

En este artículo se introduce un nuevo acercamiento a la teoría de formaciones en sistemas multiagentes (SMA), el cual se integra y amplía el modelo de control de cooperación basado en multi-resolución (MRCC). El modelo de formaciones está diseñado para proveer estructura al SMA y al mismo tiempo aumentar la ocurrencia de acciones cooperativas entre los agentes. El modelo propuesto es capaz de modificar en forma dinámica la distribución de los agentes en el espacio de la tarea del sistema a partir de la detección de las deficiencias que existan en el cumplimiento de los objetivos.

El modelo de formaciones propuesto incorpora elementos de la teoría de Instituciones Electrónica. Si bien se inserta en el contexto de MRCC, es posible extraerlo de este y usarlo como un modelo genérico de formaciones aplicado en otros contextos. Los resultados obtenidos en simulación demuestran una mejora en el rendimiento del sistema al incorporar el uso del nivel de formaciones en el MRCC.

Nivel de formaciones en el modelo MRCC

Carlos Bernal • Felipe Camargo

introducción

En la literatura sobre estrategias cooperativas e interacción en sistemas multiagente existen incontables desarrollos propuestos [6], [7], [8], entre otros. Sin embargo, muy pocas veces se propone y trabaja el concepto de formación, no solo en términos de organización del sistema, sino también en cuanto a la asignación de responsabilidades según las necesidades del sistema multiagente (SMA).

En la actualidad, el grupo de investigación SIDRe está desarrollando modelos que permiten el control explícito de la cooperación y realización de tareas cooperativas en sistemas multiagente. Los

trabajos previos se han concentrado en los mecanismos para la realización de acciones cooperativas por un grupo de agentes, llevando a la formulación del modelo base de control de cooperación basado en multi-resolución, MRCC. Sin embargo, no se había abordado la problemática de desarrollar mecanismos que introduzcan un mayor nivel de organización y estrategia en el sistema. Esta labor está a cargo del denominado nivel de formaciones que aquí se presenta. El MRCC parte de una organización jerárquica; en la parte superior de esta jerarquía se encuentra el nivel sistema y en la inferior el nivel agente; en el medio existen dos grandes niveles: el nivel de formaciones ó macro-social y a nivel de cooperación o micro-social. El nivel macro-social está sustentado por algunos de los conceptos propuestos por el IIIA en la teoría de Instituciones Electrónicas, IE, expuestos y trabajados también por el ARLab, Agent Research Lab.

Se presenta el marco de referencia donde el lector encontrara los conceptos básicos como la teoría de agente y el modelo MRCC. Luego, se describe y generaliza el concepto de formación, seguido por una presentación detallada del modelo de formaciones y de su integración en el contexto del modelo MRCC. Por ultimo, se muestra un caso de estudio con los resultados y las conclusiones.

Antecedentes y conceptos básicos

Para entender el modelo propuesto y la formulación realizada es importante tener presentes tres saberes: la teoría básica de agentes, los conceptos del modelo de instituciones electrónicas IE y el marco propuesto en el modelo de control de cooperación basado en multi-resolución MRCC.

A. Teoría Básica de Agentes

Es necesario hacer una breve descripción de lo que se entiende por un agente y los términos ligados a este paradigma de programación antes de describir el modelo MRCC. Cabe aclarar que no existe una definición estándar de agente, sino que existen definiciones diferentes según el contexto, la forma de decidir y el nivel de autonomía, entre otros factores.

En los sistemas multiagente, la cooperación es básica para obtener los objetivos del sistema, debido a la heterogeneidad de los agentes, no todos pueden hacer todas las labores y puede requerirse interacción entre ellos para conseguir objetivos comunes. Un ejemplo concreto de cooperación en sistemas multiagente se aprecia en las labores de rescate de un equipo de robots, en las que se deben utilizar diferentes robots dependiendo de las características de la tarea a realizar, coordinando los momentos en los cuales cada uno de los robots debe actuar y los recursos que éstos utilizan para el logro de su misión.

Según Ferber [9], existen tres situaciones que dan lugar a diferentes condiciones de interacción entre agentes. Primero, la existencia de objetivos compatibles e incompatibles puede hacer que los agentes se encuentren en condiciones de antagonismo; los objetivos son incompatibles, cuando lograr el objetivo de un agente implica no poder lograr los de los otros. Segundo, la competencia por recursos que se utilizan en forma concurrente, la cual surge de la necesidad que tienen los agentes de usar el mismo recurso en el mismo lugar y/o en el mismo tiempo; esta competencia genera la necesidad de utilizar mecanismos de coordinación de acciones y resolución de conflictos. Finalmente, la insuficiencia en la capacidad de los agentes en relación con las tareas puede llevar a requerir que varios agentes unan sus talentos para el logro de las metas del sistema. Sobre la capacidad se presentan 3 casos, cuando los agentes pueden hacer por si mismos las tareas impuestas; cuando el agente puede hacer la tarea, aunque con ayuda de otros la lograría hacer más eficazmente; y, cuando es indispensable que se unan los esfuerzos de los agentes para lograr una tarea.

Cabe decir que para lograr manejar estas situaciones, los mecanismos de cooperación requieren el intercambio de información entre los agentes. Esta cooperación se logra a través del manejo de técnicas de asignación de tareas, sincronización y planificación multiagente, y solución de conflictos. En conclusión, el problema de cooperación en un sistema multiagente es complejo y su solución exige planteamiento de soluciones planteadas desde diferentes perspectivas dependiendo la finalidad del sistema.

B. Modelo MRCC

El modelo de control de cooperación por multi-resolución, MRCC, parte del concepto propuesto por Meystel en el contexto de planificación de trayectorias para robots móviles [5]. En este marco, la trayectoria entre el punto de origen de un robot y el punto de destino se ven como un todo que se puede descomponer

en una serie de niveles de diferente resolución. En los niveles altos se maneja una granularidad gruesa, permitiendo la generación de planes que dan un primer esbozo del camino a seguir; en los niveles siguientes, el plan generado a un nivel grueso limita el espacio de búsqueda. Luego, progresivamente se va aumentando el detalle de cada nivel hasta llegar al más fino donde se encontraran las acciones más primitivas de movimiento como lo son girar o avanzar. Gracias a esta aproximación, el proceso de búsqueda se hace más eficiente; los niveles altos restringen el espacio de búsqueda los bajos.

La ejecución de una labor en un sistema multiagente según el concepto de multi-resolución, nos lleva a lo que es en sí el MRCC [12] [13]. Se parte de una reformulación del problema de cooperación, estableciendo que puede ser abordado por niveles, en donde los niveles altos involucran la abstracción de las metas del sistema como un todo y los niveles más bajos las metas del agente en forma individual. Al igual que en la propuesta original de multi-resolución, las metas de los agentes individuales están supeditadas a las restricciones impuestas por los niveles superiores. Los niveles medios permiten construir esquemas organizacionales intermedios, los cuales respetan las metas globales, y al mismo tiempo restringen o establecen parámetros a los niveles inferiores. Si bien es un modelo jerárquico en cuanto al control de la cooperación es importante resaltar que los patrones de comunicación no necesariamente se restringen de la misma forma, la posibilidad está abierta según las necesidades de quien diseña el sistema.

El modelo general de MRCC establece su estructura de la siguiente forma: $MRCC = \{N_v, AP, AR\}$, donde N_v hace referencia al conjunto de los diferentes niveles de control, AP las influencias o conexiones parametrizantes y AR las influencias o conexiones de retroalimentación. Una conexión representa una forma de influencia entre capas.

Hasta ahora, se han formulado dos tipos de influencias: de parametrización y de retroalimentación. Al establecer una influencia de parametrización de un nivel a otro, se están modificando los parámetros básicos del funcionamiento del nivel que recibe la influencia, lo cual genera diferentes comportamientos, los cuales a su vez podrían influenciar a los niveles inferiores que reciban información del nivel parametrizado. En relación con las influencias de retroalimentación, es plausible decir que representan los flujos ascendentes que un nivel envía a otro con información específica de lo que está ocurriendo en ese nivel; el receptor puede mejorar su proceso de toma de decisiones gracias a esta información de retroalimentación, modificando y adaptando su comportamiento. En otras palabras, estas influencias

permiten la inclusión de mecanismos de aprendizaje para la adaptación dinámica del sistema.

Durante la definición de una estructura particular del modelo MRCC, cada nivel expone de alguna forma cuáles atributos de su funcionamiento y/o estructura son parametrizables. De igual forma se deben especificar cuáles son los puntos posibles de realimentación que recibe cada capa. Mediante la definición de las capas y las especificaciones de las influencias es posible generar instancias diferentes del modelo MRCC.

Rigurosamente se puede definir entonces un nivel de la siguiente forma donde:

- PaE representa el conjunto de parámetros modificables del nivel.
- PaF representa el conjunto de parámetros fijos del nivel.
- Rt representa la información de retroalimentación que puede ser enviada a través del arco a otro nivel.
- PaS es el conjunto de parámetros a través de los cuales puede influir a otra capa a través del arco de conexión.
- RTE representa las retroalimentaciones de entrada que puede recibir dicho nivel.

La Figura 1 ilustra una jerarquía de resolución de 3. En este caso, sólo hay una capa intermedia que liga al nivel sistema con el nivel agente. El nivel sistema parametriza al nivel micro-social, el cual a su vez hace lo propio con el nivel agente. En este ejemplo existe una influencia de retroalimentación que va del nivel agente hasta el nivel sistema.

Si bien el modelo base de 3 capas es robusto, al realizar un análisis minucioso del mismo se encontró que existían cuatro problemáticas por resolver: falta de orden y estructura en el SMA, rigidez en el modelo y pocas posibilidades de aprendizaje, bajo establecimiento de acciones cooperativas y aprovechamiento únicamente de las oportunidades detectadas en el ambiente sin tener en cuenta las necesidades de cooperación.

Dado que el objetivo de este artículo es introducir el nivel de formaciones, no se profundizará más en la descripción del modelo MRCC generalizado. Se complementarán algunos conceptos cuando se requieran para la comprensión del modelo de formaciones.

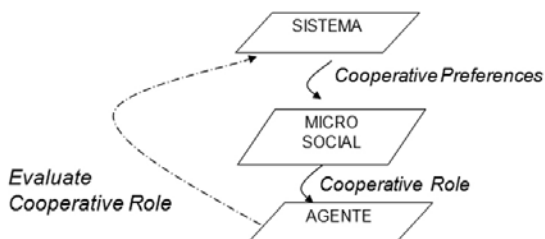


Figura 1. Modelo base MRCC de 3 capas.

Modelos de formaciones

En esta sección se presentan los conceptos básicos y el modelo formal de formaciones, así como también el modelo de negociación inspirado de la teoría de las Instituciones Electrónicas.

A. Conceptos Básicos y Antecedentes

Dado que en la literatura la conceptualización sobre formaciones es ambigua y poco concreta, fue necesario desarrollar un modelo que permitiera manejar diferentes tipos de organizaciones en sistemas multi-agente para la consecución de un objetivo a través de un manejador de estructura y estrategia.

Partiendo de la literatura es posible extraer elementos importantes que permitirán la generalización de la definición de formación. En la propuesta de Viswanathan [6] se encuentra un elemento clave, la división del espacio de acción a través de unos puntos centrales que almacenan la información de la región y de las posibles necesidades de la misma. Es decir, si en algún punto un agente encuentra una situación en la que puede trabajar, le avisa a la región y esta le indica si puede o no iniciar labores; además se pueden requerir agentes con diferentes habilidades para realizar la labor, lo que implica cierto manejo de la heterogeneidad.

Existen otro tipo de acercamientos a las formaciones como el propuesto por León [1], en el cual a partir de información de los vecinos cercanos es posible establecer

cierto tipo de formaciones centrada en patrones geométricos que se pueden encontrar en la naturaleza como el vuelo de las gaviotas. (Figura 2)

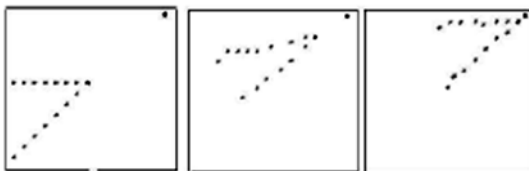


Figura 2. Formaciones geométricas [1].

Otros autores establecen formaciones muy similares a las anteriormente nombradas de diferentes maneras como los atractores no lineales [2], las cadenas de amistad [3] y las orientadas a comportamientos [4]. A diferencia de los trabajos anteriormente nombrados, el modelo propuesto busca proponer una definición formal de formación, ya que de alguna forma las formaciones presentadas pueden asociarse más con acciones de grupo que con una formación estratégicamente establecida. Se propone entonces un modelo a partir de los siguientes elementos: zona de acción, rol estructurante y mecanismo de negociación.

Dado que todos los sistemas multi-agente tienen implícito un funcionamiento concurrente, no es adecuado manejar una centralización total de la información, por lo cual se hace deseable dividir el espacio total en donde se desenvuelven los agentes en zonas de acción, las cuales se definen formalmente como una tupla $Z_n = \{RE, Ob, Ru, Fp, DN\}$ en la que:

- *RE* representa un conjunto de roles estructurantes.
- *Ob* son los objetivos de la zona.
- *Ru* es el conjunto de reglas que deben satisfacerse.
- *Fp* mide la pertenencia de los agentes a la zona.
- *DN* es el mecanismo de detección de necesidades.

Al dividir el espacio total en zonas es posible asignar mejor las responsabilidades a cada uno de los agentes, dado que el área de trabajo es más pequeña y por lo tanto la cantidad de posibles actividades a realizar también disminuye. Para poder asignar mejor responsabilidades a los agentes dentro de la zona fue necesario elaborar el concepto de *rol estructurante*. Si bien fue extraído inicialmente del contexto del

fútbol, es posible establecer roles estructurantes en cualquier contexto de aplicación, incluso para aplicaciones basadas en agentes *software*.

En el contexto del fútbol robótico, se habla de formaciones tales como 4-4-2, 5-3-1, etc. Observando detenidamente este tipo de aproximaciones, se identifica el uso de diferentes roles que permiten generar orden y estructura en un equipo. Para este caso, se han planteado roles estructurantes como: defensa lateral derecho, defensa stopper, volante de creación, arquero, etc. Cada uno de estos roles juega un papel dentro de la formación y representa un conjunto de responsabilidades de los agentes del sistema en pro de la existencia de un orden dentro del SMA. Esta responsabilidad se debe manejar en forma tal que no haya interferencia con el desarrollo de las acciones cooperativas que se encuentren más abajo en el nivel jerárquico. Por ejemplo, un jugador delantero debería mantenerse en la zona de ataque y demarcándose, pero si se da la oportunidad de participar en un pase, este debería dar prioridad al logro de esta acción cooperativa. Siguiendo este esquema, un jugador en la defensa solo podrá disparar al arco en ocasiones excepcionales, cuando las oportunidades de anotar sean bastante buenas para evitar distracciones en su labor de defensa, además debe estar en capacidad de volver a su zona una vez realizada la acción que le implicó alejarse de ella.

Siguiendo con la notación de tuplas, un rol estructurante se puede describir mediante una tupla $RE=\{Rs,Mo\}$ en donde:

- *Rs son las responsabilidades asociadas al rol.*
- *Mo es la función de movilidad.*

Las responsabilidades asociadas al rol representan la labor, en términos de los compromisos, que adquiere el agente que asume dicho rol. Es decir, que una vez que se le asigna un rol estructurante a un agente, este adquiere una responsabilidad con la zona y todas las acciones que ejecute deben ir encaminadas al cumplimiento de sus responsabilidades.

La función de movilidad representa la cota de movimiento del agente dentro de una zona de acción. Una analogía sencilla es la de asumir que el agente está unido con una banda de caucho (que representa la función de movilidad) a un punto de referencia de su zona de acción, y la dureza del caucho (parámetros de la función) hacen que si está alejado, el agente sea atraído hacia a su punto de referencia;

incluso esta función de movilidad podría impedir que realice alguna labor que le implica alejarse hasta un punto no permitido.

Una vez establecidos los elementos que conforman una zona, puede definirse una formación mediante la siguiente tupla $F=\{ZN,Ob,N\}$ en donde:

- *ZN representa el conjunto de zonas en las que está dividido el espacio de acción.*
- *Ob son los objetivos de la formación.*
- *N es el mecanismo de negociación entre zonas.*

En forma análoga a los agentes, los cuales son preactivos para cumplir sus objetivos, las zonas y las formaciones también deben especificar sus objetivos, los cuales son la base para la definición del comportamiento de las mismas. Es importante resaltar que los objetivos del agente, de la zona y de la formación deben ser coherentes entre si. Dicho de otra forma, los objetivos del agente deben contribuir al cumplimiento de los de la zona, y los de esta a los de la formación.

Por otra parte, el mecanismo de negociación, basado en la teoría de IE, permite especificar la forma en la que las zonas pueden intercambiar agentes con el fin de cumplir con las necesidades de las mismas; en la sección IV se profundiza sobre estos aspectos.

B. Instituciones Electrónicas

En algunos casos es necesario establecer una forma de intercambio de agentes entre zonas de acción, para esto se establece un protocolo de negociación, el cual en este caso está basado en el modelo de Instituciones Electrónicas.

Se entiende por una institución electrónica como la estructura que busca emular características de las instituciones humanas definiendo las “reglas del juego” o en términos más reales, definir qué es lo que está permitido hacer, en que lugares y en que momentos. Las instituciones electrónicas [10] [11] surgen de la necesidad de manejar interacciones entre SMA heterogéneos. En un principio, el modelo IE fue desarrollado y utilizado en contextos de comercio electrónico. En el contexto

del modelo presentado acá, se proponen las instituciones electrónicas como el marco de desarrollo del protocolo de negociación entre zonas de una formación. El fin de la Institución será representar una formación y hacer que su estructura se mantenga hasta que un nivel genere una influencia parametrizante que afecte la estructura de la formación.

En cuanto a la estructura de una Institución Electrónica, es posible decir que está conformada por 4 elementos básicos: marco dialógico, escenas, estructura performativa y normas. En el contexto de una formación, cada escena representará una zona de acción y se encargará de mantener la consistencia de la misma, además del paso de agentes entre las diferentes zonas teniendo presentes las normas definidas para la cardinalidad del conjunto de agentes que deben estar presentes en la zona. En el modelo de formaciones, la estructura preformativa y el marco dialógico son la base de los protocolos de negociación.

Modelo de formaciones en MRCC

En la sección anterior se definió un modelo de formación genérico, en esta sección se presenta la inclusión de este modelo dentro del contexto de MRCC. Según Ariza [ARIZ2007] la capa (o nivel) de formaciones debería ser una capa comprendida en el nivel intermedio superior, cuya responsabilidad es modular las acciones cooperativas dentro del espacio de acción de los agentes. En pocas palabras, la capa de formaciones aumenta el nivel de descomposición progresiva del problema.

A. Jerarquía de Resolución

Partiendo de la generalización de MRCC, se propuso una jerarquía donde el nivel de formaciones entra a interactuar entre el nivel sistema y el nivel micro-social, parametrizando el funcionamiento del agente a través de la asignación de los roles estructurantes. Además, se incluyó una retroalimentación de la ejecución de las acciones cooperativas por parte del nivel agente hacia la formación, la cual facilita la detección de una necesidad (a través de la ausencia de ejecución de acciones cooperativas exitosas). La Figura 3 ilustra cómo la capa de formaciones fue incorporada en el modelo base MRCC.

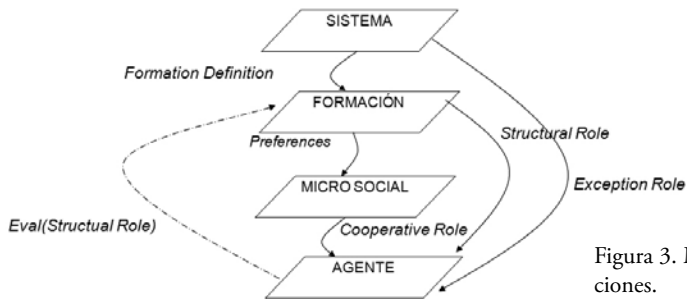


Figura 3. MRCC con Formaciones.

B. Estructura Interna y Gestor de Zona

Para articular todas las funcionalidades y ejecutar las diferentes tareas asociadas a la zona, es necesario integrar un agente gestor de zona. Este agente tiene la responsabilidad de ejecutar el protocolo de negociación, manejar la asignación de recursos, agentes y verificar de la consistencia de la zona en relación con las reglas estructurantes. Adicionalmente, debe existir un mecanismo de detección de necesidades, el cual constituye el punto de partida para alimentar el sistema y afectar las capas inferiores en la jerarquía de resolución.

La Figura 4 muestra los elementos que permiten el manejo de una zona; además de los elementos relacionados con la tupla que define los componentes de una zona, también se requieren los elementos operativos mencionados en el párrafo anterior. En particular, se observa que el gestor de zona, es el encargado de hacer efectiva la operación de la zona; relacionándolo con el contexto de IE, éste representa la escena. El motor de reglas es utilizado por el gestor de zona para verificar si al alterar la estructura interna (el número de agentes y su asignación de roles estructurantes) se mantiene la consistencia.

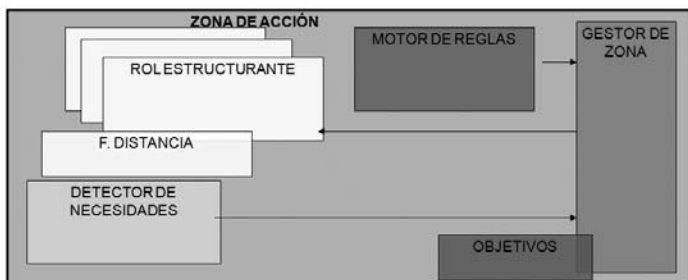


Figura 4. Elementos de una zona de acción en MRCC.

C. Negociación entre Zonas de Acción

Cuando un gestor de zona, a través del detector de necesidades, percibe que hay una necesidad no satisfecha en relación a los objetivos de la zona, este inicia una negociación con otro gestor de zona (participante). El objetivo es lograr que la otra zona le transfiera uno o más agentes a la zona que ha detectado una necesidad; se espera que estos agentes logren cubrir los objetivos no satisfechos. Si bien existen diferentes modelos de negociación, en la primera especificación del modelo de formaciones integrado al MRCC, se utiliza un protocolo de interacción sencillo tipo *Request-Reply* con confirmación, el cual se describe en el diagrama de interacción de agentes observable en la Figura 5.

Una vez el agente gestor iniciador hace la petición de un recurso (uno o más agentes), el participante evalúa una función de beneficio/costo, y prosigue a la ejecución del macro-algoritmo de toma de decisiones (ver Figura 6). Este algoritmo permite evaluar si el costo de entregar al agente solicitado (teniendo presentes múltiples factores como la cercanía, la aptitud del mismo y la utilidad para el participante) es inferior o no al beneficio que tendría el sistema al pasar el agente a la zona que lo solicita. Si el costo es inferior, la negociación es aceptada. El cierre del protocolo incluye el envío de la respuesta y la confirmación de la recepción de la misma.

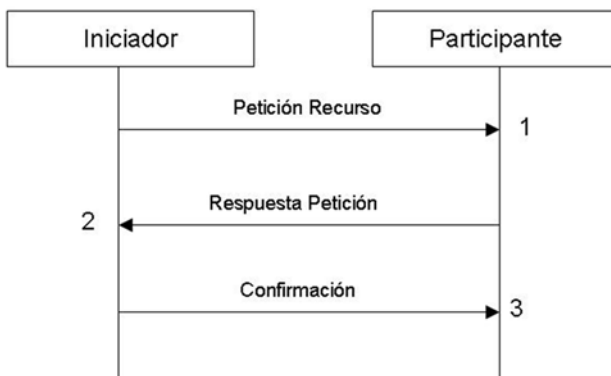


Figura 5. Protocolo de negociación.

Como se observa en la ecuación (1) la función de beneficio/costo BC está construida a partir de la función de utilidad (2), la cual a su vez está construida a partir de otras tres funciones: el aporte (3), la cercanía (4) y la aptitud (5).

$$BC(Ag_I, RE_Act, RE_P, WM) = Utilidad(Ag_I, RE_P, WM) - Utilidad(Ag_I, RE_Act, WM) \quad (1)$$

$$Utilidad(Ag, RE, Wm) = \frac{\sum_{i=0}^n (K * Aporte(Ag, RE, Obj_i)) + L * Cercania(Ag, RE) + M * Aptitud(Ag, RE)}{K + L + M} \quad (2)$$

$$Aporte(Ag, RE, Obj) = \frac{\sum_{j=0}^n PAC_j * Objetivo[Ag][j]}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n PAC_j * Objetivo[i][j]} \quad (3)$$

Dentro de la función de utilidad (2), es posible darle más importancia a alguno de los factores, ajustando el valor de los parámetros K, L, M.

En cuanto a la función de aporte (3), esta modela que tanto aporta el agente Ag al cumplimiento de los objetivos de la zona a partir de la información recibida como retroalimentación, en comparación al cumplimiento actual del objetivo. La función de cercanía (4), establece una forma (mas no la única) de calcular la distancia que posee un agente con respecto a un punto. Cabe resaltar que esta función puede ser reescrita según las necesidades del diseñador del SMA. Por ahora, y para el caso de estudio implementado se definió esta función de distancia como el cálculo de la distancia euclidiana entre el punto de referencia y el punto actual.

$$Cercania(Ag, RE) = F(Ag_posX - RE_posX, Ag_posY - RE_posY) \quad (4)$$

$$Aptitud(RE, Ag) = \frac{\sum_{i=0}^{nh} RE_Hab_i - Ag_Hab_i}{nh} \quad (5)$$

La función de aptitud (5) modela y maneja la heterogeneidad de los agentes al interior del SMA. Incorporando una valoración cualitativa de las habilidades que

el agente posee a la función de utilidad, permitiendo una mejor asignación de roles.

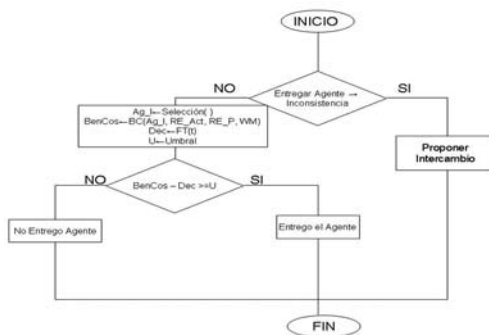


Figura 6. Algoritmo para manejar una petición de un recurso.

Caso de estudio y resultados

Con el fin de evaluar el rendimiento del sistema al utilizar la jerarquía de resolución propuesta, se estableció un caso de estudio, asociado al fútbol robótico, contemplando la ejecución del SMA en un ambiente simulado. Se dividió el área de juego en dos zonas, defensa y delantera (Figura 7) y se definieron los roles estructurantes: Defensa izquierdo, Defensa central, Defensa derecho, Delantero izquierdo, Delantero central, Delantero derecho y Arquero.

Utilizando el Simulador Multi-Robot (SMR) desarrollado al interior de los grupos SIDRe y SIRP, se midió el desempeño de la jerarquía de resolución sin el nivel de formaciones, dicho caso será identificado en la tabla de resultados como CCNET; este esquema corresponde a la estrategia de cooperación basada en contract net utilizada para el caso de estudio. De igual forma, se midió el rendimiento al incluir el nivel de formaciones, con lo cual se puede observar por comparación la influencia de este.

Para medir el rendimiento del sistema, se definió un protocolo experimental con 27 escenarios de prueba cuyas variables independientes controladas fueron: el tipo de formación F, el umbral de aceptación del beneficio costo B/C y el umbral de cumplimiento de un objetivo usado para la detección de necesidades UD.

Las variables dependientes medidas que se definieron orientadas a medir el rendimiento de la jerarquía de resolución son: el número de acciones cooperativas evaluadas por segundo NAC (6), el número de goles totales anotados por minuto GTA (7), el número de acciones cooperativas realizadas por segundo NART (8), y el promedio del matching de las acciones cooperativas percibidas PMAC (9).

$$NAC = \frac{\sum_{i=0}^n NACE_i}{T} \quad (6)$$

$$GTA = \frac{\sum_{i=0}^n GA_i}{T} \quad (7)$$

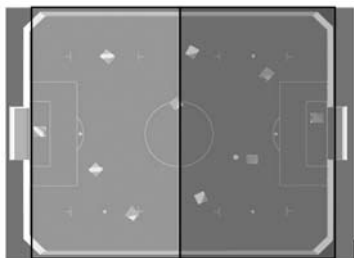


Figura 7. Espacio de juego y división en Zonas de acción.

Los resultados obtenidos de la ejecución de los 9 escenarios con la formación 3-2 (3 defensas y 2 delanteros) se presentan en la Tabla 1. Para los otros casos los resultados son similares.

Partiendo entonces de la descomposición de los objetivos, de la cual surge el modelo de cooperación de MRCC, es de suponerse que un aumento en el establecimiento de micro sociedades generará un aumento en el cumplimiento de los objetivos del sistema. Según los resultados obtenidos, en el mejor de los escenarios del modelo MRCC extendido, se presenta un aumento del indicador NAC de cerca del 99.2% en comparación con el modelo MRCC base; incluso en el peor de los escenarios el aumento es del 23.36%. De igual forma, el indicador asociado al establecimiento de acciones cooperativas por unidad de tiempo (NART) presentó un aumento del 277% en el mejor de los casos. A partir de estos elementos

es posible concluir que el modelo de formaciones introducido mejora sustancialmente el rendimiento en cuanto al establecimiento de acciones cooperativas.

Para evaluar el efecto sobre la detección de oportunidades y satisfacción de objetivos se hace el análisis de la variable GTA, asociada al cumplimiento del objetivo central del fútbol robótico. En los resultados se observa un aumento de hasta 607.84% en el cumplimiento de dicho objetivo, la mejora es de 250.9% en el peor de los casos. Dado que la varianza no supera el 0.004, se confirma que dicho aumento es consecuencia de la mejora en la estructuración del SMA y su orientación a satisfacción de objetivos. Las Figuras 8, 9, 10, 11 permiten comparar más claramente los valores de la tabla.

Escenario	Var. Independientes			Variables Dependientes						
	F	B/C	UD	NAC	GTA	NART	PMAC			
				Valor	Valor	Valor	PASE	CENTRO	MONOAG	
1	3-2	0.25	0.25	7,347	0,323	0,012	0,908	0,94994	0,39763	
2	3-2	0.25	0.5	7,428	0,357	0,012	0,89	0,9486	0,3976	
3	3-2	0.25	0.75	11,38	0,361	0,034	0,901	0,9518	0,4338	
4	3-2	0.5	0.25	8,234	0,236	0,021	0,866	0,9443	0,40001	
5	3-2	0.5	0.5	9,117	0,347	0,026	0,875	0,9376	0,443079	
6	3-2	0.5	0.75	7,971	0,179	0,01	0,878	0,9525	0,4216	
7	3-2	0.75	0.25	7,838	0,215	0,008	0,859	0,9639	0,4222	
8	3-2	0.75	0.5	7,428	0,279	0,011	0,87	0,9571	0,3408	
9	3-2	0.75	0.75	7,044	0,247	0,011	0,893	0,9556	0,4444	
CCNET	-	-	-	5,71	0,051	0,009	0,865	0,9268	0,3996	
				Mín.	7,044	0,179	0,008	0,859	0,9376	0,3408
				Máx.	11,38	0,361	0,034	0,908	0,9639	0,4444
				Media	8,114	0,275	0,014	0,882	0,95123	0,410042
				Varianza	1,602	0,004	7E-05	2E-04	5,1E-05	0,000923

Tabla I. Resultados Simulaciones con la Formación 3-2.

Se resaltan los Máximos y los Mínimos.

En resumen, las pruebas experimentales demuestran que las problemáticas existentes y no resueltas por el modelo base de MRRC, son cubiertas gracias a la inclusión de la capa de formaciones. En particular, el sistema tiene un mejor rendimiento en la tarea producto de la estructuración y orden, se realizan más acciones cooperativas, y se atienden las necesidades mediante la negociación de agentes entre zonas.

NAC

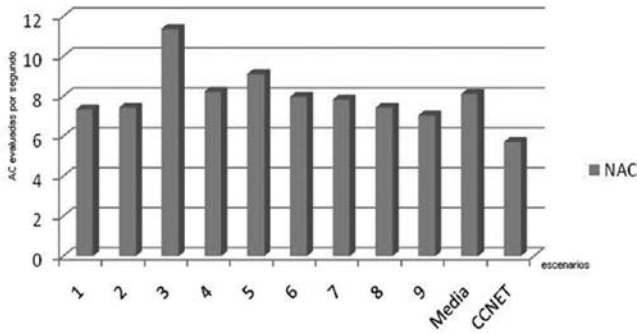


Figura 8. NAC para cada escenario del caso con formación 3-2.

GTA

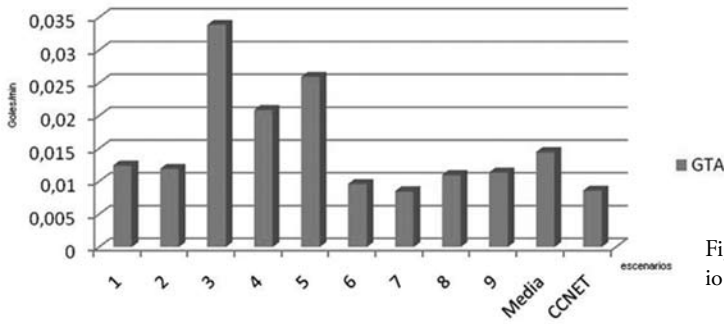


Figura 9. GTA para cada escenario del caso con formación 3-2.

NART

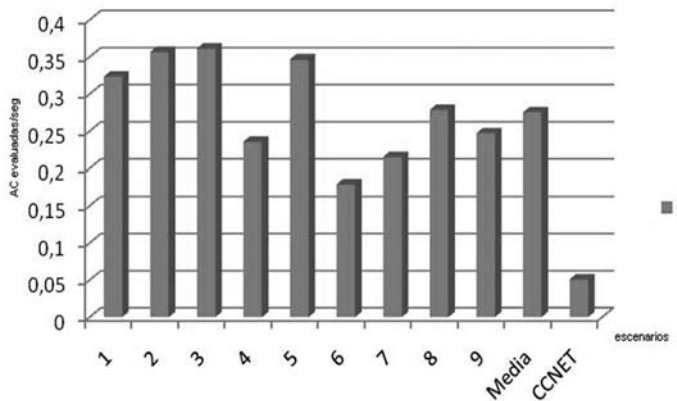


Figura 10. NART para cada escenario del caso con formación 3-2.

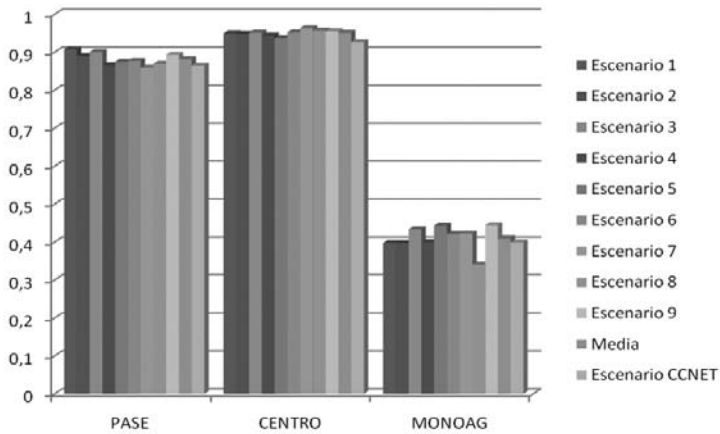


Figura 11. PMAC por escenario y tipo de acción cooperativa.

Conclusiones

En esta investigación se desarrolló un modelo formal de formaciones, el cual fue también implementado, depurado y validado satisfactoriamente. Este modelo incorpora elementos inspirados en la teoría de Instituciones Electrónicas y se integra en forma natural dentro del marco del modelo MRCC.

El modelo de formaciones introduce satisfactoriamente un nuevo nivel de resolución a la jerarquía del MRCC, complementando la orientación al aprovechamiento de oportunidades con una visión de la satisfacción de necesidades. Para realizar dicha integración se formalizó y generalizó el modelo de cooperación (MRCC) satisfaciendo necesidades específicas como las asociadas al aprendizaje, logradas a través de la definición de retroalimentaciones; a la flexibilidad del modelo, permitiendo múltiples y diferentes jerarquías de resolución según sea la problemática. Además, se abre la puerta para la fácil integración futura de nuevos niveles de resolución.

La aplicación de un protocolo experimental formal permitió observar que dicha integración mejora sustancialmente el rendimiento del MRCC, aumentando no solo el cumplimiento del objetivo, sino la cantidad de acciones cooperativas percibidas, y la cantidad de acciones cooperativas establecidas. Por el momento, el modelo fue probado en un ambiente de simulación; actualmente, se está montando un marco experimental para validar el modelo propuesto con robots reales.

Las aplicaciones del modelo acá propuesto, van desde el uso en agentes robóticos en tareas tales como búsqueda y rescate hasta una nueva cantera, que hasta ahora se está explorando y es la construcción de *software* a partir de agentes estructurantes cooperativos. Dicha exploración puede observarse desde varias perspectivas. En la primera de ellas, suponiendo que cada agente es capaz de brindar un servicio y que la reunión y organización de un sistema puede verse como una aplicación, el presente modelo podría ser un primer paso hacia sistemas inteligentes capaces de adaptarse según las necesidades y crear diferentes aplicaciones estableciendo diferentes formaciones. El segundo, está asociado también con la construcción de *software*, pero esta vez a la satisfacción de requerimientos no funcionales, teniendo presente que se define un requerimiento no funcional como una necesidad, el sistema estaría en la posibilidad de determinar cuando una necesidad se encuentra insatisfecha y tomar acciones para solucionarlo. Este tipo de aplicaciones son aún un terreno en exploración, pero que a la luz de la presente investigación parece plausible.

Referencias

- [1] Y. León, A. Muñoz. "Formations in Collective Robotics. Advances in Artificial Intelligence Applications. Research on Computing Science." Gelbukh A., Monroy R. (eds), pp. 223-232. IPN, México. ISSN 1665-9899. 2005
- [2] S. Monteiro, E. Bicho. "Robot Formations generated by non-linear attractor dynamics", 3 festival de robótica, pp.37-44, 2003
- [3] J. Fredslund, M. Mataric. "Hewie, Dewie, Louie, and GUI - Commanding Robot Formations", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'02), May 11-15, 2002, Washington, D.C., USA.
- [4] T. Balch, R. Arkin. "Behavior-Based Formation Control for Multirobot Teams", IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 14, No. 6 1998.
- [5] A. Meystel, M. Bathija. "Multiresolutional Planning: Using the Randomized Tessellation of the State Space". Proceedings. ISRA 2002
- [6] B. Viswanathan, M. desJardins. "A model for large-scale team formation for a disaster rescue problem." In Working Notes of the 2nd Workshop on the Coordi-

nation of Large-Scale Multi-Agent Systems (LSMAS 2005). Utrecht, Netherlands, July 2005.

[7] C. McMillen, P. E. Rybski, M. Veloso, “Levels of Multi-robot Coordination for Dynamic Environments,” in Multi-Robot Systems: From Swarms to Intelligent Automata, Volume III, 2005.

[8] G. Hernán. “How Spiritual Machine Works”. Paper presentado en el 2006 FIRA Robot World Congress - Dortmund - Germany. [versión en línea] <http://www.spiritualmachine.com.ar/Spiritual%20Machine%20-%20Germany%202006.pdf>

[9] J. Ferber. “Multiagent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence”. Addison-Wesley, 1999.

[10] M. Esteva, J. A. Rodríguez-Aguilar, B. Rosell, and J. L. Arcos. “AMELI: An Agent-based Middleware for Electronic Institutions”. In N. R. Jennings, C. Sierra, L. Sonenberg, and M. Tambe, editors, Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2004), pages 236--243, New York, USA, 2004. ACM Press. <http://citeseer.ist.psu.edu/esteva04ameli.html>

[11] M. Esteva, J.A. Rodríguez-Aguilar, C. Sierra, P. García, J.L. Arcos. “On the Formal Specifications of Electronic Institutions”. In Agent Mediated Electronic Commerce, the European Agentlink Perspective. F. Dignum and C. Sierra, Eds. Lecture Notes In Computer Science, vol. 1991. Springer-Verlag, London, 126-147.

[12] E. González, A. Pérez, J. Cruz, C. Bustacara. “MRCC: A Multi-Resolution Cooperative Control Agent Architecture”. IEEE-ACM IAT2007, San Francisco-USA.

Carlos A. Bernal. *Estudiante de último semestre de Ingeniería de Sistemas de la Pontificia Universidad Javeriana. Realizó su profundización académica en las áreas de Inteligencia Artificial, Sistemas Multiagente y Robótica Cooperativa. En la actualidad, realiza su práctica profesional en Merck Shap & Dohme como Consultor IT y está encargado proyectos relacionados con el análisis de redes sociales, utilizando técnicas de inteligencia artificial para facilitar los procesos de toma de decisiones de las áreas de mercadeo.*

Felipe Camargo. *Estudiante de último semestre de Ingeniería de Sistemas de la Pontificia Universidad Javeriana. Realizó su profundización académica en las áreas de Sistemas Multiagente e Inteligencia y Visión Artificial. Realiza su práctica profesional en los laboratorios farmacéuticos Pfizer, como apoyo en el área de tecnología y soporte de aplicaciones.*