzy Cognitive Maps for the Supervision of Multiagent Systems,” *Fuzzy Cognitive Maps: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Application*, Springer, 2010, pp. 307-324.
- [27] 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, 2005, vol. 3681, pp. 191-197.
- [28] J. Aguilar & J. Contreras. “The FCM designer tool”, *Fuzzy Cognitive Map: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Application*, Springer, 2010, pp. 71-87.
- [29] Y. Tohyama & H. Igarashi. “Cooperative transportation by multi-robots with selecting leader,” in *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 2009, pp. 4179-4184.
- [30] S. Moon, D. Kwak & H. J. Kim. “Cooperative control of differential wheeled mobile robots for box pushing problem,” in *12th International Conference IEEE on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2012, pp. 140-144.
- [31] A. Ghosh, A. Konar & R. Janarthanan. “Multi-robot cooperative box-pushing problem using multi-objective particle swarm optimization technique,” in *IEEE World Congress on Information and Communication*



Angel Gil, es Ingeniero en Informática de la Universidad Nacional Experimental del Táchira, San Cristóbal, Venezuela. Obtuvo un Diploma de Estudios Avanzados en Ingeniería de Sistemas y Automática en la Universidad de Málaga, España.

Actualmente, es candidato a Doctor en el programa de Ciencias Aplicadas de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Es investigador/docente categoría Agregado en la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), investigador del Laboratorio de Prototipos de la misma Universidad, del cual fue responsable entre los años 2010- 2015. Coordinador de Investigación Industrial del Decanato de Investigación UNET, período 2015-2018. Ha publicado alrededor de 30 artículos en

revistas y actas de congresos, en el área de IA, robótica y desarrollo de software. Actualmente es desarrollador de software en la empresa Alquimia Soft. S.A. en Ambato, Ecuador y miembro de la red de investigación Tepuy R+D Group, Artificial Intelligence Software Development.



Jose Aguilar, es Ingeniero de Sistema de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Obtuvo una Maestría en Informática en la Universidad Paul Sabatier, Toulouse, France y el Doctorado en Ciencias Computacionales en la Universidad Rene

Descartes, Paris, France. Además, realizó un Postdoctorado en el Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Houston. Es profesor Titular del Departamento de Computación de la Universidad de los Andes (ULA) e investigador del Centro de Microcomputación y Sistemas Distribuidos (CEMISID) de la misma universidad. Es miembro Correspondiente Estatal de la Academia de Mérida y del Comité Técnico Internacional de la IEEE en Redes Neuronales. Además, actualmente es el coordinador del Programa Doctoral en Ciencias Aplicadas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. Fue Presidente fundador del Centro Nacional de Desarrollo e Investigaciones en Tecnología Libre (CENDITEL), y de FUNDACITE-Mérida. Además, Jefe del Departamento de Computación de la ULA del 2011 al 2014, y Director del CEMISID del 2001 al 2007. Ha publicado más de 400 artículos científicos en revistas, libros y actas de congresos internacionales, en los campos de Sistemas Paralelos y Distribuidos, Computación Inteligente, Optimización Combinatoria, Reconocimiento de Patrones, Sistemas de Automatización Industrial, etc. También ha sido autor/coautor de 10 libros, editor de varios libros, y forma parte de varios comités editoriales de revistas. Además, ha dictado cursos de entrenamiento nacional e internacional y ha recibido varios premios/reconocimientos nacionales e internacionales científicos. El Dr. Ha sido presidente del Comité Científico de varios eventos nacionales e internacionales. Además, ha coordinado o participado en más de 30 proyectos de investigación o industriales. Por otro lado, ha sido consultor de diferentes empresas, ministerios y universidades latinoamericanas y venezolanas. Finalmente, ha sido tutor de más de 90 tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado, actualmente es coordinador de la red de investigación Tepuy R+D Group, Artificial Intelligence Software Development.



Eladio Dapena, es Ingeniero de Sistemas de la Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela. Doctor en Ingeniería Industrial y DEA por la Universidad Carlos III de Madrid, España, Posee Especialización en Automatización Industrial por la Universidad

Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil. Es profesor titular de la ULA y profesor/investigador visitante en varias universidades en el mundo con 25 años de experiencia. Dirige desde hace 15 años el Laboratorio de Investigación LaSDAI de la Facultad de Ingeniería ULA desarrollando proyectos de I+D+i en las áreas de automatización industrial y Robótica. Cuenta con diversas publicaciones y es revisor de diferentes revistas y comités en las áreas de Robótica y Automatización.

Tutor/cotutor de más de 20 tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado. Ha participado en diversas revisiones curriculares y creador del primer Diplomado en Robótica de Venezuela. Ha participado en Proyectos/Asesorías en diversas industrias. Además ha ocupado cargos de dirección universitaria. Fue Presidente fundador de la Asociación Venezolana de Robótica y Domótica (AVERO).



Rafael Rivas, es Ingeniero de Sistemas y Magister Science de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. DEA en Ingeniería de Sistemas por la Universidad Carlos III de Madrid, España. Realizó su Doctorado en Ingeniería en la Universidad Carlos III de Madrid. Su tesis de Doctorado fue en el área de Arquitecturas de Control para Robots Móviles Personales. Es uno de los creadores del Robot Maggie de la UC3M. Es profesor Titular adscrito al Departamento de Computación de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.