

## Arquitectura Basada en Roles Aplicada en Equipos de Fútbol de Robots con Control Centralizado

José G. Guarnizo <sup>a,b\*</sup>, Martín Mellado <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Carrera 7 No 40-53 Piso 5, Bogotá Colombia.

<sup>b</sup> Instituto de Automática e Informática Industrial, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022, Valencia, España

### Resumen

El fútbol de robots ofrece un entorno adecuado para el diseño y la validación de arquitecturas de sistemas multi-robot. Al clasificar las ligas de fútbol de robots existentes se encuentran ligas con arquitecturas centralizadas que poseen percepción global del entorno y donde los robots son controlados desde un ordenador a través de un único sistema de toma de decisiones. En este artículo se presenta una arquitectura basada en roles para equipos de fútbol de robots con percepción global y control centralizado. En esta arquitectura un rol es seleccionado para cada jugador por medio de una función. A partir de este rol y de las condiciones de juego presentes se selecciona un comportamiento que el jugador deberá ejecutar. La función que es utilizada para la asignación de roles es activada cuando el balón cambia de cuadrante en el campo de juego. La estrategia presentada es comparada en simulación realizando partidos contra un equipo que posee una estrategia de roles constantes y un equipo con una estrategia jerárquica basada en selección de tácticas y posteriormente asignación de roles a partir de la táctica seleccionada. Los resultados mostraron no solo un mejor rendimiento del equipo con la estrategia basada en roles, sino también uniformidad en los comportamientos realizados por los jugadores del equipo durante las transiciones de roles y comportamientos.

### Palabras Clave:

Agentes, toma de decisiones, robots móviles autónomos, control centralizado, arquitecturas.

### 1. Introducción

Un agente se puede considerar como un sistema que realiza acciones autónomas, percibe el entorno y responde ante los cambios que ocurren en el mismo, es proactivo e interactúa con otros agentes planteando procesos de negociación para lograr un objetivo específico (Esquivel-Flores and Benítez-Pérez, 2012). En los sistemas multi-agente, se tienen sistemas computacionales capaces de tomar acciones de forma autónoma para alcanzar sus objetivos (Bravo et al., 2011). Dentro de los sistemas multi-agente, el fútbol de robots es utilizado por diferentes grupos de investigación alrededor del mundo, como una plataforma común para validar sus investigaciones en diferentes campos de la robótica. Uno de estos campos de investigación es el diseño de arquitecturas de sistemas multi-agente que permitan la adecuada coordinación de los robots, ya que al ser el fútbol de robots un sistema multi-agente que presenta incertidumbres en un ambiente hostil, los equipos que no posean una buena coordinación entre sus jugadores presentan distintos problemas, por ejemplo jugadores del mismo equipo tratan de capturar el balón al mismo tiempo obstaculizándose, bloqueando a un compañero de juego, o descuidando zonas del campo de juego por donde jugadores del equipo oponente pueden atacar (Stulp et al., 2010).

\* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: [jguarnizo@di.sti.tal.edu.co](mailto:jguarnizo@di.sti.tal.edu.co) (José G. Guarnizo), [martinn@ai2.upv.es](mailto:martinn@ai2.upv.es) (Martín Mellado)

A nivel de arquitecturas, las ligas de fútbol de robots pueden dividirse en dos categorías principales. Por una parte las ligas de control centralizado (en adelante ligas centralizadas o equipos centralizados), las cuales utilizan desde un ordenador central, un único sistema de toma de decisiones para el control de los robots, junto a un sistema de visión que permite la percepción global del entorno. Las comunicaciones entre el ordenador y los robots se realizan de manera inalámbrica (Riley and Veloso, 2002). La otra categoría consiste en las ligas de control distribuido (en adelante ligas distribuidas o equipos distribuidos), en las cuales los equipos están conformados por robots completamente autónomos. En estas ligas los robots deben ser controlados de manera autónoma, la percepción es individual en cada robot, no obstante comunicaciones entre los robots son permitidas, con fines de coordinación de equipo (Acosta et al., 2010).

En fútbol de robots la estrategia se define como el plan por el cual el equipo pretende ganar el partido. La táctica se refiere a la organización del equipo durante un momento dado del partido y los roles corresponden a la combinación de los comportamientos que realizan los robots junto a su ubicación en el campo. Por ejemplo se tiene el rol de delantero, defensa, portero, o mediocampista. Los comportamientos corresponden a los movimientos que realizan los robots con el fin de alcanzar objetivos muy específicos, como ir a por el balón, bloquear un oponente, lanzar o esperar un pase (Lau et al., 2009).

A nivel de arquitecturas de equipo, se han propuesto diferentes modelos con el fin de buscar una adecuada coordinación entre sus jugadores. Algunas arquitecturas se han diseñado de manera jerárquica a través de capas para la toma de decisiones usando módulos paralelos para equipos distribuidos (Testart et al., 2011). Otros diseños utilizan redes de Petri de manera individual en cada robot y sincronizadas entre los robots para asignar roles (Palamar et al., 2009). Algunos casos utilizan redes neuronales o lógica difusa para los sistemas de toma de decisiones (Jolly et al., 2010), (Chen et al., 2014), (Wu and Lee, 2004). (Hwang et al., 2011) combina aprendizaje por refuerzo y teoría de juegos para coordinación y selección de comportamientos. Otros trabajos se basan en la asignación de posiciones de juego (Yang and Jia, 2012), o máquinas de estado finito para la asignación de tácticas y roles (Lou et al., 2012). Algunos diseños de arquitecturas se basan en la selección de la posición de los jugadores en un campo de juego dividido en cuadrículas, dependiendo de la posición del balón y de los oponentes (Wu et al., 2013). Otros trabajos presentan sistemas de toma de decisiones para la selección de comportamientos a partir de la formación de los robots, calculando trayectorias óptimas (Shi et al., 2015). (Cardoso et al., 2012) utiliza eventos discretos para el diseño de estrategias en ligas centralizadas. (Abreu et al., 2014) propone técnicas de filtros colaborativos para la selección de formaciones de equipo en ligas distribuidas.

Los roles juegan un importante factor en los sistemas multi-agente. Como diseño conceptual, permiten obtener una útil abstracción en sistemas altamente complejos y con esto diseñar una interacción de alto nivel entre agentes cooperando en tareas complejas. También permiten a los agentes especializarse en comportamientos en los que son responsables y reducen el número de agentes que compiten por una tarea en particular (Campbell and Wu, 2011). Al nivel de diseño de arquitecturas, se ha mostrado que equipos basados en roles permiten obtener un óptimo rendimiento, dadas las habilidades individuales de los agentes, compensando las debilidades de los roles con las fortalezas de otros miembros del equipo (García et al., 2013). Arquitecturas basadas en roles han sido utilizadas en diferentes aplicaciones mostrando adaptabilidad y una adecuada respuesta en diferentes ramas de la ingeniería, por ejemplo en ingeniería de software, para el diseño y análisis de programas orientados a objetos (Baldoni et al., 2008), o definiendo la interacción entre objetos proveyendo una abstracción entre clases y roles (Kendall, 2000). También son frecuentemente utilizadas en sistemas de comunicaciones en arquitecturas jerárquicas para la asignación de recursos en redes virtuales de servicios (El Barachi et al., 2013); o en seguridad informática, en criptografía para el almacenamiento de información en nube de datos (Zhou et al., 2015). Otros ejemplos de roles en sistemas informáticos son presentados en (Campbell and Wu, 2011). Arquitecturas basadas en roles también han sido utilizados en sistemas de potencia, en aplicaciones de distribución energética (Yu et al., 2015), como también en redes eléctricas, por ejemplo para asignar roles y tareas con propósitos de predicción y gestión de demanda energética (Hernández et al., 2013). En (Bayindir, 2014) se describen diferentes aplicaciones en robótica de enjambre. Arquitecturas basadas en roles son igualmente utilizadas para aplicaciones con sistemas inteligentes, por ejemplo para coordinación entre agentes, o aprendizaje (Zhu, 2006).

Como lo define (Lauer, et al., 2010), las estrategias de equipo son típicamente basadas en roles, donde uno de ellos es el portero, uno o dos son atacantes o defensas y suelen utilizar asignación

dinámica de roles. El concepto de roles en el fútbol de robots no es nuevo, ya que fue utilizado por (Kim et al., 1997), presentando una estrategia básica de equipo con 3 roles constantes, quienes deberían desarrollar ciertos comportamientos predeterminados, para un equipo centralizado. (Stone and Veloso, 1999) realizan una asignación dinámica de roles en un equipo distribuido, introduciendo el concepto de “*Periodic Team Synchronization*”. En (Hwang et al., 2004) se presenta una arquitectura jerárquica con asignación de roles en equipos centralizados, utilizando técnicas de aprendizaje de máquina para comportamiento de los jugadores. En (McMillen and Veloso, 2006), se diseña una estrategia para robots autónomos basada en juegos (“*Play-based approach*”), donde periódicamente se selecciona un líder quien asigna roles a los demás jugadores, dependiendo de las condiciones de juego. Para este tipo de ligas (Agüero et al., 2006) propone un algoritmo de selección de roles usando una función de utilidad mediante funciones heurísticas. En (Kontes and Lagoudakis, 2007) se utilizan máquinas de estado para seleccionar la táctica, combinada con redes de Petri para la ejecución de tareas por parte del jugador, dependiendo de su rol asignado. En (Hwang et al., 2007) se utiliza aprendizaje por refuerzo para la selección de roles, a través de asignación de posiciones. (Hilaire et al., 2008) presenta una arquitectura jerárquica basada en holones y sistemas inmunes artificiales, para asignar roles y realizar el control de movimientos de cada rol. (Arias and Ramirez, 2008) presenta una arquitectura basada en comportamientos de agentes para equipos distribuidos, asignando la formación de equipo mediante un agente líder. (Wang et al., 2009) utiliza gráficos de coordinación para el proceso de asignación de roles en ligas distribuidas. En (Atkinson et al., 2009), un jugador capitán utiliza redes neuronales para asignar roles, en un ambiente distribuido, partiendo de un conocimiento previo suministrado por un entrenador. (Abeyruwan, et al., 2012) realiza asignación de roles para un equipo distribuido utilizando funciones de valor general, obtenida mediante aprendizaje por refuerzo. En este tipo de estrategias, los roles se basan en posiciones sobre el campo de juego. (Cravo. Et al., 2014) realiza la planeación de estrategias, junto a la asignación y ejecución de roles mediante un lenguaje “*set-play*”, para ligas de fútbol de robots distribuidas.

Muchas de las arquitecturas hasta ahora descritas, se enfocan en técnicas de aprendizaje o se basan en comportamientos colaborativos muy puntuales. Distintos trabajos anteriormente relatados se realizan en arquitecturas distribuidas, que poseen importantes diferencias con las ligas centralizadas, requiriendo un diseño de estrategia de equipo diferente. Otras arquitecturas descritas utilizan distintas capas o niveles para la toma de decisiones, implicando esto un mayor nivel de abstracción y complejidad en el diseño de la estrategia de equipo. En el presente artículo, se propone una arquitectura de equipo de fútbol de robots basada en roles, diseñada para equipos con percepción global y control centralizado. En esta arquitectura se asignan determinados roles a cada robot, dependiendo de una función de afinidad. Para activar esta función el campo de juego se divide en 4 cuadrantes, cada vez que el balón cambia de cuadrante, la función se activa y asigna los roles dependiendo del cuadrante en el que se encuentra. Aunque se han relatado diferentes trabajos que utilizan roles para la estrategia de equipo, la estrategia propuesta se basa exclusivamente en roles para la ejecución de los comportamientos de los jugadores con asignación dinámica de los mismos, eliminando otras capas superiores que otras estrategias utilizan, con esto reduciendo la complejidad en su diseño, una

mayor adaptación a cambios en los reglamentos de las ligas como un posible aumento en el número de jugadores, siendo también adaptable a otros entornos multi-agente diferentes al fútbol de robots. La estrategia propuesta es compatible con diferentes técnicas de aprendizaje de máquina como las descritas anteriormente, con el fin de mejorar el desempeño de los comportamientos.

Para validar esta estrategia, se utiliza la plataforma de simulación *SimuroSot 5 vs. 5* de Fira, inspirada en la liga MiroSot que utiliza 5 robots por equipo con percepción global del campo de juego y control centralizado de los robots (Klančar et al., 2007). Se realizaron 100 partidos contra un equipo con roles constantes, que viene por defecto en el simulador y posteriormente se realizaron otros 100 partidos contra un equipo de arquitectura jerárquica con asignación dinámica de táctica, roles y comportamientos. Si bien existen elementos comunes con la arquitectura jerárquica, la arquitectura propuesta en el presente artículo tiene importantes diferencias, ya que esta no se divide en diferentes tácticas que determinan la asignación de los roles y la selección de los comportamientos, evitando el uso de máquinas de estado para el sistema de toma de decisiones y disminuyendo las líneas de código utilizadas y el costo computacional. En la arquitectura presente el jugador llama a una función que corresponde al rol, el cual le ha sido asignado a través de una función de afinidad. Una vez el rol es llamado, éste contiene los comportamientos que el jugador deberá ejecutar dependiendo de las condiciones de juego.

En la sección 2 se presenta la arquitectura del equipo basada en roles. La sección 3 presenta la validación de la arquitectura propuesta mediante las simulaciones de partidos. Finalmente en la sección 4 se muestran las conclusiones y trabajos futuros.

## 2. Arquitectura Basada en Roles

La arquitectura básica de una liga de fútbol de robots centralizada se presenta en la Figura 1, donde se puede observar una cámara cenital que permite obtener una imagen de video, la cual es procesada en un ordenador central, permitiendo de este modo obtener las coordenadas  $(x,y)$  de todos los jugadores y el balón. Con esta información, el sistema de toma de decisiones contenido en el ordenador central, asigna los roles y comportamientos a cada uno de los jugadores, transmitiendo sus señales de control por radio frecuencias.

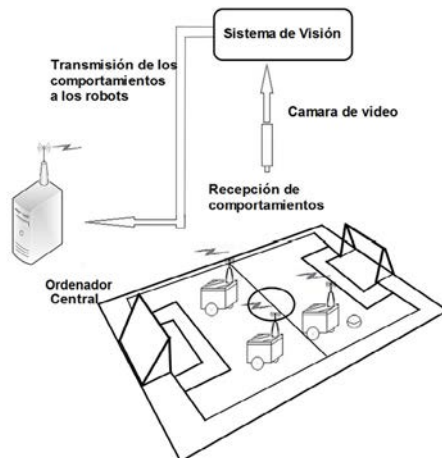


Figura 1: Arquitectura correspondiente a equipos de fútbol de robots de ligas centralizadas.

La estrategia usada se puede validar en simulación, mediante el simulador *SimuroSot 5 vs. 5 de Fira* (Fira, 2015), el cual utiliza 5 robots móviles diferenciales por equipo. La estrategia es programada en C++ desde el sistema de toma de decisiones, que recibe del simulador las coordenadas de los jugadores y el balón. Cuando la estrategia es evaluada, el programa le envía al simulador la señal de control de la rueda izquierda y de la rueda derecha para cada robot. Una vez la estrategia es programada, se genera un archivo dll que se suministra al simulador para ejecutar los partidos.

La arquitectura de la estrategia propuesta basada en roles se presenta en la Figura 2, donde las condiciones ambientales (C. A) corresponden a la información que permite establecer el comportamiento del sistema, siendo en este caso las coordenadas del balón (C. B) y las coordenadas de los jugadores (C. J) de los dos equipos. Cuando se detecta que el balón ha cambiado de cuadrante, la función de afinidad (F. A) es activada asignando los roles. Una vez los roles son asignados a los jugadores, cada jugador con su respectivo rol, activa un comportamiento (C.) determinado dependiendo de las condiciones ambientales presentes. Para los comportamientos se realiza el control a bajo nivel, utilizando la cinemática inversa de los robots, por lo cual finalmente se obtienen señales de actuador (S. A) para las dos ruedas de cada robot.

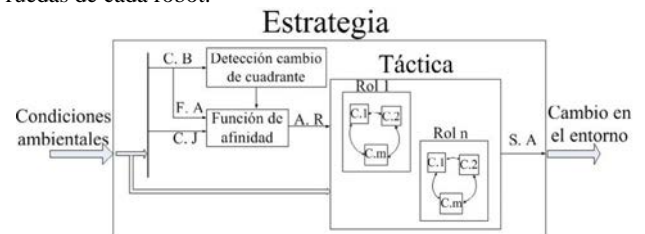


Figura 2: Arquitectura de la estrategia de equipo basada en roles.

Para el diseño de esta arquitectura se han definido 5 roles diferentes, los cuales se describen a continuación:

- Portero: Corresponde al único rol constante en esta estrategia. El portero tiene como función evitar que el equipo oponente realice goles en la portería propia.
- Defensa central: El jugador con este rol deberá capturar el balón cuando este se encuentre en la mitad del área de la portería propia, para luego enviarlo a la otra mitad del campo de juego.
- Defensa de marca: El jugador con este rol debe bloquear a un jugador oponente cuando haya peligro de gol.
- Delantero central: El jugador con este rol debe capturar el balón cuando este se encuentre en la mitad del campo donde se encuentra la portería del oponente, para tratar de anotar un gol.
- Delantero lateral: El jugador con este rol acompaña al delantero central en el cuadrante opuesto. En caso que el delantero central pierda el balón y éste cambie de cuadrante, el delantero lateral asumirá el rol de delantero central.

Para asignar los roles de forma apropiada y facilitar el proceso de asignación de comportamientos, el campo de juego se divide en 4 cuadrantes como se presenta en la Figura 3, siendo el equipo local (equipo con la estrategia propuesta) ubicado en los cuadrantes 2 y 3, mientras que el equipo rival está ubicado en los cuadrantes 1 y 4. En este artículo se representa siempre la portería propia a la izquierda. En la Figura 3 se puede observar que a los jugadores del equipo local se les asocia un número de identificación, con la excepción del portero dado que este rol a lo largo del partido siempre será constante. Cuando un rol es asignado a un jugador, este debe ejecutar una serie de

comportamientos, dependiendo de las condiciones de juego que se vayan presentando. Por lo que se hace necesario programar los comportamientos básicos que los robots deben ejecutar en el momento que la función de rol sea llamada. Para explicar los diferentes roles y comportamientos presentados en esta estrategia, se define la posesión de balón como la distancia mínima entre el robot y el balón, de tal manera que el robot pueda “golpear” el balón para enviarlo a un lugar deseado.

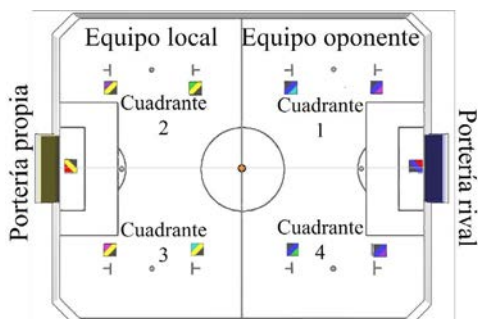


Figura 3: Distribución del campo de juego en cuadrantes.

En la Figura 4 se detalla la secuencia de comportamientos que el portero debe ejecutar. Cuando el jugador con este rol activa la función equivalente, empieza en el punto de inicio de la Figura 4. Para que el portero ejecute su rol, es necesario definir una zona llamada zona de portería (Z. P), ubicada al frente de la portería, donde el portero sigue el balón en línea a la portería que protege. Cuando el portero ejecuta su rol, lo primero que debe hacer es revisar si se encuentra correctamente ubicado en su zona, en caso tal que el portero se encuentre fuera de su zona, deberá ingresar en ella. Una vez esté ubicado de forma correcta, el portero debe revisar las coordenadas del balón y seguir al mismo en línea con la portería que protege, sin salirse de la zona de portería.

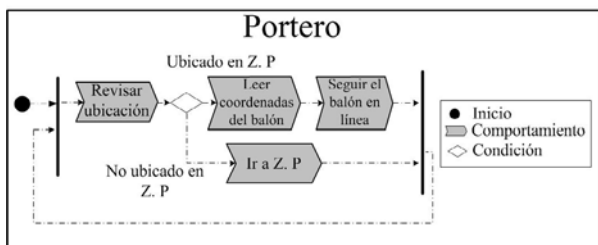


Figura 4: Comportamientos del rol portero.

Los comportamientos del rol defensa central se presentan en la Figura 5. Tanto en este caso como en los casos posteriores, el punto inicio corresponde al momento en que la función correspondiente a este rol es llamada por el jugador. Para ejecutar este rol, en primera medida se debe evaluar en qué lugar se encuentra el balón. Si el balón se encuentra en la zona de defensa (Z. D), que corresponde a la mitad del campo de juego donde se encuentra la portería propia (cuadrantes 2 y 3), se debe revisar las coordenadas del balón. Si este se encuentra al interior de la zona de portería (Z. P), el defensa debe seguir el balón sin ingresar en esta área. Esto se hace como primera medida para no obstaculizar al portero y evitar comportamientos indeseados como autogoles y como segunda medida, cumpliendo el reglamento de la SimuroSot League de Fira, ya que la presencia de más de un robot del mismo equipo en esta área es penalizada como falta. Si el balón está fuera de la zona de portería, el defensa central revisa si

tiene posesión de balón (P. B). En caso afirmativo este debe disparar el balón a la zona de ataque (Z. A), que corresponde a la mitad del campo de juego donde se encuentra la portería del equipo oponente (cuadrantes 1 y 4). Si el defensa central no tiene la posesión de balón, entonces el jugador debe ir a capturar el balón. En el caso que el balón se encuentre en la zona de ataque, la función del defensa central consiste en seguir el balón en línea de gol dentro de la zona de defensa central (Z. D. C), la cual se encuentra en la zona de defensa. En el caso que el defensa central se encuentre fuera de su zona, deberá ingresar a ella y posteriormente, seguir el balón en línea de gol dentro de esta zona. Estos comportamientos los realiza con el fin de rechazar posibles contraataques del equipo oponente. Tanto en el caso del rol defensa central, como en los otros 3 roles que se asignan dinámicamente, el robot ejecuta la secuencia de comportamientos hasta que el balón cambia de cuadrante y la función de afinidad sea activada, empezando en el punto inicio nuevamente con el rol asignado.

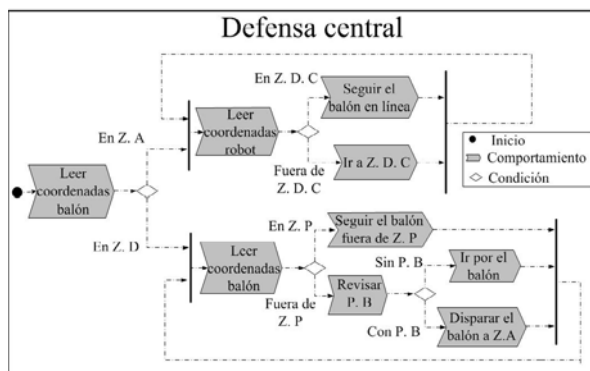


Figura 5: Comportamientos correspondientes al rol defensa central.

La secuencia de comportamientos correspondientes al jugador defensa de marca se presenta en la Figura 6. Como primera medida el robot debe revisar las coordenadas del balón. Si este se encuentra en la zona de defensa (Z. D), el defensa de marca debe calcular cual es el jugador oponente más cercano (O. M. C), dirigirse hacia él y posteriormente bloquearlo. El comportamiento bloquear a oponente consiste en seguir a este último con el fin de evitar que pueda recibir el balón, anotar un gol o realizar posibles pases, sin tener ninguna clase de contacto físico con el oponente. En el caso que el balón se encuentre en la zona de ataque (Z. A), el defensa de marca debe revisar su propia ubicación y si se encuentra fuera de la zona defensa de marca (Z. D. M), ubicada detrás de la zona defensa central (para evitar colisiones con el defensa central), el robot debe dirigirse a esta zona. Una vez en ella, el robot con este rol debe cubrir las áreas que el defensa central no cubre, con el fin de prevenir posibles contraataques del equipo oponente en estas áreas descubiertas.

El rol delantero central es presentado en la Figura 7. En caso que el balón se encuentre en la zona de defensa (Z. D), el delantero central debe esperar el balón en caso que alguno de los defensas le realice un pase. Para esto se define la zona delantero central (Z. L. C), ubicada en la zona de ataque (Z. A), donde el delantero central debe seguir el balón en línea de gol dentro de esta zona. Una vez el balón ingresa a la zona de ataque, el delantero central deberá ir por el balón y cuando tenga posesión de balón (P. B), deberá tratar de anotar un gol.

Los comportamientos del rol delantero lateral son descritos en la Figura 8. Inicialmente se revisa la ubicación del balón. Si el

balón se encuentra en la zona de ataque (Z. A), se observa el cuadrante en el que este se encuentra (cuadrante 3 Q. 3 o cuadrante 4 Q. 4). El delantero lateral debe encontrarse en el cuadrante opuesto en el que se encuentre el balón, recordando que este rol está dirigido para cubrir la zona opuesta donde se encuentre el balón y el delantero central. Una vez el delantero lateral se encuentre en el cuadrante correspondiente, el robot con este rol deberá ir a la zona donde debe seguir en línea lateral el balón (dicha zona se puede observar en los cuadrantes 1 y 4 de la Figura 9). Si el balón se encuentra en la zona defensa (Z. D), el robot debe ir a la zona delantero lateral (Z. D. L), la cual está ubicada en la zona de ataque, en línea con las porterías y delante de la zona delantero central para evitar colisiones con este jugador. Una vez el delantero lateral se encuentra en su zona, debe cubrir las áreas del campo de juego que el delantero central no cubre.

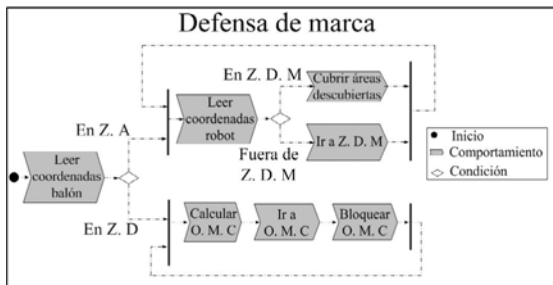


Figura 6: Comportamientos correspondientes al rol defensa de marca.

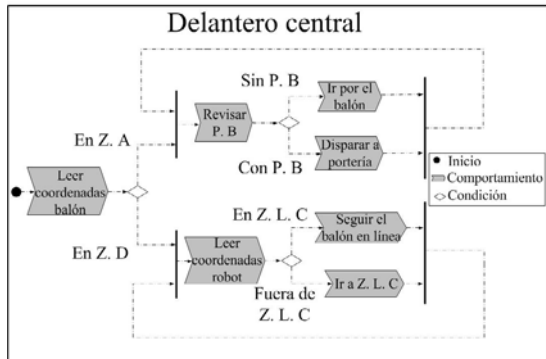


Figura 7: Comportamientos correspondientes al rol delantero central.

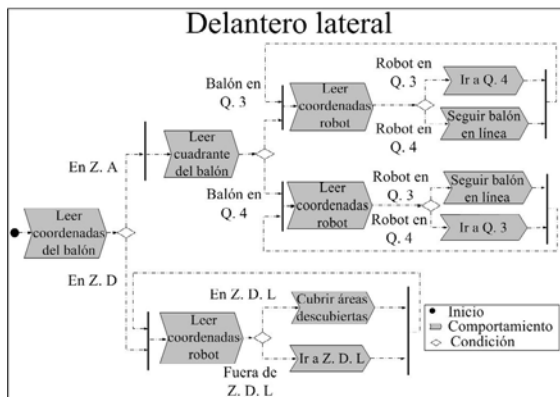


Figura 8: Comportamientos correspondientes al rol delantero lateral.

En la Figura 9 se presentan las zonas definidas para el diseño de los comportamientos de los respectivos roles. Como se ha mencionado anteriormente, estos roles se asignan a los robots

utilizando una función de afinidad, la cual es activada cuando el balón cambia de cuadrante. Los 4 roles son asignados dependiendo de qué robot obtiene el mayor o menor valor en la función de afinidad y del cuadrante en el que el balón se encuentre, esto con el fin de darle fluidez a la ejecución de comportamientos por parte de los robots.

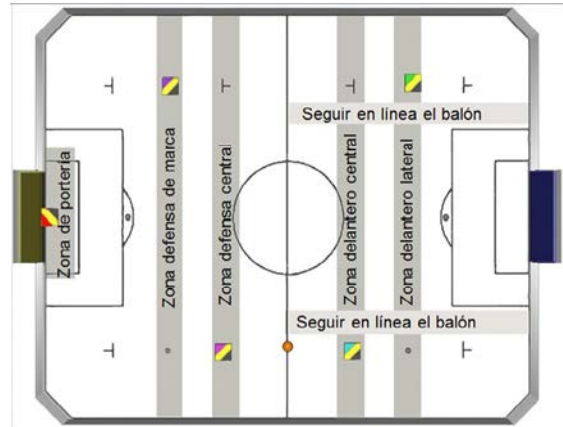


Figura 9: Zonas definidas para los diferentes comportamientos.

Para definir esta afinidad, inicialmente se tiene:

$$\vec{Pb}_{(t)} = (x_b(t), y_b(t)) \tag{1}$$

Que corresponde a un vector con las coordenadas del balón. También se tiene un vector que corresponde a las coordenadas del jugador del equipo local, el cual es:

$$\vec{Pp}_{(t)} = (x_p(t), y_p(t)) \tag{2}$$

También se tiene un valor constante  $Pg=(x_g,y_g)$ , que corresponde a las coordenadas del centro de la portería rival. La función de afinidad se define como:

$$f(t) = K \left\| \vec{Pb}_{(t)} - \vec{Pp}_{(t)} \right\|_2 + (1 - K) \left\| \vec{Pb}_{(t)} - Pg \right\|_2 \tag{3}$$

Donde  $\left\| \vec{Pb}_{(t)} - \vec{Pp}_{(t)} \right\|_2$  es la distancia euclídea entre las

coordenadas del balón y del jugador y  $\left\| \vec{Pb}_{(t)} - Pg \right\|_2$  es la distancia

euclídea entre las coordenadas del balón y las coordenadas de la portería del equipo oponente.

La constante  $K$  corresponde a un valor utilizado para ponderar las distancias, dándole un mayor peso a la distancia que hay entre el jugador y el balón, pero también resaltando la importancia de la posición del jugador en el campo de juego, ya que aunque la distancia al balón sea similar entre dos jugadores, la distancia a la portería rival es importante para determinar qué jugador será delantero y cual defensa en un momento dado. Se desarrollaron distintos experimentos con el fin de encontrar empíricamente un valor adecuado de  $K$ . En estos experimentos los robots se ubicaron en diferentes lugares del campo de juego y se probaron diferentes valores de  $K$ , observando los distintos roles asignados a los jugadores cuando el balón cambia de cuadrante. Esta constante  $K$  cumple la condición  $0 < K < 1$ . Inicialmente se asignó un valor de  $K=0.5$ , observando en muchos casos que un jugador que tenía la posesión del balón, abandonaba al mismo con el fin de asumir un rol defensivo cuando el balón pasaba de los

cuadrantes defensivos a los cuadrantes ofensivos. En los casos en los que  $K$  era aproximadamente igual a 1, se observaba que comportamientos colaborativos como realización de pases se hacían muy poco frecuentes, perdiendo oportunidades de realizar pases y goles, y con esto la posesión del balón. Finalmente realizando más experimentos, se observó que  $K=0.75$  es un valor adecuado.

La asignación de roles se puede observar en la Tabla 1, donde se tienen en cuenta tanto el cuadrante en el que se encuentre el balón como la afinidad obtenida, siendo la primera afinidad el valor más bajo obtenido.

Tabla 1: Asignación de roles según la afinidad y el cuadrante

Cuadrante	Afinidad	Rol
1	1a.	Delantero central
	2a.	Delantero lateral
	3a.	Defensa de marca
	4a.	Defensa central
2	1a.	Defensa central
	2a.	Defensa de marca
	3a.	Delantero central
	4a.	Delantero latera
3	1a.	Defensa central
	2a.	Defensa de marca
	3a.	Delantero lateral
	4a.	Delantero central
4	1a.	Delantero central
	2a.	Delantero lateral
	3a.	Defensa central
	4a.	Defensa de marca

### 3. Validación de la Estrategia

Una primera validación se realizó mediante 100 partidos de acuerdo con las reglas establecidas para la SimuroSot Middle League (Fira, 2015), en contra de un equipo con la estrategia que viene por defecto en el simulador y programada en Lingo, también conocido como equipo Fira. Esta estrategia consiste en 5 roles constantes. Uno es el portero, el cual bloquea el balón en línea con la portería. Dos defensores quienes también bloquean el balón en línea de la portería, pero distribuidos en la zona de defensa del equipo oponente. Los dos roles restantes son atacantes, los cuales básicamente van por el balón y lo golpean contra la portería donde pretenden anotar un gol. El equipo local corresponde al equipo con la estrategia propuesta basada en roles, mientras que el equipo con la estrategia del simulador es el equipo oponente. Los goles anotados por cada equipo son presentados en la Figura 10. En la Figura 11 se presenta la posesión de balón de cada equipo durante los 100 partidos, en la Figura 12 se presenta el porcentaje de tiempo en el que se encuentra el balón en las zonas defensiva y ofensiva durante los 100 partidos.

Al respecto se señala que todos los partidos han sido ganados por el equipo con la estrategia propuesta, con una diferencia de goles generalmente cómoda, de más de dos goles en más del 80% de los casos. La posesión de balón en todos los partidos ha sido mayor en el equipo local, donde se puede observar que solamente en dos partidos los porcentajes fueron cercanos. De acuerdo con los resultados de la ubicación del balón, en la mayoría de partidos (más del 90%) el balón se encuentra más tiempo en la zona

ofensiva. En 28 partidos la diferencia porcentual no es superior al 10%, esto quiere decir que aunque el equipo local se encuentra la mayor parte de tiempo atacando al oponente, se justifica la permanencia de dos roles defensivos para responder los distintos contraataques del equipo oponente, obligando a los jugadores a activar comportamientos defensivos en un significativo porcentaje de tiempo.

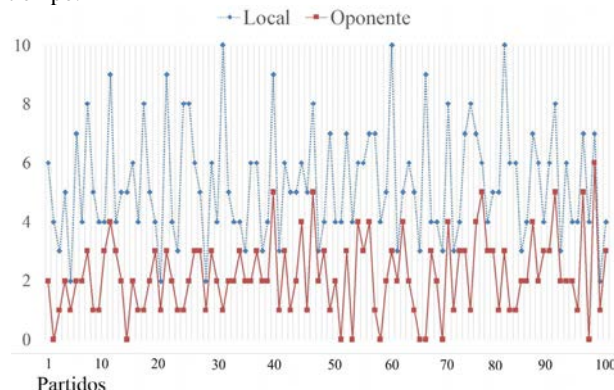


Figura 10: Goles por partido del equipo local contra el equipo oponente FIRA.

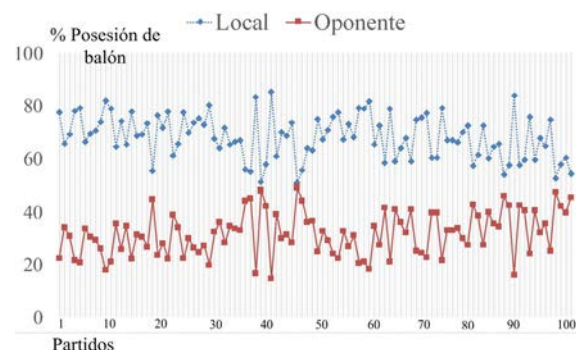


Figura 11: Porcentaje de posesión del balón por partido de los dos equipos.

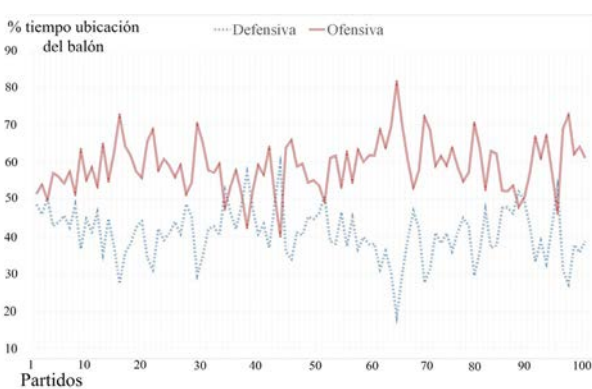


Figura 12: Porcentaje de tiempo de la ubicación del balón en las zonas.

En la Tabla 2 se presentan resultados adicionales de los 100 partidos. Así mismo y con fines de validación, en la Tabla 3 los resultados obtenidos en los juegos de la estrategia propuesta contra el equipo FIRA se comparan con otros resultados reportados en trabajos previos que fueron validados realizando partidos contra equipo que viene por defecto en el simulador o equipo FIRA. En la Tabla 3 los juegos ganados, empatados y perdidos corresponden a las columnas Gan, Emp y Perd. Local es el equipo con la estrategia propuesta por los autores y el equipo FIRA es Opon. D.E., corresponde a la desviación estándar

calculada a partir de los resultados reportados. N.R corresponde a que esa información no fue reportada en el artículo.

Tabla 2: Comparación de parámetros de los 100 partidos contra el equipo Fira

Parámetros	Local	Oponente
Promedio goles	5.29	2.17
Desviación estándar	1.934	1.326
Promedio posesión de balón	68.3 %	31.7 %
Desviación estándar	8.29%	8.25%
Promedio pases exitosos	3,52	0.48
Desviación estándar	1.3	0.47
Promedio faltas y bloqueos	0.64	6.54
Desviación estándar	0.73	2.13
	Defensa	Ataque
Ubicación del balón	41%	59%
Desviación estándar	6.89%	6.89%

Con respecto a la Tabla 2, se observa que el promedio de goles fue significativamente mayor en el equipo con la estrategia propuesta, así como el porcentaje de posesión de balón promedio durante los partidos. El número de pases exitosos realizados entre jugadores del mismo equipo es mucho mayor para el equipo local, evidenciando los comportamientos colaborativos esperados. Es de resaltar que existe una gran variación en los goles anotados por los equipos, ya que en un partido puede haber una diferencia de un gol y el equipo ganador anota dos goles y en otro la diferencia llega a ser hasta de 9 goles. Esta diferencia también se presenta con otras variables como la posesión del balón y la ubicación del balón en el campo de juego. Esto se debe en principio a que el simulador introduce un error incremental en los sensores de odometría. Por lo cual es clasificado como un simulador que posee características estocásticas (Fernandes and Bianchi, 2013).

Pese a estas variaciones, el equipo con la estrategia basada en roles presentó una mejor adaptación a las variaciones propias del ambiente, cuestión que no fue observada en el equipo FIRA. Así mismo, este equipo (FIRA) en diferentes juegos presenta comportamientos que provocan faltas o bloqueos en el juego, como por ejemplo atacar con varios jugadores al mismo tiempo a un oponente o al balón, comportamientos que son penalizados de acuerdo con el reglamento de Fira SimuroSot League. Una de las razones por las cuales las faltas y los bloqueos del equipo propuesto son menores, es que las reglas han sido tenidas en

cuenta para el diseño de la estrategia y los comportamientos de los jugadores.

Con respecto a los resultados presentados en la Tabla 3, es de resaltar que la única estrategia que presentó mejores datos, fue la presentada por (Hwang, et al., 2007), no obstante es de destacar que en este trabajo lo que se presenta es un algoritmo de aprendizaje por refuerzo, aplicado al sistema de toma de decisiones para la asignación de roles y comportamientos. Aunque este equipo anotó en promedio casi el doble de goles que el equipo con la estrategia basada en roles, la diferencia en el promedio de goles recibidos no es muy diferente. Además, dicho algoritmo de aprendizaje por refuerzo, así como cualquier otro algoritmo de optimización o aprendizaje podría ser utilizado en la estrategia propuesta basada en roles.

La estrategia presentada por (Cardoso, et al., 2012), la cual es basada en eventos discretos, presentó más goles a favor en promedio, no obstante el número de goles en contra también es mayor y fue la única que no reportó todos los juegos ganados. La estrategia propuesta por (Yang, et al., 2012) propone un algoritmo para la selección de tareas a través de la predicción de la utilidad de las tareas asignadas a los distintos jugadores, utilizando áreas de influencia. El promedio de goles anotados es similar al de la estrategia propuesta, no obstante el promedio de goles recibidos es mayor en este caso. También se puede observar que en promedio, la posesión del balón en ambos casos presentó resultados muy similares.

Comparado con la estrategia propuesta por (Lou, et al., 2012), que utiliza máquinas jerárquicas de estado finito basada en evaluación de estados y realimentación de la información de los efectos en curso, se puede observar nuevamente que aunque el promedio de número de goles anotados fue mayor, el promedio de goles recibidos también lo fue y el porcentaje de posesión del balón fue similar. Hasta este punto, es necesario resaltar que una de las principales ventajas de la estrategia basada en roles es la facilidad en su diseño y una mayor simplicidad para su implementación, esto contrasta con las estrategias hasta ahora presentadas, que requieren un grado mucho mayor de complejidad para su diseño y programación, obteniendo resultados similares. También es necesario resaltar que las desviaciones estándar de los goles anotados y recibidos, calculadas a partir de los resultados reportados por (Hwang, et al., 2007) y (Cardoso, et al., 2012) es muy similar y mayor para el caso de los goles anotados, comparada con la desviación estándar de la estrategia propuesta basada en roles. Con respecto a la estrategia propuesta en (Guarnizo, et al., 2015), el promedio de

Tabla 3: Comparación de resultados reportados de otras estrategias contra el equipo FIRA

Equipos	No. Juegos	Partidos			Promedio Goles		% Posesión Balón	
		Gan.	Emp.	Perd.	Local	Opon.	Local	Opon.
Estrategia basada en roles	100	100%	0%	0%	5.29	2.17	68.3%	31.7%
(Hwang, et al., 2007)	50	100%	0%	0%	9.74	1.78	N.R	N.R
(Cardoso, et al., 2012)	10	70%	10%	20%	5.5	4.2	N.R	N.R
(Yang, et al., 2012)	10	100%	0%	0%	5.1	3.7	71.7%	28.3%
(Lou, et al., 2012)	50	100%	0%	0%	6.1	2.8	67%	37%
(Guarnizo, et al., 2015)	10	100%	0%	0%	3	1	72.3%	27.7%
					D.E: 0.82	D.E: 0.82	D.E: 7.09%	D.E: 7.09%

goles anotados aumentó considerablemente.

Una segunda validación se realiza mediante otros 100 partidos, contra una estrategia jerárquica, basada en la selección de tácticas, roles y comportamientos a partir de máquinas de estado, la cual ha sido previamente presentada y validada en (Guarnizo et al., 2015), cuyos resultados obtenidos contra el equipo FIRA se presentaron en la Tabla 3. El equipo local corresponde al equipo con la estrategia propuesta, el equipo jerárquico corresponde al oponente con la estrategia jerárquica. En la Figura 13 se aprecia el número de goles realizados por cada equipo en cada partido. A diferencia de la información suministrada en la Figura 10, en este caso se puede observar un rendimiento más similar entre los dos equipos. Es necesario resaltar que de los 100 partidos, el equipo con la estrategia basada en roles ganó 77, perdió 15 y empató 4.

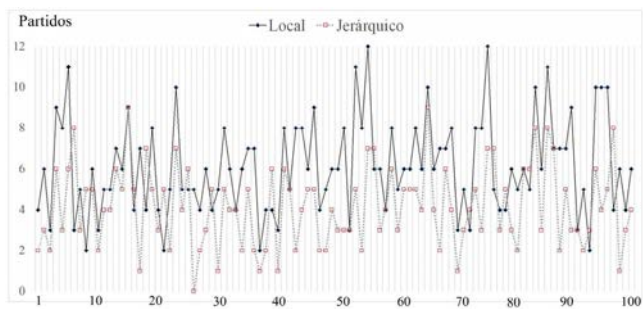


Figura 13: Goles por partido del equipo local, el cual es el que usa la estrategia propuesta basada en roles, vs. el equipo con la estrategia jerárquica.

La Figura 14 presenta el porcentaje de posesión de balón para cada equipo en cada partido. Se puede apreciar que la posesión de balón es más distribuida en los partidos realizados contra el segundo equipo, siendo mayor la posesión del balón en el equipo con la estrategia basada en roles en 75 partidos, mayor en el equipo con estrategia jerárquica en 25 partidos. No obstante es necesario resaltar que la diferencia porcentual en la posesión del balón fue menor al 10% en 28 partidos, considerándose porcentajes muy similares entre los dos equipos. Se observa igualmente que la posesión del balón para este caso, no está directamente relacionada con el marcador final del respectivo partido, ya que no necesariamente el equipo con mayor posesión del balón, ha resultado ser el equipo ganador de cada partido.

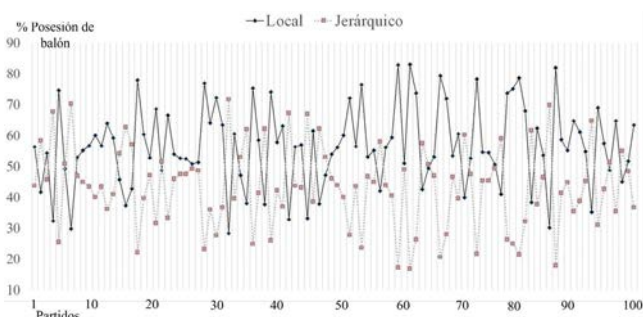


Figura 14: Porcentaje de posesión del balón, para los partidos contra el equipo con estrategia jerárquica.

La Figura 15 muestra el porcentaje de tiempo en el que el balón se encuentra en la zona defensiva y la zona ofensiva durante los 100 partidos contra el equipo jerárquico. Se puede observar que el balón pasa un mayor porcentaje de tiempo en la zona ofensiva durante la mayoría de partidos. Sin embargo las diferencias porcentuales generalmente no son muchas, lo que

indica distintos contraataques por parte del equipo oponente, obligando al equipo local a realizar diferentes asignaciones nuevas de roles y justificando nuevamente la necesidad de dos defensas para contrarrestar los contraataques y dos delanteros para la realización de jugadas ofensivas en el equipo local.

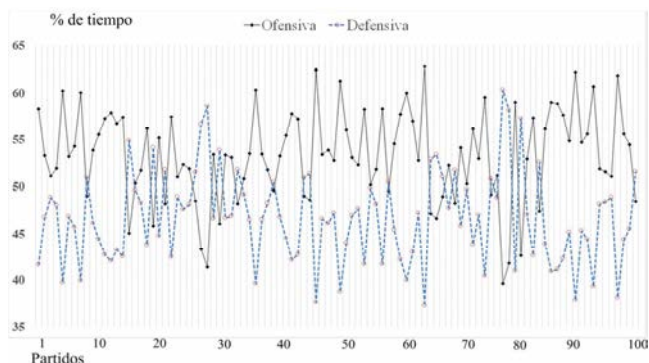


Figura 15: Porcentaje de tiempo de la ubicación del balón en las zonas, en los 100 partidos contra el equipo con estrategia jerárquica.

La Tabla 4 sintetiza resultados adicionales de los 100 partidos realizados contra el equipo con estrategia jerárquica. Se puede observar que aunque sigue siendo mayor el promedio de goles en el equipo local, el equipo con la estrategia jerárquica presenta un promedio de goles mayor que el equipo Fira. Esto se debe a que el equipo jerárquico presenta igualmente asignación dinámica de roles y comportamientos colaborativos.

Tabla 4: Comparación de parámetros de los 100 partidos contra el equipo con estrategia jerárquica

Parámetros	Local	Jerárquico
Promedio goles	6.12	4.16
Desviación estándar	2.36	1.99
Promedio posesión de balón	56.5 %	43.5%
Desviación estándar	13.1%	13.1%
Promedio pases exitosos	2.9	1.24
Desviación estándar	1.417	1.135
Promedio faltas y bloqueos	1.2	4.04
Desviación estándar	1.05	1.665
	<b>Defensa</b>	<b>Ataque</b>
Ubicación del balón	53.3%	46.7%
Desviación estándar	4.9%	4.9%

La posesión del balón es levemente mayor en el equipo con la estrategia propuesta. También es de resaltar que el número de pases exitosos es considerablemente más alto en este equipo. El número de faltas y bloqueos que causa el equipo local es menor. Sobre este último dato una de las causas por las cuales se presenta esto, es el hecho que sus comportamientos han sido diseñados a partir del reglamento de la liga de fútbol de robots en el que se valida, como por ejemplo, evitando atacar a un oponente con más de un jugador, ingresar con más de dos jugadores a la zona de gol del equipo contrario o ingresar con más de dos jugadores a la zona de gol del equipo local. Si bien se presentan faltas y bloqueos por parte del equipo local, son considerablemente menos que los realizados por los equipos oponentes. Es importante también señalar que los valores de desviación estándar se mantienen similares a los presentados con anterioridad, lo que confirma que el efecto de la aleatoriedad suministrada por el simulador es similar independiente de la estrategia utilizada. Un



dato a resaltar es el hecho que la estrategia basada en roles utiliza aproximadamente un 32% menos de líneas de código que la estrategia jerárquica y presenta un uso de CPU 2% menor, que si bien pueden sonar datos no muy relevantes, son importantes para sistemas con recursos limitados y en tiempo real. En la Figura 16 se presenta a través de diagramas de caja, el porcentaje de tiempo en el que cada jugador seleccionó cada uno de los roles, durante cada partido.

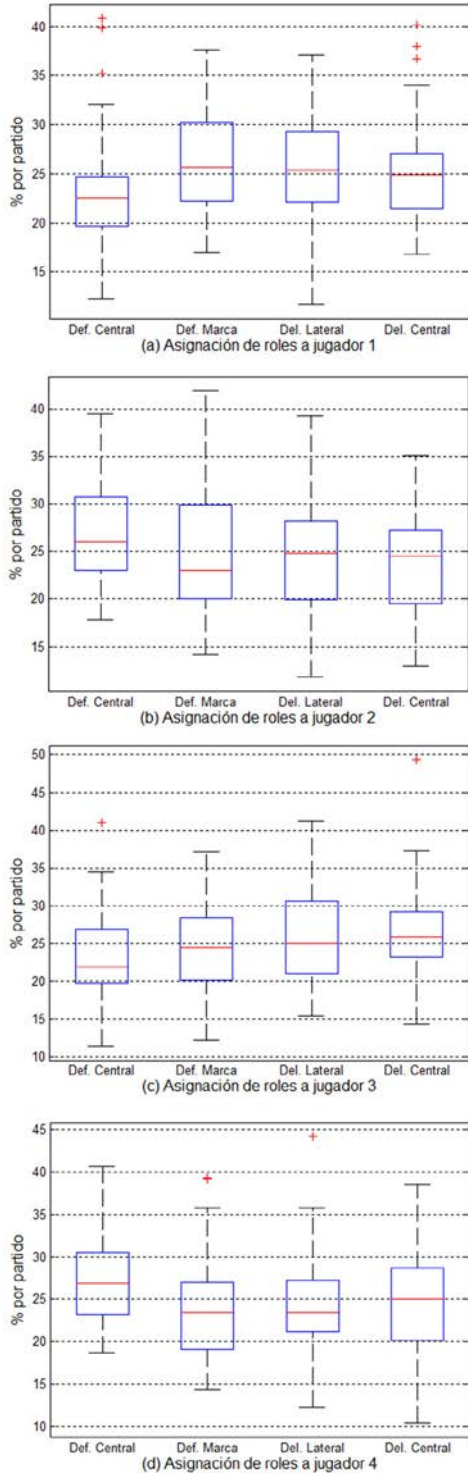


Figura 16: Porcentaje de selección de roles de cada jugador de cada partido.

Se observó que durante los partidos los jugadores seleccionaron todos los roles en porcentajes similares, exceptuando solamente pocos casos donde algún jugador tomó un rol un mayor porcentaje de tiempo, sin superar el 50% del tiempo del partido. También es necesario resaltar que cada jugador seleccionó los 4 roles en cada juego, indicando esto que por la dinámica misma de los partidos, todos los jugadores participaban activamente mediante sus comportamientos durante todos los partidos. Observando igualmente los resultados de la Figura 16, los promedios de porcentaje de tiempo en el que cada rol fue seleccionado en cada uno de los jugadores, para todos los partidos, es muy similar, estando entre el 20% y el 30%. Esto indica una gran versatilidad de la estrategia propuesta para asignar los roles a los robots, dado que por la dinámica misma del partido, diferentes procesos de asignación de roles se realizan continuamente, asignando en distintas ocasiones todos los roles a todos los jugadores en proporciones similares. En la Figura 17 se ilustra una situación de juego en la que se presentan los cambios de comportamientos en los jugadores.

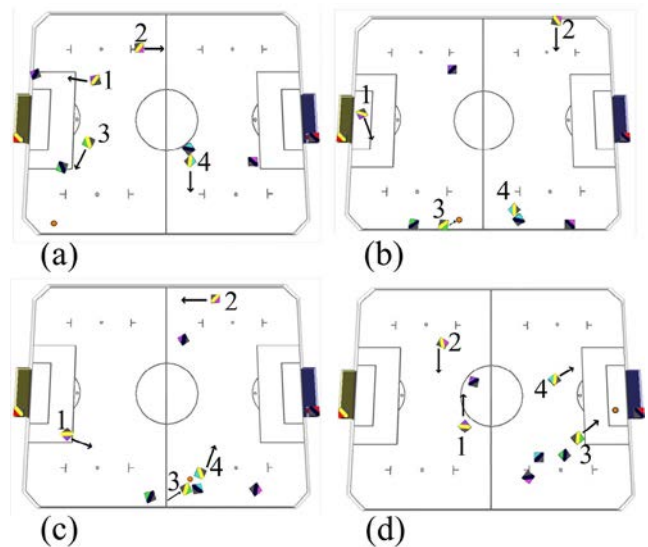


Figura 17: secuencia de comportamientos del equipo con la estrategia propuesta basada en roles.

En la Figura 17(a) el balón se encuentra en el tercer cuadrante, el jugador 3 posee el rol defensa central y va por el balón, a su vez el jugador 1 es el defensa de marca y va a bloquear al oponente más cercano. Los jugadores 4 y 2 son los delanteros centrales y laterales respectivamente, quienes van a cubrir sus respectivas zonas. En la Figura 17(b) el balón no cambia de cuadrante y los roles se mantienen, no obstante ya se aprecia cambios en los comportamientos. El defensa de marca cambia de trayectoria, ya que el jugador al que va a bloquear cambia, mientras el defensa central con posesión del balón envía el balón a la zona de ataque, donde los delanteros ya cubren sus respectivas zonas. En la Figura 17(c) el balón ha pasado al cuadrante 4 y se realiza una nueva asignación de roles. El jugador 1 pasa a ser el defensa central, quien va a su respectiva zona. Igual comportamiento tiene el jugador 2 al que se le asigna el rol de defensa de marca. El jugador 3 que mantiene la posesión del balón ahora tiene el rol de delantero central, tratando de disparar el balón a la portería oponente. Mientras que ahora el jugador 4 es

el delantero lateral y va al cuadrante 1 a apoyar. En la Figura 17(d) los roles se mantienen dado que el balón no cambia de cuadrante aún; no obstante, los defensas ya cubren sus respectivas áreas. El delantero central ha disparado el balón a la portería oponente para anotar gol, mientras que el delantero lateral acompaña en el cuadrante opuesto.

Es de resaltar que se observa la uniformidad en las acciones de los jugadores durante los cambios de roles y comportamientos, mostrando con esto una correcta transición sin afectar el rendimiento del equipo, observando continuidad en los movimientos de los jugadores, así como colaboración entre los mismos, por ejemplo, realizando pases o interceptando jugadas del equipo oponente.

#### 4. Conclusiones

El diseño de estrategias de fútbol de robots basadas en roles, aplicadas a equipos con percepción global y control centralizado, realiza una asignación dinámica de roles y comportamientos que permite un adecuado rendimiento de equipo a lo largo de los diferentes partidos. El enfoque del diseño de la estrategia a partir de roles y posteriormente comportamientos, permite un diseño más intuitivo de la estrategia, implicando un menor costo computacional al evitar el uso de máquinas de estado, o algoritmos más complejos para el sistema de toma de decisiones. Igualmente una estrategia basada en roles para la selección de los comportamientos es fácilmente expandible a más jugadores o al cambio o adaptación de nuevos comportamientos, sin que esto implique cambios significativos en la arquitectura del equipo. Así mismo este tipo de arquitecturas permite una fácil adaptación a cambios en el reglamento o su adaptación a diferentes ligas.

Al realizar simulaciones para validar la arquitectura propuesta, se observó una adecuada respuesta del equipo ante el error incremental inducido en la odometría con el fin de darle un carácter estocástico a las simulaciones. También se observa que con un apropiado diseño de los comportamientos, el equipo presenta un desempeño adecuado durante el juego, realizando pases en momentos oportunos, manteniendo la posesión del balón pese al cambio de rol de un jugador (de defensa a delantero por ejemplo), o recuperando el balón en caso de contrataques. Al comparar los resultados obtenidos en partidos realizados por otros equipos con estrategias reportadas en la literatura contra el equipo FIRA, la estrategia basada en roles obtiene resultados iguales o mejores, presentando a cambio una estrategia más sencilla e intuitiva para su diseño y programación. Observando los resultados obtenidos al validar la estrategia basada en roles contra otra estrategia jerárquica basada en tácticas, roles y comportamientos, se observaron resultados que sugieren que la estrategia presente es capaz de competir y ganar la mayoría de juegos contra otro tipo de estrategias, que si bien comparte elementos comunes, presenta importantes cambios en su arquitectura.

En futuros trabajos se presentarán algoritmos de aprendizaje para mejorar el desempeño de los jugadores y sincronizar los comportamientos colaborativos, en casos como realizar un pase para anotar un gol por ejemplo. Otros trabajos que se realizarán será la adaptación de la estrategia propuesta a ligas de fútbol de robots con jugadores completamente autónomos con percepción local. También se estudiará cómo aplicar arquitecturas de fútbol de robots como la presente, en otras aplicaciones de los sistemas multi-agente, como el caso del control de micro redes eléctricas aisladas, particularmente para la coordinación de los modos de

operación de los sistemas de almacenamiento de energía, junto a sus fuentes de energía renovables.

#### English Summary

##### Centralized Robot Soccer Architecture Based on Roles.

#### Abstract

Robot soccer offers an adequate domain in order to design and validate architectures for robot-coordination. One classification refers to centralized architectures, which correspond to robot soccer environments with global perception and centralized control of the robots, using only one decision-making system. In this paper it is presented a centralized robot soccer architecture based on roles, where one role is assigned to each player in order to select a specific behaviour depending on game conditions. Roles are assigned using an assignment function, which is activated when the ball changes of the quadrant in the playing field. This strategy has been compared by simulation in games against an opposition team with constant roles, and other team with a hierarchical strategy which assigns roles depending on a tactic previously selected. The results showed a better performance in the team with the role-based strategy outperformed the rest of the methods. As well as uniformity within the players' behaviors during the role and behavior transitions.

#### Keywords:

Agents, decision making, autonomous mobile robots, centralized control, architectures.

#### Agradecimientos

Jose Guillermo Guarnizo há sido financiado por una beca del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS, Colombia.

#### Referencias

- Abeyruwan, S., Seekircher, A., Visser, U., 2012. Dynamic Roles Assignment Using General Value Functions. *7th Workshop on Humanoid Soccer Robots, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. Osaka.
- Abreu, P.H., Castro, D., Almeida, F., Mendes-Moreira, J., 2014. Improving a Simulated Soccer Team's Performance Through a Memory-Based Collaborative Filtering Approach. *Applied Soft Computing*, 23, 180-193. DOI: 10.1016/j.asoc.2014.06.021
- Acosta Calderon, C. A., Mohan, R. E., Zhou, C., 2010. Distributed Architecture for Dynamic Role Behaviour in Humanoid Soccer Robots. En: V. Papi, *Robot Soccer*. Intech, pp. 121-138. DOI: 10.5772/7344
- Agüero, C. E., Matellán, V., Cañas, J. M., Gómez, V. M., 2006. SWITCH! Dynamic roles exchange among cooperative robots. *Second International Workshop on Multi-Agent Robotic Systems (MARS 2006)*. Setúbal.
- Arias, M., Ramirez, J., 2008. Team Agent Behavior Architecture in Robot Soccer. *Robotic Symp., 2008. LARS'2008. IEEE Latin American*, 20-25.
- Atkinson, J., Rojas, D., 2009. On-the-fly generation of multi-robot team formation strategies based in game conditions. *Expert Systems with Applications*, 3(2), 6082-6090. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.07.039

- Baldoni, M., Boella, G., Dorni, N., Mugnaini, A., Grenna, R., 2008. Organizations and roles as primitives in the JADE framework. *Workshop on Objects and Agents*. 89-92.
- Bayindir, L., 2016. A review of swarm robotics tasks. *Neurocomputing*, 172, 292-231. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.05.116.
- Bravo, C., Aguilar-Castro, J., Ríos, A., Aguilar-Martin, J., Rivas, F., 2011. Arquitectura Basada en Inteligencia Artificial Distribuida para la Gerencia Integrada de Producción Industrial. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 8(4), 405-417. DOI: 10.1007/978-3-662-43645-5\_2
- Campbell, A., Wu, A. S., 2011. Multi-agent role allocation: issues, approaches and multiple perspective. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 22(2), 317-355. DOI: 10.1007/s10458-010-9127-4
- Chen, B., Zhang, A., Cao, L., 2014. Autonomous intelligent decision-making system based on Bayesian SOM neural network for robot soccer. *Neurocomputing*, 128, 447-458. DOI:10.1016/j.neucom.2013.08.021
- Cravo, J., Almeida, F., Abreu, P. H., Reis, L.P., Lau, N., Mota, L., 2014. Strategy planner: Graphical definition of soccer set-plays. *Data & Knowledge Engineering*, 9, 110-131. DOI:10.1016/j.datak.2014.10.001
- Cardoso, P., Molina, L., Freire, E.O., Carvalho, E.A.N., 2012. A Methodology to Designing Strategies for Robot Soccer Based on Discrete Event Systems Formalism. *Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium (SBR-LARS), 2012 Brazilian*. 143-149.
- El Barachi, M., Rabah, S., Kara, N., Dssouli, R., Paquet, J., 2013. A Multi-Service Multi-role Integrated Information Model for Dynamic Resource Discovery in Virtual Networks. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE*. 4777-4782.
- Esquivel-Flores, O., Benítez-Pérez, H., 2012. Reconfiguración Dinámica de Sistemas Distribuidos en Tiempo-Real Basada en Agentes. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 9(3), 300-313. DOI:10.1016/j.riai.2012.05.014
- Fernandes, M., Bianchi, R.A.C., Heuristically-Acelerated Reinforcement Learning: A Comparative Analysis of Performance. *14th Annual Conference, TAROS 2013, Oxford, UK, August 28--30, 2013*. 15-27.
- Fira. May. 2015. Fira SimuroSot League. [http://www.fira.net/contents/sub03/sub03\\_7.asp](http://www.fira.net/contents/sub03/sub03_7.asp)
- García, P., Balmaceda, J. M., Schiaffino, S., Amandi, A., 2013. Automatic Detection of Team Roles in Computer Supported Collaborative Work. *IEEE Latin America Transactions*, 11(4), 1066-1074. DOI: 10.1109/TLA.2013.6601751.
- Guarnizo, J.G., Mellado, M., Low, C., Blanes, F., 2015. Architecting centralized coordination of soccer robots based on principle solution. *Advanced Robotics*, 29(5), 989-1004. DOI:10.1080/01691864.2015.1017534
- Hernández, L., Balandrón, C., Aguiar, J.M., Carro, B., Sánchez-Esguevillas, A., Llorent, J., Chinaro, D., Gomez-Sanz, J.J., Cook, D., 2013. A Multi-Agent System Architecture for Smart Grid Management and Forecasting of Energy Demand in Virtual Power Plants. *IEEE Communications Magazine*, 51(1), 106-113. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6400446
- Hilaire, V., Lauri, F., Gruer, P., Koukam, A., Rodriguez, S., 2008. An Adaptive Agent Architecture for Holonic Multi-Agent Systems. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, 3(1), 1-24. DOI: 10.1145/1342171.1342173
- Hwang, K.S., Tan, S.W., Chen, Y.J., Lee, C.H., 2007. Reinforcement Learning in Strategy Selection for a Coordinated Multirobot System. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 37(6), 1151-1157. DOI: 10.1109/TSMCA.2007.904823
- Hwang, K.S., Jiang, W.C., Yu, H.S., Lin, S.Y., 2011. Cooperative Reinforcement Learning Based on Zero-Sum Games. En: *Mobile Robots – Control Architectures, Bio-Interfacing, Navigation, Multi Robot Motion Planning and Operator*. Intech, pp. 289-308. DOI: 10.5772/26620
- Hwang, K.S., Tan, S.W., Chen, C.C., 2014. Cooperative strategy based on adaptive Q-learning for robot soccer systems. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 12(4), 569-576. DOI: 10.1109/TFUZZ.2004.832523
- Jolly, K., Sreerama Kumar, R., Vijayakumar, R., 2010. Intelligent task planning and action selection of a mobile robot in a multi-agent system through a fuzzy neural network approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(6), 923-933. DOI:10.1016/j.engappai.2010.04.001
- Kendall, E.A., 2000. Role modeling for agent systems analysis, design and implementation. *Concurrency, IEEE*, 8(2), 34-41. DOI:10.1016/j.simpat.2007.02.002
- Kim, J.H., Shim, H.S.; Kim, H.S.; Jung, M.J.; Choi, I.H.; Kim, J.O., 1997. A cooperative multi-agent system and its real time application to robot soccer. *Robotics and Automation, 1997. Proceedings. 1997 IEEE International Conference on*, (1), 20-25.
- Klančar, G., Zupančič, B., Karba, R., 2007. Modelling and simulation of a group of mobile robots. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(6), 647-658. DOI: 10.1109/4434.846192
- Kontes, G., Lagoudakis, M., 2007. Coordinated Team Play in the Four-Legged RoboCup League. *Tools with Artificial Intelligence, 2007. ICTAI 2007. 19th IEEE International Conference on*. 109-116.
- Lau, N., Lopes, L. S., Corrente, G., Filipe, N., 2009. Multi-robot team coordination through roles, positionings and coordinated procedures. *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009*. 5841-5848.
- Lauer, M., Hafner, R., Lange, S., Riedmiller, M., 2010. Cognitive Concepts in Autonomous Soccer Playing Robots. *Cognitive Systems Research*, 11(3), 287-309. DOI: 10.1016/j.cogsys.2009.12.003
- Lou, Y., Chen, B., Shi, H., 2012. Decision making model based on state assessment and hierarchical FSM in robot soccer. *Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012), International Conference on*. 756-759. DOI:10.1049/cp.2012.1087
- McMillen, C., Veloso, M., 2006. *Distributed, Play-Based Role Assignment for Robot Teams in Dynamic Environments*. Distributed Autonomous Robotic Systems 7. Ed. Springer, pp. 145-154. DOI: 10.1007/4-431-35881-7
- Palamar, P. F., Ziparo, V., Locchi, L., Nardi, D., Lima, P., 2009. Teamwork Design Based on Petri Net Plans. *RoboCup 2008: Robot Soccer World Cup XII*. 200-211.
- Riley, P., Veloso, M., 2002. Recognizing Probabilistic Opponent Movement Models. *RoboCup 2001: Robot Soccer World Cup V*. 453-458.
- Shi, H., Xu, L., Zhang, L., Pan, W., Xu, G., 2015. Research on self-adaptive decision-making mechanism for competition strategies in robot soccer. *Frontiers of Computer Science*, 9(3), 485-494. DOI: 10.1007/s11704-014-4210-7
- Stone, P., Veloso, M., 1999. Task decomposition, dynamic role assignment, and low-bandwidth communication for real-time strategic teamwork. *Journal of Artificial Intelligence*, 110, 241-273.
- Stulp, F., Utz, H., Isik, M., Mayer, G., 2010. Implicit Coordination with Shared Belief: A Heterogeneous Robot Soccer Team Case Study. *Advanced Robotics*, 24(7), 1017-1036. DOI: 10.1163/016918610X496964
- Testart, J., Ruiz del Solar, J., Schulz, R., Guerrero, P., Palma-Amestoy, R., 2011. A Real-Time Hybrid Architecture for Biped Humanoids with Active Vision Mechanisms. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 63(2), 233-255. DOI: 10.1007/s10846-010-9515-7
- Wang, J., Wang, T., Wang, X., Meng, X., 2009. Multi-robot decision making based on coordination graphs. *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on*. 2393-2398.
- Wu, C.-J., Lee, T.-L., 2004. A Fuzzy Mechanism for Action Selection of Soccer Robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 39(1), 57-70. DOI: 10.1023/B:JINT.0000010795.04819.90
- Wu, J., Snášel, V., Ochodková, E., Martinovič, J., Svatoň, V., Abraham, A., 2013. Analysis of strategy in robot soccer game. *Neurocomputing*, 109, 66-75. DOI:10.1016/j.neucom.2012.03.021
- Yang, M., Jia, Y., 2012. Action Utility Prediction and Role Task Allocation in Robot Soccer System. *Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 2012 12th International Conference on*. 112-117.
- Yu, W.Y., Soo, V.W., Tsai, M.S., 2015. Power distribution system service restoration bases on a committee-based intelligent agent architecture. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 41, 92-102.
- Zhou, L., Varadharajan, V., Hitchens, M., 2015. Trust Enhanced Cryptographic Role-Based Access Control for Secure Cloud data Storage. *Information Forensics and Security, IEEE Transactions on*. 10(11), 2381-2395. DOI: 10.1109/TIFS.2015.2455952
- Zhu, H., 2006. A role-Based Architecture for intelligent Agent Systems. *Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications, 2006. DIS 2006. IEEE Workshop on*, 354-362.