

Fútbol de robots orígenes, federaciones, ligas y horizontes de investigación*

Robot Soccer: Origins, Federations, Leagues and Research Horizons

Recibido: 7 de abril de 2015 • Aceptado: 3 de julio de 2015

Para citar este artículo: J. Guarnizo, C. Trujillo y N. Díaz «Fútbol de robots: orígenes, federaciones, ligas y horizontes de investigación», *Ingenium*, vol. 17, n.º 33, pp. 54-67, julio de 2015.



José Guillermo Guarnizo M.**
César Leonardo Trujillo R.***
Nelson Leonardo Díaz A.****

Resumen

En las últimas décadas el fútbol de robots ha adquirido importancia entre investigadores relacionados en el campo de la robótica, ya que ha permitido encontrar un entorno adecuado para la investigación en temas como visión artificial, locomoción, localización y navegación, así como coordinación de robots, entre otros. A raíz de esto, distintos grupos de investigación en diferentes universidades alrededor del mundo han creado sus propios equipos de fútbol de robots, con el fin de participar en distintos torneos con diferentes ligas, compitiendo y permitiendo validar los resultados obtenidos en sus investigaciones en áreas relacionadas. En el presente artículo se realiza una revisión sobre los orígenes del fútbol de robots y sus diferentes ligas, así como una presentación de distintos temas de investigación relacionados en este campo.

Palabras clave

FIRA, fútbol de robots, Robocopa, robótica, sistemas multiagentes.

* Artículo de investigación, producto derivado del grupo de investigación: Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía (Lifae), perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.

** M. Sc. Automatización Industrial, investigador Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía (Lifae), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. E-mail: jguarnizo@udistrital.edu.co

*** Ph. D. Profesor asociado, investigador Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía (Lifae), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. E-mail: cltrujillo@udistrital.edu.co

**** M. Sc. Automatización Industrial, Profesor asistente, investigador Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía Lifae, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. E-mail: nldiaza@udistrital.edu.co

Abstract

In previous decades, robot soccer has become important for robotic research, due to provide of an adequate environment for research in areas such as artificial vision, locomotion, localization and navigation, as well as multi-robot systems, and others. Hence, different groups of research in several universities around the world have been working on robot soccer teams, to competing against other robot soccer teams in different leagues of robot soccer and, in this way, to validate the results achieved acquired from their research in related areas. In this paper is presented a review about robot soccer, showing a brief overview about its origin and its leagues, but also a presentation about different topics on research related in this field.

Keywords

FIRA, multi-agent systems, Robocup, robot soccer, robotics.

1. Introducción

La robótica ha desempeñado un papel trascendental en las últimas décadas y presenta una alta proyección para tiempos futuros, abarcando diferentes ámbitos de la vida [1]. En este aspecto, el fútbol de robots presenta un entorno multirobot, en un ambiente hostil con incertidumbres dinámicas, donde robots que necesitan coordinación deben operar en la búsqueda de un objetivo común [2].

Desde los años noventa el fútbol de robots es utilizado en distintas universidades y centros de investigación alrededor del mundo, para la validación de diferentes temas de investigación relacionados con la robótica, la visión artificial, o los sistemas multiagentes [3]. Para este propósito estos grupos han desarrollado sus propios equipos de fútbol de robots, con el fin de presentar sus resultados en competiciones, de las cuales se desprenden dos ligas importantes, FIRA (The Federation of International Robot-soccer Association por su siglas en inglés) creada en 1997 [4], y la Federación de la Robocopa (Robocup Federation, nombre original del inglés) establecida en 1996 [5]. Cada una de estas federaciones cuenta con diferentes ligas de competición, en algunas de estas las competiciones se realizan con robots móviles de ruedas, mientras que otras utilizan humanoides, así mismo algunas ligas usan robots completamente autónomos, mientras que en otras ligas participan equipos cuyos robots se deben comunicar con un computador central, el cual les suministra información como localización, estrategias de juegos o control de movimiento. Algunas de estas ligas utilizan robots construidos por los investigadores, mientras que en otras participan con robots comerciales estandarizados. También estas dos federaciones tienen su respectiva liga de torneos simulados, centrada principalmente en el diseño de estrategias de cooperación de sistemas multi-agentes.

En el siguiente trabajo se presenta una revisión sobre los orígenes del fútbol de robots y sus diferentes ligas, igualmente se introducen los temas de investigación desarrollados por los investigadores en sus distintas categorías. En la sección 2 se presentan los orígenes de las federaciones relacionadas con el fútbol de robots, relatando brevemente su

historia. En la sección 3 se detalla cada una de las ligas de fútbol de robots. En la 4 se introducen diferentes temas de investigación ligados al fútbol de robots. Finalmente en la 5 se presentan conclusiones.

2. Orígenes y federaciones de fútbol de robots

Una de las primeras veces que se mencionó el término fútbol de robots, se dio en el ensayo del profesor Allan Mackworth [6], en donde se exponen los retos que implica la construcción de robots que jueguen fútbol. De forma paralela el tema era tratado por un grupo de investigadores japoneses, quienes promovían el fútbol de robots para desarrollar avances en inteligencia artificial, durante el *Workshop on Grand Challenges of Artificial Intelligence* en octubre de 1992 en Tokio [7]. Basados en las conclusiones obtenidas, en junio de 1993 un grupo de investigadores en robótica, entre los cuales se incluyen Minoru Asada, Yasuo Kuniyoshi and Hiroaki Kitan, deciden crear una competición de fútbol de robots, tentativamente llamada Robot J-League (Japanese Professional soccer league, o liga profesional Japonesa de fútbol de robots) [8]. Posteriormente, grupos de investigación de diferentes países mostraron su interés en participar en este proyecto, por lo que la competición cambió su nombre a Robot World Cup Initiative, o iniciativa mundial de fútbol de robots, con el tiempo abreviada a Robocup, o Robocopa en español. Durante la Conferencia Internacional de Inteligencia Artificial (IJCA-95) realizada en agosto de 1995 en Montreal Canadá, fue presentada la primera Robocopa (First Robot World Cup Soccer Games) la cual sería realizada dos años después, durante la conferencia IJCA-1997 en Nagoya, Japón. No obstante, una pre-Robocopa se realizó durante la Conferencia Internacional de Sistemas y Robots Inteligentes (IROS-96) en Osaka, Japón, entre el 4 y el 8 de Noviembre de 1996 [9]. Finalmente, como fue previsto, la primer Robocopa fue realizada en 1997 en Nagoya, Japón, con la participación de 38 equipos de 11 países, y planteando como meta para el año 2050, construir un equipo de robots completamente autónomos, que le puedan ganar al equipo humano campeón mundial [10].

Desde entonces, la Robocopa ha venido desarrollándose anualmente de manera ininterrumpida, siendo en el 2015, la edición 19 realizada en la ciudad de Hefei en China. Adicionalmente, se realizan eventos regionales adscritos a la Robocopa, y pertenecientes a la Federación de la Robocopa (Robocup Federation), como lo son el German Open, Iran Open, Mediterranean Open, Japan Open, y el Latin American Open, entre otros [11].

De forma paralela, en septiembre de 1995 el Profesor Jong-Hwan Kiminicia presentó de manera formal el Comité Organizativo Internacional del torneo mundial de fútbol de micro-robots (Micro-Robots World Cup Soccer Tournament MIroSot) [12], con un campeonato inicial realizado en la ciudad de Kaist, Corea del Sur, entre el 29 de julio y el 4 de agosto de 1996, con la participación de 30 equipos pertenecientes a 13 países. Dado el éxito de este último evento, fue creada la Federación Internacional de Asociaciones de Fútbol de Robots (Federation International of Robot-Soccer Association), cuyo principal objetivo es el promover la investigación de sistemas multirrobots autónomos que puedan cooperar, y de esta manera contribuir con el estado del arte en este campo tecnológico, empezando de manera ininterrumpida sus torneos anuales, con diferentes categorías [13].

Inicialmente, se consideraba que la diferencia entre las ligas pertenecientes a FIRA y a Robocup consistía en la percepción, las ligas pertenecientes a FIRA contaban con percepción global del entorno, mientras que para las de la Robocup la percepción era local a través de robots completamente autónomos [14]. Hoy en día las dos federaciones cuentan con ligas que presentan los dos tipos de percepciones, manteniendo únicamente esta diferencia en las ligas simuladas.

3. Ligas de fútbol de robots

Las diferentes ligas de fútbol de robots se pueden clasificar en dos categorías dependiendo de su arquitectura. Ligas centralizadas, las cuales tienen el control de los robots y la percepción centralizada desde un computador con un único sistema de toma de decisiones, el cual a partir de la información del juego y basado en la estrategia de equipo controla los movimientos de los jugadores [15]. Y ligas distribuidas, con robots completamente autónomos, que no poseen percepción global ni control central de jugadores, aunque presenta comunicación entre los robots pertenecientes al equipo, con el fin de obtener coordinación entre sus jugadores [16].

3.1. Ligas centralizadas

Las ligas centralizadas o ligas con control centralizado, utilizan un sistema de visión usado para localización y conectado a un computador, el cual realiza el procesamiento de vídeo con el fin de obtener la posición de los jugadores y el balón en el campo de juego, y el control de movimiento de los robots, a través de su modelo cinemático inverso. Para el control de movimiento, es utilizada la estrategia del equipo, programada desde un sistema de toma de decisiones centralizado desde el mismo computador. La localización se realiza a partir del reconocimiento de colores mediante el sistema de visión [17]. En las ligas centralizadas la selección de los comportamientos que el robot debe ejecutar es realizada por el sistema central de toma de decisiones, y transmitida de manera inalámbrica a los robots miembros del equipo, sin afectar las comunicaciones de los robots oponentes [18]. Un ejemplo de este tipo de arquitecturas se presenta en la figura. 1.

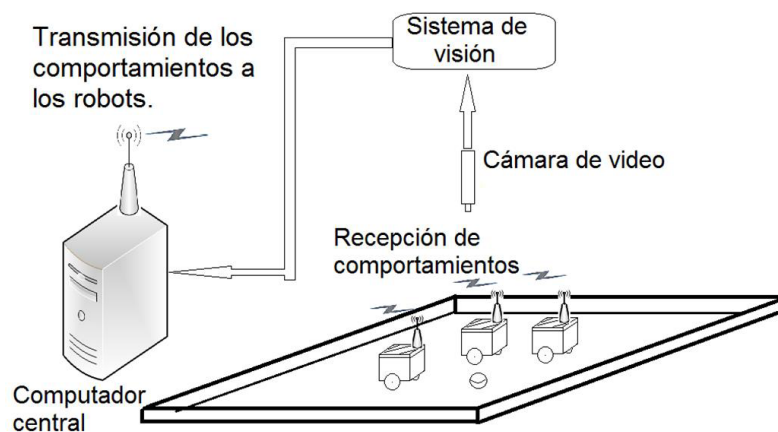


Figura 1. Arquitectura de equipos de fútbol de robots con control centralizado

3.2. Ligas distribuidas

En el caso de las arquitecturas distribuidas, los equipos de fútbol de robots están compuestos por robots autónomos con visión local, aunque usualmente deben estar conectados a un controlador de juego quien determina el inicio y el fin de los partidos. El control de comportamiento de los robots es realizado de manera autónoma, la comunicación entre robots es permitida, permitiendo realizar procesos de deliberación como parte de la estrategia de equipo [19]. En este tipo de arquitecturas, es necesario tener en cuenta cuestiones como fusión sensorial entre la información recibida de los diferentes agentes [20], así como la planeación de trayectorias de los robots [21]. Un ejemplo de arquitectura de este tipo de ligas es presentado en la figura. 2.

A continuación se presenta una revisión de las diferentes ligas de fútbol de robots y sus respectivas federaciones, las cuales envuelven ligas de arquitectura tanto distribuida, como centralizada, algunas centradas en el diseño de sus propios robots, en otras utilizando hardware estándar, así como también se presentan las ligas simuladas existentes.

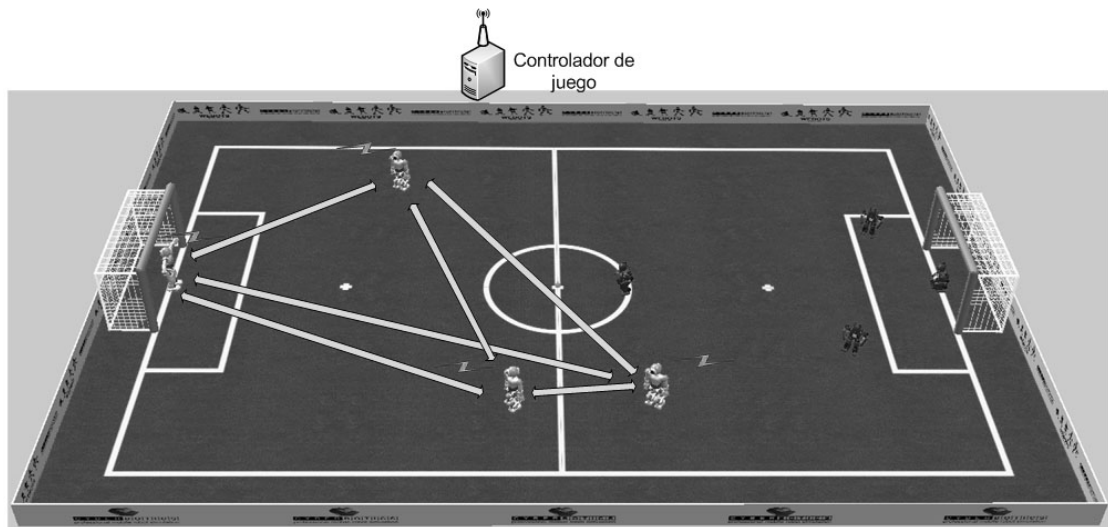


Figura 2. Arquitectura de equipos de fútbol de robots con control distribuido

3.3. Ligas pertenecientes a FIRA (The Federation of International Robot-soccer Association por su siglas en inglés)

Como se explicaba anteriormente, la Federación Internacional de Asociaciones de Fútbol de Robots (FIRA), realiza su torneo internacional cada año, reuniendo distintos grupos fútbol de robots quienes compiten entre sí en sus diferentes ligas, las ligas que actualmente están vigentes se describen a continuación.

A. Liga HuroCup

La competición de robots humanoides HuroCup (Humanoid Robot Competition) enfatiza en el desarrollo de robots humanoides (de aspecto humano) flexibles, robustos y versátiles que puedan desarrollar diferentes tareas en múltiples dominios. Sus investigaciones se enfocan en diferentes áreas de la robótica humanoide como lo es la caminata, planeación

de movimientos, interacción entre el hombre y el robot, a través de diferentes eventos como lo son competiciones de velocidad, cobro de penales, carreras con obstáculos, maratones, levantamiento y transporte de objetos, maratones, levantamiento de pesas, escalada de muro y baloncesto [22]. Actualmente cuenta con liga senior para grupos de investigación profesionales, y liga junior para niños y adolescentes.

B. Liga AMiRESot

El torneo de autónomos mini-robots AmireSot (Autonomous Mini-robots for Research and Edutainment Robot Soccer Tournament) se compone de mini-robots autónomos con visión integrada, sin percepción global del sistema y sin la necesidad de un computador externo al campo de juego, lo que lo convierte en una liga de tipo distribuido. Su principal característica es que se compone de robots con ruedas de pequeño tamaño, no mayor a 11 cm de diámetro en un campo de juego de 200 cm de largo por 140 cm de ancho. Los equipos pueden tener 1, 3 o 5 jugadores, con distintos tipos de sensores, lo que permitiría diferentes clases de comunicación entre los jugadores. Aunque los equipos participantes diseñan sus propios robots, no está permitido el diseño de hardware adicional para patear el balón [23].

C. Liga MiroSot

El torneo mundial de fútbol de micro-robots MiroSot (Micro Robot World Cup Soccer Tournament), fue el primer torneo realizado dentro de la FIRA, siendo la base de esta federación [24]. Esta liga se compone de tres robots conectados de manera inalámbrica a un computador central, que posee visión global del campo de juego, siendo esta una liga con control centralizado. Los robots deben ser de dos ruedas, y su tamaño está limitado a un máximo de 7.5 cm x 7.5 cm x 7.5 cm. La pelota debe ser de color naranja, como en todas las ligas. Los equipos tendrán 5 robots en la liga mediana y 11 robots en la liga grande, variando igualmente el tamaño del campo de juego, dependiendo de la correspondiente liga [25].

D. Liga NaroSot

El torneo de fútbol de nano-robots NaroSot (Nano Robot Soccer Tournament), es una liga similar a MiroSot, con percepción global y control centralizado desde un computador central, utilizando cinco robots de dos ruedas, y sin hardware adicional para patear la pelota. La diferencia está en el tamaño de los robots, ya que su tamaño máximo es de 4 cm x 4 cm x 5.5 cm. El tamaño del campo de juego debe ser de 130 cm x 90 cm [26].

E. Liga AndroSot

El torneo de fútbol de androides AndroSot (Android Soccer Tournament) consiste en equipos de fútbol conformados por robots humanoides, de distintos tamaños dependiendo la categoría, desde los 20 cm para las categorías infantiles hasta mayores de 60 cm para categorías adultas. En las categorías infantiles y juveniles existen torneos para equipos con robots controlados por control remoto o con control centralizado y visión global. En la categoría mayores se juega un torneo para robots con control centralizado, y otro torneo para robots completamente autónomos, es decir con control distribuido. Actualmente, se juegan torneos con 3 y 5 robots por equipo, siendo uno de ellos el arquero [27].

F. Liga RoboSot

El torneo de fútbol de robots RoboSot (Robot Soccer Tournament) se compone de equipos con máximo 3 robots de ruedas, cada uno posee cámaras pero el procesamiento de las imágenes se puede realizar desde un computador central, no obstante robots completamente autónomos también son permitidos, los robots pueden comunicarse entre sí o comunicarse al computador central siempre utilizando comunicaciones inalámbricas. Esto convierte esta liga en una liga de tipo distribuido, o semidistribuido en el caso de que el equipo decida utilizar el computador central para el procesamiento y la toma de decisiones del equipo. El tamaño máximo de los robots es de 35 cm x 35 cm. El tamaño del campo de juego se encuentra entre los 6 m x 4 m. Aparte del torneo, se realizan en esta liga otras competiciones como lo son el desafío en visión, desafío cooperativo, desafío en movimiento y desafío en creatividad [28].

G. Liga SimuroSot

El torneo simulado de fútbol de robots SimuroSot (Simulated Robot Soccer Tournament), consiste en un evento donde equipos simulados en entornos centralizados pueden participar, enfocándose únicamente en temas de estrategia de equipo y planeación de trayectorias, ya que no se centra en problemas como la cinemática de los robots, localización ni visión. Esta liga consiste en un servidor que recrea el ambiente de juego, incluyendo el campo con sus respectivas líneas y metas, los robots de dos ruedas y el balón, siendo los dos equipos los clientes. Las simulaciones son en entornos 3D suministrándoles a los equipos las coordenadas de los jugadores y el balón, donde la programación de la estrategia se realiza desde un sistema de toma de decisiones centralizado, en el cual se programa la estrategia de equipo, controlando el movimiento de los jugadores. Existe una plataforma mediana de 5 jugadores [29] y una plataforma grande con 11 jugadores [30].

H. Liga KheperaSot

El torneo de fútbol de robots KheperaSot (Khepera Soccer Tournament) fue una liga que se compitió hasta el año 2007 y que fue reemplazada por la AmireSot. En esta liga participaban equipos compuestos únicamente por el robot comercial Khepera, un mini-robot autónomo de dos ruedas el cual consta con 8 sensores infrarrojos y una cámara lineal para la detección del balón, las porterías y los oponentes [31].

3.4. Ligas pertenecientes a Robocup

Igualmente, la federación de la Robocopa realiza de manera anual su campeonato mundial de fútbol de robots Robocup World Cup, contando con diferentes ligas que serán explicadas en los siguientes apartados [32]. Durante este torneo se realizan otros eventos como son RoboCup Junior, un proyecto orientado hacia la enseñanza de la robótica en niños y adolescentes, Robocup Home, el cual propone retos orientados a la robótica en el hogar, y Robocup Rescue, el cual presenta desafíos que deben ser solucionados, con referencia al uso de robots para la atención de desastres [33].

A. Soccer Humanoid League

La liga de fútbol de robots humanoides es una liga descentralizada con robots autónomos de forma humanoide, donde cada robot debe procesar su propio sistema de visión, localización y toma de decisiones, no obstante la comunicación entre los robots es permitida. Los sensores deben ser equivalentes a sensores humanos, es decir dos cámaras de vídeo, sensores de sonido, un micrófono con frecuencias equivalentes a la de la voz humana, y sensores de fuerza y presión, así como un acelerómetro. Esta liga es utilizada para investigaciones en diseño de robots, caminata bípeda, localización y visión artificial. Esta liga se divide en tres categorías, la categoría de robots pequeños (KidSize) se juega con robots con altura entre los 40 cm hasta los 90 cm, los equipos constan de 4 jugadores. La categoría de robots medianos (TeenSize) se juega con robots entre los 80 cm y 140 cm, con dos jugadores. La categoría de robots grandes (AdultSize) se juega con robots entre los 130 cm y 180 cm, en esta liga un robot patea el balón y el arquero del equipo oponente protege el arco, posteriormente los roles de los robots se intercambian [34].

B. Soccer Middle Size League

La liga de fútbol de robots de tamaño medio consta de equipos de 6 robots de ruedas, con un tamaño máximo de 50 cm. Los robots son completamente autónomos con percepción local y la posibilidad de comunicarse entre ellos. Es posible el uso de un computador externo para la deliberación de la estrategia, llamado “entrenador”, el cual se comunicaría con los robots de manera inalámbrica. No obstante es de recordar que todo el procesamiento de vídeo y localización debe ser realizado por los robots [35].

C. Standard Platform League

En la liga estándar de fútbol de robots participan actualmente equipos con 5 robots humanoides y completamente autónomos Nao de la empresa Aldebaran Robotics [36], aunque a partir del año 2014 es permitido el uso de un sexto robot que hace las veces de entrenador técnico, obteniendo una visión más completa del juego, y seleccionando estrategias. Estos robots deben operar únicamente con sus propios sensores y actuadores, ninguna clase de modificación en los robots es permitida. No obstante, la comunicación entre robots puede ser utilizada con fines de estrategia de equipo. Esta liga con arquitectura distribuida es muy utilizada para investigaciones en visión artificial, localización, caminata bípeda, cinemática y dinámica de robots, así como en temas de coordinación de robots [37].

D. Soccer Small Size League

La liga pequeña de fútbol de robots corresponde a la liga con la que originalmente se fundó la Robocopa. Esta liga se enfoca en investigaciones orientadas a la cooperación entre agentes, y procesamiento de vídeo para el reconocimiento de objetos. Esta liga cuenta con equipos compuestos por 5 robots de ruedas con un diámetro de 18 cm cada uno y no más altos de 15 cm. Esta liga posee percepción global con una cámara sobre el campo de juego y control centralizado desde un computador externo, el cual reconoce la posición de los jugadores y el balón, transmitiendo las señales de control a los robots por radio frecuencias [38]. Esta es la única liga de tipo centralizado perteneciente a la federación de la Robocopa.

E. Soccer Simulation League

La liga simulada de fútbol de robots de la Robocopa se enfoca en investigaciones aplicadas a la inteligencia artificial y estrategias de coordinación de equipos. La liga se divide en dos subligas, una de ellas es la liga simulada 2D [39], donde equipos con 11 jugadores llamados agentes juegan en un entorno bidimensional representado en un computador central, el cual se comunica con los jugadores en una arquitectura tipo cliente-servidor, esta liga es de tipo distribuida, con agentes autónomos, aunque se permite la comunicación con un “entrenador” para efectos de estrategia. La otra subliga corresponde a la liga simulada 3D, la cual incrementa el realismo del entorno simulado en un ambiente de realidad virtual, utilizando desde el año 2008 un modelo virtual del robot Nao. Además de las características ya comentadas en la liga 2D, como lo es arquitectura descentralizada e información parcial del entorno, es necesario desarrollar comportamientos del robot como el levantarse, patear el balón, correr, entre otros, basados en el modelo cinemático del robot [40].

3.5. Proyecto RobotStadium

Este fue un torneo de simulación en realidad virtual emulando el entorno de la Standard Platform League, realizado hasta el año 2011. En la actualidad esta plataforma se puede descargar y utilizar de manera gratuita utilizando el simulador Webots [41]. Este entorno simula dos equipos con 4 robots Nao cada uno. La arquitectura es completamente descentralizada, siendo cada robot simulado completamente autónomo, aunque se pueden comunicar los robots entre ellos. Los equipos deben programar los comportamientos de los robots a partir de su cinemática, así como realizar los procesos de localización y planeación de trayectoria a partir de visión artificial, utilizando las dos cámaras simuladas que cada robot posee [42].

4. Investigación en temas de fútbol de robots

Como se ha presentado a lo largo de este artículo, el fútbol de robots es utilizado como marco común para la investigación en temas de robótica en general.

4.1. Campos de investigación en el fútbol de robots

En el campo de la visión artificial, se encuentran trabajos sobre reconocimiento de objetos [43] utilizando por ejemplo información HSV para el proceso de reconocimiento, y Redes Neuronales para la estimación de la posición. Se realizan investigaciones también sobre calibración de colores en tiempo real, donde en [44] se utilizan técnicas basadas en umbrales. Se realizan trabajos de fusión sensorial para sistemas de visión distribuida, utilizando el criterio de Grubbs para el reprocesamiento de las señales recibidas por radiofrecuencias, y teoría de Bayes para la fusión de datos [45]. Otros trabajos se enfocaban en la estimación de movimientos de objetos [46], tomando en este caso el balón y buscando estimar su velocidad y posibles colisiones, por medio de algoritmos de regresión Ridge en este caso. Se realizan investigaciones en autocalibración visual, especialmente utilizado en ligas con percepción distribuida combinando por ejemplo, localización Montecarlo con localización por optimización de ajuste [47].

En [48] se presenta el uso de técnicas de fusión sensorial en ligas distribuidas, con el fin de realizar comportamientos colaborativos entre los jugadores. En [49] se presenta una revisión del estado del arte sobre la percepción visual aplicada a la Middle Sized League de la Robocopa, incluyendo el diseño y la calibración de los sistemas de visión, el reconocimiento de objetos, estimación de movimiento de objetos, autolocalización de robots a través de visión artificial, y fusión sensorial cooperativa. Una revisión general sobre la visión artificial aplicada al fútbol de robots es presentada en [50], donde inicialmente se realiza un recuento sobre los sistemas de cámara utilizados en las ligas tanto de FIRA(The Federation of International Robot-soccer Association) como de la Robocopa, tanto de percepción local como global. Posteriormente se analizan los desarrollos de software utilizados para el procesamiento de video, exponiendo sus ventajas y desventajas, describiendo los algoritmos filtro de Kalman, CamShift y flujo óptico.

Otro campo muy importante en el que se desarrollan investigaciones en el marco del fútbol de robots corresponde al tema de locomoción, ya que es necesario que los robots tengan la capacidad de moverse con el fin de realizar sus comportamientos, siendo esto como se explica en [51], parte importante de la arquitectura de equipo, usando en este caso en particular, lógica difusa. Algunos de estos trabajos de locomoción se enfocan en el diseño de algoritmos que controlen la caminata bípeda [52], o diseñar comportamientos a través de la creación de librerías como en el caso presentado en [53]. Algunos trabajos se centran en el diseño de comportamientos como patear el balón [54], incluyendo en su diseño la percepción, el modelo cinemático (humanoide en este caso particular), el hardware y hasta las comunicaciones inalámbricas con otros miembros del equipo, en el caso de las ligas distribuidas. Consecuentemente se realizan también trabajos sobre diseño de trayectorias, en el marco del fútbol de robots utilizando redes neurodifusas por ejemplo [55], o utilizando modelos más clásicos como los métodos diferenciales [56].

También se ha observado que diferentes ligas requieren del diseño de sus propios robots, promoviendo este tipo de investigaciones tanto para robots con ruedas [57], como de tipo humanoide [58], teniendo en cuenta en todos los casos, el modelo cinemático y dinámico del robot, el control de movimiento, módulos de comunicaciones inalámbricas, entre otras consideraciones. Algunos trabajos se enfocan hacia el diseño de arquitecturas de equipos, tanto centralizados [59], como distribuidos [60]. Dentro de este tipo de trabajos orientados hacia arquitecturas, un punto bastante importante es el desarrollado en temas de estrategias de equipo y coordinación de robots [61], enfocándose este último trabajo en arquitecturas distribuidas de equipos que participan en la Standard Platform League de la Robocopa. Otros trabajos de coordinación no se enfocan en estrategias de equipo, sino en comportamientos de colaboración entre agentes, como por ejemplo la realización de pases [62], o la estrategia del arquero [63]. En [64] se presenta una revisión sobre diferentes estrategias de coordinación de equipos de fútbol de robots, esta vez enfocada en las ligas simuladas de la Robocopa, recordando que estas son ligas distribuidas, incluyendo una revisión sobre las tecnologías necesarias para la coordinación, como lo son las comunicaciones, percepción del mundo, y arquitecturas de equipo. En [65] se realiza una revisión completa del diseño de un equipo de fútbol de robots perteneciente a la Liga MiroSot de Fira, envolviendo distintos temas como arquitecturas de equipo, coordinación, diseño de trayectorias, estrategias, sistemas de visión y protocolos de comunicaciones.

Finalmente, como ha sido dicho desde el comienzo, todos estos temas de investigación relacionados en el contexto del fútbol de robots, tiene un claro propósito educativo, con el fin de promover la investigación y la enseñanza de distintos campos relacionados con la robótica [66]. Siendo igualmente un tema que puede ser utilizado por estudiantes de pregrado, con fines de aprendizaje, o herramienta pedagógica para la enseñanza en temas relacionados con la electrónica, la robótica, mecatrónica o programación [67].

4.2. Fútbol de robots en el contexto colombiano

En años recientes grupos de investigación colombianos han empezado a realizar trabajos en el marco del fútbol de robots, obteniendo resultados satisfactorios. Uno de estos casos es el del grupo Bochica, de la Universidad Javeriana y Universidad de los Andes, el cual participó en ediciones de la Small Size League de la Robocopa en el año 2011[68], o el grupo Stox`s de la Universidad Santo Tomás, grupo colombiano que ha estado presente en la Robocopa, y ha participado en sus 4 últimas ediciones en la Small Size League [69], incluyendo el torneo del año 2014, realizado en la ciudad de João Pessoa en Brasil, y quienes han presentado sus trabajos en diferentes eventos académicos, en áreas como planeación de trayectorias [70], o la aplicación de técnicas de aprendizaje de máquina para la predicción de jugadas del equipo oponente [71]. Otros trabajos que se han desarrollado por parte de investigadores de la Universidad de los Andes, están relacionados con arquitecturas de equipo orientadas a la Robocup 2D Simulation League [72], o de ligas humanoides [73]. Se puede observar entonces, que el fútbol de robots presenta un entorno adecuado por diferentes grupos de investigación colombianos, con el fin de desarrollar sus diferentes trabajos de robótica, y presentarlos a la comunidad académica mundial.

5. Conclusiones

El fútbol de robots se ha convertido en un entorno estandarizado y utilizado por distintos grupos de investigación alrededor del mundo para presentar sus trabajos de investigación en diferentes campos relacionados con la robótica, centrándose en dos federaciones que aunque nacieron de forma paralela, llevan dos décadas realizando torneos con distintas categorías, con el fin de ofrecerle a los investigadores diferentes campos donde puedan presentar sus desarrollos ofreciendo un entorno común global.

Igualmente, el fútbol de robots se convierte en una herramienta con el fin de incentivar la enseñanza de la robótica no solamente entre estudiantes de pregrado sino también en un público infantil y juvenil, permitiendo con esto el desarrollo de tecnologías que son muy necesarias en el actual contexto tanto mundial, como colombiano.

Muchos de los temas desarrollados en el entorno de fútbol de robots presentan muy importantes aplicaciones más allá de este ámbito, como por ejemplo en robótica industrial, visión artificial, mecatrónica, programación o sistemas multiagentes. Permitiendo esto que el fútbol de robots se convierta en una herramienta para el aprendizaje en temas relacionados en ingeniería de sistemas, ingeniería electrónica e ingeniería mecatrónica, y al estar estandarizado en competiciones con reglas claras y equipos de diferentes paí-

ses, se garantiza que los resultados de sus investigaciones se encuentren a la vanguardia mundial en temas relacionados con la robótica. Dentro de los campos de la industria donde los temas del fútbol de robots puede ser aplicado, se encuentra la visión artificial para aplicaciones de robótica industrial, en informática industrial, en cinemática y dinámica de robots industriales, generación de trayectoria de robots móviles, colaboración de robots aplicados a la industria, o sistemas multiagentes.

6. Referencias

- [1] F. H. Martínez, F. Martínez, y H. Montiel, «Identificación visual sobre sistema embebido para navegación robótica autónoma», *Ingenium*, vol. 15, n.º 29, 2014, pp. 71-84.
- [2] A. Farinelli, L. Iocchi y D. Nardi, «Multirobot systems: a classification focused on coordination,» *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 34, n.º 5, October 2004.
- [3] H. Kitano, M. Asada, Y. Kuniyoshi, I. Noda, E. Osawai y H. Matsubara, «RoboCup: A challenge problem for AI and robotics,» de *RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I*, Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 1-19.
- [4] Abril 2015. [En línea]. Available: <http://www.fira.net/>.
- [5] Abril 2015. [En línea]. Available: <http://www.robocup.org/>.
- [6] A. K. Mackworth, «On Seeing Robots,» de *Computer Vision: Systems, Theory and Applications*, A. Basu y X. Li, Edits., Singapore, World Scientific Press, 1993, pp. 1-13.
- [7] A. Davis, «Urban search and rescue robots: from tragedy to technology,» *IEEE Intelligent Systems*, vol. 17, n.º 2, 2002. pp. 81-83.
- [8] H. Kitano, M. Tambe, P. Stone, M. Veloso, S. Coradeschi, E. Osawa, H. Matsubara, I. Noda y M. Asada, «The RoboCup synthetic agent challenge 97», de *RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I*, H. Kitano, Ed., Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 62-73.
- [9] T. Gabel y M. Riedmiller, «On Progress in RoboCup: The Simulation League Showcase,» de *RoboCup 2010: Robot Soccer World Cup XIV*, J. Ruiz-del-Solar, E. Chown y P. G. Plöger, Edits., Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 36-47.
- [10] H. Kitano, M. Asada, I. Noda y H. Matsubara, «RoboCup: robot world cup,» *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 5, n.º 3 September 1998, pp. 30-36.
- [11] S. Kalyanakrishnan, T. Hester, M. Quinlan, Y. Bontor y P. Stone, «Three Humanoid Soccer Platforms: Comparison and Synthesis,» de *RoboCup 2009: Robot Soccer World Cup XIII*, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 140-152.
- [12] K.-H. Kim, K.-W. Ko, J.-G. Kim y S.-H. Lee, «The development of a micro robot system for robot soccer game,» de *Robotics and Automation, 1997. Proceedings, 1997 IEEE International Conference on*, Albuquerque, 1997.
- [13] J.-H. Kim y P. Vadakkepat, «Multi-agent Systems: A survey from the Robot-Soccer Perspective,» *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 6, n.º 1, 2000, pp. 3-17.
- [14] X. Xu, S. Li, Z. Ye y Z. Sun, «A survey: RoboCup and the research,» de *Intelligent Control and Automation, 2000. Proceedings of the 3rd World Congress on*, Hefei, 2000.
- [15] P. Riley y M. Veloso, «Recognizing Probabilistic Opponent Movement Models,» de *RoboCup 2001: Robot Soccer World Cup V*, Springer Berlin Heidelberg, 2002, pp. 453-458.
- [16] R. Ros, J. L. Arcos, R. Lopez de Mantaras y M. Veloso, «A case-based approach for coordinated action selection in robot soccer,» *Artificial Intelligence*, vol. 173, n.º 9-10, June 2009, pp. 1014-1039.
- [17] X. Zhang, C. Liu, Q. Yu y Z. Li, «A Identification Method for Robotics Soccer» de *Education Technology and Computer Science (ETCS), 2010 Second International Workshop on*, Wuhan, 2010.
- [18] J. G. Guarnizo, M. Mellado, Y. L. Cheng y A. Norheliena, «Strategy Model for Multi-Robot Coordination in Robotic Soccer» de *Applied Mechanics and Materials*, Malacca, Malasya, 2013.
- [19] J. Atkinson y D. Rojas, «On-the-fly generation of multi-robot team formation strategies based on game conditions,» *Expert Systems with Applications*, vol. 36, n.º 2, April 2009, pp. 6082-6090.
- [20] M. Mellado y K. Skrzypczyk, «Information Fusion in Multi-agent System Based on Reliability Criterion,» de *Vision Based Systems for UAV Applications*, Springer International Publishing, 2013, pp. 207-217.
- [21] Z. Cen and M. Hemami, «Sliding Mode Control of Kicking a Soccer Ball in the Sagittal Plane,» *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, vol. 37, n.º 6, 2007, pp. 1131-1139.
- [22] K.-Y. Tu, P. H. Lin, C. Y. Wu, H. Y. Sun, S. C. Chen y W. C. Lee, «A humanoid robot designed for HuroCup competition,» de *SICE Annual Conference 2010, Proceedings of*, Taipei, 2010.

- [23] U. Witkowski, J. Sitte, S. Herbrechtsmeier y U. Rückert, «AMiRESot – A New Robot Soccer League with Autonomous Miniature Robots,» de *FIRA RoboWorld Congress 2009*, Incheon, 2009.
- [24] S.-W. Park, J.-H. Kim, E.-H. Kim y J.-H. Oh, «Development of a multi-agent system for robot soccer game» de *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, Albuquerque, 1997.
- [25] S.-H. Tsai y Y.-H. Tseng, «A novel color detection method based on HSL color space for robotic soccer competition,» *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 64, n.º 5, 2012, pp. 1291-1300.
- [26] P. Kopacek, M.-W. Han, B. Putz, E. Schierer y M. Wurzl, «NaroSot - nanotechnology in robot soccer» de *A Proceedings Volume from the 12th IFAC Conference*, Saint-Etienne, 2006.
- [27] M.-Y. Shieh, J.-S. Chiou y C.-I. Ko, «Adaptive classification and strategy making system for android soccer games,» de *Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), 2012 4th International Conference on*, Kuala Lumpur, 2012.
- [28] S.-A. Li, M.-H. Hsieh, C.-Y. Ho, K.-H. Chen, C.-Y. Lin y C.-C. Wong, «Task Allocation Design for Autonomous Soccer Robot,» de *16th FIRA RoboWorld Congress, FIRA 2013*, Kuala Lumpur, 2013.
- [29] G. Klančar, B. Zupančič y R. Karba, «Modelling and simulation of a group of mobile robots,» *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 15, n.º 6, July 2007, pp. 647-658.
- [30] Y. Zhang y H. Yang, «A Novel Simulation Platform for Robot-Soccer Games,» de *Computational Intelligence and Industrial Application, 2008. PACIIA '08. Pacific-Asia Workshop on*, Wuhan, 2008.
- [31] N. Keeratipranon, F. Maire y J. Sitte, «Robot Soccer KheperaSot League: Challenges and Future Directions,» de *Proceedings of the 3rd International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment (AMiRE 2005)*, Fukui, 2006.
- [32] H.-D. Burkhard, D. Duhaut, M. Fujita, P. Lima, R. Murphy y R. Rojas, «The road to RoboCup 2050,» *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 9, n.º 2, 2002, pp. 31-38.
- [33] B. X. Li, H. Lu, D. Xiong, H. Zhang y Z. Zheng, «A Survey on Visual Perception for RoboCup MSL Soccer Robots,» *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, n.º 110, 2013, pp. 1-10.
- [34] D. D. Lee, S.-J. Yi, S. McGill, Y. Zhang, S. Behnke, M. Missura, H. Schulz, D. Hong, J. Han y M. Hopkins, «RoboCup 2011 Humanoid League Winners,» de *RoboCup 2011: Robot Soccer World Cup XV*, Istanbul, 2011.
- [35] A. Ahmad y P. Lima, «Multi-robot cooperative spherical-object tracking in 3D space based on particle filters,» *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, n.º 10, 2013, pp. 1084-1093.
- [36] D. Gouaillier, V. Hugel, P. Blazevic, C. Kilner, J. Monceaux, P. Lafourcade, B. Marnier, J. Serre y B. Maisonnier, «Mechatronic design of NAO humanoid,» de *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, 2009.
- [37] B. Coltin, S. Liemhetcharat, C. Mericli, J. Tay y M. Veloso, «Multi-humanoid world modeling in Standard Platform robot soccer,» de *Humanoid Robots (Humanoids), 2010 10th IEEE-RAS International Conference on*, Nashville, 2010.
- [38] J. A. Gurzoni Jr, M. Fernandes Martins, F. Tonidandel y R. A. C. Bianchi, «On the construction of a RoboCup small size league team,» *Journal of the Brazilian Computer Society*, vol. 17, n.º 1, 2011, pp. 69-82.
- [39] L. Mota, N. Lau y L. P. Reis, «Co-ordination in RoboCup's 2D simulation league: Setplays as flexible, multi-robot plans,» de *Robotics Automation and Mechatronics (RAM), 2010 IEEE Conference on*, Singapore, 2010.
- [40] T. Uchitane y T. Hatanaka, «Applying evolution strategies for biped locomotion learning in RoboCup 3D Soccer Simulation,» de *Evolutionary Computation (CEC), 2011 IEEE Congress on*, New Orleans, 2011.
- [41] J. Ibarra Zannatha, L. Figueroa Medina, R. Cisneros Limón y P. Mejía Álvarez, «Behavior control for a humanoid soccer player using Webots,» de *Electrical Communications and Computers (CONIELECOMP), 2011 21st International Conference on*, San Andres Cholula, 2011.
- [42] O. Michel, Y. Bourquin y J.-C. Baillie, «RobotStadium: Online Humanoid Robot Soccer Simulation Competition,» de *RoboCup 2008: Robot Soccer World Cup XII*, Suzhou, 2009.
- [43] I. Awaludin, P. Hidayatullah, J. Hutahaeay y D. G. Parta, «Detection and Object Position Measurement using Computer Vision on Humanoid Soccer,» de *Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2013 International Conference on*, Yogyakarta, 2013.
- [44] J. Bruce, T. Balch y M. Veloso, «Fast and inexpensive color image segmentation for interactive robots,» de *Intelligent Robots and Systems, 2000. (IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on*, Takamatsu, 2000.
- [45] «A robust object recognition method for soccer robots,» de *Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on*, Chongqing, 2008.
- [46] M. Lauer, S. Lange y M. Riedmiller, «Modeling Moving Objects in a Dynamically Changing Robot Application,» de *28th Annual German Conference on AI, KI 2005*, Koblenz.
- [47] H. Lu, X. Li, H. Zhang, M. Hu y Z. Zheng, «Robust and real-time self-localization based on omnidirectional vision for soccer robots,» *Advanced Robotics*, vol. 27, n.º 10, 2013, pp. 799-811.
- [48] G. Corrente, J. Cunha, R. Sequeira y N. Lau, «Cooperative robotics: Passes in robotic soccer,» de *Autonomous Robot Systems (Robotica), 2013 13th International Conference on*, Lisbon, 2013.

- [49] X. Li, H. Lu, D. Xiong, H. Zhang, Z. Zheng, «A Survey on Visual Perception for RoboCup MSL Soccer Robots,» *International Journal for Advanced Robotic Systems*, vol. 10, n.º 110, 2013, pp. 1-10, 2013.
- [50] S. Nadarajah, K. Sundaraj, «Vision in robot soccer: a review,» *Artificial Intelligence Review*, pp. 1-23,
- [51] D. Gu y H. Hu, «Integration of Coordination Architecture and Behavior Fuzzy Learning in Quadruped Walking Robots,» *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, vol. 37, n.º 4, 2007, pp. 670-681.
- [52] C. Iverach-Brereton, J. Baltes, J. Anderson, A. Winton y D. Carrier, «Gait design for an ice skating humanoid robot,» *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, n.º 3, 2014, p. 306-318.
- [53] M. A. Al-Mouhamed y A. Abu-Arafah, «Design of a library of motion functions for a Humanoid robot for a football game,» de *Computer Systems and Applications (AICCSA), 2010 IEEE/ACS International Conference on*, Hammamet, 2010.
- [54] S. Behnke, M. Schreiber, J. Stuckler, R. Renner y H. Strasdat, «See, walk, and kick: Humanoid robots start to play soccer,» de *Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on*, Genova, 2006.
- [55] K. Jolly, R. Sreerama Kumar y R. Vijayakumar, «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*, vol. 23, n.º 6, September 2010, pp. 923-933.
- [56] Z. Weibing, W. Longjun, L. Zaixin y D. Xinqiao, «Research on motion control algorithm for mirosot soccer robot,» de *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2009 IEEE International Conference on*, Guilin, 2009.
- [57] H. Albahal, A. Algabri, S. Alarifi, N. Alsayari, A. Fardoun y K. Harib, «Design of a wheeled soccer robot,» de *Mechatronics and its Applications (ISMA), 2010 7th International Symposium on*, Sharjah, 2010.
- [58] I. A. Sulistijono, O. Setiaji, I. Salfikar y N. Kubota, «Fuzzy walking and turning tap movement for humanoid soccer robot EFuRIO,» de *Fuzzy Systems (FUZZ), 2010 IEEE International Conference on*, Barcelona, 2010.
- [59] N. Lau, L. S. Lopes, G. Corrente y N. Filipe, «Multi-robot team coordination through roles, positionings and coordinated procedures,» de *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, St Louis, 2009.
- [60] S. Behnke, J. Stuckler, M. Schreiber, H. Schulz, . M. Bohnert y K. Meier, «Hierarchical reactive control for a team of humanoid soccer robots,» de *Humanoid Robots, 2007 7th IEEE-RAS International Conference on*, Pittsburgh, 2007.
- [61] J. G. Guarnizo, J. F. Blanes, M. Mellado, J. Simo y M. Muñoz, «A Survey of Team Strategies in Robot Soccer, Focused in Standard Platform League,» Santiago de Compostela, 2012.
- [62] B. Fu, P.-x. Zhang y C.-f. Wang, «A Cooperation Strategy for Shooting in Robot Soccer Competition Based on the Multi-Suppose Tree,» de *2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering*, Harbin, 2012.
- [63] C. E. Prieto, F. Niño y G. Quintana, «A goalkeeper strategy in robot soccer based on Danger Theory,» de *Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE Congress on*, Hong Kong, 2008.
- [64] F. Almeida, N. Lau y L. P. Reis, «A Survey on Coordination Methodologies for Simulated Robotic Soccer Teams,» Proceedings of the 3rd Multi-Agent Logics, Languages, and Organisations Federated Workshops (MALLOW) - Workshop on Multi-Agent Systems and Simulation (MAS&S), volume 627, pp. 483-490, Lyon, France, August 2010. CEUR-WS.
- [65] S. Nadarajah, K. Sundaraj, «A Survey on Team Strategies in Robot Soccer: team strategies and role description,» *Artificial Intelligence Review*, vol. 40, 2013, pp. 271-3004.
- [66] J.-H. Kim, Y.-H. Kim, S.-H. Choi y I.-W. Park, «Evolutionary multi-objective optimization in robot soccer system for education,» *Computational Intelligence Magazine, IEEE*, vol. 4, 2009, n.º 1, pp. 31-41.
- [67] J. K. Archibald y R. W. Beard, «Goal! Robot soccer for undergraduate students,» *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 11, n.º 1, 2004, pp. 70-75.
- [68] «<https://code.google.com/p/bochica-smallsize/>,» Junio 2015. [En línea].
- [69] «www.stoxs.org/index.php/que-es-robocup-2/robocup-2014,» Junio 2015. [En línea].
- [70] S. Rodríguez, E. Rojas, K. Perez, J. López, C. Quintero y J. Calderón, «Fast Path Planning Algorithm for the RoboCup Small Size League,» de *RoboCup 2014: Robot World Cup XVIII*, Joao Pessoa, 2014.
- [71] C. Quintero, S. Rodríguez, K. Perez, J. López, E. Rojas, y J. Calderón, «Learning Soccer Drills for the Small Size League of RoboCup,» de *RoboCup 2014: Robot World Cup XVIII*, Joao Pessoa, 2014.
- [72] J. M. Angel, F. De la Rosa y G. Bravo, «Cooperative architecture for multi-agent systems in robotic soccer,» de *Robotics Symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC)*, Bogota, 2011.
- [73] J. M. Angel, G. E. Bravo C y F. De la Rosa R., «Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA), 2010,» de *Conceptualization of Human Soccer Concepts to Robotic Soccer Architecture*, Morelos, 2010.