



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN AUTOMÁTICA,
ROBÓTICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

**Arquitecturas Centralizadas de Coordinación.
Extrapolación del Fútbol de Robots al Control
de Modo de Operación de Micro-Redes**

TESIS DOCTORAL PRESENTADA POR

José Guillermo Guarnizo Marín

DIRECTOR.

Dr. Martín Mellado Arteché.

Instituto de Automática e Informática Industrial

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Valencia España.

Junio 2016.

A mi madre por todo su apoyo, a Fany por su amor y persistencia.

Agradecimientos

Deseo agradecer al Instituto de Automática e Informática Industrial de la Universitat Politècnica de València y en especial, al profesor Dr. Martín Mellado por su asesoramiento, sus consejos, su apoyo y dedicación durante la realización de este trabajo. Deseo agradecer al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS por su apoyo a través del crédito beca Francisco José de Caldas, sin este apoyo, la realización de este trabajo no hubiera sido posible.

Deseo agradecer de forma muy especial a mi madre, quien gracias a su esfuerzo, dedicación y apoyo me ha permitido alcanzar todos mis sueños y metas. Deseo agradecer a mi padre por todos sus sabios consejos y la educación que me ha brindado y que sin esto tampoco habría podido alcanzar mis sueños y metas en la vida. Deseo agradecer también a mis hermanos Enrique y Marcela, por todo su cariño, apoyo y compañía durante todas nuestras vidas.

Quiero también agradecer de una forma muy especial a mi novia Fany por todo su amor, apoyo, comprensión, y sobre todo por esa gran paciencia que ha tenido a lo largo de esta importante etapa de mi vida.

Deseo agradecerle también a mis compañeros de laboratorio, mis amigos en Valencia, mis amigos en Colombia, y en el lugar del mundo en el que se encuentren, que con sus palabras de ánimo y sus voces de aliento me han apoyado con la realización de este sueño.

Resumen

Arquitecturas de coordinación en sistemas multi-agente representa un tópico importante, ya que en este tipo de sistemas los agentes deben ser organizados con el fin de obtener un objetivo específico. Dentro de este tipo de sistemas el fútbol de robots se presenta como un entorno que ofrece un marco común para realizar investigaciones en temas relacionados con temas de coordinación de equipo. La importancia de este tipo de arquitecturas radica en su aplicación en otro tipo de ambientes que requieran coordinación. Un sistema que permite este tipo de aplicaciones consiste en una micro-red eléctrica aislada, donde se modelan las fuentes de energía distribuida como agentes que deben ser coordinados con el fin de proteger las baterías de los sistemas de almacenamiento de energía, manteniendo la regulación del bus común.

Una forma de conseguir esto es a través de estrategias de coordinación, las cuales permiten asignar roles y comportamientos a los agentes de la forma más adecuada, dependiendo de las condiciones del sistema. Así mismo, también deben presentar comportamientos colaborativos entre los agentes como la realización de pases en el fútbol de robots o la equalización del estado de carga de las baterías, con el fin de obtener mejores resultados.

Una posibilidad para llevar a cabo esta colaboración entre agentes es el diseño de estrategias de coordinación a través de sistemas jerárquicos para la selección de una adecuada táctica. Adicionalmente se debe permitir la asignación de roles y posteriormente la selección de comportamientos de los agentes. Para esto, una alternativa es el uso de Máquinas Jerárquicas de Estado Finito, ya que presentan flexibilidad y adaptabilidad en su programación, siendo fácilmente expandibles a cambios y modificaciones, permitiendo con esto el diseño de estrategias de coordinación de equipo de manera intuitiva acorde con la arquitectura del equipo y los reglamentos de las ligas donde se compite, y a su vez, que permita también el diseño de comportamientos colaborativos entre sus jugadores.

En esta tesis doctoral se proponen estrategias de coordinación para fútbol de robots, mediante la selección de tácticas, la asignación dinámica de roles y la selección de comportamientos, usando Máquinas de Estado Finito, enfocándose en el diseño de arquitecturas de equipo que presentan percepción global y control centralizado, y que permitan un diseño intuitivo dependiendo de las especificaciones de los equipos y de la liga en la que se compite. Estas estrategias deben permitir mayor flexibilidad y adaptabilidad frente a posibles cambios, como por ejemplo en el número de jugadores por equipo, en las dimensiones del campo de juego, o en el reglamento de la correspondiente liga. Igualmente deben poseer robustez ante po-

sibles fallos o perturbaciones, permitiendo también comportamientos colaborativos entre sus integrantes.

En una primera aproximación, se propone una estrategia basada en tácticas, asignación dinámica de roles y selección de comportamientos para equipos de fútbol de robots de percepción global y control centralizado, y utilizando Máquinas Jerárquicas de Estado Finito. Posteriormente se propone una aproximación diagramática de este tipo de estrategias jerárquicas mediante *principle solution*, permitiendo con esto un diseño y modelado mucho más intuitivo, en especial en sistemas que presentan una alta complejidad y con condiciones cambiantes, como lo es el fútbol de robots. A continuación se presenta una arquitectura basada en roles, donde dependiendo de las condiciones ambientales, a cada jugador se le selecciona un rol, el cual se ejecuta llamando a una función, sin necesidad de una táctica específica. A partir de esta función y de las condiciones de juego, se selecciona el comportamiento que el jugador debe ejecutar. A continuación se propone el uso de funciones de sincronización entre las máquinas de estado que seleccionan los comportamientos de los jugadores, con fines de sincronización de comportamientos colaborativos entre jugadores.

Una característica importante de las estrategias presentadas en la presente tesis, es que debe ser adaptable a otro tipo de entornos que requieran coordinación. Dado el reciente impulso que tienen las fuentes renovables de energía, las micro-redes eléctricas han adquirido una fuerte relevancia en el mercado energético actual. Una micro-red puede ser dividida en unidades distribuidas almacenadoras de energía y unidades generadoras de energía. Particularmente cuando una micro-red eléctrica trabaja en modo aislado, una de sus unidades debe encargarse de la regulación de la tensión y la frecuencia del bus común, manteniendo el balance de potencia, y asegurando la carga adecuada de las baterías que conforman la micro-red.

En esta tesis, finalmente se presenta una propuesta para el control del modo de operación de una micro-red aislada, presentando una arquitectura de red como sistema multi-agente, donde las unidades de almacenamiento y generación de energía son los agentes del equipo, y proponiendo una estrategia de control basada en tácticas, roles y comportamientos. Esta arquitectura está basada en las estrategias de fútbol de robots aportadas en esta tesis y las cuales son diseñadas para sistemas con percepción global y control centralizado, que determina los cambios en el modo de operación para las fuentes distribuidas de energía en la micro-red.

Resum

Arquitectures de coordinació en sistemes multi-agent representa un tòpic important, perquè en aquest tipus de sistemes els agents deuen organitzar-se per a obtenir un objectiu específic. Dins d'aquest tipus de sistemes, el futbol de robots es presenta com un entorn que ofereix un marc comú per a realitzar investigacions en temes relacionats amb la coordinació d'equips. La importància d'aquest tipus d'arquitectures radica en la seua aplicació en altre tipus d'entorns que requereixin coordinació. Un sistema que permet aquest tipus d'aplicació consisteix en una micro-xarxa elèctrica aïllada, a on es modelitzen les diferents fonts d'energia distribuïdes com agents que deuen ser coordinats per a protegir les bateries dels sistemes de acumulació de energia, mantenint la regulació del bus comú.

Una manera d'aconseguir això es mitjançant estratègies de coordinació, que permeten assignar papers i comportaments als agents de la millor forma, en funció de las condicions del sistema. Així mateix, també deuen presentar comportaments col·laboratius entre els agents la realització de passes de futbol de robots o la equalització de la carga de les bateries, amb la finalitat d'obtenir millor resultats.

Una possibilitat per a aconseguir aquesta col·laboració entre els agents és el disseny d'estratègies de coordinació mitjançant sistemes jeràrquics per a la selecció d'una tàctica adequada. Addicionalment s'ha de permetre l'assignació de rols i, posteriorment, la selecció de comportaments dels jugadors del equip. Per a açò, una alternativa es l'ús de Màquines Jeràrquiques d'Estat Finit, ja que presenten flexibilitat i adaptabilitat en la seua programació fent que siguin fàcilment expansibles a canvis i modificacions, permetent el disseny d'estratègies de coordinació d'equip de manera intuïtiva relacionant-se amb l'arquitectura de l'equip i el reglament de les lliga en la que estiguin competint, al mateix temps permetent el disseny de comportaments de col·laboració entre els jugadors.

En aquesta tesis doctoral es proposen estratègies de coordinació per a futbol de robots, mitjançant la selecció de tàctiques, l'assignació dinàmica de rols y la selecció de comportaments, utilitzant Màquines d'Estat Finit, enfocant-se en el disseny d'arquitectures d'equip que presenten percepció global y control centralitzat, i que puguin permetre un disseny intuïtiu depenent de les especificacions dels equips y de la lliga en la que es competeix. Aquestes estratègies han de permetre major flexibilitat i adaptabilitat davant possibles canvis com podrien ser el nombre de jugadors per equip, les dimensions del camp o el reglament de la corresponent lliga. D'igual manera han de tindre robustesa davant possibles fallades o pertorbacions, permetent també comportaments d'aspecte col·laboratiu entre els seus integrants.

En una primera aproximació, es proposa una estratègia basada en tàctiques, assignació dinàmica de rols i selecció de comportaments per a equips de futbol robots de percepció global i de control centralitzat, utilitzant Màquines Jeràrquiques d'Estat Finit. Posteriorment es proposa una aproximació diagramàtica d'aquest tipus d'estratègies jeràrquiques mitjançant *principle solution*, permetent d'aquesta manera un disseny i modelat molt més intuïtiu, en especial en sistemes una alta complexitat i condicions canviants, com el futbol de robots.

A continuació es presenta una arquitectura basada en rols en la qual, depenent de les condicions ambientals, cada jugador es seleccionat per a un rol que executa una crida a una funció, sense necessitat d'una tàctica específica. A partir d'aquesta funció i de les condicions del joc es selecciona el comportament que ha d'executar el jugador. A continuació es proposa l'ús de les funcions de sincronització entre les màquines d'estat que seleccionen els comportaments dels jugadors, de manera que els comportaments col·laboratius entre els jugadors es sincronitzen.

Una característica important de les estratègies presentades en aquesta tesi, és que ha de ser adaptable a diferents entorns que requereixen coordinació. Donat el recent impuls que tenen les fonts renovables d'energia, les micro-xarxes elèctriques han aconseguit una gran rellevància en el mercat energètic actual. Una micro-xarxa pot ser dividida en unitats distribuïdes que emmagatzemen energia i unitats que generen energia. Concretament quan una micro-xarxa elèctrica treballa de manera aïllada, una de les seues unitats ha d'encarregar-se de la regulació de la tensió i la freqüència del bus comú, mantenint el balanç de potència i assegurant la càrrega adequada de les bateries que formen la micro-xarxa.

En aquesta tesi, finalment es presenta una proposta per al control del mode d'operació d'una micro-xarxa aïllada, presentant una arquitectura de xarxa com a sistema multi-agent, on les unitats d'emmagatzemament i generació d'energia són els agents del equip, i proposant una estratègia de control basada en tàctiques, rols i comportaments. Aquesta arquitectura està basada en les estratègies de futbol de robots aportades en aquesta tesi i que son dissenyades per a sistemes amb percepció global i control centralitzat, el qual determina els canvis en la forma d'operació per a les fonts distribuïdes d'energia en la micro-xarxa.

Abstract

Coordination architectures in multi-agent systems represent an important topic, due to the agents must be organized in order to get a specific objective. In these kinds of systems, robot soccer is shown as an environment with a common frame for research in team coordination. The importance of these kinds of architectures is that the application in other kinds of systems which require coordination. An islanded micro-grid corresponds to a system which can be modeled as multi-agent system, where the distributed energy resources are modeled as agents are coordinated in order to protect the batteries of the energy storage systems, maintaining the common bus regulation.

One way to do this throughout coordination strategies, which allow assigning roles and behaviors to the agents, depending on the system conditions. Likewise, the agents must show collaborative behaviors such as making passes in robot soccer, or the equalization of the state of charge for distributed energy storage systems, in order to obtain better results.

Multi-agent systems such as robot soccer, that show uncertainties in a hostile environment, require team coordination in order to reach a common goal. One way to achieve this goal is by coordination strategies, which allow role assignment and behavior selection to the players depending on the game conditions. These strategies can present cooperative behaviors among players such as ball passes, in order to obtain better scores against an opponent team.

One alternative is the design of hierarchical coordination strategies for an adequate tactic selection, roles assignment and subsequently behavior selection to the players. To this end, one possibility is to use Hierarchical Finite States Machines, due to those allow more flexible and adaptable programming, with a possibility to make changes or modifications. This allows the design of team strategies by an intuitive way according to the control architecture and the rules and specifications of the league where the team plays, in turn performing collaborative behaviors among the players.

In this doctoral dissertation are proposed coordination strategies to robot soccer teams, based on tactics, dynamical role assignment and behaviors selection through the use of Finite States Machines, oriented to team architectures with centralized control and global perception. These strategies must allow an intuitive design depending on the team specifications and the rules of the league. These strategies must allow flexibility and adaptability to the necessary changes, such as the number of players, dimensions of the playing field or other changes in the league's

rules. The strategies must be show an adequate response to the failures and allow cooperative behaviors among their players.

In a first approximation is proposed one strategy based on tactics, dynamically roles assignment and behaviors selection to robot soccer teams with centralized control and global perception by using Hierarchical Finite State Machine. Thereafter, it is proposed a diagrammatic approach to architecting the coordination strategy of robot soccer team by means of a principle solution. The work sets out from the conceptual design phase, facilitating cross-domain development efforts, where different layers must be interconnected and coordinated to perform multiple tasks. Subsequently, 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 behavior 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. Then, it is proposed synchronization functions between Finite State Machines to behaviors selection, with behaviors synchronization purpose among the players.

One important characteristic of the present strategies is their adaptability to other kind of environments that require coordination. Given the recent support to the alternative sources of energy, islanded microgrids have gained relevance in the actual energy market. The microgrid is divided in renewable energy sources and energy storage systems. Particularly, when the microgrid works in isolated mode, at least one of its units must be responsible of the common bus regulation, maintaining the power regulation and ensuring an adequate level of charge of the batteries.

Lastly, this dissertation presents a structured architecture based on tactics, roles and behaviors for the coordinated operation of islanded microgrids. This grid architecture takes the form of a multi-agent system, and the energy storage and generation units are the team agents. The control strategy is based on the robot soccer strategies presented in this dissertation, which are designed for systems with global perception and centralized control, and in turn determines the changes among operation modes for the distributed energy resources in an islanded microgrid.

Índice

Resumen.....	VII
Capítulo 1. Introducción, Justificación, Objetivos y Organización de la Tesis	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación y Objetivos	5
1.3. Contribuciones	8
1.4. Estrategia de investigación.....	11
1.5. Organización de la tesis.....	13
Capítulo 2. Estado del Arte Sobre Coordinación en el Fútbol de Robots	15
2.1. Introducción	15
2.2. Arquitecturas centralizadas	16
2.2.1. Trabajos en arquitecturas de equipo	16
2.2.2. Trabajos a nivel de comportamientos de agente y comportamientos co- laborativos	24
2.3. Arquitecturas distribuidas	26
2.4. Arquitecturas basadas en roles	33
2.5. Clasificación de los trabajos relatados	35
2.6. Revisión de arquitecturas multi-agente para el control de micro-redes eléctri- cas.....	37
2.7. Conclusiones del capítulo.....	40
Capítulo 3. Propuesta de Estrategia de Fútbol de Robots Basada en Máquina Jerár- quica de Estado para Arquitecturas Centralizadas.....	41
3.1. Introducción	41
3.2. Arquitectura de equipo jerárquica	42

3.2.1. Arquitectura jerárquica	42
3.2.2. Selección de la táctica	45
3.2.3. Asignación de roles	48
3.2.3.1. Roles en táctica defensa	49
3.2.3.2. Roles en táctica contraataque	50
3.2.3.3. Roles en táctica presión	51
3.2.3.4. Roles en táctica ataque	52
3.2.4. Selección de comportamientos	53
3.3. Simulación y resultados	56
3.4. Conclusiones del capítulo	61

Capítulo 4. Diseño de Arquitectura Para la Coordinación de Equipo de Fútbol de Robots con Percepción Global y Control Centralizado Basado en *Principle Solution*

63	
4.1. Introducción	63
4.2. Estructura de equipo de fútbol de robots de arquitectura centralizada	64
4.3. Modelo de estrategia basado en <i>principle solution</i>	67
4.3.1. Funciones	67
4.3.1.1. Mover	68
4.3.1.2. Disparar balón	68
4.3.1.3. Localizar	68
4.3.1.4. Comunicar	68
4.3.1.5. Generar trayectoria	69
4.3.2. Entorno	69
4.3.3. Estructura activa	70
4.3.3.1. Módulo de estrategia de equipo	72
4.3.3.2. Módulo de control	72
4.3.3.3. Módulo de comunicaciones	72
4.3.4. Comportamientos	72
4.3.4.1. Rol portero	75
4.3.4.2. Roles en táctica defensa	76
4.3.4.3. Roles en táctica ataque	79
4.4. Resultados experimentales	82
4.5. Conclusiones del capítulo	85

Capítulo 5. Arquitectura Basada en Roles Aplicada en Equipos de Fútbol de Robots con Control Centralizado

87	
5.1. Introducción	87
5.2. Arquitectura basada en roles	88

5.3. Validación de la estrategia	96
5.4. Conclusiones del capítulo.....	106
Capítulo 6. Sincronización de Máquinas de Estado Para Comportamientos Colaborativos Aplicadas a Estrategias de Equipo de Fútbol de Robots	109
6.1. Introducción	109
6.2. Selección de comportamientos usando funciones de sincronización en Máquinas de Estado Finito	111
6.2.1. <i>Estrategia de equipo</i>	111
6.2.2. <i>Selección de comportamientos utilizando funciones de sincronización para Máquinas de Estado Finito</i>	114
6.2.2.1. <i>Comportamientos del rol defensa activo</i>	115
6.2.2.2. <i>Comportamientos del rol defensa pasivo</i>	116
6.2.2.3. <i>Comportamientos de los roles mediocampista y delantero, y sincronización de roles</i>	117
6.3. Simulación y resultados	121
6.4. Conclusiones del capítulo.....	129
Capítulo 7. Arquitectura de Control Inspirada en Coordinación de Equipos de Fútbol de Robots, Aplicada a Micro-redes Eléctricas Aisladas	131
7.1. Introducción	131
7.2. Modelo de la micro-red	132
7.2.1. <i>Operación de los ESSs</i>	133
7.2.2. <i>Operación de las RESs</i>	134
7.2.3. <i>Operación de la micro-red aislada</i>	136
7.3. Arquitectura centralizada basada n tácticas, roles y comportamientos	137
7.3.1. <i>Arquitectura de la estrategia de control</i>	137
7.3.2. <i>Selección de táctica</i>	140
7.3.2.1. <i>Táctica balance de potencia</i>	141
7.3.2.2. <i>Táctica recorte de potencia</i>	147
7.3.2.3. <i>Táctica desconexión de carga</i>	151
7.4. Descripción de la implementación experimental y resultados	153
7.4.1. <i>Descripción del montaje experimental</i>	153
7.4.2. <i>Resultados experimentales</i>	155
7.5. Conclusiones del capítulo.....	162
Capítulo 8. Conclusiones Generales y Trabajos Futuros	165
8.1. Conclusiones	165
8.2. Resultados en publicaciones.....	168

8.3. Trabajos futuros.....	170
Bibliografía	173

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

1.1 Introducción

En años recientes, los sistemas multi-agente son utilizados en diferentes campos, donde distintos agentes interactúan en aplicaciones complejas en la búsqueda de un objetivo común. Una definición formal de agente es de un sistema computarizado ubicado en un ambiente, con la capacidad de realizar acciones autónomas con el fin de alcanzar objetivos determinados [1]. Los sistemas multi-robot son un caso específico de los sistemas multi-agente, donde los agentes son robots. En estos sistemas es necesario el diseño de arquitecturas que permitan la colaboración entre robots, presentando diferentes aplicaciones como misiones militares, búsqueda y rescate, transporte o aplicaciones industriales [2]. En este aspecto, el fútbol de robots presenta un entorno multi-robot, en un ambiente hostil con incertidumbres dinámicas, donde los robots que necesitan coordinación deben operar en la búsqueda de un objetivo común [3].

Desde los años noventa, el fútbol de robots es usado por diferentes grupos de investigación en todo el mundo para validar sus trabajos relacionados con la robótica, la visión artificial o los sistemas multi-agente [4]. Una de las primeras veces que se mencionó el término fútbol de robots, fue en el ensayo del profesor Allan Mackworth, donde expone los retos que implica la construcción de robots que jueguen al fútbol [5]. No obstante y de forma paralela, el tema era tratado por investigado-

res japoneses, quienes promovían el fútbol de robots para desarrollar avances en inteligencia artificial en el *Workshop on Grand Challenges of Artificial Intelligence*, realizado en Tokio Japón en octubre de 1992 [6].

A partir de las conclusiones obtenidas en el mencionado workshop, un grupo de investigadores en robótica entre los cuales se incluye Minoru Asada, Yasuo Kuniyoshi y Hirokani Kitan, crean una competición de fútbol de robots inicialmente llamada *Japanese Professional Soccer League (J-League)* [7]. Posteriormente grupos de investigación de diferentes países mostraron su interés en participar en dicho proyecto, razón por la cual la competición cambió su nombre a *Robot World Cup Initiative*, y posteriormente se denominó como *Robocup Federation* [8].

Durante la Conferencia Internacional de Inteligencia Artificial (*IJCA-95*) realizada en 1995 en Montreal Canadá fue presentada la primera *Robocup*, que sería realizada en Nagoya Japón durante la conferencia *IJCA-97* en 1997. No obstante, un año antes en 1996 se realizó una *pre-Robocup* durante la Conferencia Internacional de Sistemas y Robots Inteligentes (*IROS-96*) en Osaka Japón [9]. Finalmente la primera *Robocup* fue llevada a cabo en Nagoya Japón, con la participación de 38 equipos de 11 países planteando como meta construir un equipo de robots completamente autónomos, que le puedan ganar al equipo humano campeón mundial en el año 2050 [10]. Desde entonces la *Robocup* se ha venido desarrollando anualmente y de manera ininterrumpida, incluyendo eventos regionales adscritos como lo son el *German Open*, *Iran Open*, *Mediterranean Open*, entre otros.

Por este mismo tiempo en septiembre de 1995 el Profesor Jong-Hwan Kim inicia presentó de manera formal el Comité Organizativo Internacional del *Micro-Robot World Cup Soccer Tournament (MiroSot)* [11], con un torneo inicial realizado en Kaist en Corea del Sur en 1996 y la participación de 30 equipos de 13 países. Dado el éxito de este torneo, fue creada *The Federation of International Robot-soccer Association (FIRA)*, cuyo principal objetivo es promover la investigación de sistemas multi-robot 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 en distintas categorías [12].

A nivel de arquitecturas, las ligas de fútbol de robots pueden dividirse en dos categorías principales. Una primera categoría corresponde a las ligas que poseen percepción global y control centralizado (en adelante se llamarán ligas centralizadas), que se detalla en la Figura 1.1. Estas arquitecturas de tipo centralizado 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 permita la percepción global del

entorno. Las comunicaciones entre el ordenador y los robots se realizan por medios inalámbricos mediante radio frecuencias [13]. En estas arquitecturas se instala una cámara cenital que permite obtener una imagen de video, la cual es procesada desde el ordenador central, permitiendo obtener las coordenadas (x,y) de los jugadores y el balón. Con esta información el sistema de toma de decisiones realiza las acciones de control a cada uno de los jugadores, transmitiendo sus señales de control por radio frecuencias. Los equipos con esta arquitectura en adelante serán llamados equipos centralizados.

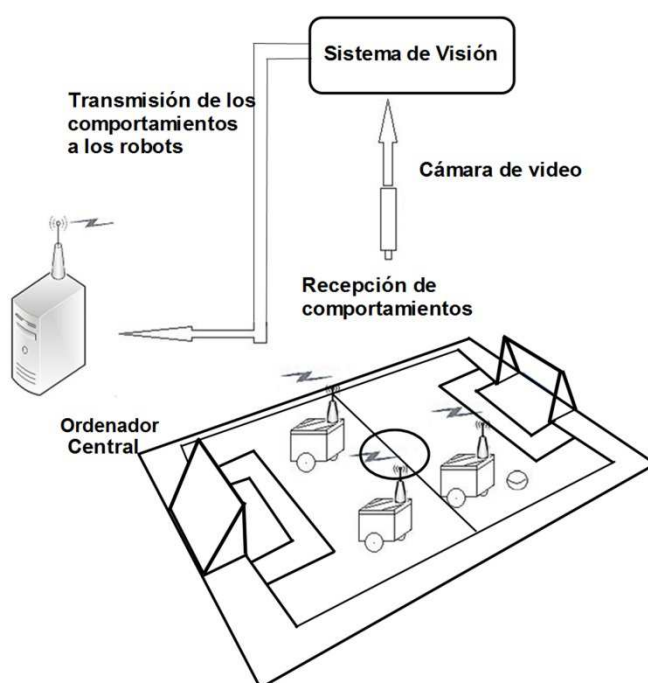


Figura 1.1. Arquitectura de equipos de fútbol de robots con control centralizado.

La segunda categoría consiste en las ligas de percepción local y control distribuido, compuestas por robots completamente autónomos (en adelante llamadas ligas distribuidas). En estas ligas, los robots que conforman los equipos son completamente autónomos con visión local, en algunos casos conectados vía radio frecuencias a un controlador de juegos que determina el inicio y fin de los partidos. El control de los robots es realizado de manera autónoma, la comunicación de los robots es permitida con fines de coordinación. Un ejemplo de arquitectura de este tipo de ligas es presentado en la Figura 1.2. Los equipos con este tipo de arquitecturas serán llamados equipos distribuidos.



Figura 1.2. Arquitectura de equipos de fútbol de robots con control distribuido.

Dentro de las dos federaciones existen ligas centralizadas, para el caso de *FIRA* se tienen por ejemplo *MiroSot*, una liga compuesta por 5 robots de dos ruedas en la liga mediana, y 11 robots de dos ruedas en la liga grande [14]; y en *Simulated Robot Soccer Tournament (SimuroSot 5vs5 League y SimuroSot 11vs11 League)*, la cual es una liga simulada basada en la *MiroSot* [15].

En el caso de la *RoboCup*, la liga centralizada corresponde a la liga *Soccer Small Size League*, igualmente compuesta por 5 robots de dos ruedas [16]. En cuanto a ligas distribuidas, se tienen por ejemplo la liga *Android Soccer Tournament (AndroSot)*, liga de robots humanoides de *FIRA* [17]. O la liga *Soccer Middle Size League*, compuesta por 6 robots autónomos con ruedas, con un tamaño máximo de 50 cm [18]. Y la *Standard Platform League*, compuesta en sus inicios en el año 1998 por 3 robots comerciales cuadrúpedos *AIBO*, cambiando en el años año 2008 por robots comerciales *Nao*, de aspecto humanoide, siendo para el año 2015 5 jugadores permitidos por equipo más un jugador que actúa como técnico. Una característica importante de esta liga es que ninguna clase de modificación en el hardware de los robots es permitida [19]. Estas dos anteriores ligas pertenecen a la *RoboCup*. A nivel de simulación, se tiene la liga *RoboCup Simulation League*, dividida en dos sub-ligas, siendo una de ellas la *2D Simulation League*, donde equipos con 11 jugadores juegan en un entorno bidimensional representado en un ordenador central, el cual se comunica con los jugadores en una arquitectura tipo cliente-servidor, los agentes se pueden comunicar con un agente virtual “técnico”, con fines de estrategia y coordinación [20]. La otra sub-liga corresponde a la *3D*

Simulation League, 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 [21].

Dentro del fútbol de robots, es necesario diseñar arquitecturas que permitan la coordinación de los distintos jugadores que conforman el equipo, ya que al ser el fútbol de robots un sistema multi-agente que presenta incertidumbres en un ambiente hostil [3], los equipos que no posean una buena coordinación entre sus jugadores presentan distintos problemas, como por ejemplo jugadores del mismo equipo que tratan de capturar el balón simultáneamente obstaculizándose, bloqueando a un compañero o descuidando zonas del campo de juego por donde jugadores oponentes pueden atacar [22].

En fútbol de robots, la estrategia es definida como el plan del equipo con el que se pretende ganar el partido, mientras que la táctica se define como la organización del equipo durante un momento dado del partido [23]. Los roles corresponden a la combinación de los comportamientos que realizan los robots junto a su ubicación en el campo de juego, por ejemplo se tienen roles como portero, mediocampista, defensa o delantero. Los comportamientos corresponden a los movimientos que realizan los robots con el fin de alcanzar objetivos muy específicos, como ir por el balón, bloquear un oponente, lanzar o esperar un pase [24]. Dadas las anteriores definiciones, se redefine la estrategia como un conjunto de tácticas compuestas por formaciones de equipo, que diferencian roles entre los jugadores con el fin de guiarlos hacia sus comportamientos [25].

1.2 Justificación y Objetivos

Dado el gran aumento que han tenido aplicaciones relacionadas con sistemas multi-agente tanto en robótica como por ejemplo con el auge de los drones, la robótica industrial, la domótica, los vehículos de guiado automático, robótica espacial o la robótica de servicios, o en otras aplicaciones como el internet de las cosas, aplicaciones para móviles o aplicaciones relacionadas con sistemas eléctricos, se ha creado la necesidad de trabajar en arquitecturas que permitan la coordinación entre los agentes (sean estos robots, unidades de software y otras unidades de hardware) que componen el sistema.

Si bien la naturaleza misma de los sistemas multi-agente es distribuida, arquitecturas con control centralizado son muy utilizadas en este tipo de aplicaciones ya que presentan distintas ventajas frente a las arquitecturas de control distribuidas, como facilitar una percepción global del entorno, realizar cómputos más complejos con menos limitaciones de recursos, permite una mayor tolerancia a fallos [26], también facilita procesos en la deliberación [27], siendo preferiblemente utilizado en sistemas cuyos componentes tengan objetivos comunes y busquen cooperación con el propósito de alcanzar sus metas, o que se facilite su control con la presencia de un operador [28]. Dados estos motivos los sistemas de percepción global y control centralizado siguen presentando importantes ventajas que los mantienen vigentes en las próximas décadas para la investigación en sistemas multi-agente.

En [29] definen la liga de fútbol *MiroSot* como un banco de pruebas adecuado para la investigación en sistemas multi-agente, desde un punto de vista en el que el fútbol de robots se presenta como un buen ejemplo de problemas en la vida real, el cual puede ser moderadamente abstraído, como un problema estándar de los sistemas multi-agente y puede ser utilizado como *benchmark*.

Así mismo, al ser el fútbol de robots un entorno común en la investigación de los sistemas multi-agente, es importante que los resultados obtenidos puedan ser utilizados en otros ambientes con el fin de ofrecer soluciones a problemas existentes. Para esto, las micro-redes eléctricas presentan un gran interés debido al auge que han tenido la integración de fuentes de energía renovables, para suministrar energía en zonas remotas o para mejorar la fiabilidad de las redes de energía locales. Una micro-red puede operar conectada a la red o en modo aislado, haciendo necesario el uso de sistemas de almacenamiento de energía con el propósito de compensar el comportamiento variable de las fuentes de energía renovables. Particularmente, cuando la micro-red se encuentra en modo aislado se hace necesario que alguna de las unidades de almacenamiento de energía asuman la regulación del bus común, con el fin de asegurar que la señal de tensión suministrada sea la correcta. A su vez distintas unidades de almacenamiento de energía conectadas en paralelo pueden cooperar en el proceso de regulación de la micro-red, dependiendo de sus condiciones particulares de operación. En este proceso, es importante regular la energía almacenada en las unidades de almacenamiento evitando tanto sobrecargas como descargas profundas en las baterías, ya que esto afecta el tiempo de vida de las mismas. Para resolver este problema, una arquitectura multi-agente con percepción global y control centralizado puede ser propuesta como una opción para asegurar la correcta y fiable operación de la micro-red eléctrica.

El objetivo principal de esta tesis doctoral es presentar arquitecturas de estrategias de coordinación para equipos de fútbol de robots con percepción global y control centralizado, basadas en Máquinas de Estado para la asignación de roles, que realicen comportamientos colaborativos entre sus jugadores, permitiendo un diseño de la estrategia intuitivo, fácilmente expandible o adaptable a cualquier liga o cambios en el reglamento de juegos. También es importante que estas arquitecturas puedan ser validadas en otro tipo de entornos multi-agente donde coordinación sea requerida.

Los objetivos específicos de la presente tesis son:

1. Conocer las técnicas que resuelven el problema de la coordinación en fútbol de robots. Para eso se realiza una revisión del estado del arte sobre arquitecturas de coordinación de fútbol de robots, presentando una mayor atención a los trabajos basados en arquitecturas de equipo y que presenten percepción global y control centralizado.
2. Proponer una arquitectura de estrategia de fútbol de robots, para ligas con percepción global y control centralizado, la cual utilice Máquinas de Estado para la asignación dinámica de los roles a los jugadores, dependiendo las condiciones de juego, y que presente comportamientos colaborativos durante la realización del juego.
3. Presentar una aproximación sistemática para el diseño de estrategias de coordinación de un equipo en fútbol de robots de una manera intuitiva, incluyendo el diseño de comportamientos colaborativos, orientado a arquitecturas con percepción global y control centralizado.
4. Partiendo de la aproximación anterior, se pretende diseñar arquitecturas para la coordinación de un equipo que no presenten excesiva complejidad en su implementación y que permitan asignación dinámica de roles, coordinación y colaboración entre sus agentes. Estas arquitecturas deben ser fácilmente expandibles y adaptables a otros entornos.
5. Validar las estrategias propuestas mediante simulación, buscando observar la asignación de roles y la realización de comportamientos colaborativos, realizando partidos contra equipos rivales.
6. Proponer una arquitectura con percepción global y control centralizado, basada en tácticas, roles y comportamientos con el propósito de coordinar los cambios en el modo de operación de las fuentes de energía distribuidas, en una micro-red eléctrica aislada.

1.3 Contribuciones

La presente tesis doctoral se realizó en marco del crédito beca Francisco José de Caldas modalidad Doctorado en el Exterior, otorgado por el Departamento de Ciencia Tecnología e Innovación COLCIENCIAS de Colombia. Así mismo dentro del Programa de Doctorado en Automática, Robótica e Informática Industrial, del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universitat Politècnica de València, se ha realizado la estancia de investigación en el Instituto de Automática e Informática Industrial, bajo la supervisión del Profesor Dr. Martín Mellado Arteche, director de la presente tesis doctoral.

En marco de la tesis también se han realizado trabajos de colaboración con el profesor Dr. Cheng-Yee Low, del *Center of Excellence for Humanoid Robots and Bio-Sensing, Faculty of Mechanical Engineering, de Universiti Teknologi Mara, Malaysia*. También se ha realizado una estancia de investigación en *The Department of Energy Technology, Aalborg University*, bajo la dirección del profesor Dr. Josep Guerrero.

Se han propuesto arquitecturas para la asignación de roles y comportamientos en sistemas multi-agente, con una orientación a la coordinación de equipos fútbol de robots con percepción global y control centralizado. Esta estrategia para la coordinación de equipo está basada en Máquinas Jerárquicas de Estado Finito para la selección de tácticas, roles y comportamientos, sin una programación compleja y sin mayores costos computacionales. A partir de esto, se presenta una metodología para el diseño de estrategias de coordinación de fútbol de robots orientada a arquitecturas de equipo de percepción global y control centralizado, mediante *principle solution* para el diseño de sistemas mecatrónicos en entornos multidisciplinarios. Presentando una metodología intuitiva para la selección de roles y el diseño de comportamientos, incluyendo comportamientos colaborativos entre jugadores.

Basada en la arquitectura jerárquica, se presenta una arquitectura de coordinación de equipos basada en roles, para la asignación de roles mediante una función de afinidad. Una vez el rol es asignado mediante el llamado de una función de rol, el jugador ejecuta su correspondiente función, donde mediante una Máquina de Estado se seleccionan los comportamientos adecuados. Esta arquitectura propuesta presenta comportamientos colaborativos y una adecuada coordinación de equipo, mostrando resultados similares a las estrategias jerárquicas con un menor tiempo de desarrollo y mantenimiento de programación, pero permitiendo igualmente el

diseño intuitivo así como su posible ampliación o adaptación de la estrategia de equipo.

Con el fin de facilitar los comportamientos colaborativos, se propone también el uso de funciones de sincronización con fines de coordinación de comportamientos entre jugadores, mediante el uso de Máquinas de Estado para la selección de comportamientos. Dichas funciones son adaptables a las estrategias anteriormente propuestas permitiendo una mejor coordinación de comportamientos entre jugadores.

Finalmente con el propósito de mostrar la viabilidad en el uso de las estrategias propuestas en otro tipo de sistemas la estrategia jerárquica para la selección de tácticas, roles y comportamientos fue adaptada para el control de los modos de operación en una micro-red eléctrica aislada. Para esto, se presenta un modelo de la micro-red como sistema multi-agente, realizando una analogía entre la micro-red y un equipo de fútbol de robots con percepción global y control centralizado. Este modelo multi-agente es basado en agentes de hardware, siendo estos las fuentes distribuidas de energía, tales como fuentes renovables o sistemas almacenadores. A partir de esto, se diseña una estrategia jerárquica basada en la selección de una táctica, y posteriormente asignación de roles y selección de comportamientos por parte de Máquinas Jerárquicas de Estado Finito, para la selección del modo de operación de la micro-red eléctrica, de tal manera que se asegure la regulación del bus común, manteniendo un adecuado nivel de carga en las baterías.

Dentro de los resultados a nivel de publicaciones y participación en eventos obtenidos durante el desarrollo de esta tesis se tiene lo siguiente:

Publicaciones en revistas:

- J. G. Guarnizo, M. Mellado, C-Y. Low, F. Blanes. Architecting Centralized Coordination of Soccer Robots Based on Principle Solution. *Advanced Robotics*, vol. 29, n° 15, pp. 989-1004, 2015. **DOI:**10.1080/01691864.2015.1017534
- J. G. Guarnizo, M. Mellado. Arquitectura Basada en Roles Aplicada en Equipos de Fútbol de Robots con Control Centralizado. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 13, n° 3, pp. 370-380, 2016. **DOI:** 10.1016/j.riai.2016.05.005
- N. L. Diaz, J. G. Guarnizo, M. Mellado, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero. A Robot Soccer Coordination Inspired Control Architecture Applied to Isolated Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016. **DOI:** 10.1109/TPEL.2016.2572262

Publicaciones en conferencias:

- J. G. Guarnizo, J. F. Blanes, M. Mellado, J. Simo, M. Muñoz. A Survey of Team Strategies in Robot Soccer, Focused on Standard Platform League. *XIII Workshop on Physical Agents*, Santiago de Compostela, 2012.
- J. G. Guarnizo, M. Mellado, C-Y. Low, N. Aziz. Strategy Model for Multi-Robot Coordination in Robotic Soccer. *International Conference on Advanced in Mechanical Engineering*, Malacca, Malasia, 2013.
- J. G. Guarnizo, M. Mellado. Sincronización de Máquinas de Estado Para Comportamientos Colaborativos en Fútbol de Robots. *XXXVI Jornadas de Automática*, Bilbao, 2015.

Posters:

- J. G. Guarnizo, M. Mellado. Arquitecturas Para Estrategias de Coordinación Aplicadas al Fútbol de Robots. *I Encuentro de Estudiantes de Doctorado*, Universitat Politècnica de València, 2014.
- J. G. Guarnizo, M. Mellado. Estrategias de fútbol de robots para ligas centralizadas basadas en roles. *II Encuentro de Estudiantes de Doctorado*, Universitat Politècnica de València, 2015.

Participación en otros eventos:

- Participación en la *German Open RoboCup 2012*, Magdeburg Alemania. Equipo Los Hidalgos de la *Standard Platform League*, equipo Perteneciente al Instituto AI2, Universitat Politècnica de València.

Artículos en evaluación. Con los resultados obtenidos en la presente tesis doctoral, actualmente se encuentran en evaluación los siguientes artículos en revistas:

- J. G. Guarnizo, M. Mellado. Robot Soccer Strategy Based on Hierarchical State Machine to Centralized Architectures. *Latin America Transactions, IEEE*. 2016. En revision de correcciones.

La presente tesis resume 6 publicaciones científicas, junto a la presentación de 2 posters en eventos organizados por la Universitat Politècnica de València, y un artículo en revisión de correcciones.

- Publicaciones en revistas indexadas en JCR:

- Artículo en Advanced Robotics. *Robotics* Q4 (22/25).
- Artículo en Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. *Automation & Control Systems* Q4 (49/59); *Robotics* Q4 (23/25).
- Artículo en Transaction on Power Electronics. *Engineering, Electrical & Electronic* Q1 (9/255).
- Tres artículos en Congresos Internacionales con aceptación por revisión.
- 2 posters en *Encuentros de Estudiantes de Doctorado*, Universitat Politècnica de València
- Un artículo en revisión en revista indexada en JCR:
 - Artículo en Latin America Transactions. *Computer Science, Information Systems* Q4 (132/143); *Engineering, Electrical & Electronic* Q4 (218/255).

1.4 Estrategia de investigación

La estrategia de la investigación es importante con el fin de demostrar el rigor, organización y planificación en la elaboración de la investigación realizada. De acuerdo con [30] una estrategia de investigación puede ser vista como como una red de hipótesis asociada a un problema común, presentando ventajas como evitar la duplicidad de temas, encontrar vacíos de conocimiento, mostrar hipótesis comprobadas, ubicar la investigación particular en el interior de un marco conceptual, ayudar con la programación de los plazos de ejecución de la investigación y finalmente orientar a equipos con investigadores de diferentes disciplinas hacia un objetivo común.

La estrategia de investigación utilizada en esta tesis toma elementos de la estratégica metodológica clásica denominada usualmente como estrategia de viabilidad de investigación (*Feasibility Research Strategy*), la cual parte de una hipótesis genérica y conceptual, la cual corresponde al objetivo principal de la tesis y tiene sus orígenes en el estudio previo del estado del arte [31].

Inicialmente se realiza el planteamiento del problema a tratar. Posteriormente se realiza una exhaustiva revisión del estado del arte de estrategias de equipo y arquitecturas de coordinación aplicadas en el fútbol de robots. Posterior a esto se realiza una clasificación del estado del arte consultado, organizándolo dependiendo del tipo de arquitectura (distribuida o centralizada) y la contribución del trabajo realizado. A partir de dicha clasificación, se realiza una especial revisión en los artículos que trabajan sobre la arquitectura en la que se va a centrar esta tesis doctoral

(percepción global y control centralizado), en este punto se determinan alcances y delimitaciones del problema a tratar. Se realiza igualmente una revisión sobre simuladores donde se puedan realizar las distintas validaciones de las arquitecturas propuestas.

Posteriormente se presenta una propuesta de arquitectura, con el fin de realizar una primera aproximación y verificar su viabilidad. A partir de esta primera propuesta, se propone una aproximación sistemática para el diseño de estrategias de coordinación, dentro del problema planteado y de manera delimitada al entorno en el que se está trabajando. Posteriormente, partiendo de la estrategia propuesta, se propone de forma sistemática nuevas estrategias con el fin de mejorar su desempeño o reducir su complejidad.

Para validar estas estrategias, se realizan distintos juegos en simulación contra equipos oponentes, aplicando el reglamento de la liga que corresponda y recopilando datos del juego que permitan comparar el desempeño de los dos equipos a lo largo de los distintos juegos. Estos datos recopilados se eligen teniendo en cuenta los datos utilizados para validar las estrategias que se observaron en la revisión del estado del arte. En los casos que sea posible, se realizará una comparación de los resultados obtenidos con resultados reportados en la literatura de otras estrategias de fútbol de robots, que han sido validadas en partidos contra un oponente que es suministrado por el simulador y que es utilizado en esta tesis como oponente.

Para mostrar una mayor relevancia de las arquitecturas acá propuestas, se ha encontrado un problema real y vigente donde este tipo de arquitecturas ofrecen una solución, siendo este el control del modo de operación de una micro-red eléctrica. Inicialmente se realiza una nueva revisión del estado del arte, enfocada más hacia el uso de sistemas multi-agente en aplicaciones relacionadas con micro-redes y redes eléctricas, con el fin de observar la viabilidad del modelo propuesto en este tipo de sistemas. Una vez encontrado este problema y revisada la viabilidad de la arquitectura propuesta en estos entornos, se realiza el modelo de la arquitectura de coordinación, haciendo una analogía entre el fútbol de robots y la micro-red eléctrica aislada, adaptando la arquitectura propuesta anteriormente a este sistema. Para validar esta estrategia, se realiza una implementación en un montaje experimental que emula una micro-red AC de baja potencia, el cual se encuentra ubicado en el *Microgrid Laboratory* de la Universidad de Aalborg en Aalborg Dinamarca, el cual cuenta con una etapa de simulación en tiempo real implementada en una unidad *dSPACE1006* que permite emular los comportamientos de los modelos de batería y los generadores de energía renovables. En esta implementación, se emulan diferentes situaciones en la que se enfrenta una micro-red real, observando el comporta-

miento en los cambios de los modos de operación de la micro-red y sus correspondientes respuestas. Al ser un trabajo novedoso el cual no ha sido reportado previamente en la literatura, no es posible realizar una comparación de los resultados obtenidos con otros trabajos existentes. No obstante estos resultados sí se pueden comparar con los resultados esperados, lo que permite validar la estrategia propuesta para controlar el modo de operación en la micro-red aislada.

1.5 Organización de la tesis

La tesis se organiza en 8 capítulos de la siguiente forma: En el capítulo 2 se presenta una revisión del estado del arte sobre arquitecturas para la coordinación de equipo de fútbol de robots, así como de sistemas multi-agente aplicados en redes eléctricas. En el capítulo 3 se propone una estrategia para coordinación de equipo de fútbol de robots basada en Máquinas Jerárquicas de Estado Finito, para la selección de tácticas, asignación de roles y selección de comportamientos en equipos con arquitecturas centralizadas. En el capítulo 4 se presenta una metodología para el diseño de estrategias de equipo, basadas en *Principle Solution*, enfocado en arquitecturas con percepción global y control centralizado. En el capítulo 5 se propone una arquitectura de equipo basada en roles. En el capítulo 6 propone el uso de funciones de sincronización de Máquinas de Estado para la coordinación de comportamientos colaborativos entre jugadores. En el capítulo 7 se presenta el modelo de una micro-red eléctrica AC en modo aislado como sistema multi-agente basado en fútbol de robots, adaptando la arquitectura jerárquica propuesta en los capítulos 3 y 4, para el control del modo de operación de la micro-red. Finalmente en el capítulo 8 se presentan las conclusiones y posibles líneas de trabajos futuros.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE SOBRE COORDINACIÓN EN EL FÚTBOL DE ROBOTS

2.1 Introducción

Distintas arquitecturas para la coordinación de sistemas multi-agente han sido adaptadas e implementadas para el fútbol de robots. Un primer trabajo sobre arquitecturas fue presentado en [32], donde se presenta una arquitectura de equipo para la liga *MiroSot* que incluye 3 esquemas de control: el primero para el sistema de toma de decisiones desde el ordenador central, el segundo para el sistema de visión y el tercero para el sistema de control dentro de los robots. A nivel de estrategias de equipo, presentan comportamientos básicos como moverse o evadir obstáculos y a partir de estos diseñan acciones realizadas por los robots como son disparar el balón a una posición, interceptar el balón, llevar el balón o bloquear una acción. Se diseñaron diferentes estrategias donde a cada uno de los 3 jugadores (número de jugadores de la liga *MiroSot* para 1997) se les asigna un rol que puede ser portero, defensa o atacante. Rol que desarrollará en un área predeterminada dentro del campo de juego. Distintas estrategias básicas se asignan por un humano desde el ordenador central basadas en los roles de los jugadores, por ejemplo: asignando un portero, un defensa y un atacante, tres porteros, tres atacantes, etc.

En [33], es presentada una arquitectura para equipos distribuidos que incluye el concepto de sincronización periódica de equipo (*Periodic Team Synchronization*

PTS), con el fin de establecer un protocolo de comunicación para robots autónomos con fines de coordinación teniendo en cuenta restricciones en la comunicación. Durante los tiempos en que se realiza la sincronización entre las comunicaciones de los robots se asignan roles y formaciones de equipo dependiendo de la ubicación del jugador y del balón, del tiempo de juego y del marcador. Una vez las comunicaciones se desactivan, cada jugador dependiendo de su rol y su ubicación en el campo de juego activa comportamientos previamente programados seleccionados mediante condicionales internos en la arquitectura del robot, como se presenta en la Figura 2.1.

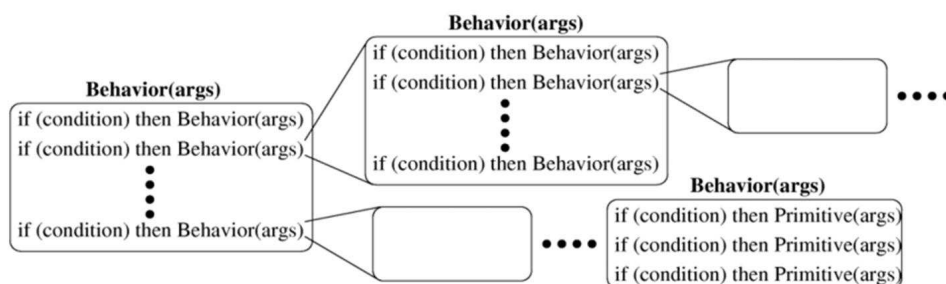


Figura 2.1. Comportamientos en la arquitectura de los agentes miembros del equipo propuesto en [33].

Distintos trabajos se han venido desarrollando sobre coordinación de equipo en fútbol de robots, bien sea tanto para arquitecturas centralizadas como para arquitecturas distribuidas. Algunos trabajos se enfocan en el diseño de arquitecturas de equipo, otros presentan sus aportes en algoritmos para el aprendizaje de máquina o de sistemas inteligentes validándolos en el marco del fútbol de robots, mientras que otros trabajos se centran en el diseño de comportamientos de un jugador o de coordinación de jugadas específicas. En este capítulo se presenta una revisión sobre diferentes trabajos relacionados con el tema de coordinación en fútbol de robots, teniendo en cuenta el tipo de arquitectura de la liga, si es únicamente sobre arquitecturas de coordinación, si el trabajo presenta algoritmos de aprendizaje o si es sobre el diseño de comportamientos coordinados entre jugadores.

2.2 Arquitecturas centralizadas

2.2.1 Trabajos en arquitecturas de equipo

Como se ha mencionado anteriormente, las arquitecturas para las ligas de fútbol de robots con percepción global y control centralizado presentan importantes diferen-

cias con respecto a las ligas distribuidas, por lo que su diseño debe presentar consideraciones diferentes. Entre los primeros trabajos basados en el diseño de arquitecturas centralizadas está [34], proponen una arquitectura para la liga MiroSot basada en niveles. Un nivel 0 que corresponde al control de movimiento de los robots. Nivel 1 corresponde a la navegación y evasión de obstáculos. Nivel 2 corresponde al de estrategia de equipo, incluyendo una capa de coordinación entre jugadores. Los roles son constantes siendo estos el portero, dos defensas y dos atacantes. En otro trabajo realizan una comparación de distintas arquitecturas, una con comportamientos constantes por jugador, otra con roles constantes pero comportamientos variables asignados por áreas de influencia, junto a otras arquitecturas que realizan asignación dinámica de roles dependiendo de condiciones de juego como lo son la ubicación del balón o la ubicación del jugador [35]. Este trabajo fue validado en la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. Estos dos trabajos no implicaban asignación dinámica de roles ni evidenciaban el diseño de comportamientos colaborativos.

Un nuevo tipo de arquitecturas es propuesta en [36], en este trabajo se divide el campo de juego en cuadrículas (*grids*) con el fin de crear vectores de posición de los jugadores y el balón, de tal manera que a partir de un vector actual de posiciones, se crea un vector de posiciones deseado para los jugadores utilizando reglas básicas tipo *if, else*. A través de estas secuencias de vectores de posición, determinan la existencia de *loop strategies* o ciclos de estrategias, que corresponden a secuencias de reglas cíclicas, lo que puede producir que los robots queden atrapados en un bucle infinito de comportamientos, los principales problemas de este tipo de arquitecturas es el diseño de los vectores de posición, el número de reglas generado puede ser excesivamente largo y además se pueden presentar situaciones de juego que no estén programadas. Este trabajo es igualmente implementado en la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. Un ejemplo de arquitecturas que utiliza lógica difusa en ligas centralizadas se presenta en [37], para la selección de acciones en un robot. En esta estrategia los roles son asignados dinámicamente dependiendo de la ubicación de los robots en diferentes áreas delimitadas en el campo de juego. Una vez los roles son asignados, se utilizan las posiciones lineales y angulares de los robots con respecto al balón y la portería oponente como entradas del sistema de inferencia difusa para la asignación de las acciones de los robots. El principal problema del diseño de este tipo de arquitecturas consiste en encontrar los vectores de posición deseados, siendo este proceso dispendioso ya que la cantidad de casos posibles es numerosa, finalmente este problema termina por convertirse en un problema de navegación. La arquitectura está diseñada también para un equipo de la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*.

El uso de Sistemas de Eventos Discretos para el diseño de estrategias de equipo para la *FIRA SimuroSot 5vs5 League* se propone en [38]. En este trabajo utilizan un sistema de toma de decisiones para la selección de comportamientos para 3 tipos de roles (portero, defensa y delantero). Se seleccionan los comportamientos de los robots de manera dinámica basados en las condiciones de juego como la posición de los jugadores o la ubicación del balón en determinadas regiones previamente definidas. Este es un trabajo que se enfoca en presentar un formalismo que permite la interacción entre comportamientos en un sistema de forma más sencilla, permitiendo la adición de nuevos comportamientos sin cambios en los comportamientos actuales, no obstante no es presentado un modelo holístico del sistema.

En [39] utilizan asignación dinámica de roles por medio de teoría de juegos. En esta arquitectura una táctica es seleccionada dependiendo de una función de utilidad que tiene en cuenta la información completa del equipo. Una vez la táctica es asignada se selecciona una correspondiente formación. Posteriormente se propone el uso de funciones de predicción de acciones con el fin de predecir la utilidad de la acción de un rol en una determinada área de influencia, y así seleccionar las tareas que el determinado rol debe realizar. Aunque presentan una estrategia global y la validación se realiza en juegos completos contra un equipo rival que el simulador provee por defecto, se enfocan en comportamientos de ataque. Este trabajo ha sido implementado para la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. Máquinas Jerárquicas de Estado Finito son utilizadas en [40] para la selección de tácticas, asignación de roles y asignación de tareas, como se presenta en la Figura 2.2. Este tipo de diseños es realizado basado en la experiencia de un experto, y toma como transiciones de estado información de juego como la posición, velocidad y ángulo de rotación de los robots, así como la localización del balón. Aunque presentan la relación de conversión de tácticas y el modelo propuesto propone asignación dinámica de roles y tareas, no es detallada la estrategia global de equipo implementada. Este trabajo también ha sido implementado en la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*.

Otro trabajo de arquitecturas basado en cuadrículas (*grids*) se propone en [41], siendo una continuación de [36]. En este modelo partiendo de formaciones actuales generan conjuntos de formaciones deseadas. Como se muestra en la Figura 2.3(a) el campo de juego se divide en cuadrículas mediante un sistema de coordenadas. Como se observa en la Figura 2.3(b) y dependiendo de la posición en un momento dado de los jugadores del equipo propio (*Mine*), del oponente (*Oppo*) y del balón (*Ball*), se establece un vector con las coordenadas de destino de los jugadores (*Dstn*). En este trabajo utilizan un método para generar estrategias de ataque. Usando este tipo de arquitectura, en [42] proponen un algoritmo de optimización

para determinar las reglas, buscando obtener el vector óptimo de destino. En [43] continúan con el proceso de optimización de las reglas utilizando “*space-filling curves*”, esto consiste en un mapa espacial multidimensional donde se crea un camino a través de puntos en un espacio cartesiano discreto. No obstante, estos trabajos siguen presentando alta complejidad para el diseño de las reglas, siendo estas muchas veces numerosas y reduciendo esa situación a un problema de seguimiento de trayectorias. También se presenta alta complejidad en la programación de los generadores automáticos de reglas.

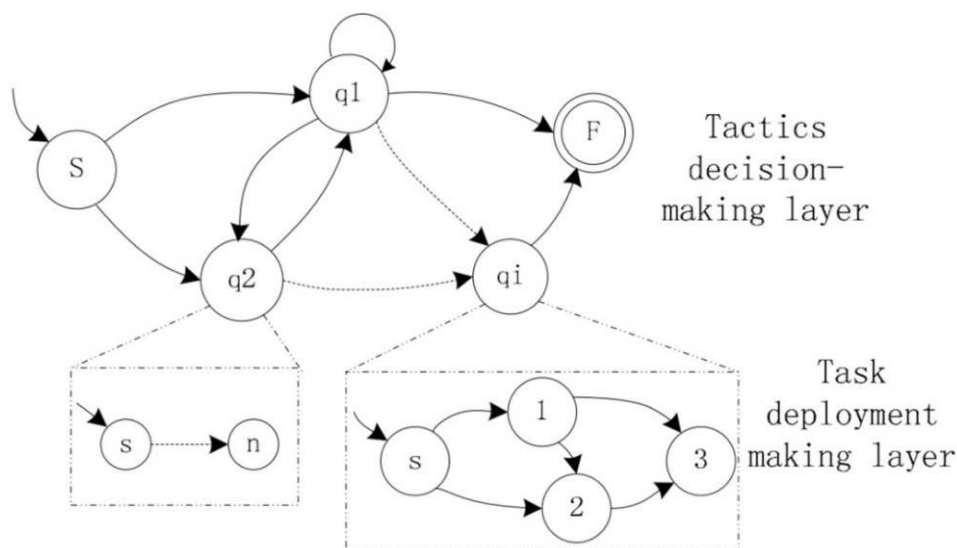


Figura 2.2. Modelo de toma de decisiones basado en Máquinas Jerárquicas de Estado Finito [40].

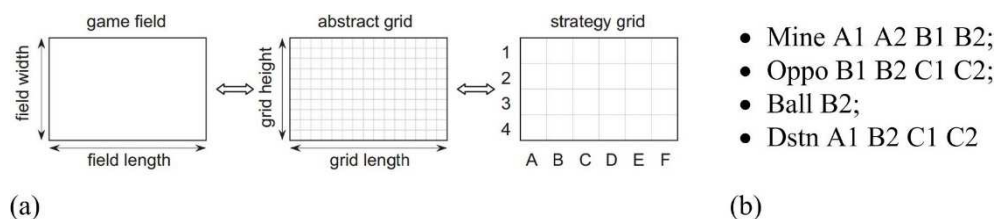


Figura 2.3. (a) Representación del campo de juego. (b) Ejemplo de reglas para la estrategia de equipo [41].

En [44] utilizan un sistema de toma de decisiones auto adaptativo en la asignación de roles y tareas para un equipo de la *FIRA MiroSot League*, a partir de los modelos matemáticos de las misiones que los robots deben desarrollar y de la información ambiental del entorno. Una vez los roles y las tácticas son obtenidas, se asignan formaciones de juego calculando las trayectorias óptimas de los jugadores durante el partido. Aunque este trabajo presenta una arquitectura de equipo, el aporte se enfoca en el diseño de trayectorias óptimas, sin ser adaptable a otro tipo de entornos multi-agente.

Lógica difusa es utilizada en el sistema de toma de decisiones con el fin de asignar formaciones de equipo y roles para equipos de la *FIRA SimuroSot 5vs5 League* [45]. No obstante el objetivo principal de este trabajo es presentar una nueva técnica de aprendizaje *Q-Learning*, que fue validada para entrenar las variables que son utilizadas para la asignación de roles, a partir de aprendizaje basado en la experiencia. En [46] proponen una arquitectura para la *FIRA MiroSot League*, donde utilizan una Red Neurodifusa para la asignación de roles y comportamientos. Esta Red es entrenada mediante algoritmos de aprendizaje de máquina *Q-Learning*. El sistema de toma de decisiones propuesto se divide en 3 sub capas jerárquicas: asignación dinámica de roles, selección e implementación de acciones, como se observa en la Figura 2.4. En este trabajo aunque se presenta una arquitectura jerárquica de equipo el principal aporte se centra en el algoritmo de aprendizaje de máquina, especialmente para el diseño de trayectorias de los robots, siendo este tipo de trabajos no expandibles a otro tipo de arquitecturas multi-agente.

Aprendizaje de sistemas de toma de decisiones mediante técnicas *Q-Learning* es utilizado también en [47] para la selección de estrategias y roles, utilizando un sistema de pesos adquirido inicialmente por experiencias de juego y entrenado mediante técnicas de aprendizaje de máquina, este sistema fue igualmente validado en simulación para la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. En [48] es utilizado aprendizaje por refuerzo combinado con un Modelo BDI, con el fin de obtener una arquitectura cooperativo para la *FIRA SimuroSot 11vs11 League*. En este modelo se busca que los robots logren conseguir una solución óptima común. A los robots se les asignará una posición en el campo de juego, dependiendo de la posición actual de los jugadores que cooperan en una jugada específica y la posición del balón, uno de estos jugadores es manejado por un humano utilizando un joystick. Esta nueva posición asignada es obtenida mediante técnicas de aprendizaje por refuerzo, combinadas con modelos BDI.

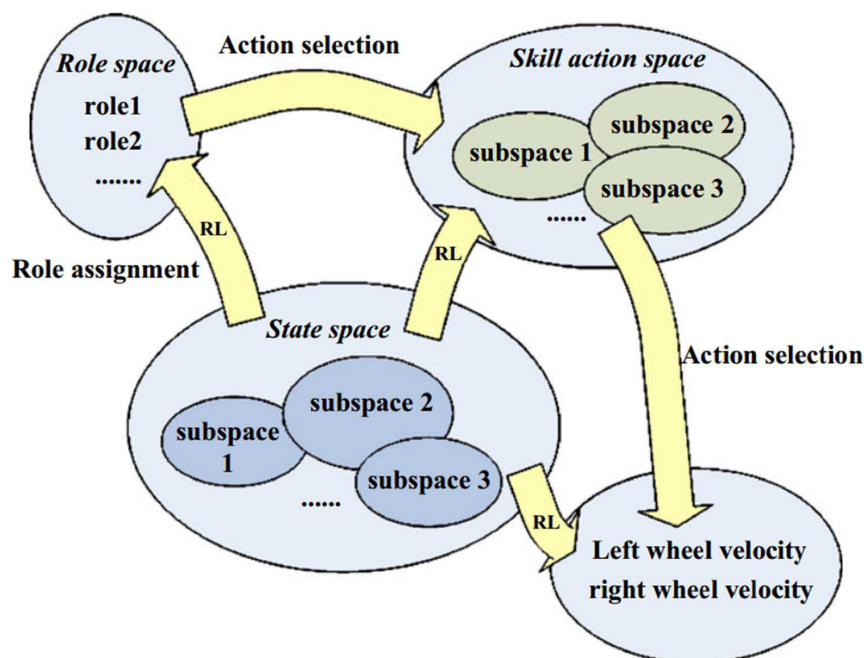


Figura 2.4. Arquitectura de aprendizaje jerárquica del sistema de toma de decisiones presentado en [46].

Otro ejemplo del uso de Redes Neurodifusas para sistemas de toma de decisiones es propuesto en [49], donde se propone un planeador de tareas y selección de acciones para robots de la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. En este trabajo el campo de juego es fusificado sirviendo como entrada de la Red Neuronal que a su vez determina las acciones y ejecuta las tareas que los robots deben realizar, como lo son interceptar el balón, disparar a la portería o realizar un pase. Utilizando el mismo simulador e implementando en hardware para la *MiroSot League*, en [50] proponen un método basado en Redes Neuronales probabilísticas para la predicción de las acciones del equipo oponente, con el fin de seleccionar las acciones a realizar por parte de los jugadores del equipo. Para esto se toma información de juego como la distancia del balón a las porterías, las distancias lineales y angulares del jugador al balón o a jugadores oponentes. Otro trabajo implementado en la *FIRA MiroSot League* [51], presenta una estrategia de coordinación de fútbol de robots para la asignación de tareas y roles, envolviendo técnicas de *Q-Learning* con el fin de determinar la posición que los jugadores deben tomar. Los roles se asignan por criterios como el jugador más cercano al balón y otras situaciones del juego. Nuevamente se observa que estos trabajos se enfocan más hacia el diseño de nuevas

técnicas de aprendizaje de máquinas, validando su trabajo en arquitecturas de fútbol de robots.

En [52] presentan algoritmos de aprendizaje usando Redes Neuronales para la selección de estrategias de juego realizando una abstracción de la información del mundo en vectores. Para este caso, las Redes Neuronales son basadas en mapas auto-organizados. Se realiza un primer aprendizaje off-line basados en la experiencia a priori de un diseñador experto. Posteriormente se realiza un segundo ciclo de aprendizaje on-line, con el fin de afinar el proceso de selección de estrategias. En la Figura 2.5 se observa la arquitectura del sistema de toma de decisiones propuesto, siendo S1 la estrategia ataque, S2 es preparación de ataque, S3 corresponde a preparación defensa y S4 a defensa. Este trabajo también fue implementado en *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. Como continuación del anterior trabajo, en [53] incluyen un modelo de aprendizaje bayesiano en la Red Neuronal para la selección de la estrategia. En estos trabajos se observa nuevamente alta complejidad en su diseño y el aporte principal se enfoca en el diseño de la técnica de aprendizaje de máquina.

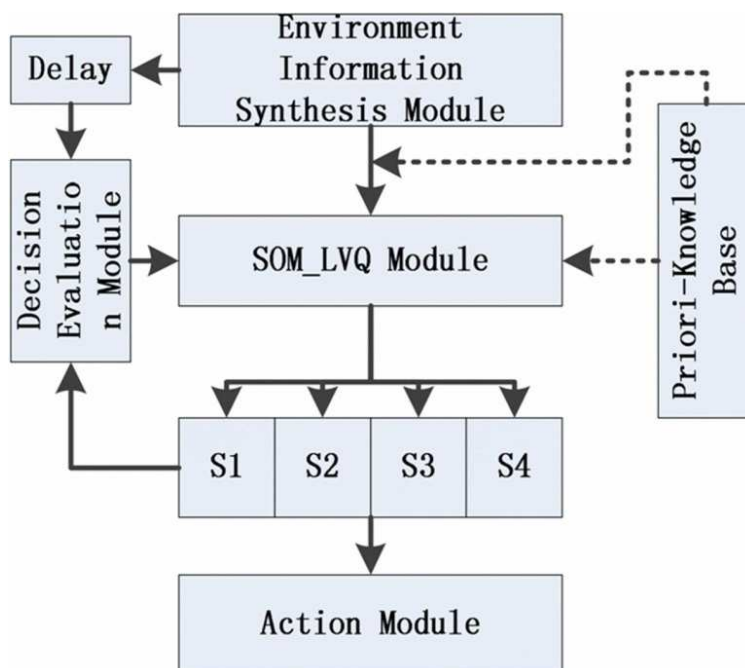


Figura 2.5. Sistema de toma de decisiones para la selección de estrategias propuesto en [52] y [53].

En [54] utilizan cadenas de Markov para el aprendizaje de acciones de los agentes. Toma como conjunto de estados la información sobre la ubicación del balón y los jugadores. Por medio de procesos de decisiones de Markov se entrena el sistema de toma de decisiones para determinar la acción a seguir por parte de los jugadores, como por ejemplo ir a una posición deseada, o disparar el balón a un punto específico, no obstante otros temas como asignación de roles o coordinación no se abordan.

Sistemas Inmunes Artificiales son utilizados como algoritmos evolutivos para el diseño de estrategias en ligas centralizadas. Por ejemplo en [55] se usan para la selección de comportamientos de los jugadores, que combinada con información de juego como la distancia de los jugadores a las porterías y al balón, le asigna a cada jugador un comportamiento como puede ser patear, realizar un pase, disparar a la portería, perseguir el balón, entre otros, no obstante otros detalles de la arquitectura de equipo no se presentan. Este trabajo fue implementado para la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. En [56] combinan holones con Sistemas Inmunes Artificiales para el diseño de una arquitectura jerárquica implementada en la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. Como se puede observar en la Figura 2.6, existe una primera capa donde se selecciona la estrategia a desarrollar durante el juego. La segunda capa utiliza Sistemas Inmunes para la selección de roles a los jugadores. La tercera capa se encarga de la selección de los comportamientos a los jugadores. De acuerdo con la teoría de los Sistemas Inmunes, la selección del anticuerpo que en este caso corresponde al comportamiento del robot deseado, se hace mediante una función de afinidad en la que se le compara con el antígeno, que para este trabajo, corresponde a las condiciones de juego. Aunque se presenta una arquitectura completa, no se detalla el diseño de comportamientos colaborativos y la coordinación de equipo no se evidencia de forma sistemática e intuitiva.

En [57] presentan una arquitectura diseñada para la *FIRA MiroSot League* y *FIRA SimuroSot League*, la cual realiza el proceso de selección de roles por medio de Árboles de Decisión, junto a la selección y ejecución de comportamientos por medio de Sistemas Inmunes Artificiales, entrenado por técnicas de aprendizaje por refuerzo, no obstante colaboración entre agentes no se presenta, siendo además una arquitectura muy restrictiva al fútbol de robots.

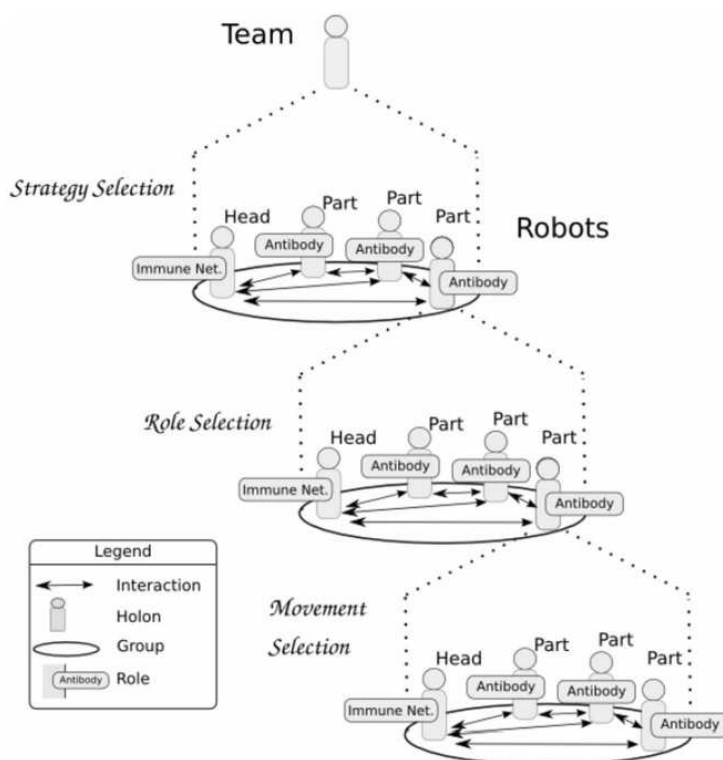


Figura 2.6. Modelo holónico utilizando una arquitectura inspirada en Sistemas Inmunes Artificiales [56].

2.2.2 Trabajos a nivel de comportamientos de agente y comportamientos colaborativos

Otros trabajos sobre fútbol de robots a nivel de ligas centralizadas se enfocan únicamente en comportamientos colaborativos, o a nivel de agente individual y en ningún caso ninguno de estos trabajos presenta una arquitectura completa de equipo. Por ejemplo Redes Neuronales Artificiales son utilizadas en [58] como sistema de toma de decisiones para equipos de la *FIRA MiroSot League* y la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. La función básica de esta Red Neuronal es determinar qué robot debe ir por el balón mientras el otro apoya (este diseño se realiza para equipos con 3 robots, siendo uno el portero, con rol constante). En otra capa de la Red Neuronal se realiza el control de movimiento de los robots. Este trabajo se centra básicamente en la coordinación entre estos dos jugadores. Por ejemplo en [59] es utilizada la lógica difusa para la selección de acciones mediante funciones calculadas a partir de las ubicaciones y el balón. Dichas acciones son interceptar o disparar el balón,

bloquear, barrer el balón o esperar. Si bien el sistema se implementa en una plataforma con robots reales y su correspondiente sistema de localización por colores, el modelo y la validación se realiza únicamente en juegos *1vs1*. Un ejemplo de algoritmos para coordinar pases entre jugadores es presentado en [60]. Implementado en *FIRA SimuroSot 11vs11 League*, propone coordinación para la realización de pases entre jugadores asignando también formación de equipo. Utilizan diagramas de Voronoy para determinar áreas de influencia y asignar formaciones de equipo. Utilizan también el concepto de fuerzas virtuales con el fin de encontrar posiciones óptimas para disparar el balón bien sea para realizar un pase, o tratar de anotar un gol. Si bien presentan una arquitectura de equipo, el artículo finalmente trabaja en el aprendizaje del comportamiento disparar a la portería, teniendo en cuenta la posición lineal y angular del jugador con respecto a la portería oponente.

En [61] y utilizando el simulador de *FIRA SimuroSot 5vs5 League*, utilizan Árboles de Decisión para la coordinación de pases buscando anotar un gol. El algoritmo busca encontrar a un jugador compañero de juego que se encuentre adecuadamente ubicado para anotar un gol, con el fin de realizarle un pase. Esta selección se realiza buscando que el jugador al que se le envíe el balón tenga una trayectoria libre sobre la portería oponente. En la Figura 2.7(a), se calcula una secuencia de pases jugador por jugador, buscando tener una trayectoria libre de oponentes para anotar el gol. En la Figura 2.7(b) se presenta la implementación del flujo de búsqueda para el caso correspondiente.

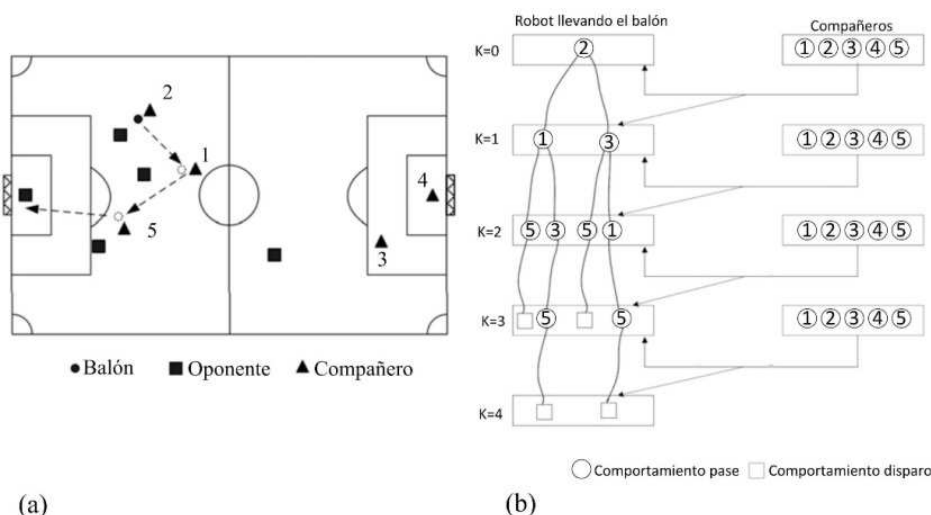


Figura 2.7. (a) Modelo de pases entre los robots. (b) Flujo de implementación del árbol de decisiones correspondiente [61].

En [62] presentan el diseño de un equipo participante de la *RoboCup Small Size League*, enfocándose en la realización de un pase entre dos jugadores, desde el punto de vista de la dinámica del robot, y el control. En [63] dos agentes colaboran en la realización de un pase utilizando Redes Neuronales, sus entradas corresponden a las distancias entre los dos jugadores, y sus distancias tanto lineales como angulares a la portería oponente. La Red Neuronal le suministra al jugador las velocidades lineales y angulares de los jugadores. Para entrenar la red son obtenidos datos de manera experimental a través de situaciones aleatorias de juego, implementado en el simulador de *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. Otros trabajos se centran en el diseño de comportamientos del rol portero como por ejemplo [64], donde utilizan sistemas inmunes artificiales con el fin de diseñar los comportamientos de este jugador en particular. En este trabajo proponen particularmente el uso de la teoría del peligro en inmunología, para determinar la zona de influencia del portero. En [65] proponen una especificación semi-formal para el modelado de la estrategia de equipo para la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. No obstante este trabajo se enfoca es en la estrategia del portero asignada a un jugador con rol constante.

2.3 Arquitecturas distribuidas

En el trabajo desarrollado en [66], se presentan dos aproximaciones para la coordinación de equipo: La primera para las ligas simuladas donde se propone una arquitectura holónica implementada en un equipo de la *RoboCup Simulation League*. Acá un técnico o jugador líder asigna a los jugadores un respectivo rol, teniendo cada rol una posición determinada en el campo de juego con su respectivo comportamiento. En la segunda aproximación la anterior arquitectura se adapta para un equipo de la *Middle Size League* también de la *RoboCup*, enfocándose en el diseño de los comportamientos a nivel de hardware y a los protocolos de comunicación. En [67] se realiza la descripción de una plataforma robótica de un equipo perteneciente a la *RoboCup Middle Size League*. En este trabajo a nivel de estrategia se activa un protocolo de comunicación entre los jugadores cuando se detecte un evento específico por parte de un agente, con el propósito que dicho robot asigne nuevos roles a sus compañeros de juego. Estos trabajos se enfocaban principalmente en el diseño del hardware.

En [68] se utiliza un modelo para la toma de decisiones en un equipo de la *RoboCup 2D Simulation League*. En este modelo el jugador más cercano al balón evalúa funciones para decidir la formación del equipo, de tal manera que esta formación sea defensiva u ofensiva. Igualmente el mismo jugador evalúa funciones

para determinar qué jugador disparará el balón a la portería oponente para anotar un gol. Una vez se selecciona la formación de equipo (esta puede ser 4-4-2, 4-3-3, etc), a cada jugador se le asigna su posición en distintas áreas de acción previamente diseñadas. Para realizar jugadas colaborativas como la realización de pases, se utilizan protocolos de comunicación basados en Árboles de Decisión. Siendo este modelo altamente diseñado para arquitecturas distribuidas, lo que compromete su flexibilidad para arquitecturas centralizadas.

Una arquitectura diseñada para la *Standard Platform League* de la *RoboCup* y utilizando robots autónomos cuadrúpedos *AIBO* es presentada en [69], enfocándose en el diseño de un algoritmo para la asignación de roles. En este trabajo se presenta el concepto de *plays*, los cuales son los planes de un equipo seleccionados ante situaciones específicas, proporcionando un conjunto de roles a los agentes cuando un respectivo *play* es activado. Un *play* se selecciona de acuerdo a una serie de pesos (*weights*), a través de un algoritmo que es ejecutado por un jugador predefinido denominado líder y transmitido por este jugador a sus compañeros de equipo utilizando protocolos de comunicación. Dependiendo de cada rol, los jugadores seleccionan sus respectivos comportamientos, los cuales van a ser realizados en regiones delimitadas en el campo de juego. Este modelo es totalmente dependiente de las comunicaciones entre los robots, las cuales suelen ser muy complejas y requieren un alto costo tanto de programación como de recursos.

En [70] utilizan una arquitectura junto a su aplicación en la *RoboCup 2D Simulation League*. En este trabajo un agente que asume el papel de técnico selecciona a un agente líder entre los jugadores, el cual corresponde al jugador que tiene posesión del balón o en su defecto, el más cercano al mismo. A su vez el técnico selecciona otros jugadores líderes locales, dependiendo su ubicación en un campo de juego dividido en áreas locales, este trabajo se enfoca en el problema de selección de la formación de equipo. Es de resaltar que esta arquitectura fue implementada previamente en aplicaciones de turismo electrónico. En [71] proponen un algoritmo de asignación dinámica de roles para un equipo de la *Standard Platform League* que utiliza robots *AIBO*, en este modelo una función heurística de utilidad periódica es evaluada individualmente por cada robot utilizando la información de la posición transmitida por cada uno de sus compañeros, junto a la posición del balón estimada por medio de su propio modelo global. Una arquitectura de equipo diseñada para la *Standard Platform League* con robots *AIBO* es propuesta en [72], utilizando con fines de coordinación sofisticados protocolos de comunicación. Cada robot selecciona una táctica dependiendo de la actual situación de juego y utilizando información compartida entre los jugadores por medio de Máquinas de Esta-

do Finito. Esta arquitectura es especialmente diseñada para equipos distribuidos, por lo que su extrapolación a arquitecturas centralizada requeriría de requerimientos especiales en su diseño.

Otro trabajo propone arquitecturas basadas en agentes y comportamientos es presentado en [73] e implementado para la *RoboCup 2D Simulation League*. En esta arquitectura se propone igualmente la selección dinámica de un líder, el cual analiza el entorno acorde con la percepción del mundo obtenida y selecciona el plan del equipo, el enfoque de este trabajo es dirigido a arquitecturas distribuidas. Otro trabajo para la misma liga simulada es presentado en [74], donde los roles son asignados mediante *Coordination Graphs* (gráficos de coordinación). Para este proceso el equipo utiliza una función global basada en el equilibrio Nash, la cual se descompone en funciones locales que evalúan cada uno de los agentes, esta función es especialmente diseñada para equipos con percepción local del entorno. En [24] diseñan la arquitectura para un equipo de la *RoboCup Middle Size League*, donde los jugadores crean su percepción del mundo utilizando tanto su sistema de visión artificial, como información por odometría. El equipo cuenta con 3 roles: delantero, ayudante y portero. Junto a un conjunto de comportamientos definidos como mover al balón, mover a las porterías, mover a un punto específico y esperar el balón, disparar el balón, etc. Nuevamente el diseño es especialmente orientado a arquitecturas con percepción local del entorno.

En [75] presentan una arquitectura de equipo validada en la *Standard Platform League* utilizando robots humanoides NAO (en adelante, cuando se referencie esta liga, se asume que utiliza robots NAO a menos que se indique lo contrario). A nivel de hardware la arquitectura se divide en 4 módulos: percepción, actuación, modelado del mundo y control híbrido. A nivel de estrategia de equipo se define una misión como una tarea de alto nivel que es llevada a cabo por los robots agentes, la cual puede ser realizada por uno o varios agentes. Para realizar las misiones los robots realizan comportamientos deliberativos los cuales son seleccionados por los mismos jugadores implicados en la misión, dependiendo del rol y el estado del mundo, utilizando protocolos de comunicación. Para este proceso son utilizadas Máquinas de Estado Finito. Otro caso que presenta el uso de Máquinas de Estado para la selección de comportamientos se presenta en [76], donde los jugadores seleccionan sus comportamientos teniendo en cuenta la percepción del mundo. Los estados corresponden a los comportamientos de los robots, y las transiciones a eventos del juego. Cada robot ejecuta la Máquina de Estado de manera individual, sin el uso de comunicaciones ni sincronización entre jugadores. Este trabajo fue diseñado para un equipo de la *Standard Platform League*, con robots humanoides

Nao, pero simulado en *Webots*. Estos trabajos también se enfocan a resolver problemas que implica la coordinación de equipo en arquitecturas de percepción local y control distribuido, y aunque se pueden tomar elementos para arquitecturas de tipo centralizado, sus aportes presentan un paradigma diferente al propuesto en esta tesis.

Conceptos de fútbol humano son definidos y utilizados en [77], para el diseño de una arquitectura de un equipo de la *RoboCup 2D Simulation League*. Esta arquitectura utiliza 5 niveles de abstracción organizados de forma jerárquica: estrategia, táctica compleja, táctica simple, *plays*, y *skills* (habilidades). Los 3 primeros niveles corresponden a nivel de equipo, y envuelven sincronización entre jugadores y comunicaciones, los dos segundos corresponden a nivel de jugador. Como es habitual en esta liga distribuida, existe un agente técnico, el cual se comunica periódicamente con los jugadores, y es el encargado de seleccionar la estrategia, la cual implica una formación de equipo ante una situación de juego dada. La arquitectura a partir de los niveles de abstracción es planteada para sistemas distribuidos.

Por medio de una metodología definida como *Principle Solution*, que consiste en una aproximación sistemática basada en la especificación de sistemas mecatrónicos, [78] presenta un diseño basado en estrategias, tácticas, asignación dinámica de roles y comportamientos de equipo de fútbol de robots basada en Máquinas de Estado Finito. Este diseño está enfocado para equipos de la *Standard Platform League*, no obstante, su validación se realiza en simulación utilizando *Webots*. Una continuación de este trabajo es presentada en [79], centrándose en la planificación de estrategias de equipo.

En [80] presentan una arquitectura para la planificación de tareas de un robot, utilizando Redes de Petri e implementado en *Webots*. La planificación de tareas es realizada por cada robot de manera individual, permitiendo al agente seleccionar el comportamiento adecuado dependiendo de las condiciones de juego, y teniendo en cuenta las acciones de los demás jugadores percibidas por su percepción local. No obstante, en este trabajo no se envuelven comunicaciones inalámbricas entre los jugadores del mismo equipo. En [81] se presenta la arquitectura de un equipo de la *FIRA RoboSot League*. Esta arquitectura es jerárquica y compuesta por 4 capas independientes. La capa de información le permite al jugador obtener la percepción del mundo. La capa de la estrategia le permite al robot seleccionar su rol. La capa de la táctica es utilizada por el robot para seleccionar un comportamiento. La capa de ejecución constituye el control a bajo nivel para la realización de los comportamientos del robot. No obstante, este trabajo está más enfocado al diseño del hardware de los robots.

En [82] presentan un *framework* diseñado para un equipo perteneciente a la *RoboCup 3D Simulation League*. A nivel de arquitectura de equipo, proponen un sistema deliberativo jerárquico, donde los jugadores a través de votación, seleccionan un jugador llamado “héroe” que se supone debe ser el jugador más cercano al balón. Una vez este jugador es seleccionado, asigna roles y posiciones de juego a los compañeros de equipo. En [83] utilizan *Memory-based Collaborative Filtering Approach* en el vecindario cercano de los jugadores para la selección de la respuesta de equipo para la *RoboCup 2D Simulation League*. La estrategia de equipo se compone de tácticas, que encapsulan los comportamientos colaborativos en términos de formación y *set-plays* (planes flexibles de equipo para una situación específica del juego, que se pueden desarrollar en un intervalo de tiempo específico, para un determinado marcador, o en situaciones determinadas como por ejemplo, cobrar un tiro de esquina). El trabajo se enfoca en el diseño de algoritmos para generar la formación del equipo y para la selección de los *set-plays* en caso que situaciones de juego determinadas ocurran, como por ejemplo un *kick-off* (comienzo de juego), un *free kick* (cuando hay una falta), un *goal kick* (balón fuera del campo de juego), o tiro de esquina.

En el trabajo presentado en [84], se presenta una arquitectura para la coordinación de un equipo de la *Standard Platform League* con robots AIBO, los agentes combinan comportamientos reactivos partiendo de su percepción local del mundo, junto a razonamiento deliberativo con fines de coordinación de equipo. La selección de comportamientos es realizada por Máquinas de Estado Finito basadas en sistemas de inferencia difusos. En [85] utilizan algoritmos evolutivos *Ant Intelligence* para la asignación de posiciones a los jugadores para equipos de la *RoboCup 2D Simulation League*, otros conceptos de coordinación no son trabajados. Una arquitectura de equipo para la *Standard Platform League* utilizando robots AIBO es presentada en [86], basado en las experiencias de un entrenador humano se diseña una Red Neuronal para la selección de roles dependiendo de las actuales condiciones de juego como posiciones de los jugadores y el balón, y el historial de las distintas acciones seleccionadas a lo largo del juego. Esta Red Neuronal se encuentra en el jugador con el rol portero y quien a su vez es el capitán del equipo, seleccionando roles y formaciones, y transmitiendo dicha información a los demás jugadores. Una vez cada jugador tiene su rol, este individualmente selecciona sus comportamientos de juego.

Diseñado para la *RoboCup Middle Size League*, en [87] se propone una arquitectura de equipo donde una estrategia es seleccionada y los roles son asignados desde un ordenador externo, que transmite por vía inalámbrica dicha información a los

jugadores. Posteriormente cada jugador selecciona sus comportamientos de equipo utilizando Árboles de Decisión. Este trabajo se centra en partes como la localización de robots con percepción limitada, y el diseño de la arquitectura desde el punto de vista del hardware de los robots. En [88] utilizan aprendizaje por refuerzo para el diseño de funciones que permiten la asignación dinámica de roles para equipos de la *RoboCup 3D Simulation League*. Cada agente aprende de manera independiente estas funciones ante la presencia de un equipo oponente, basado en su posición y la estimación de la posición del balón. En [89] se propone un algoritmo de aprendizaje modular en un escenario de fútbol de robots dividido en cuadrículas, utilizando un simulador con percepción local y control distribuido. Con esto se busca mejorar la baja tasa de aprendizaje y la mala calidad en la toma de decisiones en los primeros escenarios. No obstante dadas las limitaciones del simulador, los comportamientos de los agentes se limitan a moverse a alguna cuadrícula vecina, pasar el balón a un compañero, o esperar.

En [90] se propone un modelo de aprendizaje híbrido combinando *Case-based Reasoning* con Algoritmos Genéticos con el fin de obtener una estrategia de equipo para la *RoboCup 2D Simulation League*, centrándose en el aprendizaje de formaciones, dependiendo de la formación del equipo oponente. En [91] utilizan una nueva clase de algoritmos evolutivos llamados “Algoritmos Culturales” para el desarrollo de juegos ofensivos y defensivos en estrategias cooperativas de equipo para la *RoboCup 2D Simulation League*. Los Algoritmos Culturales son una clase de modelos computacionales derivados de los procesos de evolución cultural en la naturaleza [92]. Estos trabajos relacionados sobre temas de aprendizaje, se enfocan más en presentar nuevas técnicas de aprendizaje de máquina, utilizando el fútbol de robots como el entorno para la validación de los algoritmos propuestos.

Muchos trabajos se centran en el diseño de comportamientos colaborativos. Por ejemplo en [93] presentan un algoritmo de aprendizaje llamado *Distributed Reinforcement Learning* para el aprendizaje de comportamientos colaborativos como la realización de pases entre dos jugadores en la *RoboCup 2D Simulation League*. En [94] presentan un modelo para la selección de casos para comportamientos coordinados en un equipo de la *Standard Platform League* compuesto por robots AIBO, utilizando *Case-based Approach*. A partir de una librería de casos, seleccionan la respuesta más adecuada utilizando una ponderación de la situación basada en términos como la posición del balón y los jugadores. *Joint Commitments Theory* es implementado mediante el uso de Redes de Petri con propósitos de selección de comportamientos para un equipo de la *Standard Platform League* de la *RoboCup* compuesto por robots AIBO [95]. En este trabajo cada robot tiene su propia Red de

Petri para la selección de sus comportamientos dependiendo de sus condiciones de juego. Los robots utilizan protocolos de comunicación para la sincronización de dos redes con fines de realizar comportamientos colaborativos.

Otros trabajos a nivel de arquitecturas en fútbol de robots se centran a nivel de comportamientos de un solo jugador, por ejemplo en [96] donde trabajan en la selección de comportamientos de un jugador de la *Standard Platform League*. La selección de los comportamientos es realizada mediante Máquinas de Estado Finito, teniendo en cuenta la información obtenida por la percepción local del robot. Otro caso donde se trabaja el concepto de *Set-plays* se presenta en [20] para estructurar comportamientos de equipos de fútbol de robots, implementado en la *RoboCup Middle Size y 2D Simulation League*. La arquitectura de equipo se diseña de tal manera que un agente externo “técnico” inicializa el correspondiente *Set-play*, asignándole y transmitiéndole roles a los jugadores dependiendo de su ubicación en el campo de juego y la distancia al balón. Cada jugador posee su propia secuencia de *Set-plays* a ejecutar, no obstante es el técnico quien envía las señales que activan la transición a la siguiente tarea.

En [97] se presenta el control de comportamientos de ataque de equipo para la *RoboCup 2D Simulation League*, los comportamientos se ejecutan por parte de los robots mediante el uso de Árboles de Decisión. El principal aporte de este trabajo consiste en el uso de una variación del algoritmo *Q-Learning* para el diseño de estos comportamientos. En [98], para equipos de la *RoboCup 3D Simulation League*, se busca aprender por imitación jugadas colaborativas de otros equipos. Utilizando Redes Neuronales para predecir la posición del robot del que se están aprendiendo los comportamientos. En [99] un jugador con el rol ayudante aprende el comportamiento de otros jugadores, con el fin de ayudar al atacante. Este aprendizaje se realiza utilizando distintas técnicas como son Redes Neuronales y Árboles de Decisión, imitando el comportamiento de un jugador controlado por humanos a través de consolas. La implementación se realiza para la *RoboCup 3D Simulation League*. En [100] proponen el aprendizaje de comportamientos como lo son evasión de obstáculos y seguimiento de trayectorias en un robot tipo humanoide utilizado en la *RoboCup 3D Simulation League*, combinando tanto Redes Neuronales como Algoritmos Genéticos. En otro ejemplo utilizan un algoritmo *Q-Learning* combinado con una técnica basada en *Batch Reinforcement Learning* para el aprendizaje de comportamientos en un robot de la *RoboCup Middle Size League*, enfocando estos algoritmos en el control a bajo nivel del robot [101]. En [102], utilizan un algoritmo de *Batch Reinforcement Learning* para el aprendizaje de tareas como rotar alrededor de un punto, disparar el balón o recibir un pase en un

robot de la *RoboCup Middle Size League*. Trabajos como el publicado en [103], se centran en el uso de Árboles de Decisión con el propósito de generar y evaluar comportamientos colaborativos para la realización de pases entre dos jugadores en la *RoboCup 2D Simulation League*. En [104] continúan utilizando el concepto de *set-plays*, esta vez en el contexto de la *RoboCup 2D Simulation League*. Proponen un lenguaje basado en *set-plays* para coordinar la ejecución de comportamientos entre dos jugadores.

2.4 Arquitecturas basadas en roles

Un agente se puede considerar como un sistema que realiza acciones autónomas, percibe el entorno y responde ante los cambios que ocurren en él, es proactivo e interactúa con otros agentes planteando procesos de negociación para lograr un objetivo específico [105]. En los sistemas multi-agente, se tienen sistemas computacionales capaces de tomar acciones de forma autónoma para alcanzar sus objetivos [106]. Dentro de ellos, el fútbol de robots es utilizado por diferentes grupos de investigación alrededor del mundo, como una plataforma común para validar sus resultados en diferentes campos de la robótica.

Los roles juegan un importante papel 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 que requieren especial atención. 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 [107]. 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 [108].

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 [109]; o definiendo la interacción entre objetos, proveyendo una abstracción entre clases y roles [110]. También son frecuentemente utilizadas en sistemas de comunicaciones en arquitecturas jerárquicas para la asignación de recursos en redes virtuales de servicios [111], en seguridad informática o en criptografía para el almacenamiento de información en nube de datos [112]. Otros modelos de roles en sistemas informáticos son presentados en [107]. Arquitecturas basadas en roles también han sido utilizadas en sistemas de potencia, en aplicacio-

nes de distribución energética [113], como también en redes eléctricas por ejemplo para asignar roles y tareas con propósito de predicción y gestión de demanda energética [114]. En [115] se describen diferentes aplicaciones en robótica de enjambre. Arquitecturas basadas en roles son igualmente empleadas para aplicaciones con sistemas inteligentes, para coordinación entre agentes, o aprendizaje [116].

Como lo define [87], 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 [32], presentando una estrategia básica de equipo con 3 roles constantes, quienes deberían desarrollar ciertos comportamientos predefinidos, para un equipo centralizado. A partir de esto, han sido muchos los trabajos sobre fútbol de robots que han sido basados en roles, y aunque han sido ya relatados en el capítulo dos, vale la pena recordarlos.

En [33] realizan una asignación dinámica de roles en un equipo distribuido, introduciendo el concepto de “*Periodic Team Synchronization*”. En [45] se presenta una arquitectura jerárquica con asignación de roles en equipos centralizados, utilizando aprendizaje de máquina para comportamiento de los jugadores. En [69] se diseña una estrategia para robots autónomos basada en juegos (“*Play-based approach*”), donde periódicamente se selecciona un líder quien asigna roles a los jugadores dependiendo de las condiciones de juego. Para ligas distribuidas también [71] propone un algoritmo de selección de roles usando una función de utilidad mediante funciones heurísticas. En [72] 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 [47] se utiliza aprendizaje por refuerzo para la selección de roles, a través de asignación de posiciones.

En [56] presentan una arquitectura jerárquica basada en holones y Sistemas Inmunes Artificiales, para asignar roles y realizar el control de movimientos de cada rol. En [73] se muestra una arquitectura basada en comportamientos de agentes para equipos distribuidos, asignando la formación de equipo mediante un agente líder. En [74] se utiliza gráficos de coordinación para el proceso de asignación de roles en ligas distribuidas. En [86], un jugador capitán utiliza Redes Neuronales para asignar roles, en un ambiente distribuido, partiendo de un conocimiento previo suministrado por un entrenador. En el trabajo presentado en [88] realizan 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. En [104] se realiza la planificación

de estrategias, junto a la asignación y ejecución de roles mediante un lenguaje “set-play”, para ligas de fútbol de robots distribuidas.

2.5 Clasificación de los trabajos relatados

Como se ha podido observar, los trabajos presentados pueden ser clasificados dependiendo el tipo de arquitectura sobre el que está diseñado, si son trabajos orientados al diseño de arquitecturas, a comportamientos puntuales, o si utilizan el fútbol de robots como un entorno para la validación de técnicas que aprendizaje de máquina. En la Tabla 2.1 se presenta una clasificación de los distintos trabajos presentados dependiendo de su arquitectura, modelo computacional utilizado, y sobre si su aporte se presenta a nivel de arquitecturas para la coordinación de equipo o de comportamientos puntuales entre jugadores.

Cent., hace referencia a arquitecturas con percepción global y control centralizado. *Dist.*, se refiere a arquitecturas con percepción local y control distribuido. *Arq.*, se refiere a trabajos sobre arquitecturas completas para la coordinación de equipo. Mientras que *Comp.*, hace referencia a trabajos sobre coordinación de comportamientos puntuales, como la realización de pases, o trabajos sobre un único jugador, como por ejemplo el comportamiento del portero. *F.S.M* se refiere a trabajos que utilizan Máquinas de Estado Finito. *P.N* se refiere a trabajos que utilizan Redes de Petri. *D.T* se refiere a Árboles de Decisión. *F.Z* se refiere a trabajos que utilizan Lógica Difusa. *N.N* hace referencia a trabajos que usan Redes Neuronales. *E.A* hace referencia de trabajos que utilizan algoritmos evolutivos tales como Algoritmos Genéticos, Sistemas Inmunes Artificiales o algoritmos culturales. *M.L* se refiere a otros algoritmos que utilizan trabajos de aprendizaje de máquina, como por ejemplo *Q-Learning*. Como se puede observar, existe una variedad similar de trabajos en arquitecturas tanto centralizadas como distribuidas, siendo la investigación en ligas centralizadas vigente y con relevancia. También y como se ha comentado anteriormente, los trabajos que envuelven técnicas de aprendizaje principalmente se enfocan en presentar nuevos modelos y utilizar el fútbol de robots para su validación.

Arquitecturas centralizadas de coordinación. Extrapolación del fútbol de robos al control de modo de operación de micro-redes

Tabla 2.1. Clasificación de los trabajos del estado del arte.

Referencia	Cent.	Dist.	Arq.	Comp.	F.S.M	P.N	D.T	F.Z	N.N	E.A	M.L
[31] [65] [73] [74] [76] [77] [79]		x	x		x						
[64] [67] [68] [69] [80] [81] [71] [72] [24] [75]		x	x								
[66]		x	x				x				
[70]		x	x		x	x					
[78]		x	x			x					
[82]		x	x		x			x		x	
[83] [89]		x	x							x	
[84]		x	x						x		
[85]		x	x				x				x
[86] [87]		x	x								x
[88]		x	x							x	x
[102]		x		x							
[91] [92] [20]		x		x							x
[95] [101]		x		x			x				x
[93]		x		x		x					
[94]		x		x	x						
[96]		x		x					x		
[97]		x		x			x		x		x
[98]		x		x					x	x	
[99] [100]		x		x							x
[30] [32] [33] [34] [36] [37] [39] [40] [41] [42]	x		x								
[35]	x		x					x			
[38]	x		x		x			x			
[43]	x		x					x			x
[44] [48] [50] [51]	x		x						x		x
[56]	x		x						x		
[45] [46] [49] [52]	x		x								x
[47]	x		x					x	x		
[53]	x		x					x		x	
[54]	x		x							x	
[55]	x		x				x			x	
[57]	x			x				x			
[58] [60]	x			x							x
[61]	x			x					x		
[59]	x			x			x				
[62]	x			x						x	
[63]	x			x	x						

2.6 Revisión de arquitecturas multi-agente para el control en micro-redes eléctricas

La integración de la generación eléctrica distribuida está ganando una mayor atención dada la creciente penetración de las fuentes renovables de energía (*renewable energy sources* RESs), tales como las fuentes fotovoltaicas (*photovoltaic* PV) y los aerogeneradores eléctricos (*wind turbine* WT). En este aspecto, las micro-redes eléctricas han aparecido como una alternativa para la integración de las RES, dado que las micro-redes pueden operar tanto en modo aislado como en modo red interconectada [117]. Cuando la micro-red está en modo de operación red interconectada, la red de suministro determina la frecuencia y la tensión que serán suministradas al bus común. Mientras que las fuentes de energía distribuidas (*distributed energy resources* DERs) pueden tanto absorber como inyectar potencia a la red energizada [118]. Dado esto, la red eléctrica es responsable de mantener el balance de potencia entre la generación y el consumo eléctrico [119].

Por otro lado para el caso de las operaciones en modo aislado, se requiere el uso de sistemas de almacenamiento de energía (*energy storage systems* ESSs) para mantener el balance de potencia tanto en la generación como en el consumo, y corregir comportamientos impredecibles de las RESs. De hecho el control del balance de potencia es uno de los problemas más complejos en micro-redes aisladas, ya que requiere que al menos una de las unidades DERs (ESSs o RESs) debe asumir el rol de formación de red llamado en adelante *grid-forming*, convirtiéndose en responsable de fijar la amplitud y la frecuencia de la tensión de la red local [120]. Para esto, dos principales aproximaciones han sido usadas para definir la tensión y la frecuencia de la red local: Maestro único (una unidad en modo de operación *grid-forming*), o multimaestro (distintas unidades conectadas en paralelo trabajando todas en modo de operación *grid-forming*) [118]. En el modo multimaestro la potencia es distribuida entre las diferentes unidades de almacenamiento de energía las cuales operan en modo de operación *grid-forming* [121]. Normalmente en modo de operación aislado las unidades ESSs asumen el rol de *grid-forming*. En este caso las RESs pueden ser integradas a la micro-red en modo seguidor de red, llamado en adelante *grid-following*, como unidades de seguimiento de red usando control para el seguimiento del punto de máxima transferencia de potencia (*maximum power point tracking* MPPT) con el fin de obtener la máxima potencia posible [122].

Para una operación confiable en una micro-red aislada, es importante definir una adecuada arquitectura de control que permita operaciones coordinadas entre las

DERs. Esta arquitectura de control debe considerar la demanda de la carga, la potencia disponible de las RESs y la capacidad de almacenamiento de energía de los ESSs. De hecho, el estado de la carga (SoC) de un ESSs es probablemente el principal factor para ser tenido en cuenta en el momento de definir la arquitectura de control. Esto se da principalmente para prevenir profundas descargas o sobrecargas de las ESSs, permitiendo con esto prolongar el tiempo de vida de las unidades de almacenamiento de energía, ya que principalmente estas se basan en baterías [123].

En general, arquitecturas centralizadas son propuestas en sistemas donde la generación de potencia de las DERs es planeada para mantener un apropiado nivel de carga de cada uno de los ESSs y proporcionar un adecuado balance de potencia en la micro-red [124]. Uno de los problemas que se tiene es que el uso de múltiples RESs presenta más retos para el balance generación-consumo. Frente a este problema en [125] la generación de potencia desde las RESs es recortada para mantener el almacenamiento de energía dentro de los límites deseados, sin dejar de garantizar el balance de potencia en la micro-red. En otras aproximaciones se ha considerado la operación de los ESSs como fuentes de tensión que siguen curvas características de frecuencia, de esta forma la potencia se ajusta con el estado de carga, es decir el valor del SoC [126]. El principal problema de esta aproximación es una desviación de frecuencia muy grande que se requiere para asegurar la coordinación de las DERs, inclusive en estado estacionario [122]. Adicionalmente, una apropiada carga de los ESSs basada en baterías es críticamente importante para alargar el tiempo de vida y el rendimiento de las mismas.

La mejor forma de cargar las baterías es mediante un procedimiento de dos etapas. Inicialmente limitando la intensidad de corriente, seguido por una carga constante de tensión. En esta última etapa la tensión permanece constante mientras que la corriente de la batería llega a sus niveles de carga máxima [127], adicionalmente, se recomienda que las baterías sean completamente cargadas después de iniciar sus ciclos de descarga. Dado lo anterior una operación de control de corriente es requerida con el propósito de asegurar una carga apropiada de la batería, implicando con esto que los ESSs deben cambiar su modo de operación de fuente de tensión a carga de potencia. Como consecuencia de esto la operación de las otras DERs debe ser coordinada para asegurar que al menos una unidad asuma la regulación de la tensión y la frecuencia del bus común y para esto, estrategias de coordinación distribuidas que consideran los diferentes escenarios de carga de los ESSs han sido considerados en [128], donde la tensión y la frecuencia del bus AC es utilizada para disparar los cambios en los modos de operación de las DERs. Esta propuesta tiene el problema que cualquier perturbación o ruido puede causar cambios abruptos en

los modos de operación, y la tensión y frecuencia deseadas para el bus finalmente no son alcanzadas.

Dado que en años recientes tecnologías basadas en sistemas multi-agente son aplicadas en sistemas de potencia [129], distintos trabajos han utilizado este tipo de arquitecturas en aplicaciones relacionadas con micro-redes eléctricas. Por ejemplo utilizando estrategias basadas en teoría de juegos para integrar la energía producida por redes eléctricas inteligentes [130], con propósitos de integración y resolución de conflictos de intereses alcanzados entre agentes productores y consumidores, y la red de agentes. Una arquitectura basada en sistemas multi-agente para la gestión y predicción en redes eléctricas inteligentes aplicadas a centrales eléctricas virtuales es presentada en [114], incluyendo un conjunto de agentes empotrados combinados con Redes Neuronales para la predicción colaborativa de demandas energéticas desagregadas para usuarios domésticos. En [131] es presentado un algoritmo basado en agentes para la restauración del servicio con almacenadores distribuidos de energía incluyendo detección de fallos, localización y aislamiento. Sistemas Inmunes Artificiales son utilizados como algoritmos de optimización en redes eléctricas inteligentes como se puede encontrar en [132], para asegurar operaciones rentables en el mercado energético. Micro-redes eléctricas han sido modeladas como equipos de agentes cooperativos en [133], donde cada micro-red puede intercambiar potencia con otras micro-redes y la red eléctrica, sin necesidad de un control centralizado. En [134] sistemas multi-agente son usados para la gestión energética y control en una red compuesta por múltiples micro-redes eléctricas. El estándar IEC/ISO 62264 es presentado en [135] para adaptar el control jerárquico y el almacenamiento de energía en micro-redes eléctricas y centrales eléctricas virtuales.

Más específicamente, los sistemas multi-agente han sido usados en aplicaciones relacionadas con el control de la operación en una micro-red eléctrica. Por ejemplo en [136] se propone una estrategia basada en sistemas multi-agente descentralizados, para el control de frecuencia para una micro-red autónoma con restricciones en las comunicaciones. En [137] es presentado un método de control basado en sistemas multi-agente descentralizados para micro-redes aisladas, con una estructura de control de dos capas, siendo la capa baja la de distribución eléctrica, y la capa alta la red de comunicaciones. Un sistema híbrido de control basado en sistemas multi-agente es presentado en [138], para micro-redes inteligentes con el propósito de buscar la seguridad en la tensión suministrada, buscando maximizar beneficios económicos y ambientales.

2.7 Conclusiones del capítulo

Sistemas de percepción global y control centralizado siguen teniendo una importante relevancia en el contexto actual, permitiendo el fútbol de robots un entorno adecuado para la validación de este tipo de arquitecturas y con una amplia variedad de trabajos enfocados en simulación, permitiendo con esto centrar la investigación en las arquitecturas de coordinación, sin tener los problemas relacionados con la visión artificial o el diseño del hardware, siendo estos dos temas que abarcarían completamente una tesis doctoral. Además las simulaciones permiten realizar los diseños y validaciones de las arquitecturas en entornos realistas, permitiendo implementar posteriormente este tipo de diseños en arquitecturas que impliquen hardware, sin que esto implique grandes modificaciones.

Muchos de estos diseños presentados se enfocan en nuevas técnicas o algoritmos de aprendizaje de máquina o en algoritmos de optimización, sin que la arquitectura de coordinación sea el objetivo principal de sus investigaciones. Muchos de los trabajos presentan una muy alta complejidad para su implementación, lo que produce dificultades en el momento de adaptar esta arquitecturas a cambios en el sistema, cambios en las condiciones, variaciones bien sea en el número o en el diseño de los agentes, o en su implementación en otro tipo de entornos multi-agente. Como se ha visto, otro tipo de tecnologías como son las energéticas emergen ante las nuevas realidades sociales, presentando todo un campo donde es necesario el diseño de arquitecturas de control, permitiendo el enfoque como sistema multi-agente. Este tipo de sistemas requieren de investigación en temas relacionados con la coordinación, y si bien trabajos en optimización y aprendizaje de máquina son importantes, en sus primeras etapas requiere enfocarse en el diseño de las arquitecturas de coordinación entre sus componentes.

Dado lo anterior, se plantea la necesidad de desarrollar arquitecturas multi-agente con percepción global y control centralizado que permitan flexibilidad y adaptabilidad, que puedan ser diseñadas de manera intuitiva y sin un alto costo computacional, permitiendo coordinación entre sus agentes y el diseño de comportamientos colaborativos, y que puedan ser adaptadas en diferentes sistemas como lo es el fútbol de robots u otros entornos que requieran coordinación entre sus componentes, con una percepción global y control centralizado. Encontrando en la coordinación del modo de operación de una micro-red eléctrica aislada una problemática actual, donde este tipo de arquitecturas puedan ofrecer una solución adecuada.

CAPÍTULO 3

PROPUESTA DE ESTRATEGIA DE FÚTBOL DE ROBOTS BASADA EN MÁQUINA JERÁRQUICA DE ESTADO PARA ARQUITECTURAS CENTRALIZADAS

3.1 Introducción

Como se explicó en secciones anteriores, el diseño de arquitecturas para equipos con percepción global y control centralizado requiere una consideración diferente con respecto a las arquitecturas distribuidas, y si bien han sido presentados distintos trabajos con fines de coordinación de equipo para ligas centralizadas, estos trabajos presentan complejos algoritmos para su diseño haciendo difícil su adaptación a nuevos jugadores, nuevas ligas o nuevos reglamentos; o se enfocan en el diseño de algoritmos de aprendizaje sin centrarse en el diseño propio de la arquitectura de equipo; o en otro caso diseñan comportamientos de roles o jugadas muy específicas. En este capítulo se presenta una arquitectura de equipo de fútbol de robots basada en una Máquina Jerárquica de Estado Finito para selección de tácticas, selección de comportamientos y acciones de control a bajo nivel, envolviendo el concepto de un “técnico virtual” para el proceso de asignación de roles. En esta estrategia una táctica específica es seleccionada por la Máquina Jerárquica de Estado Finito dependiendo de la posición del balón y los jugadores. Una vez la táctica es seleccionada, los roles son asignados a los jugadores dependiendo de su posición en el campo de juego, siendo este proceso realizado por un agente virtual llamado técnico.

Cuando los roles son asignados, cada jugador ejecuta un comportamiento específico hasta que las condiciones de juego cambien, una nueva táctica es seleccionada, y nuevos roles son asignados. Esta arquitectura es diseñada para equipos de fútbol de robots con un sistema central de toma de decisiones y percepción global, y es simulada utilizando robots diferenciales de dos ruedas, mediante el uso del simulador Webots.

La propuesta presenta como ventajas una sencilla programación e implementación, sin mayor complejidad y fácilmente adaptable a cualquier clase de lenguaje de programación. Así mismo actualizar la estrategia con nuevos cambios o ampliarla a más jugadores no requiere significativos ajustes. Por otro lado esta estrategia es fácilmente adaptable a otro tipo de entornos, bien sean otras ligas de fútbol de robots, u otros ambientes de tipo multi-agente, para distintas aplicaciones de la ingeniería. Con esto se busca presentar un diseño de estrategia intuitivo, fácilmente adaptable, sin que requiera excesiva complejidad en el momento de su programación e implementación.

3.2 Arquitectura de equipo jerárquica

3.2.1 Arquitectura jerárquica

Como se ha mencionado en secciones anteriores, las Máquinas de Estado son frecuentemente utilizadas en fútbol de robots como alternativas para el diseño de estrategias de equipo. En este capítulo se propone un sistema de toma de decisiones basada en una Máquina Jerárquica de Estado Finito, la cual es dividida en distintos niveles. El primer nivel, que es el más alto es presentando en la Figura 3.1, donde una Máquina de Estado selecciona la táctica desde un conjunto de n predefinidas tácticas $T=\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, utilizando las condiciones ambientales Ev como transiciones.

Como se muestra en la Figura 3.2, una vez la táctica es seleccionada el segundo nivel es activado; en este nivel un agente virtual llamado técnico asigna un rol a cada jugador. Los jugadores con sus respectivos roles ejecutan sus comportamientos $B=\{b_1, b_2, \dots, b_k\}$, controlado por un nivel más bajo de la Máquina de Estado, utilizando las condiciones ambientales St como transiciones. El control de los comportamientos es realizado por la capa más baja de la Máquina de Estado.

El técnico mide las condiciones ambientales de forma periódica, cuando estas condiciones cambian, una nueva táctica es seleccionada y un nuevo conjunto de roles es asignado a los jugadores. Un diagrama del modelo propuesto es presentado en la

Figura 3.3. Una vez la Máquina de Estado selecciona la táctica, un agente virtual llamado “técnico” asigna un conjunto de roles $R=\{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ a un número finito de agentes $A=\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ teniendo en cuenta que existe el mismo número de agentes y roles, de tal manera que cada agente debe tener su rol asociado, sin repetir ninguno de los roles. Existe un conjunto de comportamientos $B=\{b_1, b_2, \dots, b_k\}$, que serán ejecutados por los agentes. A cada rol r le ha sido asociado uno o más comportamientos que serán ejecutados por un agente a en el partido, dependiendo de las condiciones del mismo. Existe un conjunto de características $G=\{g_1, g_2, \dots, g_p\}$ que describen las condiciones ambientales. En el más alto nivel de la Máquina de Estado Finito se usa el conjunto G para seleccionar T y posteriormente el técnico C usa el conjunto G para asignar R a A . Posteriormente, la segunda capa de la Máquina de Estado Finito selecciona un comportamiento b_k para que sea ejecutado por cada agente a . El control de movimiento de los robots es implementado en la capa más baja de la Máquina de Estado.



Figura 3.1. Primer nivel de la Máquina Jerárquica de Estado Finito para el sistema de toma de decisiones. Este nivel selecciona la táctica.

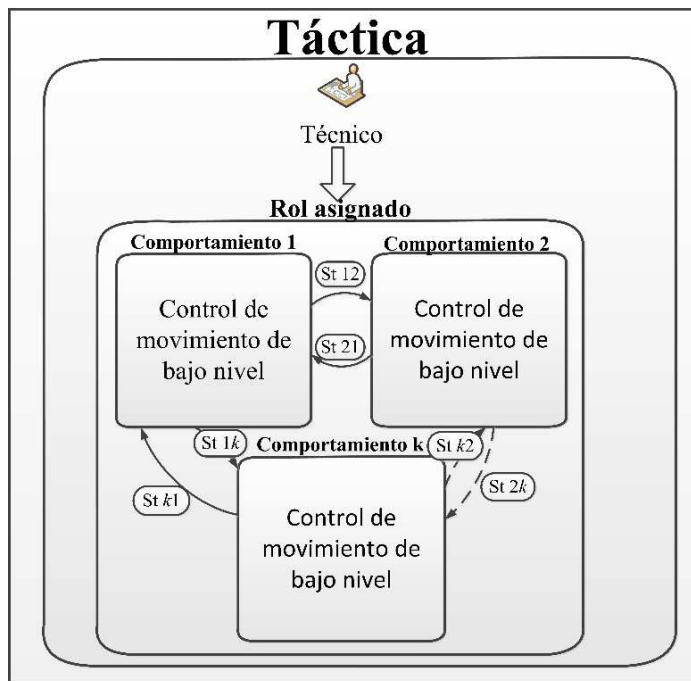


Figura 3.2. Niveles de asignación de roles y selección de comportamientos.

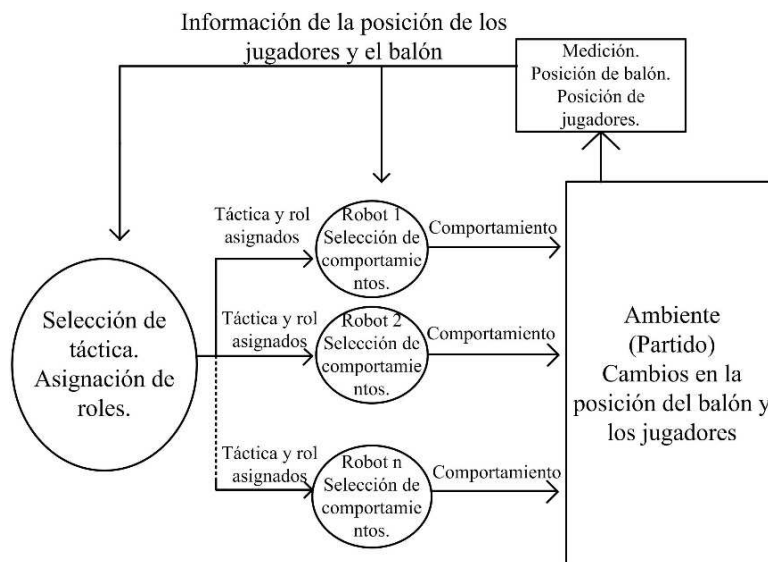


Figura 3.3. Diagrama de bloques de la estrategia propuesta.

El sistema de selección se ejecuta mediante el algoritmo 3.1.

ALGORITMO 3.1. SISTEMA DE DECISIONES DE LA ESTRATEGIA

1. La Máquina Jerárquica de Estado Finito lee el conjunto G y asigna una táctica t .
 2. Dada t seleccionada en el paso 1, C asigna un rol r a cada agente a , asegurándose que el conjunto R es asignado de forma completa al conjunto A .
 3. La Máquina Jerárquica de Estado Finito lee el conjunto G y asigna comportamientos b a cada agente a , dependiendo del rol r asignado en el paso 2 y el conjunto G .
 4. El conjunto de comportamientos B es ejecutado por el control de movimiento del robot, en el nivel más bajo de la Máquina de Estado.
 5. El conjunto de agentes A ejecuta los comportamientos asociados al conjunto de roles R que ha sido asignado en el paso 2, modificando el conjunto G .
-

3.2.2 Selección de táctica

La asignación de táctica es realizada cuando ocurre el evento que genera la transición correspondiente en la Máquina de Estado. No obstante si las condiciones de juego no han cambiado considerablemente los roles deben mantenerse y los comportamientos desarrollados por los jugadores no deben ser interrumpidos o cambiados de manera abrupta perdiendo la continuidad del juego. El objetivo de la estrategia propuesta es asegurar un adecuado rendimiento del juego buscando ganar el partido. Esta estrategia es implementada en un equipo de fútbol de robots con 4 jugadores. Uno de ellos es el portero, el cual es el único jugador con el rol constante asignado al mismo robot. Para la selección de tácticas han sido seleccionados dos parámetros: el primero corresponde a la localización del balón en el campo de juego y el segundo a la posesión del balón. El campo ha sido dividido en 3 zonas como se muestra en la Figura 3.4 (Todas estas imágenes han sido directamente tomadas del simulador Webots), con el fin de clasificar la localización del balón en una de estas zonas.

Estas zonas han sido divididas como se muestra a continuación. Dada una distancia l que corresponde al largo del campo de juego, siendo esta la distancia entre la portería propia y la portería del equipo oponente, l es dividido en dos distancias menores l/m y l/n tal que $0 < l/n < l/2$ y $l/2 < l/m < l$, donde $n \in \mathcal{R}$, $m \in \mathcal{R}$, y $n > m$. Dado esto, se define:

$$l_b \in \mathcal{R} > 0, \text{ tal que } l_b \leq l \quad (3.1)$$

donde l_b es la distancia entre la portería propia y el balón. Se define Z_z como la zona del campo de juego donde el balón está ubicado.

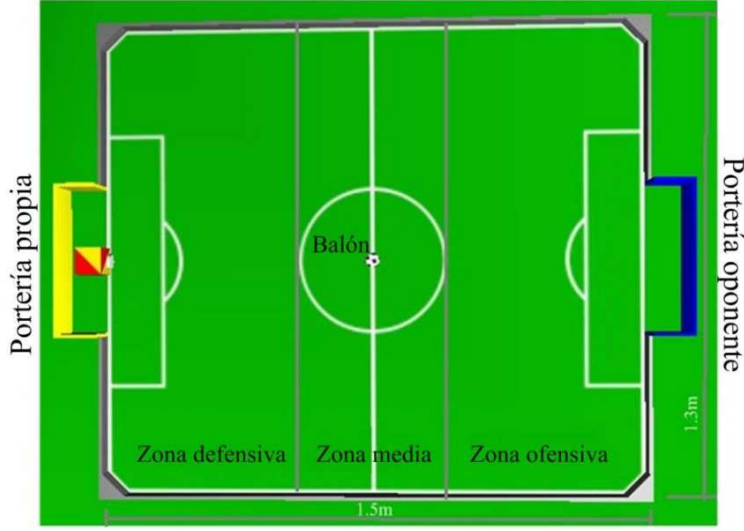


Figura 3.4. División en zonas del campo de juego.

Dado esto las tres zonas se definen de la siguiente manera:

- Zona defensiva: $Z_z = Z_D: \exists l_b \text{ tal que } l_b \leq l/n.$
- Zona media: $Z_z = Z_M: \exists l_b \text{ tal que } l/n < l_b \leq l/m.$
- Zona ofensiva: $Z_z = Z_M: \exists l_b \text{ tal que } l/m < l_b \leq l.$

n y m determinan la ubicación de las zonas a lo largo del campo de juego, con la posibilidad de adaptar estos valores en caso que se necesite una táctica más defensiva u ofensiva. Se define:

$$R\vec{a}_m(t) = (x_m(t), y_m(t)) \quad (3.2)$$

como el vector de coordenadas $(x_m(t), y_m(t))$ de un agente a_m sobre el campo de juego, tal que:

$$x_m(t) \in \mathcal{R} \text{ tal que } 0 \leq x_m(t) \leq l, \quad (3.3)$$

$$y_m(t) \in \mathcal{R} \text{ tal que } 0 \leq y_m(t) \leq w, \quad (3.4)$$

donde w corresponde al ancho del campo de juego.

Se define:

$$\overrightarrow{RB}(t) = (x_b B(t), y_b B(t)) \quad (3.5)$$

como el vector de las coordenadas del balón sobre el campo de juego, tal que:

$$x_b(t) \in \mathcal{R} \text{ tal que } 0 \leq x_b(t) \leq l, \quad (3.6)$$

$$y_b(t) \in \mathcal{R} \text{ tal que } 0 \leq y_b(t) \leq w, \quad (3.7)$$

dado lo anterior, se tiene:

$$D(RBall_b, Ra_m) = \|\overrightarrow{RB}(t) - R\vec{a}_m(t)\|_2 \quad (3.8)$$

que corresponde a la distancia euclídea entre a_m y el balón.

En el caso del segundo parámetro para la selección de la táctica que es la posesión del balón, se considera que el jugador a_m mantiene la posesión del balón $BP(a_m)$ cuando:

$$BP(a_m) = \begin{cases} true & \leftrightarrow D(RBall_b, Ra_m) \leq \delta_b, \\ false & \leftrightarrow D(RBall_b, Ra_m) > \delta_b, \end{cases} \quad (3.9)$$

donde δ_b es la máxima distancia entre el robot y el balón en la que se puede considerar que el robot tiene posesión del balón. Para esta estrategia fueron asignados los siguientes valores: $l=1.5m$, $w=1.3m$, $\delta_b=0.008m$, donde l y w corresponden a las dimensiones del campo de juego tomadas directamente del simulador *Webots*. δ_b fue obtenido de forma experimental como la distancia apropiada en la cual el robot puede golpear el balón. Un número finito de tácticas $T(Z_Z, BP(am)) = \{t_{dd}, t_{da}, t_{od}, t_{oa}\}$ ha sido definido a continuación.

- Táctica defensa: Esta táctica es seleccionada cuando el balón está localizado en la zona defensiva o en la zona media, y ningún jugador del equipo que posee la estrategia propuesta, llamado el equipo propio, tiene la posesión del balón.

$$\text{If } ((Z_Z = Z_D \vee Z_Z = Z_M) \wedge (BP(am) = false)), \text{ then } T(Z_Z, BP(am)) = t_{dd}. \quad (3.10)$$

- Táctica contra ataque: Esta táctica es seleccionada cuando el balón está ubicado en la zona defensiva o en la zona media, y algún jugador del equipo propio tiene la posesión del balón.

$$\text{If } ((Z_z = Z_D \vee Z_z = Z_M) \wedge (BP(am) = \text{true})) \text{ then } T(Z_z, BP(am)) = t_{da}. \quad (3.11)$$

- Táctica presión: Esta táctica es seleccionada cuando el balón está localizado en la zona ofensiva y ningún jugador del equipo propio tiene la posesión del balón.

$$\text{If } ((Z_z = Z_O) \wedge (BP(am) = \text{false})) \text{ then } T(Z_z, BP(am)) = t_{od}. \quad (3.12)$$

- Táctica ataque: Esta táctica es seleccionada cuando el balón se encuentra en la zona ofensiva y algún jugador del equipo propio tiene la posesión del balón.

$$\text{If } ((Z_z = Z_O) \wedge (BP(am) = \text{true})), \text{ then } T(Z_z, BP(am)) = t_{oa}. \quad (3.13)$$

Las reglas de la selección de tácticas son presentadas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Criterios de selección de táctica del primer nivel de la Máquina de Estado

Táctica	Zona de ubicación del balón	Posesión del balón
Defensa	Defensiva y media	No
Contra ataque	Defensiva y media	Sí
Presión	Ofensiva	No
Ataque	Ofensiva	Sí

3.2.3 Asignación de roles

Una vez la táctica ha sido seleccionada, los roles se asignan dependiendo no solo de la táctica, sino también de la posición de los jugadores y el balón. Para esto Rga se define como las coordenadas del centro de la portería propia (xga, yga) , tal que $xga=0$ y $yga=w/2$.

$D(Rga, Ra_m)$ se define como la distancia entre a_m y Rga , como se presenta a continuación:

$$D(Rga, Ra_m) = \|Rga - R\vec{a}_m(t)\|_2. \quad (3.14)$$

Se define Rge como las coordenadas del centro de la portería oponente (xge, yge) tal que $xge=l$ y $yge=w/2$.

$D(Rge, Ra_m)$ se define como la distancia entre a_m y Rge , como se presenta a continuación:

$$D(Rge, Ra_m) = \|Rge - R\vec{a}_m(t)\|_2. \quad (3.15)$$

Como se explicó anteriormente, hay 4 jugadores por equipo. Uno de ellos es el portero a_p , siendo el único rol constante y asignado al mismo jugador. Dado esto, existe un número finito de agentes $A=\{a_1, a_2, a_3\}$, que ejecutan un conjunto de roles $R=\{r_d, r_s, r_a\}$, donde r_d corresponde al defensa, r_s es el mediocampista y r_a corresponde al delantero. El técnico C ejecuta el algoritmo de asignación de roles, dependiendo de la táctica previamente seleccionada, de acuerdo con el siguiente procedimiento.

3.2.3.1 Roles en táctica defensa

Esta táctica es activada cuando el equipo propio no tiene la posesión de balón, y este se encuentra en las zonas defensiva o media. En esta táctica, el jugador más cercano al balón se convierte en el defensa r_d y está encargado de tratar de capturar el balón. El jugador más cercano a la portería oponente es el delantero r_a , quien va a la mitad del campo de juego a la espera del balón para atacar. El último jugador es el mediocampista r_s , quien va a bloquear al jugador oponente más cercano a la portería propia, con propósitos de defensa y tratando de bloquear posibles pases del equipo rival. Un ejemplo de esta situación de juego se presenta en la Figura 3.5.



Figura 3.5. Situación de juego táctica defensa.

Para la asignación de roles, el técnico virtual C ejecuta el algoritmo 3.2.

ALGORITMO 3.2. ASIGNACIÓN DE ROLES, TÁCTICA DEFENSA

1. Obtener $\min\{D(RBall_b, Ra_1), D(RBall_b, Ra_2), D(RBall_b, Ra_3)\}$.
 2. Asignar a_d al agente con la menor distancia calculada en el paso 1.
 3. Asignar $r_d=a_d$.
 4. Obtener $\min\{D(Rge, Ra_1), D(Rge, Ra_2), D(Rge, Ra_3)\}$, *excluyendo*
 5. $D(Rge, Ra_d)$.
 6. Asignar a_a al agente con la menor distancia obtenida en el paso 4.
 7. Asignar $r_a=a_a$.
 8. Seleccionar $a_s = \{a_1, a_2, a_3\}$ tal que $(a_s \neq a_d) \wedge (a_s \neq a_a)$
 9. Asignar $r_s=a_s$.
-

3.2.3.2 *Roles en táctica contra ataque*

Esta táctica se activa cuando el equipo propio tiene la posesión del balón, y este se encuentra en la zona defensiva o media. Para asignar roles, el robot con la posesión del balón se convierte en el mediocampista r_s , quien enviará el balón a la zona ofensiva. El delantero r_a es el jugador más cercano a la portería oponente quien debe esperar el balón que enviará el mediocampista. El otro jugador es el defensa r_d , quien se mantiene esperando en la zona defensiva en caso de contra golpes. En el momento que el delantero intercepte el balón, la Máquina de Estado activa una nueva táctica y un nuevo proceso de sección de roles es activado.

Para la asignación de roles, el técnico virtual C ejecuta el algoritmo 3.3.

ALGORITMO 3.3. ASIGNACIÓN DE ROLES, TÁCTICA CONTRA ATAQUE

1. Seleccionar $a_s = \{a_1, \dots, a_m\}$ tal que $BP(am) = true$.
 2. Asignar $r_s=a_s$.
 3. Obtener $\min\{D(Rge, Ra_1), \dots, D(Rge, Ra_m)\}$, *excluyendo* $D(Rge, Ra_s)$.
 4. Asignar a_a al agente con la menor distancia obtenida en el paso 3.
 5. Asignar $r_a=a_a$.
 6. Seleccionar $a_d = \{a_1, a_2, a_3\}$ tal que $(a_d \neq a_s) \wedge (a_d \neq a_a)$.
 7. Asignar $r_d=a_d$.
-

Un ejemplo de situación de juego se presenta en la Figura 3.6.

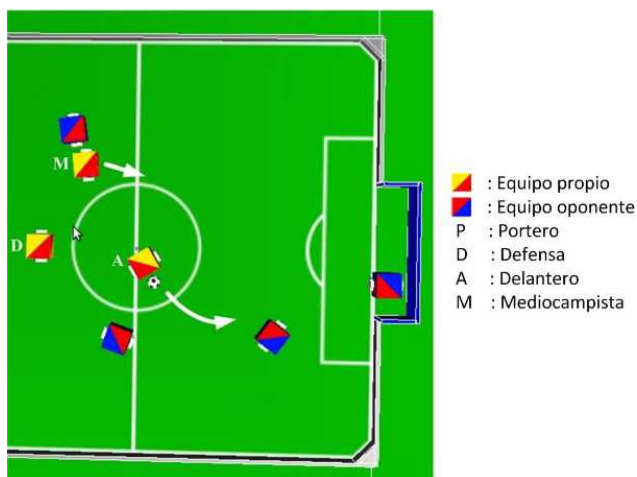


Figura 3.6. Situación de juego táctica contra ataque.

3.2.3.3 Roles en táctica presión

Esta táctica se activa cuando ningún jugador del equipo propio posee la posesión del balón, y el balón se encuentra en la zona ofensiva. El jugador más cercano al balón se convierte en el delantero r_a , y es el jugador que trata de capturar el balón. El defensa r_d es el jugador más cercano a la portería propia, y se mantiene en la zona defensiva en caso de contra ataque del equipo rival. El último jugador es el mediocampista r_s , quien se encuentra bloqueando al jugador oponente más cercano. La Figura 3.7 muestra un ejemplo de esta táctica, donde el delantero trata de interceptar el balón, el mediocampista bloquea un oponente y el defensa espera.

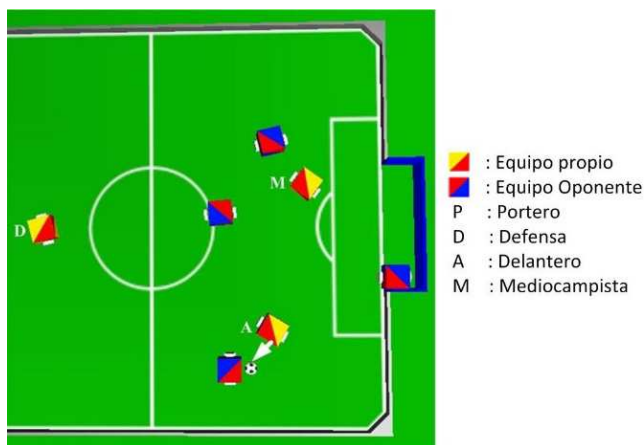


Figura 3.7. Situación de juego táctica presión.

Para la asignación de roles, el técnico virtual C ejecuta el algoritmo 3.4.

ALGORITMO 3.4. ASIGNACIÓN DE ROLES, TÁCTICA PRESIÓN

1. Obtener $\min\{D(RBall_b, Ra_1), D(RBall_b, Ra_2), D(RBall_b, Ra_3)\}$.
 2. Asignar a_a al agente con la menor distancia calculada en el paso 1.
 3. Asignar $r_a=a_a$.
 4. Obtener $\min\{D(Rga, Ra_1), D(Rga, Ra_2), D(Rga, Ra_3)\}$, *excluyendo* $D(Rga, Ra_a)$.
 5. Asignar a_d al agente con la menor distancia obtenida en el paso 4.
 6. Asignar $r_d=a_d$.
 7. Seleccionar $a_s = \{\{a_1, a_2, a_3\} \text{ such as } (a_s \neq a_d) \wedge (a_s \neq a_a)\}$
 8. Asignar $r_s=a_s$.
-

3.2.3.4 Roles en táctica ataque

Esta táctica se activa cuando el equipo propio tiene la posesión del balón y este último se encuentra en la zona ofensiva. El jugador con la posesión del balón se convierte en el delantero r_a , jugador cuya misión es tratar de anotar un gol. El jugador más cercano a la portería propia es el defensa r_d , quien espera en la zona defensiva en caso de contra ataque. El último jugador es el que obtiene el rol de mediocampista, ubicado en paralelo con el delantero en línea con la longitud del campo de juego y a la espera de recibir un posible pase o recuperar el balón. Un ejemplo de situación de juego se presenta en la Figura 3.8(a), donde el delantero trata de anotar un gol. En caso que un jugador oponente diferente al portero bloquea la línea de gol a la portería rival, el delantero le envía el balón al mediocampista, como se presenta en la Figura 3.8(b). Para la asignación de roles, el técnico virtual C ejecuta el algoritmo 3.5.

ALGORITMO 3.5. ASIGNACIÓN DE ROLES, TÁCTICA ATAQUE

1. Seleccionar $a_a = \{\{a_1, \dots, a_m\} \text{ tal que } BP(am) = true \}$.
 2. Asignar $r_a=a_a$.
 3. Obtener $\min\{D(Rga, Ra_1), \dots, D(Rga, Ra_m)\}$, *excluyendo* $D(Rga, Ra_a)$.
 4. Asignar a_d al agente con la menor distancia obtenida en el paso 3.
 5. Asignar $r_d=a_d$.
 6. Seleccionar $a_s = \{\{a_1, a_2, a_3\} \text{ tal que } (a_s \neq a_d) \wedge (a_s \neq a_a)\}$.
 7. Asignar $r_s=a_s$.
-

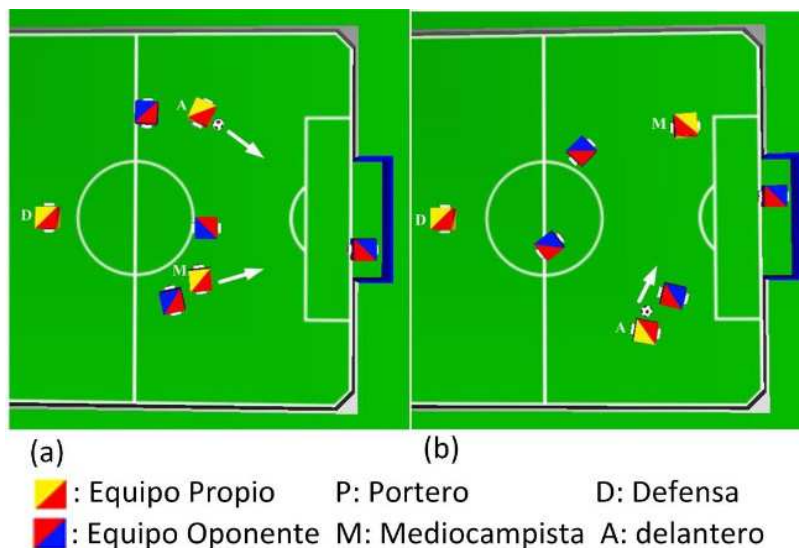


Figura 3.8. Situación de juego táctica ataque.

3.2.4 Selección de comportamientos

Diferentes roles han sido diseñados con el fin de ejecutar distintos comportamientos, dependiendo de la táctica seleccionada. Como se puede observar en la Tabla 3.2, cada rol en cada táctica posee un comportamiento principal. Para el caso del portero, se ha determinado un único rol que consiste en seguir el balón en paralelo a la línea de gol.

Tabla 3.2. Comportamientos principales de los roles, para cada táctica.

Táctica	Rol	Comportamiento principal
Defensa	Defensa	Ir por el balón
	Mediocampista	Bloquear jugador oponente
	Delantero	Ir a la mitad del campo de juego
Contra ataque	Defensa	Bloquear jugador oponente
	Mediocampista	Enviar balón a zona ofensiva
	Delantero	Esperar pase
Presión	Defensa	Ir a zona defensiva
	Mediocampista	Bloquea jugador oponente
	Delantero	Ir por el balón
Ataque	Defensa	Ir a zona defensiva
	Mediocampista	Espera pase
	Delantero	Realizar pase o disparar a la portería

Los comportamientos principales se resumen a continuación.

- Ir por el balón: El robot va hacia el balón hasta la distancia suficiente en frente del balón, donde se considera que tiene posesión del mismo (0.08m).
- Bloquear jugador oponente: Identificar un jugador oponente determinado, y bloquearlo sin tener contacto físico con el mismo.
- Ir a la mitad del campo de juego: Ir a la mitad del campo de juego, esperando por el balón en caso de contra ataque.
- Enviar balón a zona ofensiva: Disparar el balón hacia la zona ofensiva del campo de juego.
- Esperar pase: Desde una posición determinada, esperar que jugador compañero envíe un pase.
- Ir a zona defensiva: Ir a la zona defensiva, esperando en caso de contra ataque del equipo oponente.
- Disparar a la portería o Realizar pase: Disparar el balón a la portería oponente, tratando de anotar un gol, en caso de que la línea de gol no esté bloqueada por un oponente diferente al portero. O enviar el balón a otro robot, cuando la línea de gol de la portería oponente está bloqueada por otro jugador oponente diferente al portero.

Los comportamientos principales se dividen en sub-comportamientos, seleccionados por un nivel inferior de la Máquina Jerárquica de Estado Finito. En la Figura 3.9 se muestran los estados de los comportamientos principales y los sub-comportamientos. Cada sub-comportamiento corresponde a un estado y las transiciones son las condiciones de juego. El control de movimiento de los robots corresponde al nivel más bajo de la Máquina de Estado, y es utilizado para realizar los distintos comportamientos. El sistema de toma de decisiones envía las señales de control para los robots. Como fue mencionado anteriormente, el equipo está compuesto por 4 robots diferenciales de dos ruedas, los cuales poseen dos señales de control, una para cada rueda.

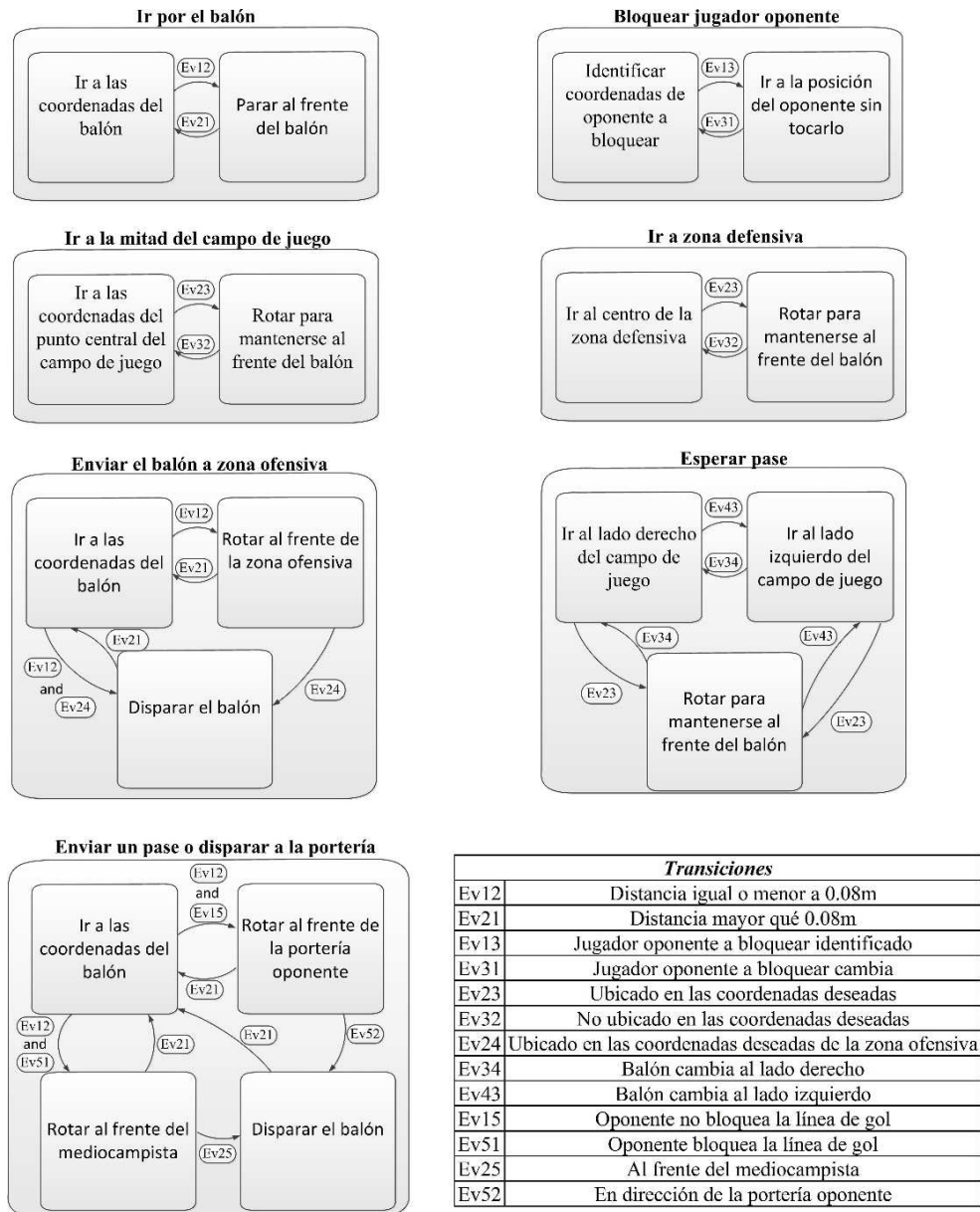


Figura 3.9. Comportamientos y transiciones.

3.3 Simulación y resultados

Con el propósito de implementar y validar el modelo propuesto, la estrategia es simulada en partidos en contra de un equipo oponente el cual utiliza una estrategia de equipo con 4 jugadores con roles constantes, siendo estos el portero, un defensa, un mediocampista y un delantero. El rol portero es similar al de la estrategia presentada. En la estrategia del oponente, el defensa intercepta el balón cuando este se encuentra en la zona ofensiva, y una vez lo tiene se lo envía al mediocampista, quien a su vez se lo envía nuevamente al delantero, este último trata de anotar un gol. Los comportamientos diseñados para el equipo oponente son similares a los de la estrategia propuesta; la diferencia fundamental consiste en que los roles en el oponente son constantes. No obstante, la coordinación de equipo en la estrategia del oponente sí se presenta, incluyendo comportamientos cooperativos como la realización de pases.

Se realizaron un total de 200 juegos, cada uno de 10 minutos. La formación inicial en cada juego se cambia. En la Tabla 3.3 se presentan los resultados más relevantes de todos los juegos (número de goles, promedio de goles por partido, porcentaje de posesión del balón promedio, juegos ganados, juegos empatados y perdidos). Como se ha comentado, el equipo propio es el equipo con la estrategia propuesta, mientras que el equipo oponente es el equipo con la estrategia de roles constantes. Como puede ser observado, el número de goles anotados por el equipo propio es significativamente mayor que los goles anotados por el equipo oponente. También se puede apreciar que el equipo propio mantiene una mayor posesión del balón en todos los juegos. Adicionalmente, el porcentaje de juegos ganados por el equipo propio es considerablemente más alto que los empatados y los partidos perdidos.

Tabla 3.3. Resultados de los 200 partidos.

	Total goles	Promedio de goles	% Posesión del balón	% Partidos ganados	% Partidos empatados	% Partidos perdidos
Equipo propio	725	3.625	65.49 %	92.5 %	4 %	3.5 %
Equipo oponente	321	1.1605	34.51 %	3.5 %	4 %	92.5 %

La Tabla 3.4 presenta el porcentaje de tiempo en que cada táctica es seleccionada en todos los juegos, y el porcentaje de tiempo que el balón es ubicado en cada zona. DD corresponde a la táctica Defensiva, DA es la táctica contra ataque, OD co-

responde a la táctica presión y OA es la táctica ataque. DZ corresponde a la zona defensiva, MZ es la zona media y OZ es la zona ofensiva. En promedio, la táctica contra ataque es la más seleccionada y la táctica presión ha sido la menos seleccionada. No obstante, es de resaltar que la táctica ataque es seleccionada en un porcentaje muy similar que la táctica contra ataque. Es de notar también que las tácticas contra ataque y ataque son más utilizadas porque el equipo propio mantiene la posesión del balón durante un porcentaje mayor de tiempo. La táctica contra ataque presenta un porcentaje levemente mayor, esto se da porque la táctica contra ataque se activa estando el balón en las zonas defensivas y media, contrario a la táctica ataque que solamente puede ser activada cuando el balón está en la zona ofensiva.

Tabla 3.4. Comparación del promedio de porcentaje de tiempo en que cada táctica y el porcentaje de tiempo de la ubicación del balón en cada zona.

	% de táctica				% Ubicación del balón		
	DD	DA	OD	OA	DZ	MZ	OZ
Promedio.	19.5	35.8	15	29.7	35.2	20	44.8

La Figura 3.10 presenta en diagrama de cajas el porcentaje de selección de cada táctica en cada juego y en la Figura 3.11 se presenta igualmente en diagrama de cajas el porcentaje de ubicación del balón en cada zona por cada uno de los juegos.

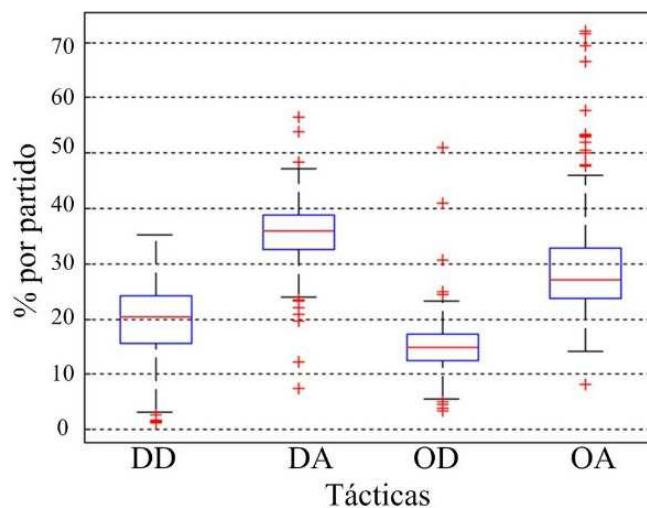


Figura 3.10. Porcentaje de selección de táctica en cada juego.

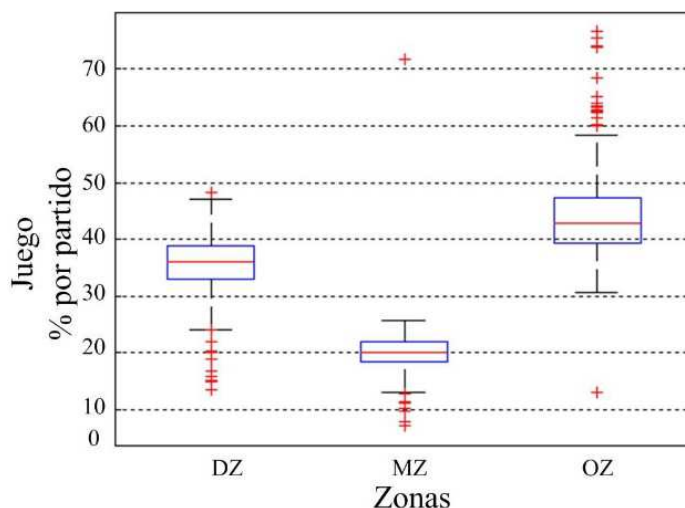


Figura 3.11. Porcentaje de ubicación del balón por zonas en cada juego.

En general las táctica contra ataque y ataque (DA y OA) son seleccionadas más frecuentemente, confirmando los promedios presentados en la Tabla 3.4 y como esto se explicó anteriormente, esto se debe a que el equipo propio presentó una mayor posesión del balón que el equipo oponente. Es bueno notar además que la táctica ataque (OA) muestra un porcentaje significativamente mayor de juego en muchos partidos, alcanzando en algunos casos valores cercanos al 70%. No obstante, en otros juegos se observa que el porcentaje de tiempo en que la táctica contra ataque fue seleccionada es el mayor, siendo superior inclusive al 50%. Esto es consistente con los porcentajes de tiempo de la ubicación del balón en las zonas, ya que en algunos juegos el balón puede estar hasta cerca del 70% del tiempo de juego en las zonas ofensivas, pero en otros juegos el balón se encuentra principalmente en las zonas defensiva o media.

En la Figura 3.12 se presenta en diagrama de cajas el porcentaje de transiciones entre tácticas para cada juego. Se puede observar que es similar en todos los juegos para cada transición, no obstante se aprecia que 4 transiciones son mucho más frecuentes que las demás (contra ataque a defensa y viceversa, o presión a ataque y viceversa). Aunque transiciones entre tácticas defensa a presión y viceversa, o contra ataque a ataque y viceversa se presentan en un menor porcentaje, transiciones entre tácticas defensa a ataque y viceversa, y presión a contra ataque y viceversa se presentan en muy pocos casos, llegando a no presentarse en algunos juegos, esto se debe a que las condiciones de juego que permiten que estas transiciones se den son situaciones de juego poco usuales.

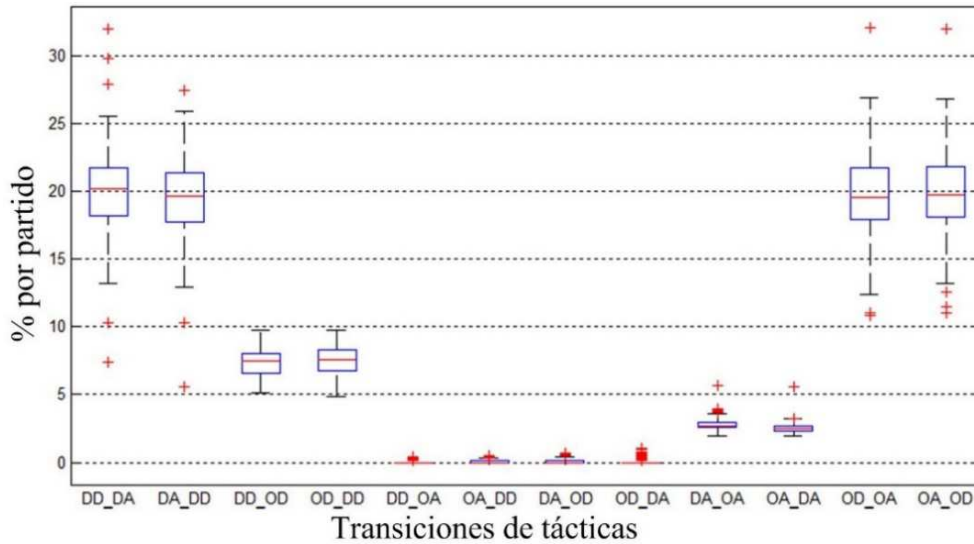


Figura 3.12. Porcentajes de transiciones de tácticas por partido.

En la Tabla 3.5 se presentan los porcentajes de tiempo de los promedios en que cada rol es asignado a cada jugador, durante los 200 partidos. D corresponde al defensa, S al mediocampista y A al delantero. En la Figura 3.13 se presentan diagramas de caja de los porcentajes de tiempo en que cada rol es asignado a cada jugador en cada partido. En promedio los tres roles fueron asignados en porcentajes similares en cada jugador. No obstante se puede notar que en algunos partidos algún jugador tuvo asignado un rol específico en un mayor o menor porcentaje de tiempo. Una razón por la cual esta situación ocurre se debe a la formación inicial que como se explicó, se cambiaba en cada juego, no obstante esta se mantenía durante el mismo juego cuando el partido se reiniciaba después que fuera anotado un gol, aunque es necesario resaltar que esta situación se presentó en muy pocos partidos.

Tabla 3.5. Comparación del promedio de porcentaje de tiempo en que cada rol es seleccionado

Jugador	1			2			3		
Rol	D	S	A	D	S	A	D	S	A
% promedio	32.33%	35.1%	32.57%	32.59%	33.45%	33.96%	34.78%	33.36%	33.87%

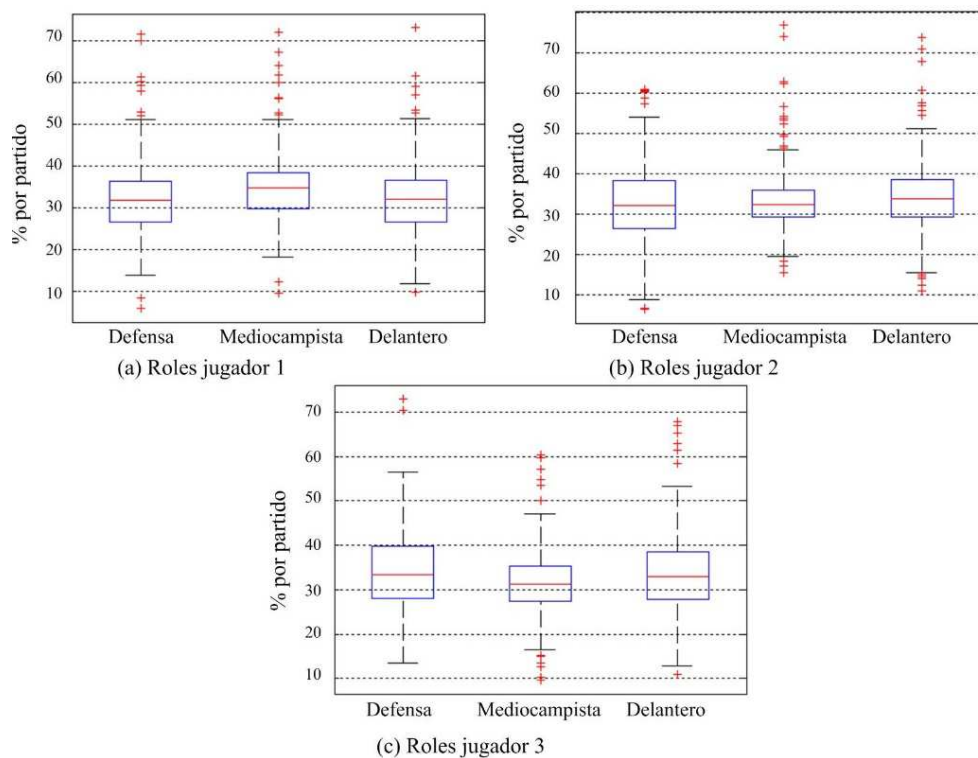


Figura 3.13. Porcentaje de selección de roles por jugador en cada juego.

En la Figura 3.14 se presenta un diagrama de cajas con el porcentaje de las transiciones entre roles de los tres jugadores, para cada juego. Se puede observar que la transición más común se da entre el defensa el mediocampista, y viceversa. En un menor porcentaje, se da la transición entre el defensa y el delantero. Estos resultados están en coherencia con las reglas establecidas para la asignación de roles, ya que es más usual que un jugador que tenga el rol mediocampista vaya por el balón y lo capture, pasando al rol defensa o delantero, según sea la táctica en que se encuentre; o que un jugador al perder la posesión del balón, asuma el rol mediocampista.

Muchos comportamientos han sido observados, por ejemplo la realización de pases entre el defensa y el mediocampista, o entre el mediocampista y el delantero, o la interceptación del balón cuando un oponente realiza un pase. El rol mediocampista ha sido muy importante en las tácticas ataque y presión, ya que se presentaron casos en los que el delantero dispara el balón pero este es desviado por un defensa

oponente, logrando ser recuperado por el jugador que presentaba el rol de medio-campista.

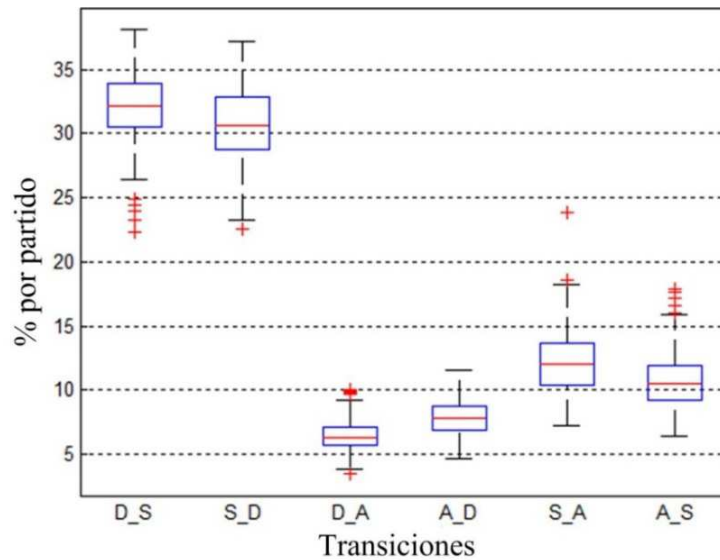


Figura 3.14. Transiciones de roles en los jugadores, durante los 200 juegos.

3.4 Conclusiones del capítulo

En este capítulo ha sido presentado un modelo de estrategia para fútbol de robots con asignación dinámica de roles realizada por un agente virtual llamado técnico, en un equipo con percepción global y control centralizado. Esta estrategia utiliza un número finito de tácticas, seleccionadas por una Máquina Jerárquica de Estado Finito y una vez el técnico virtual ha asignado los roles dependiendo de la ubicación del balón y los jugadores en el campo de juego, los robots con sus respectivos roles asignados ejecutan diferentes comportamientos asignados por la Máquina Jerárquica de Estado Finito, envolviendo diferentes comportamientos colaborativos. Una importante ventaja de este proceso es que no se requiere programación compleja, ya que es relativamente sencilla y de programación intuitiva. También es de resaltar que las arquitecturas jerárquicas de esta naturaleza son fácilmente expandibles a otras ligas con un número diferente de jugadores, como se podrá apreciar en el siguiente capítulo.

Para validar el modelo propuesto, se han realizado 200 partidos en simulación contra un equipo que incluye roles constantes. El número total de goles anotados por

parte del equipo con la estrategia propuesta fue considerablemente mayor frente al oponente, así como ocurre con la posesión del balón. La ubicación del balón en el campo de juego fue mayoritariamente en la zona ofensiva, indicando que la estrategia propuesta presentaba jugadas principalmente de ataque sobre el equipo oponente con roles constantes. La selección dinámica de roles a su vez permitió comportamientos cooperativos tales como la realización de pases, la interceptación del balón en caso de pases del equipo oponente o recuperar la posesión del balón por parte de un jugador del equipo cuando su compañero la ha perdido, y siempre manteniendo la continuidad del juego, ya que no se apreciaron comportamientos extraños o indebidos, como por ejemplo que un jugador abandone la posesión del balón para encargarse de un rol diferente, o que varios jugadores al mismo tiempo fueran a obstaculizarse mutuamente tratando de capturar el balón.

Las 4 tácticas presentadas en esta estrategia han sido seleccionadas en los 200 juegos. En la mayoría de los casos, se observó que las tácticas ofensivas (presión y ataque) fueron seleccionadas en mayores porcentajes, aunque esta diferencia porcentual no es muy grande. Adicionalmente el porcentaje de tiempo que los roles son asignados por los jugadores muestran que los jugadores ejecutan los 3 roles en similares proporciones. Este resultado indica que los roles son asignados de forma dinámica, dependiendo de las condiciones instantáneas del juego. Las mediciones obtenidas durante los juegos como por ejemplo el porcentaje de posesión del balón, número de goles anotados o el porcentaje de tiempo en que el balón se encuentra en la zona ofensiva, sugieren los beneficios de la estrategia propuesta con asignación dinámica de roles comparada con una estrategia de roles constantes. Otra ventaja de la estrategia propuesta en este capítulo es que presenta robustez en el caso de posible daño de un robot durante un juego: con un rol específico, un robot dañado podría no realizar importantes tareas, tales como disparar el balón a la portería oponente o bloquear a un contrincante.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DE ARQUITECTURA PARA LA COORDINACIÓN DE EQUIPO DE FÚTBOL DE ROBOTS CON PERCEPCIÓN GLOBAL Y CONTROL CENTRALIZADO BASADO EN *PRINCIPLE SOLUTION*

4.1 Introducción

Como se ha señalado en capítulos anteriores, la coordinación es un tópico relevante en el fútbol de robots, dado que equipos no coordinados presentan problemas como obstrucción entre sus jugadores, descuidando espacios que pueden ser utilizados por el equipo oponente [22]. Y si bien distintos trabajos han sido publicados en el campo de la coordinación de equipo de fútbol de robots, muchos de estos se enfocan en arquitecturas distribuidas, no siendo siempre posible aplicar de manera eficiente dichos algoritmos en arquitecturas centralizadas, otros trabajos se centran en algoritmos de aprendizaje más que en la arquitectura misma, y en otros casos el diseño de las arquitecturas no permite fácil e intuitivamente cambios en su diseño o adaptación a nuevas ligas o nuevos reglamentos. Una definición formal de *principle solution* consiste en el mecanismo físico de un sistema para alcanzar una función deseada [139]. *Principle solution* determina la estructura básica y el modo de operación del sistema y subsecuentemente, es la base para su futura concretización [140].

La funcionalidad, estructura y diseño de equipos de fútbol de robots, visto como un complejo sistema mecatrónico, resulta en diseños altamente complicados y requiere una efectiva coordinación entre sus diferentes dominios con el fin de facilitar el diseño de la arquitectura de equipo [141]. En este sentido, una aproximación siste-

mática basada en la especificación del *principle solution* para el diseño de arquitecturas de fútbol de robots es presentada para estrategias de equipo. Esta aproximación permite una especificación de estrategias de equipo intuitiva y una realización sistemática para comportamientos colaborativos entre robots, empezando con una fase de diseño conceptual y facilitando el desarrollo en todos los dominios en un ambiente multidisciplinario. Aunque *principle solution* ya ha sido utilizado anteriormente en el diseño de estrategias de equipo de fútbol de robots [78], [79], estos diseños se realizaron para ligas distribuidas, enfocados para robots humanoides de la *Standard Platform League*, presentando importantes diferencias con las ligas centralizadas en cuanto a la arquitectura, control y percepción.

En este capítulo, se presenta el diseño de estrategias de equipo de fútbol de robots con arquitectura centralizada basada en *principle solution*, proporcionando una arquitectura holística del sistema, con un diseño intuitivo de asignación de roles y selección de comportamientos. Este diseño de arquitecturas es compatible con otros diferentes sistemas de toma de decisiones, o algoritmos de aprendizaje como los descritos en capítulos anteriores con el fin de mejorar el rendimiento del equipo. Esta estrategia es diseñada utilizando el simulador *SimuroSot 5vs5* utilizado en la liga de simulación *FIRA SimuroSot 5vs5 League*, e inspirada en la *FIRA MiroSot Middle League*. Esta liga utiliza 5 robots de dos ruedas diferenciales por equipo con percepción global y un único sistema de toma de decisiones [15]. La estrategia es programada utilizando C++ desde el sistema de toma de decisiones, que recibe del simulador las coordenadas de los jugadores (tanto del equipo local como del oponente), como del balón. Cuando la estrategia es evaluada, el programa le envía al simulador la señal de control de las dos ruedas a cada uno de los 5 robots. Una vez la estrategia es programada, se genera un archivo .dll que se le suministra al simulador para ejecutar los partidos. Para el diseño basado en *principle solution*, se parte de la propuesta presentada en el capítulo anterior, presentando una aproximación sistemática en su diseño.

4.2 Estructura de equipo de fútbol de robots de arquitectura centralizada

Como se ha explicado en capítulos anteriores, la arquitectura de un equipo de fútbol de robots con percepción global y control centralizado, consiste en un sistema de visión el cual proporciona las coordenadas de los jugadores de los dos equipos y el balón en el campo de juego. Esta información es suministrada a un único sistema de toma de decisiones contenido en el ordenador central, el cual transmite vía

radiofrecuencias las señales de control de movimiento a los robots, que corresponden a los comportamientos seleccionados para los jugadores. El robot recibe y procesa esta información, ejecutando el comportamiento deseado en el campo de juego.

Entre los 5 jugadores que conforman los equipos para esta liga, uno de ellos corresponde al portero y como en la mayoría de los casos, corresponde a un rol constante. Los otros roles diseñados para la presente estrategia consisten en el defensa activo, defensa pasivo, mediocampista y delantero. Dichos roles son asignados a los jugadores dependiendo de las condiciones de juego. Para el proceso de asignación de roles y selección de comportamientos, esta estrategia se divide en dos tácticas, cada táctica se selecciona dependiendo de la ubicación en el campo de juego. Para este propósito, el campo se divide en dos zonas, como se presenta en la Figura 4.1. La zona defensiva corresponde a la mitad del campo de juego donde la portería del equipo propio (equipo con la franja amarilla en el centro), y la zona ofensiva que corresponde a la otra mitad del campo de juego donde se encuentra la portería del equipo oponente (equipo con la franja azul en el centro).

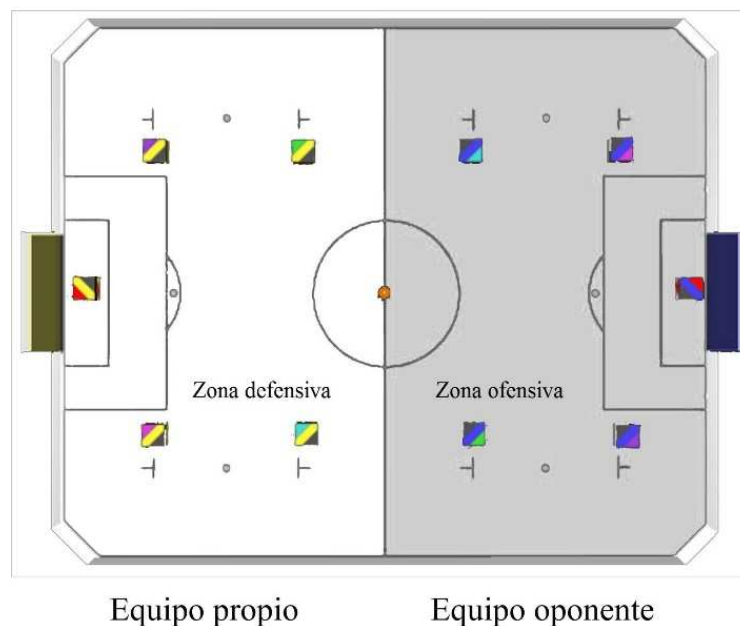


Figura 4.1. División del campo de juego.

Un equipo de fútbol de robots de tipo centralizado encaja plenamente dentro de la estructura jerárquica para sistemas complejos mecatrónicos sugerida en [142]. La

capa más baja corresponde a los denominados módulos de función mecatrónica (MFMs), que incluyen la estructura mecánica, sensores, actuadores y procesamiento local de la información. Los MFMs son conectados por tecnología de la información y/o componentes mecánicos que conforman un sistema autónomo mecatrónico (AMS), el cual realiza procesamiento de la información. Esta información es usada para realizar tareas superiores como monitoreo, diagnóstico de fallos o ejecución de decisiones. Adicionalmente, se generan objetivos para procesamiento local de la información de los MFMs. Múltiples AMSs conectados mediante procesamiento de la información conforman un sistema mecatrónico interconectado (NMS).

Como se puede observar en la Figura 4.2, en un ambiente de fútbol de robots centralizado, los módulos de locomoción (el robot diferencial de dos ruedas de las ligas *SimuroSot* y *MiroSot*) corresponden a los MFMs. Los robots, junto al sistema de visión para la localización, y el ordenador central corresponden cada uno a los AMSs. El equipo completo como un todo, dividido en los 5 robots, el sistema de visión, el ordenador central (incluyendo el procesamiento de video, la estrategia de equipo y el sistema de comunicaciones) corresponde a un NMS.

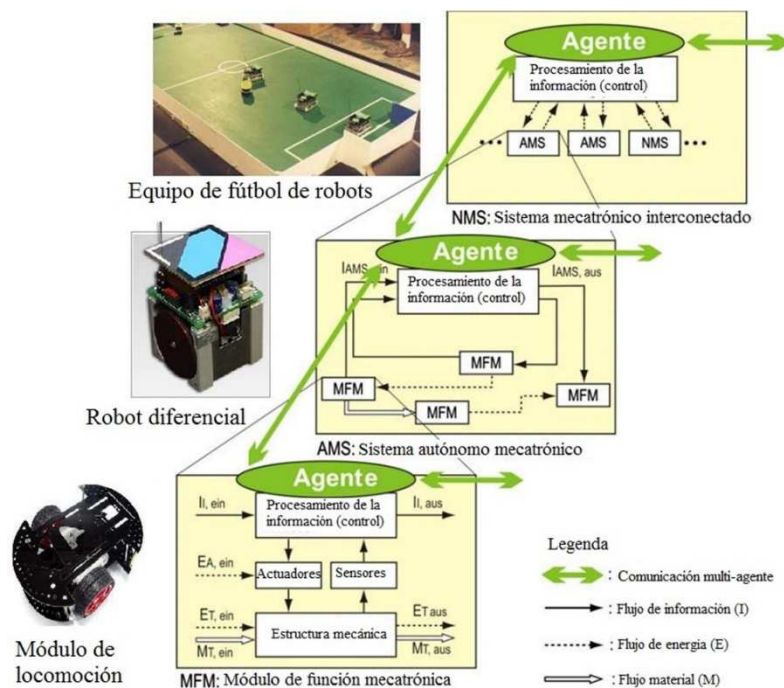


Figura 4.2. Estructura jerárquica de equipo de fútbol de robots centralizado.

4.3 Modelo de estrategia basado en *principle solution*

Para el diseño de la estrategia distintos aspectos deben ser tenidos en cuenta, los cuales son el ambiente, las funciones, la estructura activa, el estado de los comportamientos y las actividades de los comportamientos [140]. Estos aspectos son descritos a continuación.

4.3.1 Funciones

La Figura 4.3 muestra la función jerárquica por un jugador de fútbol de robots de dos ruedas perteneciente a la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*.

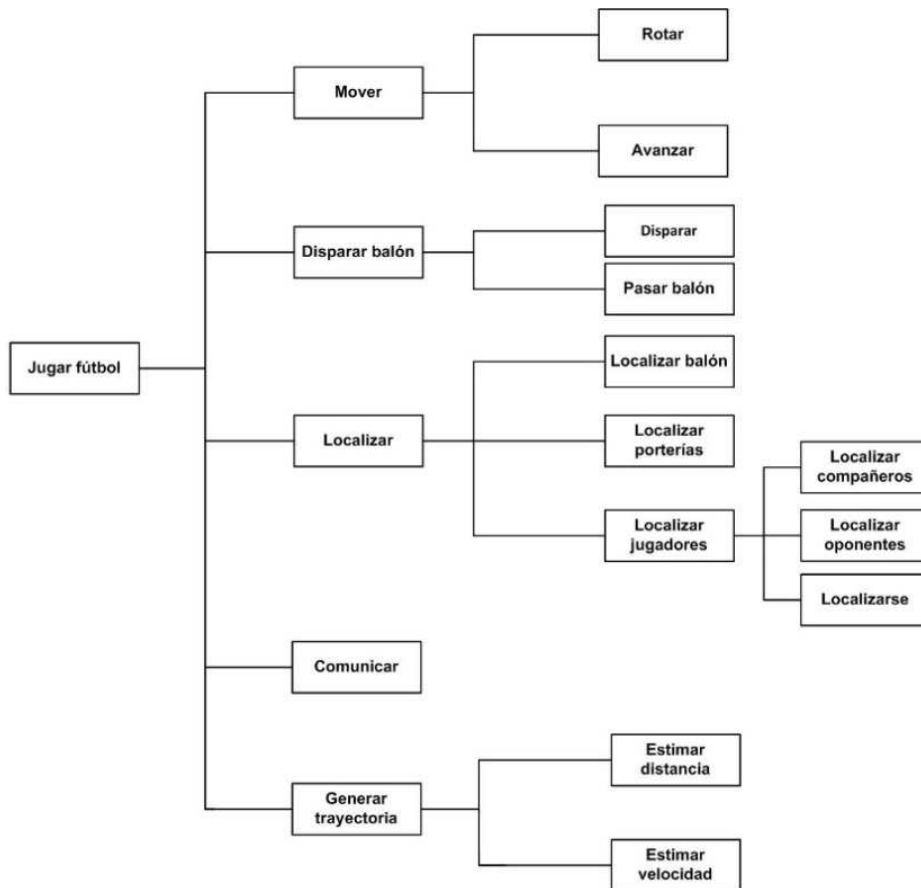


Figura 4.3. Funciones y sub-funciones de un robot futbolista de dos ruedas, en un equipo centralizado de fútbol de robots.

Las funciones corresponden a la subdivisión jerárquica de la funcionalidad de un equipo de fútbol de robots de arquitectura centralizada. La principal idea de la función es identificar actividades y comportamientos que pueden ser programados y tenidos en cuenta en el modelado y el diseño de la estrategia de equipo. Las funciones requieren coherencia entre los parámetros de entrada y salida, con el fin de cumplir una tarea. Estas funciones son llevadas a cabo por patrones de solución y su concretización. Una subdivisión en sub-funciones se realiza hasta que se encuentre un patrón de solución para la función. La función principal de jugar fútbol es descompuesta en 5 sub-funciones necesarias para que el equipo completo pueda jugar fútbol, a su vez 4 sub-funciones se subdividen en una capa más baja de sub-funciones, las cuales se definen a continuación.

4.3.1.1 Mover

Esta función se refiere a las tareas de locomoción. El robot debe rotar sobre su propio eje o desplazarse a una dirección determinada. Para esto, 2 sub-funciones aparecen para ejecutar tareas de locomoción. La cinemática inversa del robot es requerida. Para ligas centralizadas, el sistema de toma de decisiones utiliza el modelo inverso del robot de dos ruedas para obtener las señales de actuador, transmitiendo estos valores al robot.

4.3.1.2 Disparar balón

Esta función se refiere a la habilidad de disparar el balón o pasarlo a un compañero de juego. Para esto, dos sub-funciones son generadas las cuales dependen tanto del diseño mecánico del robot como de su cinemática inversa. En *SimuroSot* no es permitido realizar modificaciones en el hardware del robot, pero se pueden programar comportamientos de disparo del balón.

4.3.1.3 Localizar

Esta función se refiere a la habilidad de localizar jugadores compañeros, oponentes, porterías, el balón y al mismo jugador en el campo de juego. Como se ha explicado, en las ligas centralizadas utilizando una cámara sobre el campo de juego, se obtienen las coordenadas de los objetos que se desean localizar. En *SimuroSot*, la localización del balón y los jugadores es proporcionada por el simulador, en coordenadas que son transmitidas al sistema de toma de decisiones.

4.3.1.4 Comunicar

Esta función se refiere a la información transmitida del sistema de visión y el ordenador central, y posteriormente los jugadores. En *SimuroSot*, la posición de los jugadores y el balón es suministrada por el simulador. Por consiguiente la función de comunicación es integrada en el simulador.

4.3.1.5 Generar trayectoria

Esta función se refiere al diseño de las trayectorias para el movimiento de los robots. Para este propósito es necesario el modelo cinemático inverso. Dos importantes variables deben ser controladas para esta estrategia en particular: la distancia al punto objetivo y la velocidad del robot. Esta función es llevada a cabo en el sistema de toma de decisiones.

4.3.2 Entorno

Este modelo describe el entorno donde se actúa el sistema, sus influencias relevantes, sus atributos y características. La Figura 4.4 describe el entorno para la estrategia propuesta. Los elementos del sistema consisten en el balón, los compañeros de juego, los oponentes, las porterías, el ordenador central y las zonas del campo de juego. Las influencias entre cada robot y el entorno son presentadas en la tabla de influencias. La Tabla 4.1 presenta las tablas de influencia I_2 , I_3 , I_4 , I_5 e I_6 .

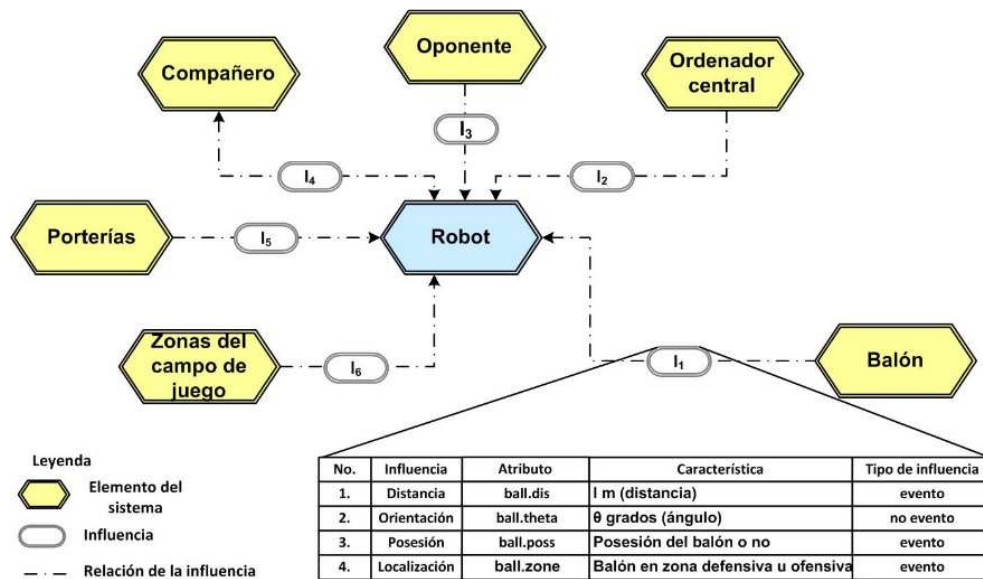


Figura 4.4. Modelo del entorno para un robot futbolista en un equipo centralizado.

Tabla 4.1. Tabla de influencias

No	Influencia	Atributo	Característica	Tipo de influencia
I_2				
1.	Inicialización del juego	Coordenadas jugador	coordenadas (x,y)	evento
2.	Goles anotados	Equipo	goles anotados por equipo	no evento
I_3				
1.	Distancia	opponent.dis	l m (distancia)	no evento
2.	Orientación	opponent.theta	Θ degree (ángulo)	no evento
3.	Oponente más cercano	Opponent.nearest	Más cercano o no	evento
I_4				
1.	Distancia	player.dis	l m (distancia)	no evento
I_5				
1.	Distancia	goal.dis	l m (distancia)	evento
I_6				
1.	Localización	player.zone	Jugador en zona defensiva u ofensiva	evento
2.	Distancia a la zona	zone.dis	l m (distancia)	evento

Por ejemplo, la Figura 4.4 muestra la influencia entre el robot y el balón. Las influencias que disparan una transición de estados son marcadas como eventos. Por consiguiente, la distancia entre el balón y el jugador es una influencia para asignar roles, en otro caso la zona donde está ubicado el balón es una influencia para seleccionar tácticas, o la posesión del balón es utilizada como influencia para seleccionar comportamientos. Las influencias marcadas como no-eventos proporcionan información que permite que un comportamiento pueda ser ejecutado.

4.3.3 Estructura activa

La estructura activa describe los elementos del sistema, sus atributos y sus interrelaciones, con el propósito de definir la estructura básica del sistema. La Figura 4.5 describe la estructura activa de un equipo centralizado de fútbol de robots, enfocado en la liga *SimuroSot 5vs5*.

Esta estructura es usada para inspeccionar los elementos del sistema y sus flujos de información entre estos elementos. Los módulos corresponden a módulos de software de aplicaciones específicas. 5 módulos de software han sido identificados, 4 de ellos en el ordenador central: módulo de percepción, módulo de estrategia de equipo, módulo de control y módulo de comunicación. El quinto módulo se encuentra en el agente y corresponde también al módulo de comunicación del robot. Adicionalmente, las señales de sensores y actuadores de la liga *MiroSot* son simuladas en la liga *SimuroSot 5vs5*. La interrelación entre módulos es presentada como flujos de información en el caso de software, y flujos de energía en el caso de cam-

bios físicos en el entorno. En el caso de la liga *MiroSot*, la interacción es sensada por las cámaras (sistema de visión), en el caso de *SimuroSot*, la interacción está incluida al interior del simulador.

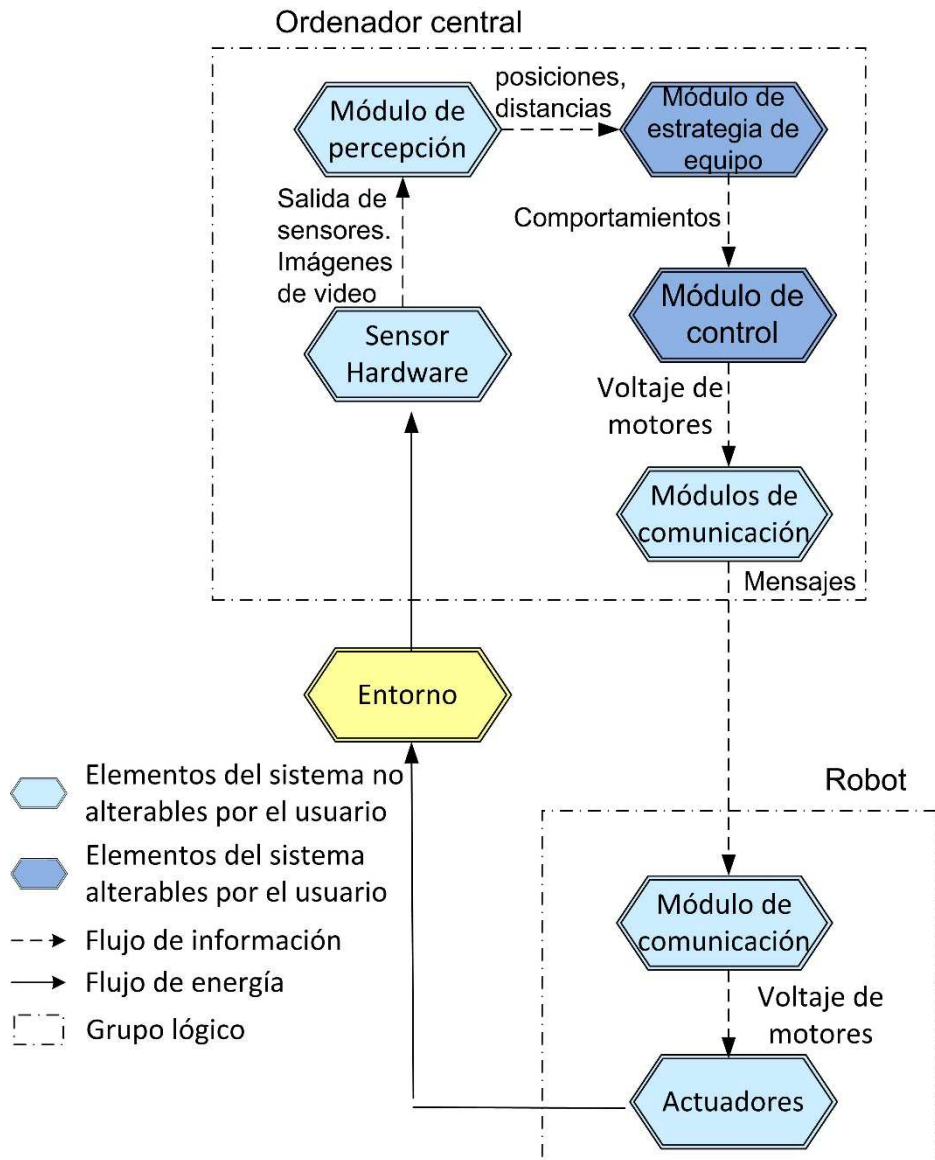


Figura 4.5. Estructura activa de un jugador de fútbol de robots con control centralizado, para la liga SimuroSot.

Los módulos se describen a continuación.

4.3.3.1 *Módulo de estrategia de equipo*

Este módulo se refiere a la implementación de la estrategia, selección de tácticas, roles y comportamientos. En este módulo el sistema de toma de decisiones es implementado. La información obtenida en este módulo es enviada como flujos de información al módulo de control.

4.3.3.2 *Módulo de control*

En el módulo de control la información de los comportamientos es transformada en señales de actuador, basadas en la cinemática inversa del robot. Tanto en *MiroSot* como en *SimuroSot* el modelo cinemático inverso debe ser obtenido, con el propósito de calcular la señal equivalente de cada actuador, dependiendo del comportamiento seleccionado por el módulo de estrategia de equipo. Esta información es enviada al módulo de comunicaciones.

4.3.3.3 *Módulo de comunicaciones*

Este módulo se refiere a las comunicaciones y debe ser dividido en dos sub-módulos, uno de ellos ubicado en el ordenador central y el otro en el robot. En el ordenador central las señales de control recibidas desde el módulo de control deben ser transmitidas al robot por medio de radiofrecuencias. Estas señales son recibidas por el sub-módulo de comunicación del robot, y transmitidas como señales de actuador a los motores en el caso de la liga *MiroSot*. Para el caso del *SimuroSot*, este módulo está incluido en el simulador y no es programado por el usuario.

4.3.4 *Comportamientos*

La estrategia presentada se divide en dos tácticas. Una de ellas es la táctica defensa que es seleccionada cuando el balón está ubicado en la zona defensiva. La otra es la táctica ataque la cual es seleccionada cuando el balón se encuentra en la zona ofensiva. 4 roles son asignados dependiendo de las condiciones de juego, los cuales son el defensa activo, defensa pasivo, mediocampista y delantero. Los diagramas de comportamientos son utilizados para asignar roles y posteriormente seleccionar los comportamientos apropiados. Estos diagramas se dividen en dos sub-diagramas, los cuales son el modelo parcial de comportamientos-estados, el cual describe el estado del sistema proyectado, transiciones de estados y los eventos que disparan dichas transiciones; el segundo sub-diagrama corresponde al modelo parcial comportamientos-actividades, que describe las secuencias lógicas de las actividades del sistema, incluyendo todos los procesos de operación y adaptación. En este modelo los procesos de operación se refieren a las actividades que son llevadas a cabo dentro de un estado, los procesos de adaptación se refieren a las actividades que son

realizadas durante la transición de estado. Cuando un evento ocurre, un proceso de adaptación es disparado. Posteriormente el sistema toma un nuevo estado y un nuevo conjunto de procesos de operación es activado.

En el contexto de la especificación de comportamientos se deben describir las tácticas utilizadas por el equipo (táctica defensa y táctica ataque), los roles (defensa activo, defensa pasivo, mediocampista y delantero), los comportamientos (ir por el balón, disparar el balón o realizar un pase por ejemplo) y sus interrelaciones. El diagrama de comportamientos-estados trabaja la transición de estados entre las tácticas como estados y los eventos que activan dichas tácticas. Adicionalmente, este mismo diagrama también refleja el proceso de asignación de roles, mostrando los roles como estados y las condiciones que permiten la asignación de roles como eventos. Los diagramas de comportamientos-actividades se refieren a las secuencias de comportamientos que deben ser ejecutados, y la alternativa corresponde a un condicional que depende de una condición de entorno que selecciona la siguiente actividad entre dos o más opciones posibles. Cuando una actividad es realizada, la siguiente actividad conectada mediante un conector lógico es activada.

La Figura 4.6 muestra el modelo de comportamientos-estados para el modelo propuesto. El nivel más alto, que contiene dos tácticas corresponde a la estrategia de equipo. El nivel de estrategia es dividido en dos estados, que corresponden a las tácticas que componen la estrategia de equipo, que para este caso en particular, corresponden a la táctica defensa y táctica ataque. Una vez la táctica ha sido seleccionada, es evaluada una función en cada uno de los jugadores utilizada para el proceso de asignación de roles: esto se puede observar en la Figura 4.6 como sub-estados seleccionados por eventos. Si por ejemplo el balón cambia de zona, el evento 1 (E1) o el evento 2 (E2) es activado y por consecuencia una nueva táctica es activada y la función es evaluada.

La función para la asignación de roles es presentada a continuación:

$$f(t) = k_1(\|x_b(t) - x_p(t), y_b(t) - y_p(t)\|_2) + k_2(\|x_g - x_p(t), y_g - y_p(t)\|_2) \quad (4.1)$$

donde $\|x_b(t) - x_p(t), y_b(t) - y_p(t)\|_2$ corresponde a la distancia euclídea entre el balón ubicado en las coordenadas $(x_b(t), y_b(t))$ y el jugador ubicado en las coordenadas $(x_p(t), y_p(t))$. $\|x_g - x_p(t), y_g - y_p(t)\|_2$ corresponde a la distancia euclídea entre el centro de la portería oponente ubicado en las coordenadas (x_g, y_g) y el jugador. Las constantes k_1 y k_2 corresponden a dos valores de ponderación tales que $k_1 \geq 0$, $k_2 \geq 0$ y que deben cumplir la siguiente condición:

$$k_1 + k_2 = 1. \quad (4.2)$$

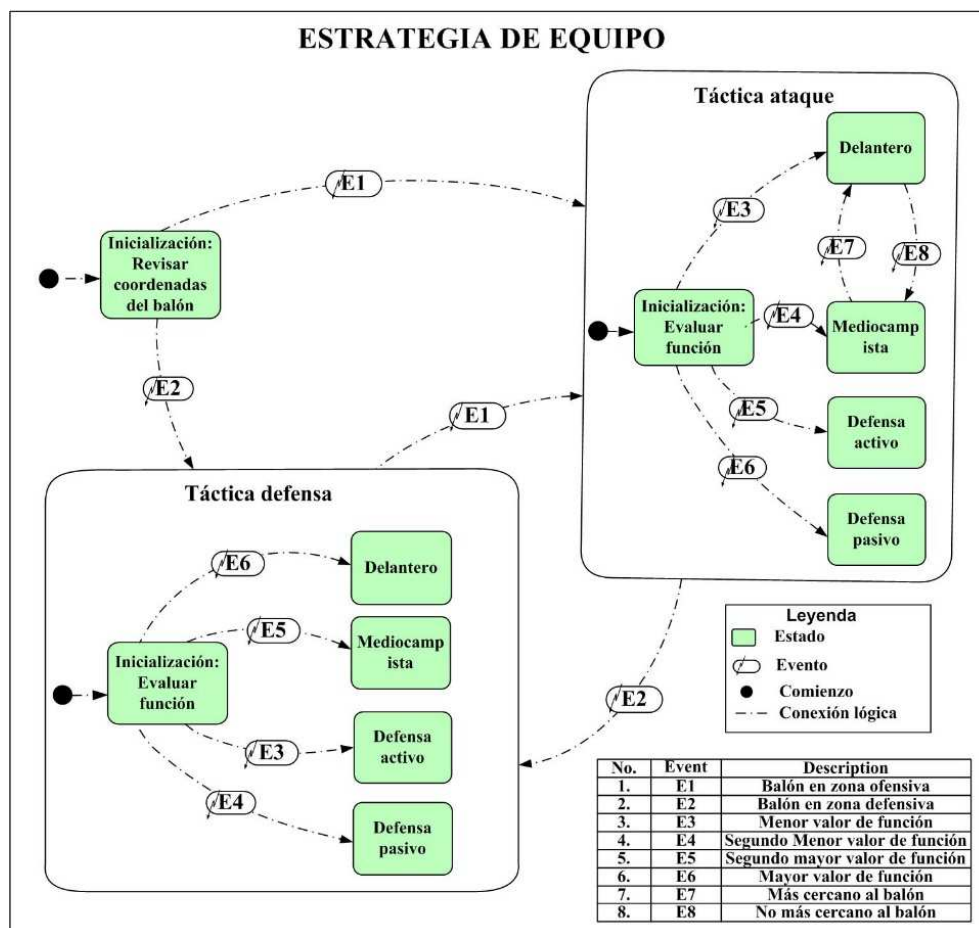


Figura 4.6. Comportamientos-estados de la estrategia propuesta para un equipo de fútbol de robots de arquitectura centralizada.

La importancia de k_1 y k_2 en la ecuación utilizada para la asignación de roles es ponderar las distancias del jugador con el balón y con la portería oponente, respectivamente. Usualmente, la distancia entre el jugador y el balón es significativamente más pequeña que la distancia entre el mismo jugador y la portería oponente, por consiguiente k_1 debe ser de mayor valor que k_2 . No obstante k_2 es importante para proporcionar información sobre la posición del jugador en el campo de juego, dado que dos jugadores pueden estar a una distancia similar del balón, pero uno puede estar más cercano a la portería oponente que el otro, siendo esto relevante para asignar roles. Diferentes experimentos fueron desarrollados con el propósito de

obtener el valor de estas dos constantes. En estos experimentos los robots fueron ubicados en distintas posiciones del campo de juego y distintos valores de k_1 y k_2 fueron asignados. Cuando un cambio de táctica se presentaba, se anotaban qué roles eran asignados a los distintos jugadores, observando el comportamiento de los robots en ese momento del juego. Inicialmente se tomó un valor de $k_1 = k_2 = 0.5$, notando que el jugador que tenía la posesión del balón abandonaba al mismo para ir a tomar un rol defensivo, en otros casos los jugadores tomaban otros cambios abruptos en sus comportamientos. En los casos en que el valor de k_1 era muy cercano a 1 se observaba que comportamientos colaborativos como la realización de pases se convertían poco frecuentes, llegando al punto que el jugador con la posesión del balón tomaba el comportamiento de ir por el mismo siempre, presentando dicho comportamiento casi constante. Después de realizar distintos experimentos se encontró que un valor adecuado era $k_1 = 0.75$ y $k_2 = 0.25$. A continuación se presenta una descripción de los 5 roles para las dos tácticas presentadas en esta estrategia.

4.3.4.1 Rol portero

El portero es el único rol estático en esta estrategia, para ambas tácticas. La Figura 4.7 presenta la zona del portero, que es un área al frente de la portería donde este jugador debe actuar. El diagrama de comportamientos-actividades del rol portero es presentado en la Figura 4.8. Cuando el rol portero es activado, este jugador debe revisar sus coordenadas. Si el jugador se encuentra al interior de la zona de portero, el jugador revisa las coordenadas del balón y lo sigue en paralelo a la portería, siempre al interior de su respectiva zona. Si el jugador portero no se encuentra al interior de la línea de portería, debe primero ubicarse en su zona y posteriormente continuar con sus comportamientos.

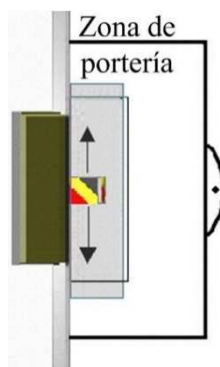


Figura 4.7. Zona de portería, que corresponde a la zona sombreada con color gris. El portero debe seguir el balón al interior de esta zona, de forma paralela a la línea de gol.

Aunque la estrategia del portero presentada ha sido implementada en la estrategia de equipo propuesta, se debe resaltar que cualquier otra estrategia de portero para ligas centralizadas puede ser implementada sin que esto afecte el rendimiento de la estrategia de equipo propuesta.

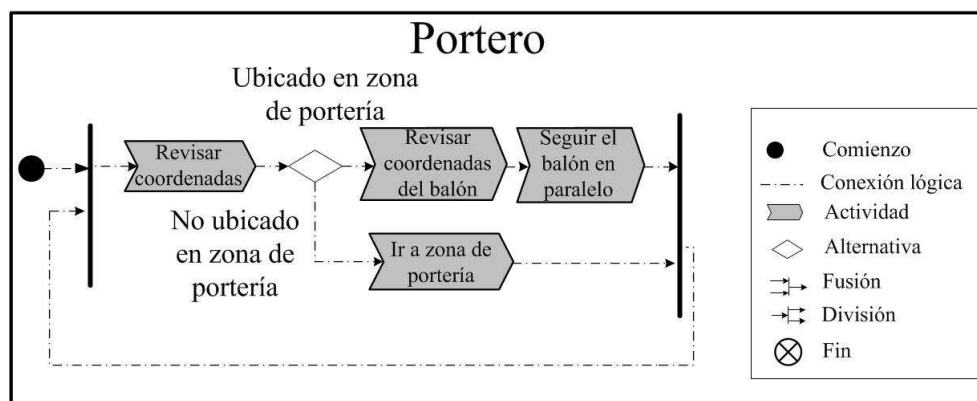


Figura 4.8. Diagrama de comportamientos-actividades del rol portero.

4.3.4.2 Roles en táctica defensa

La táctica defensa es activada cuando el evento E2 (balón en zona defensiva) ocurre. El principal objetivo de esta táctica es interceptar y enviar el balón a la zona ofensiva, evitando en lo posible recibir goles. Los roles son asignados dependiendo de la función presentada en la ecuación 4.1, de acuerdo como se presentó en la Figura 4.6. Al jugador con el menor valor de la función se le asigna el rol defensa activo, y su diagrama de comportamientos-actividades es presentado en la Figura 4.9. Cuando este rol es activado para esta táctica, el robot revisa las coordenadas del balón y posteriormente va a capturarlo. Si el robot tiene la posesión del balón lo dispara a la zona ofensiva y revisa las coordenadas de este último nuevamente. En caso que el defensa activo no tenga la posesión del balón va a capturarlo como se muestra en la secuencia descrita en la Figura 4.9. Recordando que la posesión del balón es definida como la mínima distancia entre el robot y el balón, en la que el jugador puede disparar el balón.

El robot que obtuvo el segundo menor valor en la función de asignación de roles se convierte en el defensa pasivo, presentando su diagrama de comportamientos-actividades en la Figura 4.10. Como se puede notar, el robot evalúa cuál es su oponente más cercano y se mueve a bloquear sin tocar al jugador (esto último es con el fin de evitar faltas, ya que esta estrategia ha sido diseñada teniendo en cuenta el reglamento de juego de la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. El propósito de bloquear

al oponente es con la intención de prevenir posibles pases que se le puedan realizar a este jugador. Una vez el oponente es interceptado, el defensa pasivo revisa si este sigue siendo su oponente más cercano, y continúa con la secuencia presentada en su respectivo diagrama de comportamientos-actividades.

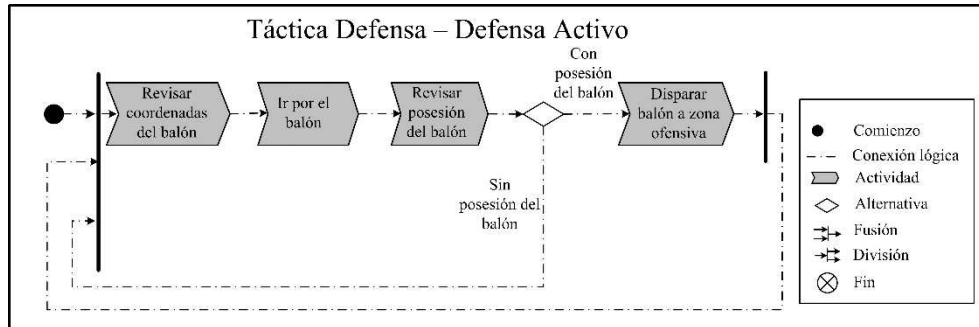


Figura 4.9. Diagrama de comportamientos-actividades del rol defensa activo, táctica defensa.

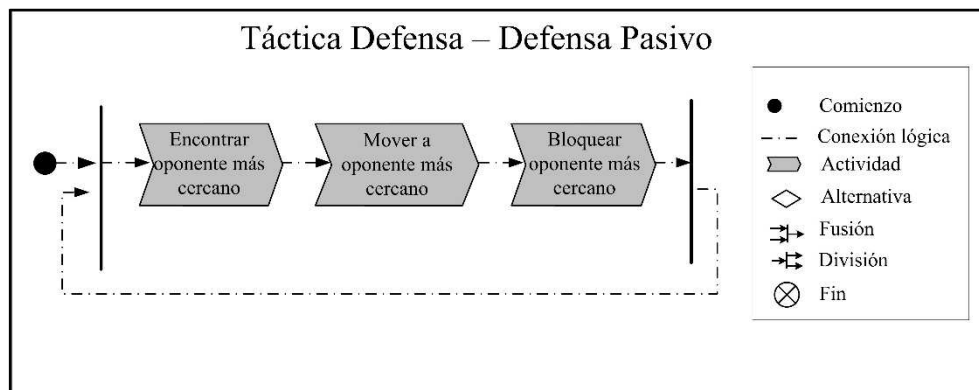


Figura 4.10. Diagrama de comportamientos-actividades del rol defensa pasivo, táctica defensa.

Los robots con el primer y segundo valor máximo en la función de asignación de roles obtienen los roles de delantero y mediocampista respectivamente. Ambos poseen el mismo diagrama de comportamientos-actividades, el cual es presentado en la Figura 4.11. Cuando estos roles son activados, cada robot revisa sus respectivas coordenadas. Si el robot se encuentra en la zona defensiva, este debe moverse a la zona ofensiva. Si el robot se encuentra presente en la zona ofensiva espera allí por el balón en caso de contra ataque. La diferencia entre el mediocampista y el delantero en esta táctica, consiste en su ubicación en el campo de juego cuando

esperan que el balón llegue a la zona ofensiva. Ya que estos dos jugadores se ubican de tal modo que cubran la zona ofensiva uniformemente.

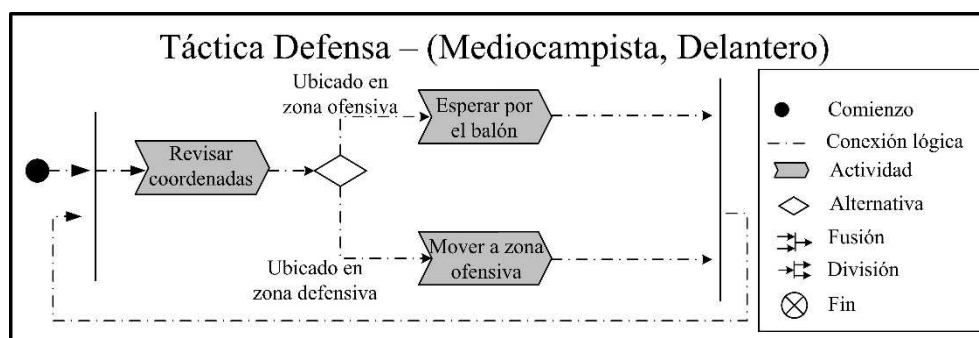


Figura 4.11. Diagrama de comportamientos-actividades para mediocampista y delantero, táctica defensa.

La Figura 4.12 presenta un ejemplo de asignación de roles y comportamientos cuando la táctica defensa es activada. El portero sigue el balón de forma paralela a la línea de gol al interior de la zona de portería; el defensa activo va por el balón y lo dispara a la zona ofensiva; el defensa pasivo va a bloquear a un jugador oponente que trata de interceptar el balón. Tanto el mediocampista como el delantero “observan el balón” ubicados desde la zona ofensiva, esperando un posible pase.

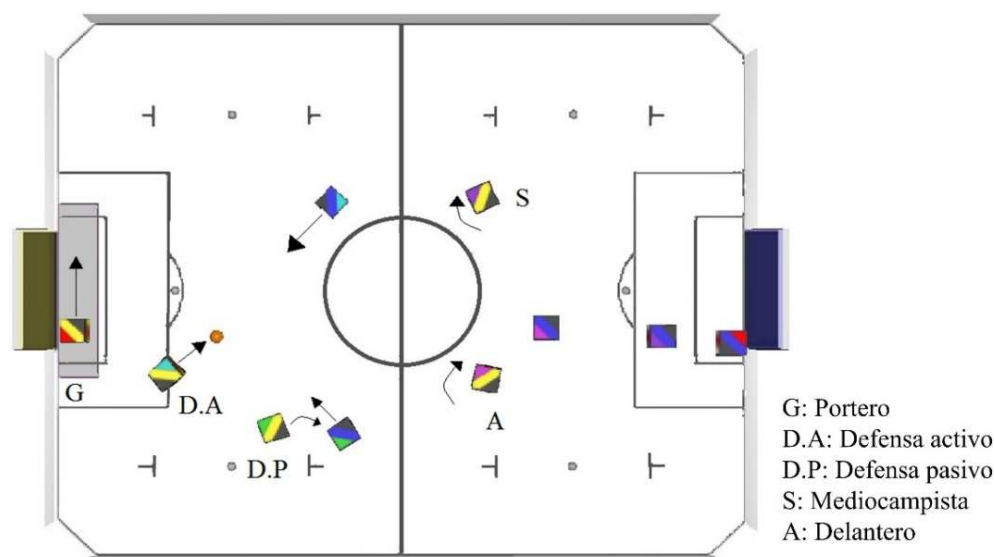


Figura 4.12. Ejemplo de situación de juego táctica defensa.

4.3.4.3 Roles en táctica ataque

La táctica ataque es activada cuando se presenta el evento E1 (balón en la zona ofensiva). Esta táctica se enfoca en disparar el balón a la portería oponente buscando anotar gol. Una vez la táctica es activada, la función para la selección de roles es evaluada, igualmente como se presentó en la Figura 4.6. El jugador con el máximo valor obtenido en la función y el segundo máximo corresponden a los roles defensa pasivo y defensa activo respectivamente. A cada uno de estos roles les es asignado una ubicación en la zona defensiva donde los robots deben seguir el balón de forma paralela a la línea de gol a lo ancho del campo de juego. Estas zonas se llaman zona de defensa pasivo y zona de defensa activo y se detallan en la Figura 4.13.

El principal objetivo de ambos roles es interceptar el balón en caso de contra ataque por parte del equipo oponente. El diagrama de comportamientos-actividades es similar para ambos roles en esta táctica, y es presentado en la Figura 4.14. Cuando uno de estos roles es activado para esta táctica, el jugador inicialmente revisa sus coordenadas. Si el defensa se encuentra fuera de su respectiva zona debe moverse hacia esta última. Si el jugador se encuentra al interior de su zona, debe seguir el balón en paralelo a la línea de gol, sin salirse de la zona que tiene asignada. La única diferencia entre estos jugadores consiste en que la zona de defensa activo está más cerca de la línea de mitad del campo de juego, estando la zona de defensa activo, hacia la mitad de la zona defensiva.

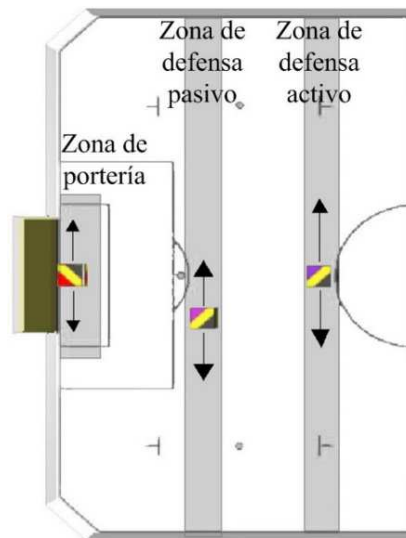


Figura 4.13. Zonas de portería, de defensa pasivo y de defensa activo. En cada zona el respectivo jugador sigue al balón en paralelo a la línea de gol.

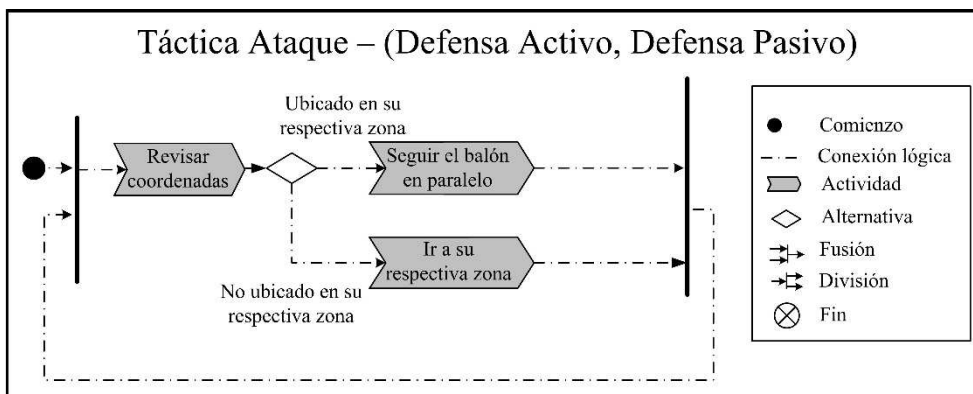


Figura 4.14. Diagrama de comportamientos-actividades para defensa activo y defensa pasivo, táctica ataque.

Mediocampista y delantero son asignados a los jugadores con el menor y segundo menor valor obtenido en la función de asignación de roles, respectivamente. No obstante una vez estos roles han sido asignados, pueden ser intercambiados entre estos dos jugadores tal como se pudo apreciar en la Figura 4.6. Por consiguiente, el rol delantero se le asigna al jugador más cercano al balón, de tal manera que si el balón en algún momento está más cercano al mediocampista, este asume el rol de delantero, sin necesidad de activar la función de asignación de roles nuevamente. En la Figura 4.15 se presenta el diagrama de comportamientos-actividades del mediocampista.

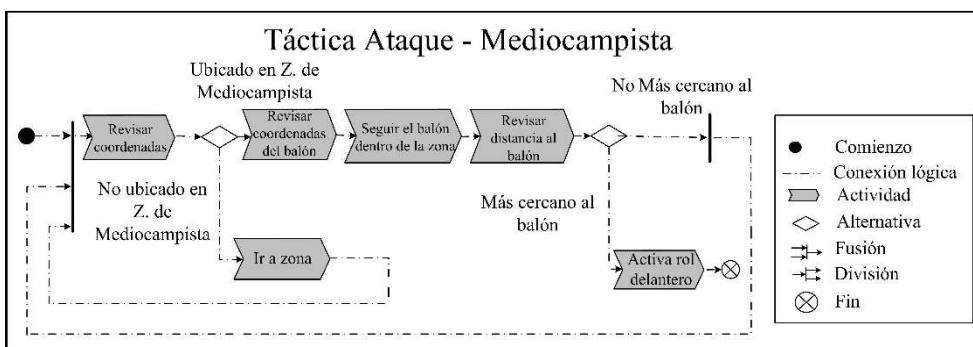


Figura 4.15. Diagrama de comportamientos-actividades para mediocampista, táctica ataque.

Cuando este rol es activado este jugador revisa sus coordenadas. Si el jugador no se encuentra en una zona denominada zona de mediocampista, el robot debe moverse a este lugar. Cuando el mediocampista se encuentre a su respectiva zona este

jugador revisa las coordenadas del balón siguiéndolo en paralelo a lo largo del campo de juego, sin salirse de su respectiva zona. En el momento en que el mediocampista detecta que se encuentra el balón más cercano a él que al jugador con el rol delantero, el evento E7 de la Figura 4.6 es activado el mediocampista asume el rol delantero y el jugador que anteriormente era delantero ahora pasa a ser mediocampista, activando este robot su nuevo rol.

La Figura 4.16 muestra el diagrama de comportamientos-actividades del rol delantero para la táctica ataque. Como se puede observar, el delantero revisa si es el jugador más cercano al balón, si no lo es, el evento E8 de la Figura 4.6 es activado y asume el rol mediocampista, si lo es el delantero va a capturar el balón, en el momento que este jugador tenga la posesión del balón disparará a la portería tratando de anotar un gol.

Un ejemplo de roles y comportamientos para la táctica ataque es presentado en la Figura 17. El delantero sigue el balón con el fin de anotar un gol. El mediocampista sigue el balón al interior de la zona mediocampista. El defensa activo y el defensa pasivo siguen el balón en paralelo a la línea de gol al interior de sus respectivas zonas.

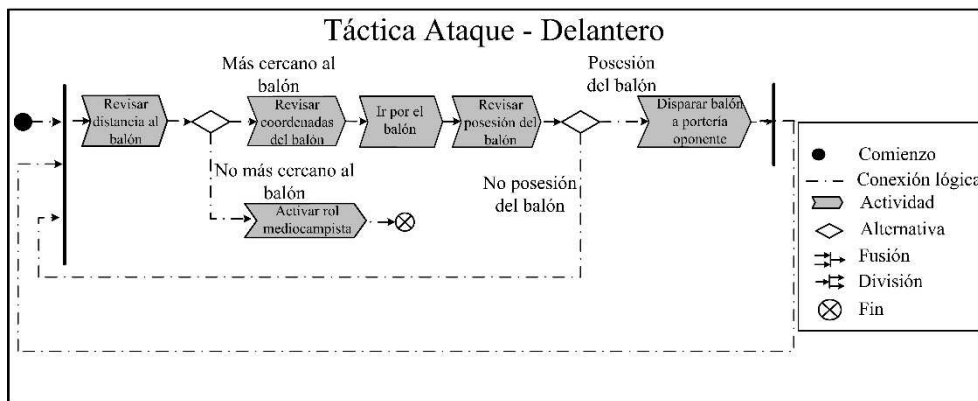


Figura 4.16. Diagrama de comportamientos-actividades para delantero, táctica ataque.

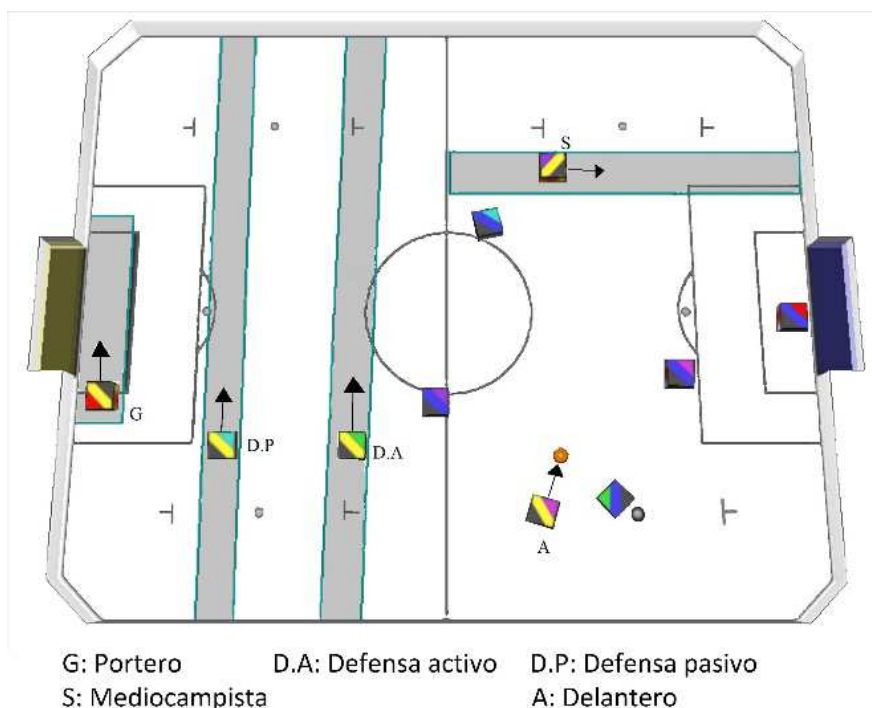


Figura 4.17. Ejemplos de roles y comportamientos en la táctica ataque.

4.4 Resultados experimentales

Con el propósito de validar la estrategia propuesta, se han realizado 10 juegos de 5 minutos en contra de una estrategia que viene por defecto en el simulador. Esta estrategia tiene 5 roles constantes, uno es el rol portero, que bloquea el balón siguiéndolo en paralelo a la línea de gol al frente de la portería. Dos jugadores defensas que igualmente bloquean al balón siguiéndolo en paralelo a la línea de gol, distribuidos a lo largo de la zona defensiva. Los otros dos roles consisten en delanteros, que básicamente van por el balón y disparan en contra de la portería oponente. Esta estrategia ha sido programada en lenguaje LINGO. Estos partidos fueron realizados teniendo en cuenta las reglas de la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. Vale la pena resaltar que al ser la estrategia presentada una aproximación sistemática de la estrategia propuesta en el capítulo 3, realizar una comparación entre las dos estrategias sería redundante, ya que ambas se basan en Máquinas Jerárquicas de Estado Finito, tácticas, roles y comportamientos, conservando en esencia la misma arquitectura.

La Tabla 4.2 presenta los goles anotados por los equipos en los 10 partidos, y el porcentaje de posesión del balón por equipo por partido. El equipo con la estrategia propuesta es el equipo local, mientras que el contrincante con la estrategia programada en LINGO y de roles constantes es el equipo oponente. El equipo local ganó todos los partidos mostrando un mayor porcentaje de posesión del balón que el oponente durante los 10 partidos, presentando un claro control de los partidos. Se puede ver también que el número de pases exitosos del equipo con la estrategia propuesta es mayor que los pases exitosos del oponente, presentando valores similares durante todos los partidos.

Tabla 4.2. Goles anotados, pases exitosos y posesión del balón por equipo

Partidos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Goles anotados	Local	3	3	2	2	3	4	4	3	4	2	3
	Oponente	2	1	0	1	1	2	2	1	0	0	1
Pases exitosos	Local	5	3	6	5	4	5	6	3	6	5	4.8
	Oponente	1	2	2	0	1	1	4	0	1	0	1.2
Posesión del balón	Local	78%	67%	77%	66%	68%	76%	84%	61%	77%	69%	72.3%
	Oponente	22%	33%	23%	34%	32%	24%	16%	39%	23%	31%	27.7%

La Tabla 4.3 presenta las faltas y bloqueos, los autogoles y los goles anulados. Muchas faltas y bloqueos causados por el equipo oponente fueron observados durante el juego, algunos casos estos se daban porque los dos delanteros oponentes iban por el balón al mismo tiempo, o el defensa oponente obstaculizaba su compañero delantero delantero, bloqueando el balón y evidenciando comportamientos de equipo que no están coordinados. Una importante razón por la cual el número de faltas y bloqueos son significativamente menores en el equipo local se debe a que la estrategia propuesta ha sido diseñada teniendo en cuenta el reglamento de la liga, por ejemplo evitando que más de un jugador vaya por el balón al mismo tiempo, previniendo que más de un jugador ingrese al área de gol, o defendiendo con más de 3 jugadores al interior del área de penalti.

Tabla 4.3. Faltas y bloqueos, autogoles y goles anotados

Partidos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Faltas y bloqueos	Local	2	1	2	1	4	2	2	0	3	1	1.8
	Oponente	11	7	8	5	12	8	7	13	8	8	8.7
Auto goles	Local	1	1	0	1	0	2	1	0	0	0	0.6
	Oponente	1	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0.5
Goles anulados	Local	1	1	1	1	2	1	1	0	1	0	0.9
	Oponente	2	0	2	0	0	0	1	2	1	0	0.8

La Tabla 4.4 presenta el porcentaje de tiempo en que cada táctica seleccionada por el equipo locales seleccionada e cada partido. Se puede observar que la táctica ataque (AT) no ha sido la más seleccionada en todos los partidos, siendo la táctica defensa (DT) la más seleccionada en dos ocasiones, y en la mayoría de los casos, los porcentajes de selección han resultado muy cercanos.

Tabla 4.4. Porcentaje de tiempo de selección de táctica por partido

Partidos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
T. D	34%	41%	40%	49%	46%	52%	47%	35%	43%	53%	44%
T. A	66%	59%	60%	51%	54%	48%	53%	65%	57%	47%	56%

Al respecto, la estrategia diseñada utilizando *principle solution* con asignación dinámica de roles, presentó un rendimiento adecuado ganando todos los partidos y obteniendo un mayor porcentaje de posesión del balón que el equipo oponente, no obstante distintos comportamientos defensivos han tenido que ser realizados durante los partidos. Esta situación se presenta como la respuesta ante la estrategia del equipo rival. Aunque algunos goles fueron anotados por el equipo oponente, la táctica defensa presentó un adecuado rendimiento ante la respuesta de los ataques de dicho equipo, forzando la selección de la táctica ataque, anotando goles y ganando finalmente los partidos. Vale la pena notar que en promedio, la táctica ataque fue levemente más seleccionada que la táctica defensa, esto implica que el balón estuvo un mayor tiempo en la zona ofensiva que en la defensiva. Distintos comportamientos colaborativos fueron observados durante los partidos. En algunos casos, el defensa activo intercepta y envía el balón a la zona ofensiva, donde el delantero, o el mediocampista intercepta el pase y se activa la táctica ataque; en otros casos el defensa activo mantiene la posesión del balón y al cambiar la táctica dicho jugador adquiere el rol delantero. Un ejemplo de comportamientos de equipo en el caso de la táctica ataque es presentado en la Figura 4.18. En la Figura 4.18(a) el delantero dispara el balón con el propósito de anotar un gol, pero el balón rebota en un jugador oponente y es desviado. En la Figura 4.18(b) los roles cambian y el jugador que anteriormente era el mediocampista ahora adquiere el rol de delantero, siendo el anterior delantero ahora el mediocampista. El nuevo delantero va por el balón mientras que el mediocampista es bloqueado por un jugador oponente. En la Figura 4.18(c) el delantero anota un gol.

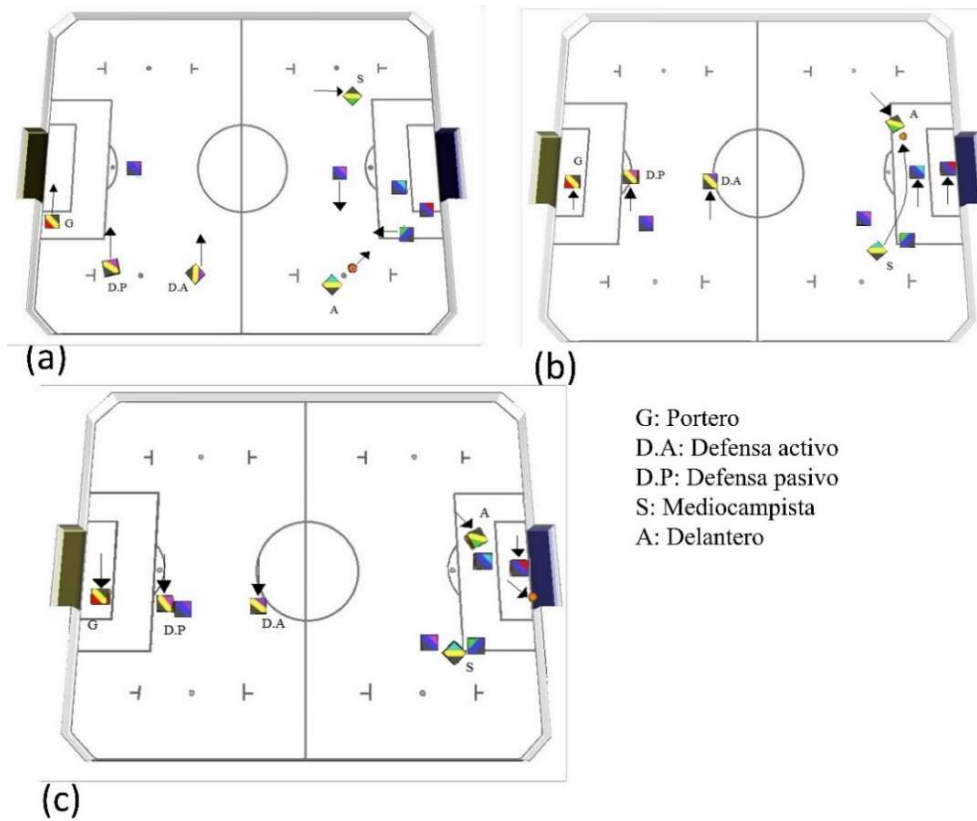


Figura 4.18. Ejemplos de comportamientos en táctica ataque. (a) El delantero dispara el balón a la portería oponente. (b) el balón es rechazado por un oponente y el nuevo delantero que anteriormente era el mediocampista, intercepta el balón. (c) El delantero dispara y anota un gol.

4.5 Conclusiones del capítulo

Principle solution ofrece una alternativa para el modelado y el diseño de estrategias de fútbol de robots en equipos con arquitecturas centralizadas de una forma clara e intuitiva, adoptando una estructura jerárquica. Esto conduce en un modelo holístico incluyendo los diferentes niveles tanto de hardware como de software, que deben ser tenidos en cuenta para el diseño de la arquitectura de la estrategia. *Principle solution* permitió la identificación de diferentes funciones, elementos del sistema y sus respectivas influencias y estructuras para el diseño de arquitecturas para la

coordinación de equipo con percepción global y control centralizado, donde las decisiones y el procesamiento de datos son realizadas por un ordenador central remoto, presentando diferentes paradigmas con respecto a los equipos con percepción local y control distribuido. Esto facilita el diseño de diferentes reglas para la selección de roles y posteriormente la ejecución de comportamientos por parte de los robots, dependiendo de las condiciones de juego. En el caso de que cambios en el código de programación asociados con la coordinación de equipo fueran requeridos, las modificaciones específicas pueden ser reorganizadas por medio de los diagramas, permitiendo una identificación intuitiva de las líneas de código que deben ser modificadas e implementadas.

Otra importante ventaja es la posibilidad de adaptar a esta estrategia nuevos roles o comportamientos colaborativos, tales como coordinación entre el portero y los defensas. También es posible envolver aprendizaje de máquina tanto en los comportamientos de los jugadores, como en los sistemas de toma de decisiones. Esta estrategia es implementada utilizando el simulador *SimuroSot 5vs5 de FIRA*, jugando 10 partidos en contra de un equipo el cual posee una estrategia que viene por defecto en el simulador. La estrategia propuesta presentó un claro dominio en los partidos, ganándolos en su totalidad y ofreciendo una mayor posesión del balón que el oponente. Aunque este modelo ha sido implementado en simulación, el modelo propuesto de estrategia puede ser implementado en la *FIRA MiroSot League*, sin significativos cambios en su arquitectura.

Un camino con el propósito de mejorar el rendimiento del equipo buscando anotar más goles o evitar los autogoles, es incluir más comportamientos colaborativos. Una razón por la que el equipo local no anotó más goles, a pesar de mantener una mayor posesión del balón, o por la que anotó algunos autogoles, es la necesidad de mejorar el rendimiento de los comportamientos cooperativos, bien sea entre los defensas y el portero en la táctica defensa, o entre el delantero y el mediocampista en la táctica ataque. Una forma para mejorar el rendimiento de los comportamientos colaborativos entre los jugadores es el uso de algoritmos de aprendizaje, o por sincronización de los comportamientos. Los valores de k_1 y k_2 están directamente relacionados con la asignación de roles y como tal no afectan el rendimiento de los comportamientos, aunque pueden afectar el rendimiento global del equipo mediante una incorrecta asignación de roles a los jugadores.

CAPÍTULO 5

ARQUITECTURA BASADA EN ROLES APLICADA EN EQUIPOS DE FÚTBOL DE ROBOTS CON CONTROL CENTRALIZADO

5.1 Introducción

Como se ha explicado en el apartado 2.4, arquitecturas basadas en roles han sido ampliamente utilizadas en distintas arquitecturas multi-agente y si bien el concepto de rol en fútbol de robots no es nuevo, las arquitecturas que lo utilizan siempre requieren de múltiples capas adicionales para que un agente pueda ejecutar su rol. En este capítulo, 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 en este capítulo 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 rendimiento de los comportamientos.

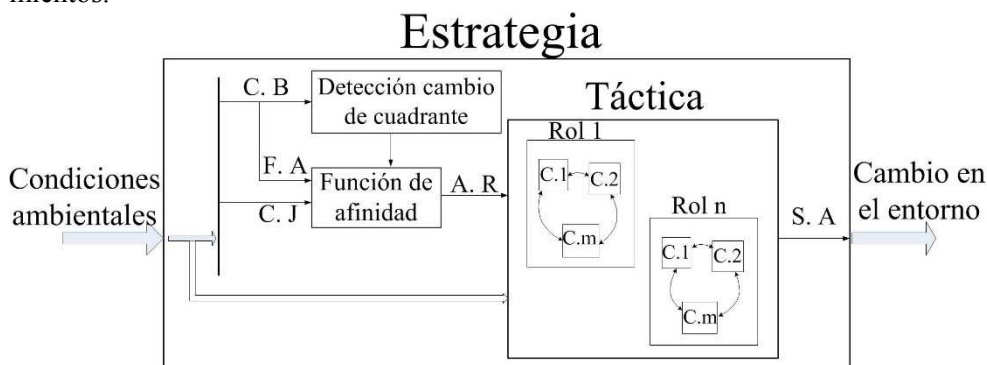


Figura 5.1. Arquitectura de la estrategia de equipo basada en roles.

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 presentada en el capítulo 4. 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. Para validar esta estrategia, se utiliza la plataforma de simulación *SimuroSot 5vs5 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.

5.2 Arquitectura basada en roles

La arquitectura de la estrategia propuesta basada en roles se presenta en la Figura 5.1, 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 juga-

dores, cada jugador con su respectivo rol, activa un comportamiento (C.) determinado dependiendo de las condiciones ambientales existentes. 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.

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: Este jugador debe bloquear a un jugador oponente cuando haya peligro de gol.
- Delantero central: Quien 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: Este jugador 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 asumiría 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 5.2, 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 5.2 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, que es la definición que ha sido utilizada en los capítulos 3 y 4.

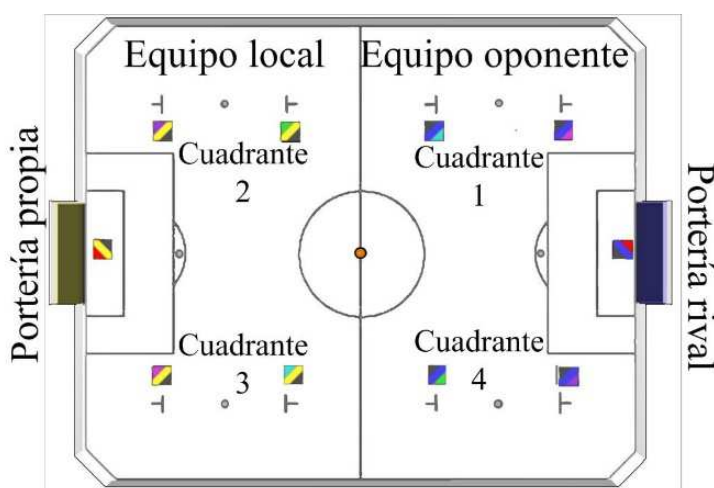


Figura 5.2. Distribución del campo de juego en cuadrantes.

En la Figura 5.3 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. 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.

Los comportamientos del rol defensa central se presentan en la Figura 5.4. 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 primer lugar se debe evaluar en qué lugar se encuentra el balón, si este 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 inicialmente para no obstaculizar al portero y evitar comportamientos indeseados como autogoles y, como segunda medida, cumpliendo el reglamento de la *FIRA SimuroSot 5vs5*

League, ya que la presencia de más de un robot del mismo equipo en esta área es penalizada como falta.

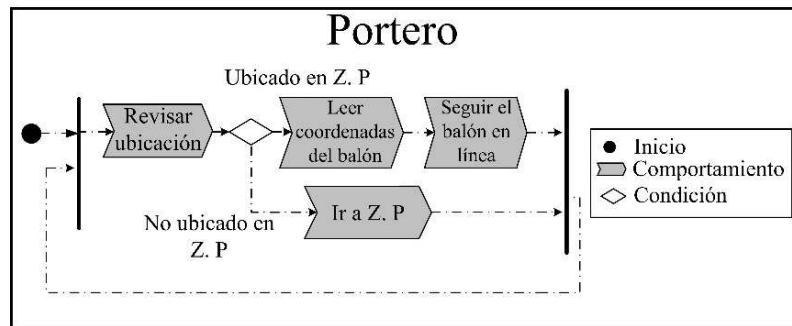


Figura 5.3. Comportamientos del rol portero.

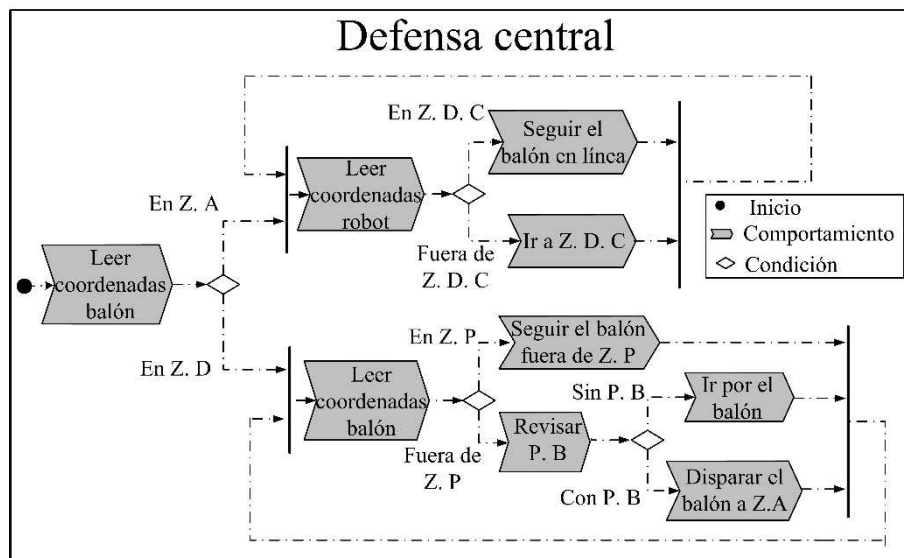


Figura 5.4. Comportamientos correspondientes al rol defensa central.

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. Si 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 contra ataques 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.

La secuencia de comportamientos correspondientes al jugador defensa de marca se presenta en la Figura 5.5. 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 de 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 de defensa de marca (Z. D. M), ubicada detrás de la zona de 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 contra ataques del equipo oponente en estas áreas descubiertas.

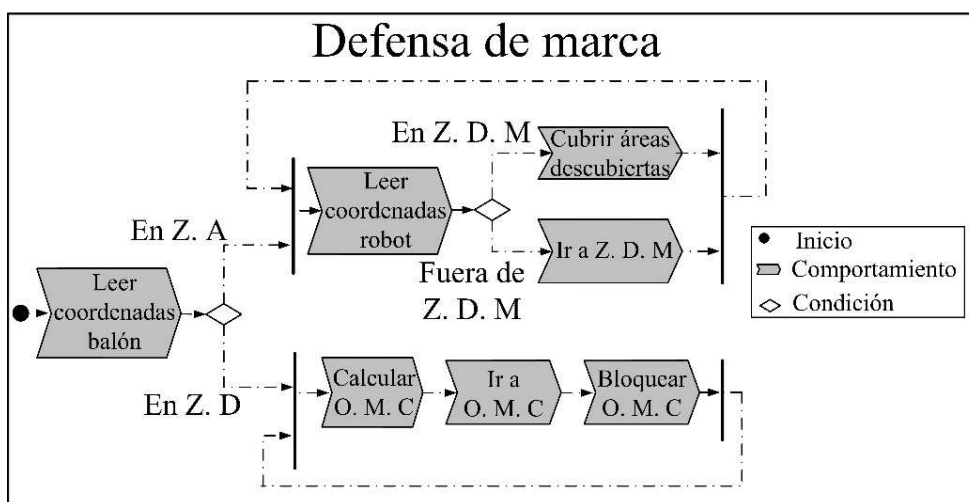


Figura 5.5. Comportamientos correspondientes al rol defensa de marca.

El rol delantero central es presentado en la Figura 5.6. Si el balón se encuentra en la zona de defensa (Z. D), el delantero central debe esperar el balón en caso de 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.

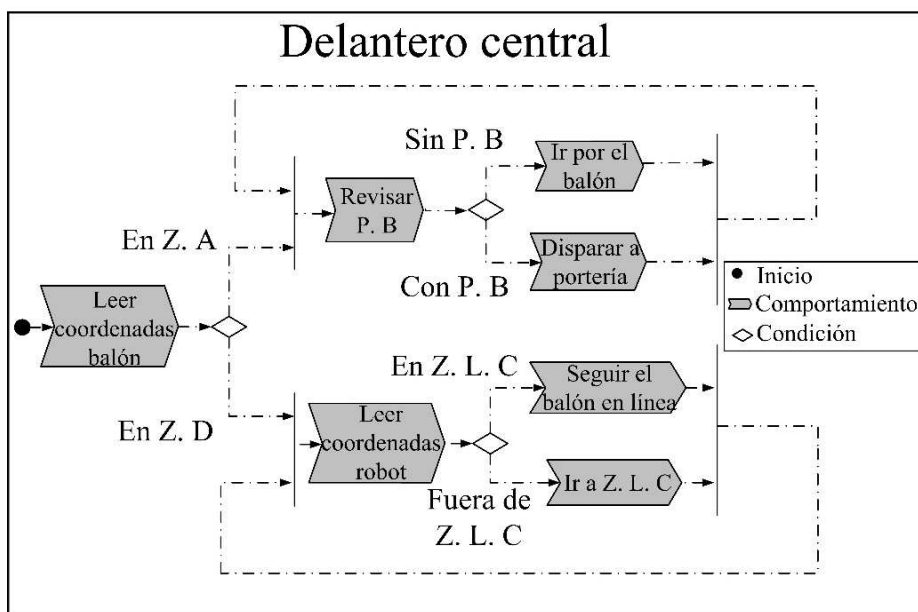


Figura 5.6. Comportamientos correspondientes al rol delantero central.

Los comportamientos del rol delantero lateral son descritos en la Figura 5.7. 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, donde el cuadrante 3 corresponde a Q. 3 y el cuadrante 4 corresponde a 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 5.8). 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.

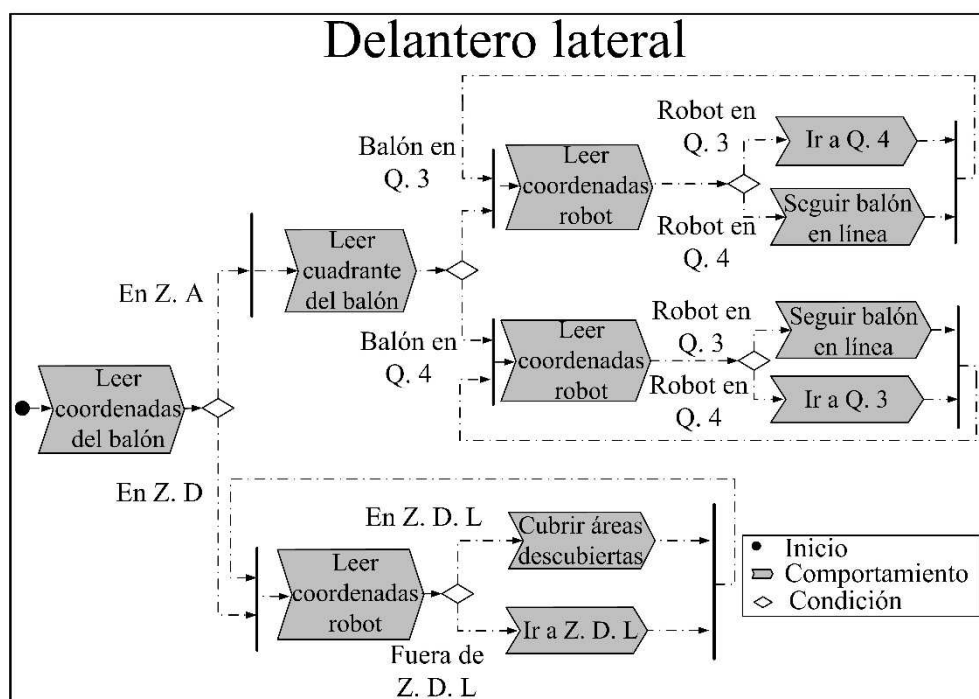


Figura 5.7. Comportamientos correspondientes al rol delantero lateral.

En la Figura 5.8 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.

Para definir esta afinidad, inicialmente se tiene:

$$P\vec{b}(t) = (x_b(t), y_b(t)) \quad (5.1)$$

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:

$$P\vec{p}(t) = (x_p(t), y_p(t)). \quad (5.2)$$

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

$$f(t) = K\|P\vec{b}(t) - P\vec{p}(t)\|_2 + (1 - K)\|P\vec{b}(t) - Pg\|_2 \quad (5.3)$$

siendo el primer término la distancia euclídea entre las coordenadas del balón y del jugador, y el segundo término la distancia euclídea entre las coordenadas del balón y las coordenadas de la portería 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.

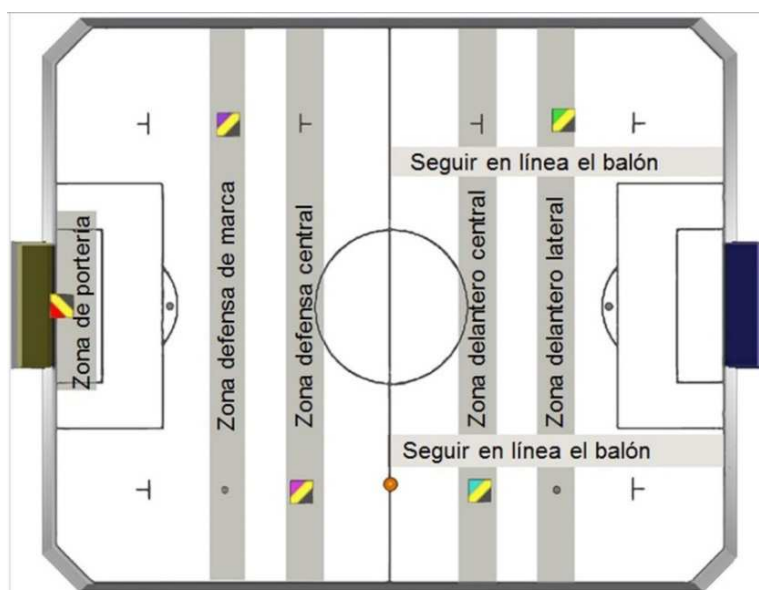


Figura 5.8. Zonas definidas para los diferentes comportamientos.

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 5.1. 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

5.3 Validación de la estrategia

Una primera validación se realizó mediante 100 partidos de acuerdo con las reglas establecidas para la *SimuroSot Middle League*, en contra del equipo con la estrategia que viene por defecto en el simulador y programada en Lingo, también conocido como equipo FIRA o equipo LINGO, siendo el mismo equipo contra el que se realizaron los partidos de validación en el capítulo 4. Recordando, la estrategia de este equipo 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 5.9.

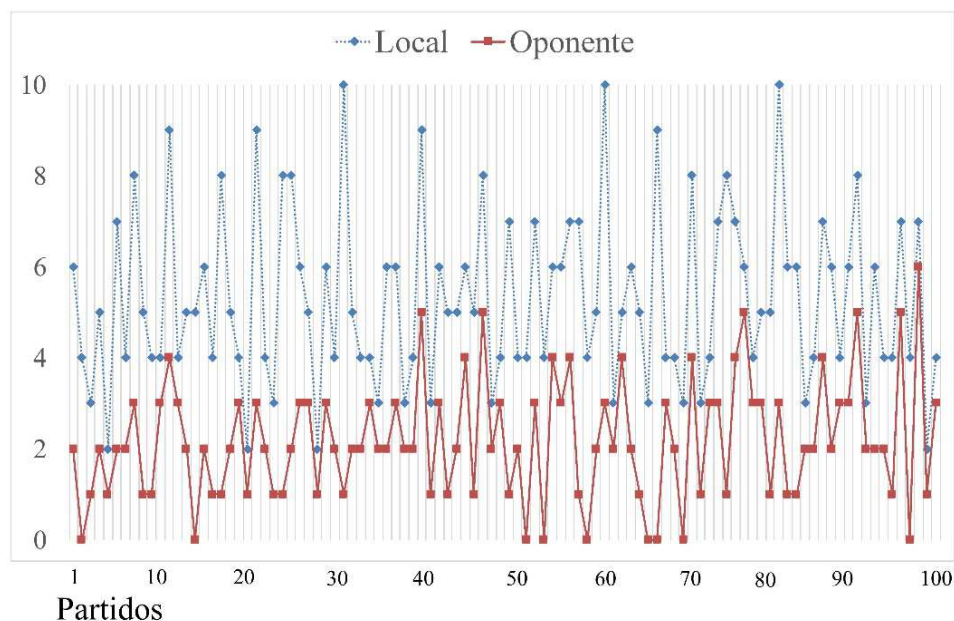


Figura 5.9. Goles por partido del equipo local, el cual es el que usa la estrategia basada en roles, contra el equipo oponente con la estrategia por defecto.

En la Figura 5.10 se muestra la posesión de balón de cada equipo durante los 100 partidos, en la Figura 5.11 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 contra ataques del equipo oponente, obligando a los jugadores a activar comportamientos defensivos en un significativo porcentaje de tiempo.

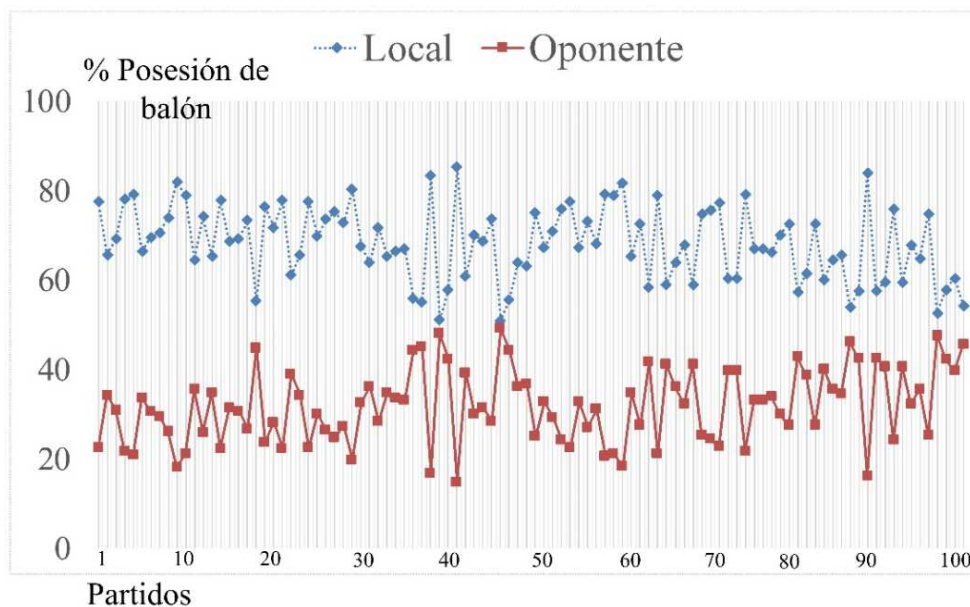


Figura 5.10. Porcentaje de posesión del balón por partido de los dos equipos.

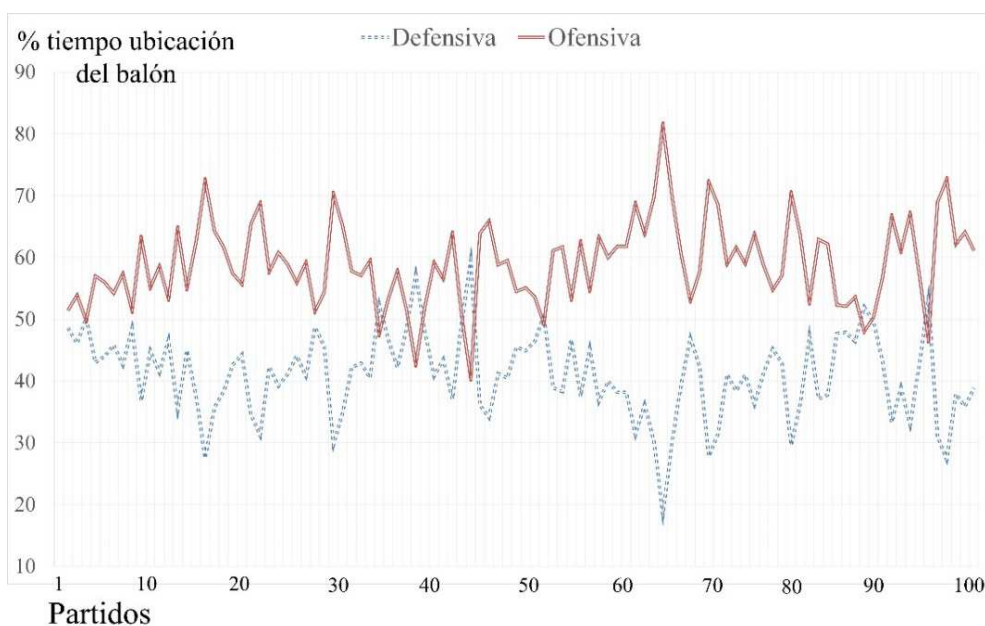


Figura 5.11. Porcentaje de tiempo de la ubicación del balón en las zonas.

En la Tabla 5.2 se presentan resultados adicionales de los 100 partidos. Así mismo y con fines de validación, en la Tabla 5.3 los resultados obtenidos en los juegos de la estrategia propuesta contra el equipo FIRA se comparan con otros resultados reportados en trabajos presentados en el estado del arte que fueron validados realizando partidos contra equipo que viene por defecto en el simulador o equipo FIRA, junto a los resultados de la estrategia propuesta en el capítulo 4.

Tabla 5.2. Comparación de los 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 5.2, 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.

En la Tabla 5.3 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. 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 [143]. 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 5vs5 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.

Tabla 5.3. Comparación de resultados reportados de otras estrategias contra el equipo de 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%
					D.E: 1.93	D.E: 1.33	D.E: 8.3%	D.E: 8.3%
[47]	50	100%	0%	0%	9.74	1.78	N.R	N.R
					D.E: 2.21	D.E: 1.22		
[38]	10	70%	10%	20%	5.5	4.2	N.R	N.R
					D.E: 2.01	D.E: 2.53		
[39]	10	100%	0%	0%	5.1	3.7	71.7%	28.3%
[40]	50	100%	0%	0%	6.1	2.8	67%	37%
Estrategia capítulo 4	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%

Con respecto a los resultados presentados en la Tabla 5.3, es de resaltar que la única estrategia que presentó mejores datos, fue la presentada por [47], 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 [38], 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 reportó tan solo el 70% de los juegos ganados. La estrategia propuesta por [39], plantea un algoritmo para la selección de tareas a través de la predicción de la utili-

dad 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 por lo regular, la posesión del balón en ambos casos presentó resultados muy similares.

Comparado con la estrategia propuesta por [40], 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 [47] y [38] 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 capítulo 4, el promedio de 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 en el capítulo 4, y que ha sido validada en partidos contra el equipo FIRA, y cuyos resultados se han presentado en la Tabla 5.3. El equipo local corresponde al equipo con la estrategia propuesta, el equipo jerárquico corresponde al oponente con la estrategia jerárquica. En la Figura 5.12 se aprecia el número de goles realizados por cada equipo en cada partido. A diferencia de la información suministrada en la Figura 5.9, 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 8.

La Figura 5.13 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, y 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 que tuvo mayor control del balón, ha resultado ser el equipo ganador de cada partido.

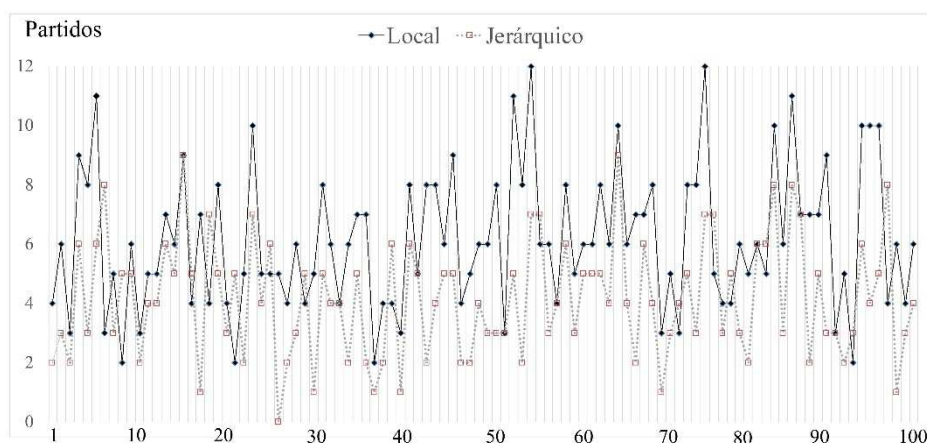


Figura 5.12. Goles por partido del equipo local, el cual es el que usa la estrategia propuesta basada en roles, contra el equipo con la estrategia jerárquica del capítulo 4.

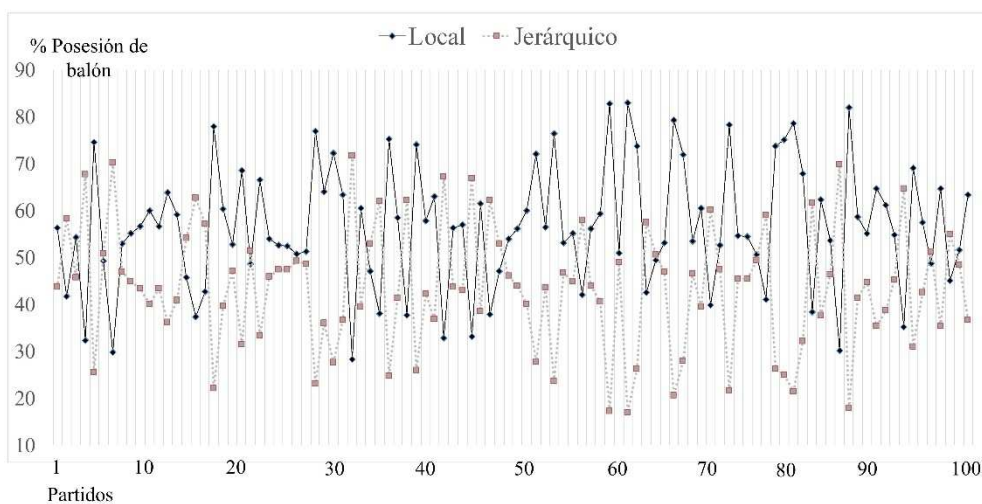


Figura 5.13. Porcentaje de posesión del balón, partidos contra el equipo con estrategia jerárquica.

La Figura 5.14 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 contra ataques 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 contra ataques y dos delanteros para la realización de jugadas ofensivas en el equipo local.

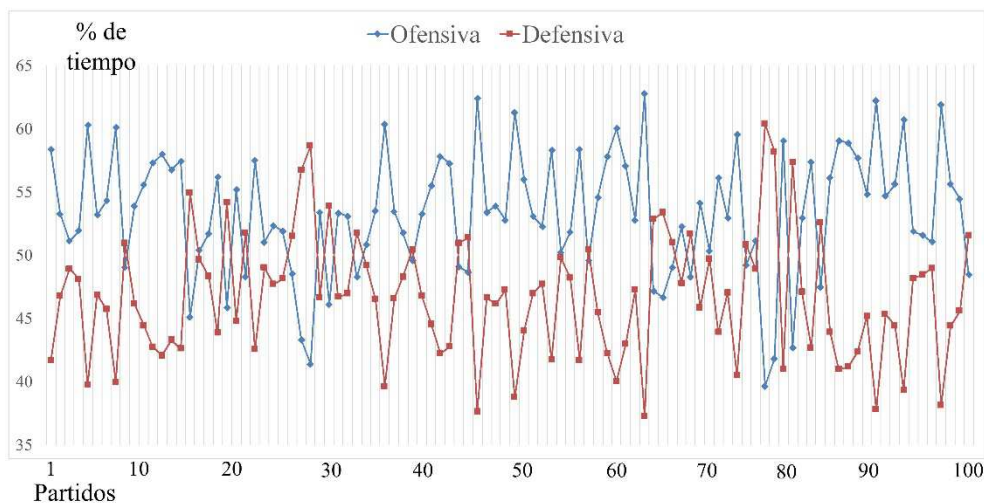


Figura 5.14. Porcentaje de tiempo de la ubicación del balón en las zonas, en los 100 partidos contra el equipo con estrategia jerárquica.

La Tabla 5.4 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.

En la Figura 5.15 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. 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 par-

tido. 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 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.

Tabla 5.4. Comparación de parámetros de 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
	Defensa	Ataque
Ubicación del balón	53.3%	46.7%
Desviación estándar	4.9%	4.9%

En la Figura 5.16 se ilustra una situación de juego en la que se presentan los cambios de comportamientos en los jugadores. En la Figura 5.16(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 correspondientes zonas. En la Figura 16(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 5.16(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 de-

fensa 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 5.16(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.

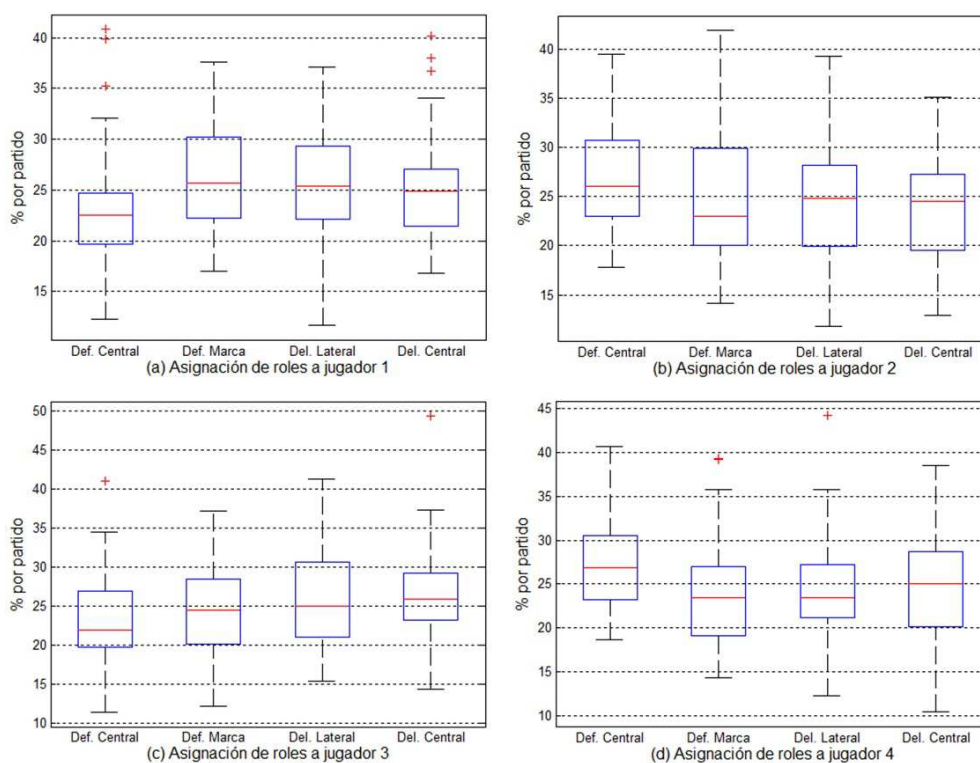


Figura 5.15. Porcentaje de selección de roles de cada jugador durante cada partido.

Debe resaltarse que se observó 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, identificándose continuidad en los movimientos de los jugadores, así como colaboración entre los mismos, por ejemplo, realizando pases o interceptando jugadas del equipo oponente.

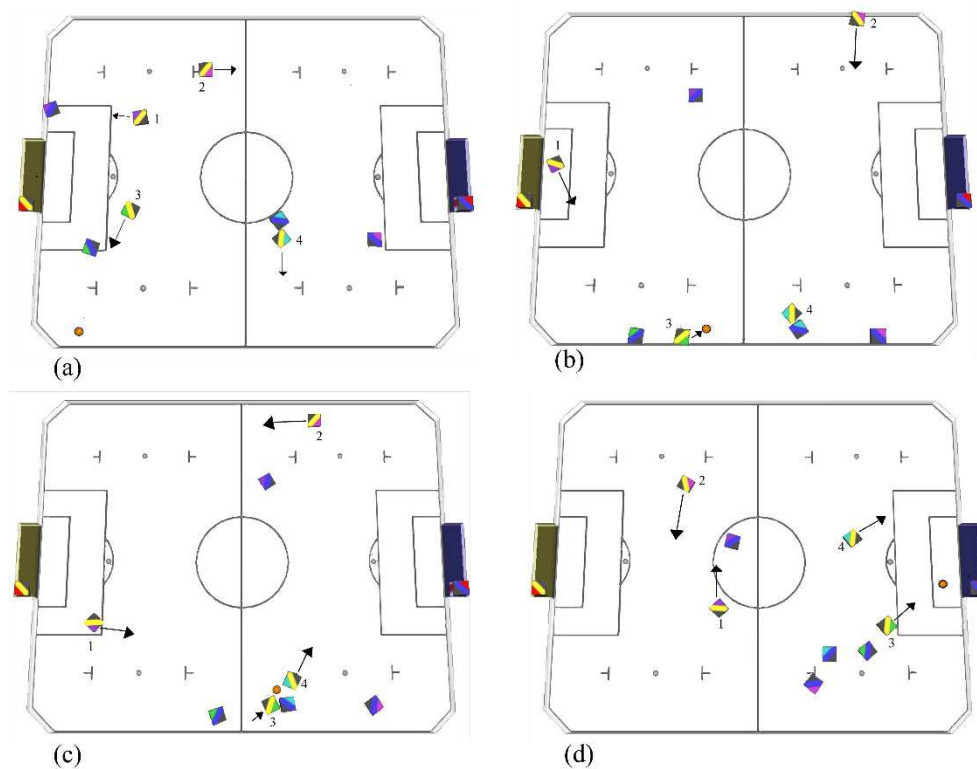


Figura 5.16. Secuencia de comportamientos del equipo con la estrategia propuesta basada en roles.

5.4 Conclusiones del capítulo

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 mayor flexibilidad a cambios en el reglamento o mayor adaptabilidad 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, mostrando esta estrategia una mayor robustez. También se identificó que con un apropiado diseño de los comportamientos, el equipo presenta un rendimiento 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 con mayor sencillez 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.

CAPÍTULO 6

SINCRONIZACIÓN DE MÁQUINAS DE ESTADO PARA COMPORTAMIENTOS COLABORATIVOS APLICADAS A ESTRATEGIAS DE EQUIPO DE FÚTBOL DE ROBOTS

6.1 Introducción

En sistemas multi-agente como lo es el fútbol de robots, los comportamientos colaborativos son necesarios con el propósito de establecer una adecuada coordinación de equipo. Como se ha comentado a lo largo de este trabajo, para el caso de las ligas con percepción global y control centralizado esta coordinación se realiza a través de un único sistema de toma de decisiones donde se programa la estrategia. También se ha comentado que una forma de programar la estrategia de equipo para la asignación de roles y comportamientos a los jugadores es mediante el uso de Máquinas de Estado Finito, las cuales se activan dependiendo de las condiciones de juego.

Como se pudo apreciar en los capítulos anteriores, distintos modelos computacionales y arquitecturas jerárquicas han sido utilizadas en sistemas multi-agente, por ejemplo utilizando modelos jerárquicos para la selección de comportamientos para el control de robots móviles [144]. Múltiples Máquinas de Estado Finito son usadas para tele-operación en sistemas multi-robot [145], o arquitecturas jerárquicas son usadas en sistemas de control de tracción en robots móviles [146]. Como se explicó en el capítulo 2, modelos computacionales son usados para la coordinación en fútbol de robots. Por ejemplo con el uso de gráficos de coordinación para la asignación de roles en ligas distribuidas [74], o arquitecturas jerárquicas con Máquinas de

Estado para la selección de comportamientos [78]. También se utiliza la combinación de Máquinas de Estado para la selección de tácticas junto al uso de Redes de Petri para la ejecución de tareas [72]. Al igual que en las ligas distribuidas, Máquinas de Estado se utilizan para la selección de tácticas y comportamientos en ligas centralizadas como se presenta en [40], donde se propone el uso de Máquinas Jerárquicas de Estado Finito para la selección de tácticas y ejecución de roles, basadas en la evaluación del rendimiento de los estados del equipo y realimentación de la información de los efectos de las acciones sobre el juego. Dentro de los trabajos relatados, se ha encontrado que la sincronización con fines de coordinación de equipo ha sido utilizada en comportamientos colaborativos, por ejemplo en [33] enfocándose en el diseño de protocolo de comunicación entre los agentes. Otro ejemplo de sincronización en modelos computacionales aplicado en el fútbol de robots es presentado en [95], donde sincronizan *Petri Net Plans* implementadas en distintos robots con fines de coordinar un pase entre dos jugadores.

En el trabajo presentado en el capítulo 3 se describe una estrategia diseñada con Máquinas Jerárquicas de Estado basada en tácticas, roles y comportamientos. Así mismo, en el capítulo 4 se describe una estrategia jerárquica basada en roles y comportamientos, diseñada para ligas con percepción global y control centralizado, e implementado para la *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. No obstante y en ambos trabajos, la Máquina de Estado selecciona los comportamientos para un jugador dado basada en las condiciones de juego y sin una realimentación de los comportamientos seleccionados para los demás jugadores. Esta situación es similar en otras estrategias reseñadas anteriormente que no utilizan sincronización. En este capítulo se propone una estrategia para equipos de fútbol de robots con arquitectura centralizada basada en una Máquina Jerárquica de Estado Finito para la selección de tácticas, y asignación dinámica de roles, con el propósito de coordinar comportamientos colaborativos ente jugadores. En este caso, los comportamientos seleccionados para un jugador dependen de una función activada por el estado de un jugador compañero.

Este modelo es validado igualmente usando el simulador *SimuroSot 5vs5* de *FIRA* y programado en C++. El modelo de estrategia propuesto posee diferentes ventajas, tales como una fácil programación, escalable y adaptable, sin gran complejidad a cambios en el sistema de toma de decisiones. Aunque la validación es realizada en simulación, este modelo puede ser fácilmente adaptado a ligas con percepción global y control centralizado que utilicen robots reales, tales como la *RoboCup Small Sizer League* o la *FIRA MiroSot League* por ejemplo.

6.2 Selección de comportamientos usando funciones de sincronización en Máquinas de Estado Finito

6.2.1 Estrategia de equipo

La arquitectura presente es igualmente diseñada también para ligas con percepción global del entorno y control centralizado desde un único sistema de toma de decisiones. Al igual que las estrategias propuestas en los capítulos 3 y 4, es utilizado en el sistema de toma de decisiones una arquitectura basada en Máquinas de Estado Finito para la selección de tácticas, y comportamientos, previa asignación de roles a los jugadores, una vez la táctica ha sido seleccionada. Los comportamientos son controlados por el nivel más bajo de la Máquina de Estado mediante una capa de control de trayectorias de los robots.

Para este propósito, se tiene un conjunto de n predefinidas tácticas tal que $T=\{t1, t2, \dots, tn\}$, utilizando condiciones ambientales Ev como transiciones. Una vez la táctica es seleccionada, la siguiente capa se activa. En ese nivel un rol es asignado a cada jugador. Para este proceso, se tiene un conjunto de roles $R=\{r1, r2, \dots, rn\}$ para un conjunto de agentes $A=\{a1, a2, \dots, am\}$, sin repetición de roles y asegurándose que cada jugador tenga su respectivo rol, teniendo en cuenta que el número de roles y agentes es el mismo. Estos jugadores con sus respectivos roles ejecutan comportamientos específicos seleccionados por la siguiente capa de la Máquina de Estado, utilizando condiciones ambientales como transiciones. Para esto, se tiene un conjunto de comportamientos $B=\{b1, b2, b3, \dots, bk\}$ el cual será ejecutado por cada agente. A cada rol r le ha sido asociado uno o más comportamientos que deberán ser ejecutados por el agente a , acorde con las condiciones de juego.

Existe un conjunto de características $G=\{g1, g2, \dots, gp\}$ que describen los cambios en el campo de juego. El nivel más alto de la Máquina Jerárquica de Estado Finito utiliza el conjunto G para seleccionar T , posteriormente es utilizado el conjunto G para asignar R a A . Luego el siguiente nivel de la Máquina Jerárquica de Estado selecciona un comportamiento b_k para ser ejecutado por cada a . El control de movimiento de los robots es implementado en el nivel más bajo de la Máquina Jerárquica de Estado Finito. El procesamiento se presenta en el algoritmo 6.1.

ALGORITMO 6.1. SISTEMA DE DECISIONES DE LA ESTRATEGIA

1. La Máquina Jerárquica de Estado Finito lee el conjunto G y selecciona una táctica T .
2. Dada T seleccionada en el paso 1, es utilizado G para asignar un rol r a cada agente a , asegurándose que el conjunto R es asignado de forma completa al conjunto A .
3. La Máquina Jerárquica de Estado Finito lee el conjunto G y asigna comportamientos b a cada agente a , dependiendo del rol r asignado en el paso 2 y el conjunto G .
4. El conjunto de comportamientos B es ejecutado por el control de movimiento del robot, en el nivel más bajo de la Máquina de Estado.
5. El conjunto de agentes A ejecuta los comportamientos asociados al conjunto de roles R que ha sido asignado en el paso 2, modificando el conjunto G .
6. Cuando una condición Ev sea disparada, repetir el paso 1.

Al igual que los casos anteriores, esta estrategia es implementada para un equipo de fútbol de robots con 4 roles que se asignan dinámicamente y un único rol constante que corresponde al portero. Dos parámetros son tenidos en cuenta para la selección de tácticas. El primero corresponde a la ubicación del balón en el campo de juego. Para esto el campo es dividido en 3 zonas como se presenta en la Figura 6.1 (estas imágenes se toman del simulador *SimuroSot 5vs5*) y que son similares a las zonas planteadas en la Figura 3.4.

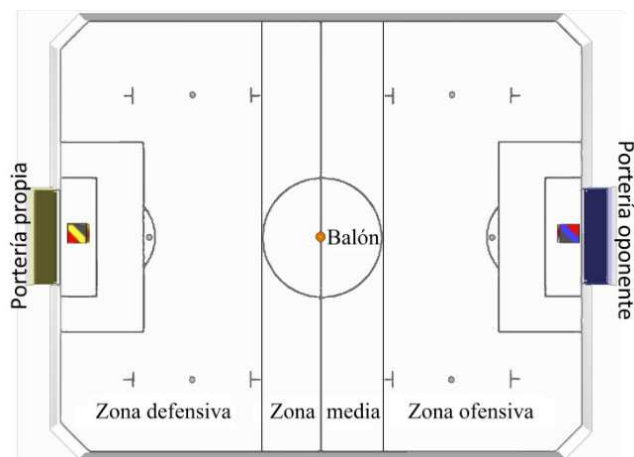


Figura 6.1. División del campo de juego.

La zona defensiva es donde el portero del equipo propio se encuentra ubicado. La zona media corresponde a la mitad del campo de juego, y la zona ofensiva es donde se encuentra la portería del equipo oponente. Al igual que en los capítulos anteriores, la posesión del balón corresponde a la mínima distancia entre el balón y el robot, en la cual este último puede disparar el balón. Las 4 tácticas utilizadas en este capítulo, corresponden a las propuestas en el capítulo 3, y se recuerdan a continuación:

- Táctica defensa: Esta táctica es seleccionada cuando el balón está localizado en la zona defensiva o en la zona media, y ningún jugador del equipo que posee la estrategia propuesta, llamado el equipo propio, tiene la posesión del balón.
- Táctica contra ataque: Esta táctica es seleccionada cuando el balón está ubicado en la zona defensiva o en la zona media, y algún jugador del equipo propio tiene la posesión del balón.
- Táctica presión: Esta táctica es seleccionada cuando el balón está localizado en la zona ofensiva y ningún jugador del equipo propio tiene la posesión del balón.
- Táctica ataque: Esta táctica es seleccionada cuando el balón se encuentra en la zona ofensiva y algún jugador del equipo propio tiene la posesión del balón.

Estas 4 tácticas corresponden a estados, mientras que las condiciones ambientales como la zona en la que se ubica el balón, y la posesión del balón, corresponden a las transiciones de estado. Como se ha explicado previamente, se proponen 5 roles en esta estrategia, de los cuales el portero a_a corresponde al único rol constante. Dado esto existe un conjunto de agentes $A=\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ que deben ejecutar un conjunto de 4 roles $R=\{r_{ad}, r_{pd}, r_s, r_a\}$, siendo r_{ad} el rol defensa activo, r_{pd} el defensa pasivo, r_a el rol mediocampista y r_s el delantero. El sistema de toma de decisiones ejecuta el algoritmo para asignación de roles, dependiendo de la táctica previamente elegida. Para las táctica defensa y contra ataque, se le asigna el rol defensa activo r_{ad} al jugador más cercano al balón. El segundo jugador más cercano al balón se le asigna el rol defensa pasivo r_{pd} . El tercer jugador más cercano al balón corresponde al delantero r_a , siendo finalmente el último, el mediocampista r_s . Para el caso de las tácticas presión y ataque, el rol delantero r_a corresponde al más cercano al balón. El segundo más cercano al balón, corresponde al mediocampista r_s , el tercer jugador más cercano al balón, es el jugador defensa activo r_{ad} . Finalmente, el último es el jugador defensa pasivo r_{pd} .

Es importante señalar que el algoritmo de asignación de roles es similar para las tácticas defensa y contra ataque, y para las tácticas presión y ataque respectivamente. Esto se da porque las condiciones de juego pueden cambiar y nueva asignación de roles se puede realizar a los jugadores, dependiendo de la nueva ubicación de los jugadores en ese momento dado.

6.2.2 Selección de comportamientos utilizando funciones de sincronización para Máquinas de Estado Finito

Con el propósito de sincronizar comportamientos colaborativos entre jugadores, es utilizada una Máquina de Estado Finito para la selección de comportamientos junto a funciones de sincronización con el propósito de realimentar el estado de algún jugador compañero de equipo. Como se presenta en la Figura 6.1, el jugador con el rol r_n activa el comportamiento k cuando la condición $St\ 2k$ es activada. Con el propósito de que el rol n dispare el comportamiento 1, es necesario no solo que la condición $St\ 1k$ sea disparada, sino también el agente con el rol m juegue su respectivo comportamiento k , y la condición del rol m dispare la función $fm_n(St\ k1)$, y esto solamente puede suceder cuando el jugador con el rol m ejecuta el comportamiento k .

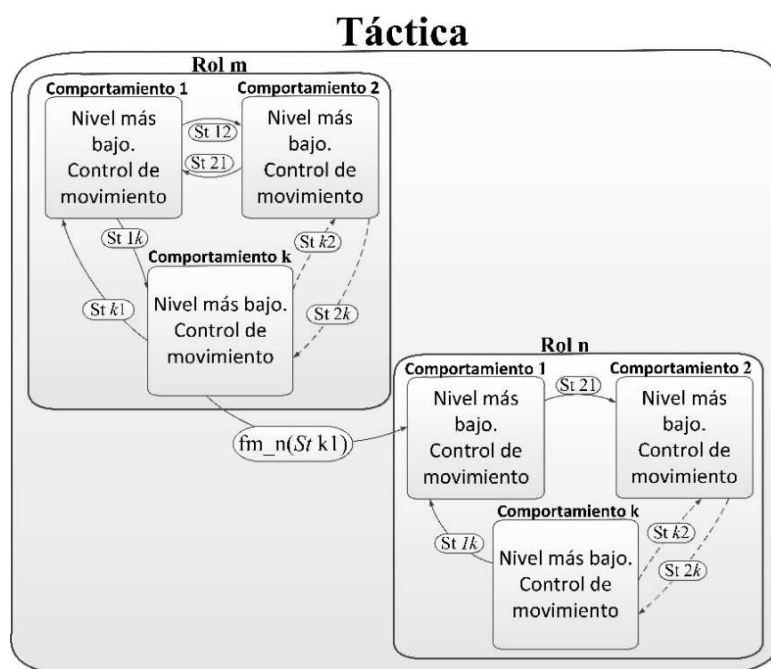


Figura 6.2. Selección de comportamientos utilizando funciones de sincronización.

Distintos roles fueron implementados para los diferentes comportamientos dependiendo de la táctica escogida. Como se ha explicado el portero es el único rol constante y su secuencia de comportamientos es descrita en la Figura 5.3.

6.2.2.1 Comportamientos del rol defensa activo

Los comportamientos asociados a este rol se presentan en la Figura 6.3.

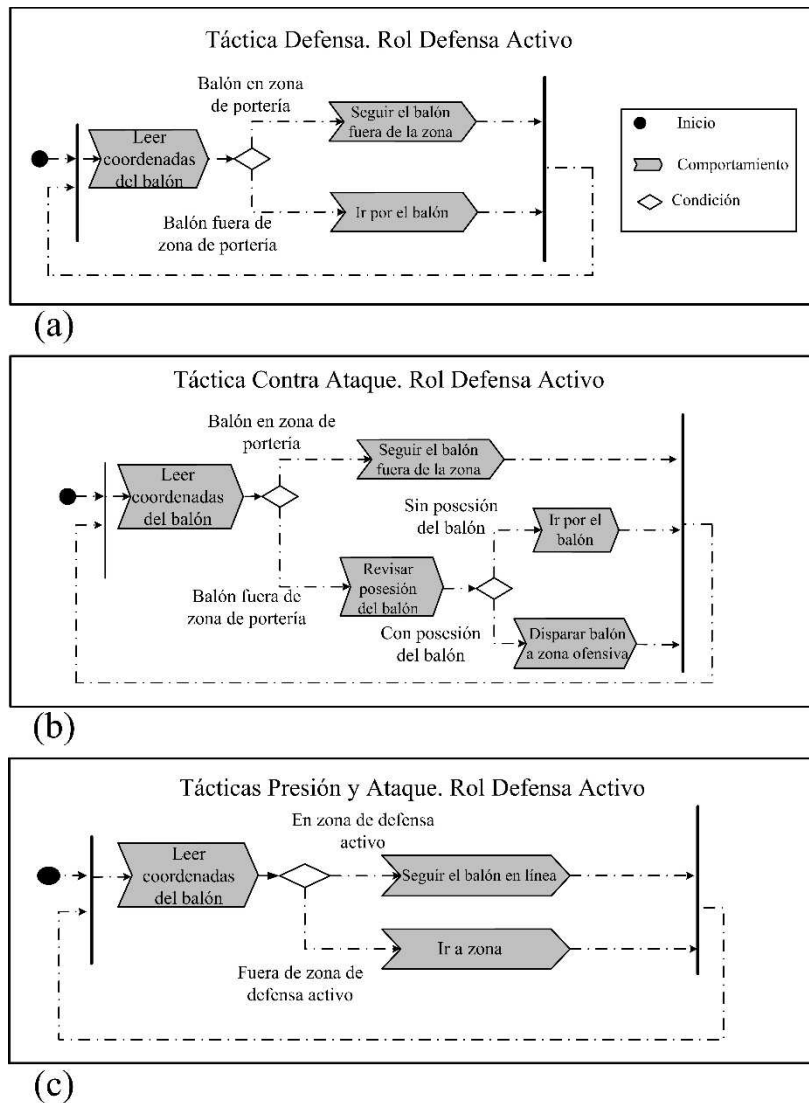
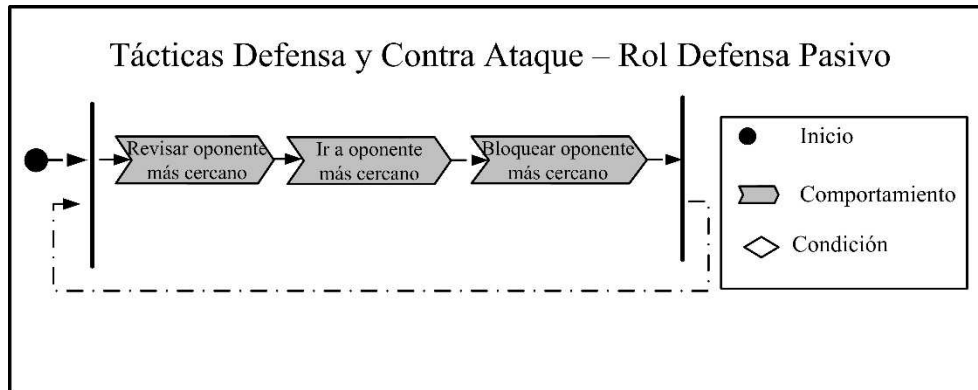


Figura 6.3. Comportamientos del jugador defensa activo.

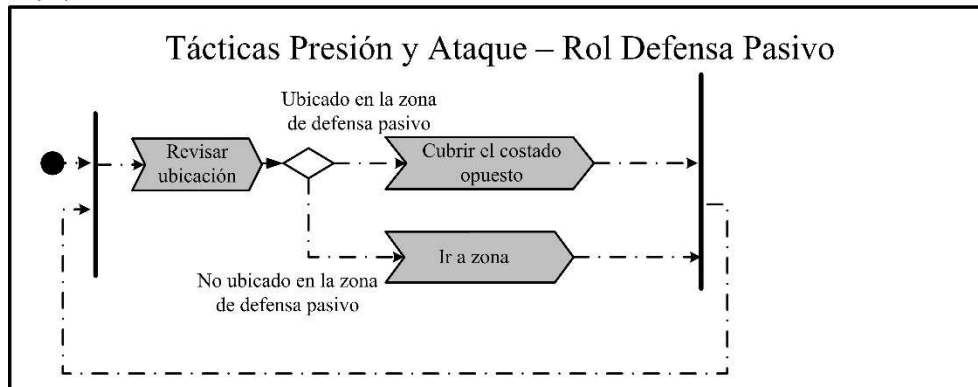
Para la táctica defensa, el defensa activo debe ir a buscar el balón como se muestra en la Figura 6.3(a). Primero, las coordenadas del balón son encontradas, si el balón se encuentra al interior de la zona de portero, el defensa activo sigue el balón fuera de dicha zona, con el propósito de evitar autogoles, obstaculizar al portero, y cumplir con las restricciones del número de jugadores máximo permitido en esta área, de acuerdo con las reglas de *FIRA SimuroSot 5vs5 League*. Cuando el balón se encuentre fuera de la zona de portero, el defensa activo va a capturar al balón. En la Figura 6.3(b) se muestran los comportamientos para este rol en la táctica contra ataque. Una vez esta táctica es seleccionada, el balón es localizado. Si el balón se encuentra fuera de la zona de portería, se debe revisar la posesión del balón. Si el jugador tiene la posesión del balón el defensa activo debe disparar el balón hacia la zona ofensiva, si no tiene la posesión del balón el jugador debe ir a capturarlo. Si el balón se encuentra al interior de la zona de portería, el jugador sigue el balón sin ingresar en esta zona. En la Figura 6.3(c) se presenta los comportamientos asociados al jugador defensa activo para las tácticas presión y ataque. Para esto se define la zona de defensa activo, la cual se encuentra detrás de la línea de mitad de campo. Cuando alguna de estas dos tácticas se activa, el jugador con el mencionado rol revisa su ubicación. Si no se encuentra al interior de la zona de defensa activo, el robot debe ir a dicha zona. Si el robot está en su correspondiente zona, el defensa activo debe seguir el balón dentro de la zona, a lo ancho del campo de juego.

6.2.2.2 Comportamientos del rol defensa pasivo

Los comportamientos del rol defensa pasivo, para las tácticas defensa y contra ataque se presentan en la Figura 6.4(a). Para ambos casos, el jugador con este rol debe encontrar al oponente más cercano e ir a bloquearlo sin tocarlo con el fin de prevenir posibles pases que dicho robot pueda recibir, no obstante este bloqueo debe ser realizado sin tocar a este jugador, con el propósito de evitar realizar faltas, de acuerdo con el reglamento de la liga. En la Figura 6.4(b) se presentan los comportamientos del jugador defensa pasivo, para las tácticas ataque y presión. Para estos casos el jugador debe situarse en la zona de defensa pasivo, que corresponde a una zona ubicado a lo ancho del campo de juego en la zona defensiva detrás de la zona de defensa activo, donde el jugador con el rol defensa pasivo cubre el lado opuesto donde se encuentra el jugador defensa activo con el propósito de prevenir contra ataques del equipo rival y eventualmente asumir la posesión del balón. Dado esto, cuando las tácticas presión o ataque son activadas, el defensa pasivo lee sus coordenadas con el fin de determinar su ubicación, si el robot no está ubicado en su respectiva zona debe dirigirse a ella. Si el robot está en la zona de defensa pasivo, este jugador debe cubrir en línea de gol al interior de su respectiva zona el costado opuesto del campo de juego que cubre el defensa activo.



(a)



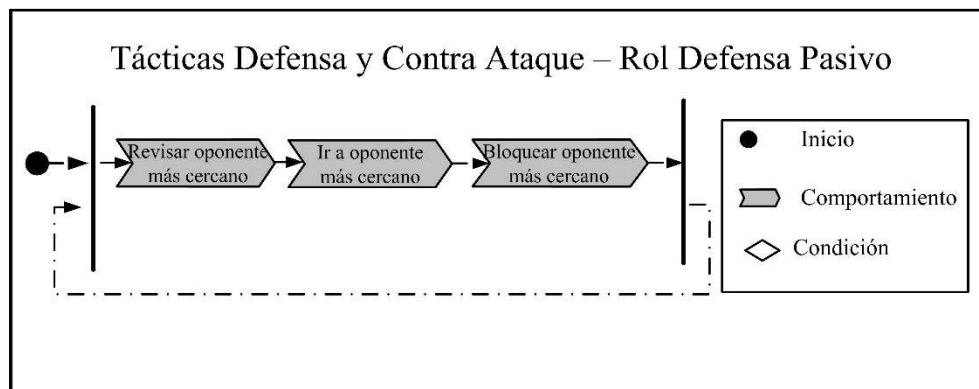
(b)

Figura 6.4. Comportamientos del jugador defensa pasivo.

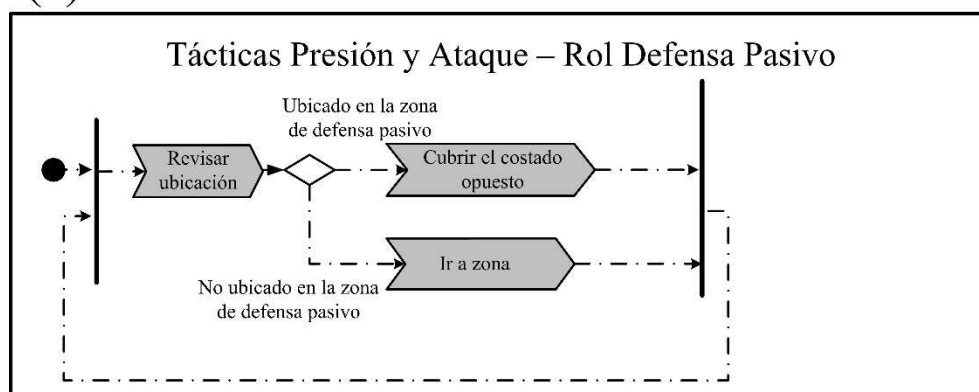
6.2.2.3 Comportamientos de los roles mediocampista y delantero, y sincronización de roles

Los comportamientos de los roles mediocampista y delantero para las tácticas de defensa y contra ataque se presentan en la Figura 6.5. Para el caso del delantero presentado en la Figura 6.5(a), se define la zona de delantero ubicada en la zona ofensiva, donde el robot sigue el balón en línea con la línea de gol esperando un posible pase. Para esto, cuando alguna de las dos tácticas comentadas se activa, el delantero revisa sus coordenadas. Si el robot está en su respectiva zona, este jugador sigue el balón en línea al interior de esta zona. En caso que el robot se encuentre fuera de su respectiva zona, debe dirigirse a ella. Los comportamientos del rol mediocampista para estas dos tácticas se presentan en la Figura 6.5(b). Se define la zona de

mediocampista localizada al frente de la zona de delantero, donde el mediocampista debe cubrir el costado opuesto que cubre el delantero, en línea con la línea de gol. Al igual que en otros casos, si el jugador está fuera de su zona, debe ir a ella.



(a)

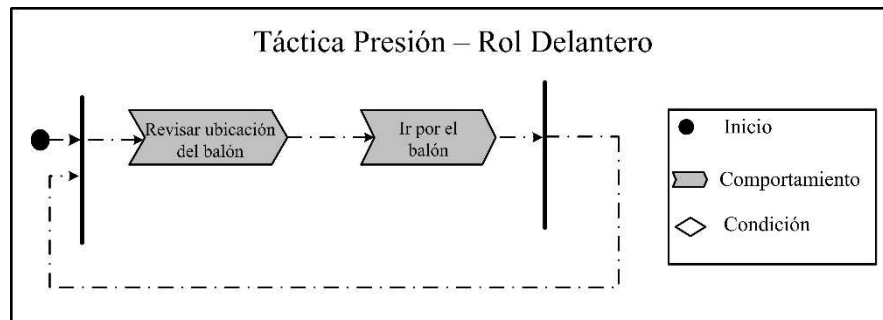


(b)

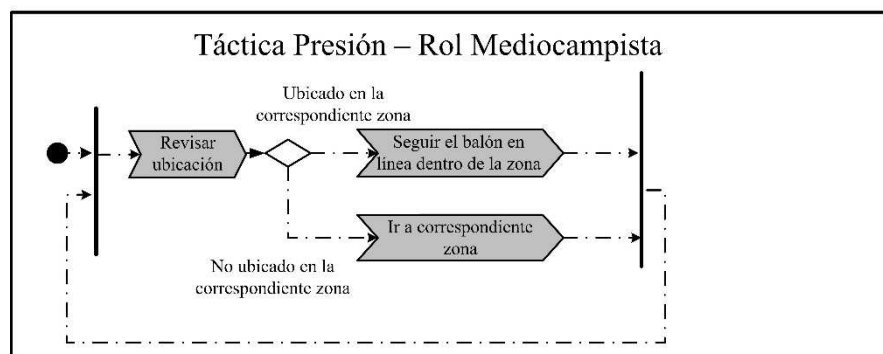
Figura 6.5. Comportamientos de los roles delantero y mediocampista, para las tácticas defensa y contra ataque.

Para la táctica presión. Los comportamientos de los jugadores delantero y mediocampista se presentan en la Figura 6.6. Para el caso del delantero, como se presenta en la Figura 6.6(a), el robot revisa la ubicación del balón y va hacia el tratando de capturarlo. Para el caso del mediocampista, como se puede observar en la Figura 6.6(b), se definen dos zonas laterales en la zona ofensiva ubicadas a lo largo del campo de juego, una en cada costado. El mediocampista debe ubicarse en la zona lateral que está en el costado opuesto donde se encuentra el balón. Una vez el juga-

Por lo tanto, si el mediocampista se encuentra correctamente ubicado, el mediocampista debe seguir el balón en línea a la línea lateral, al interior de la respectiva zona.



(a)

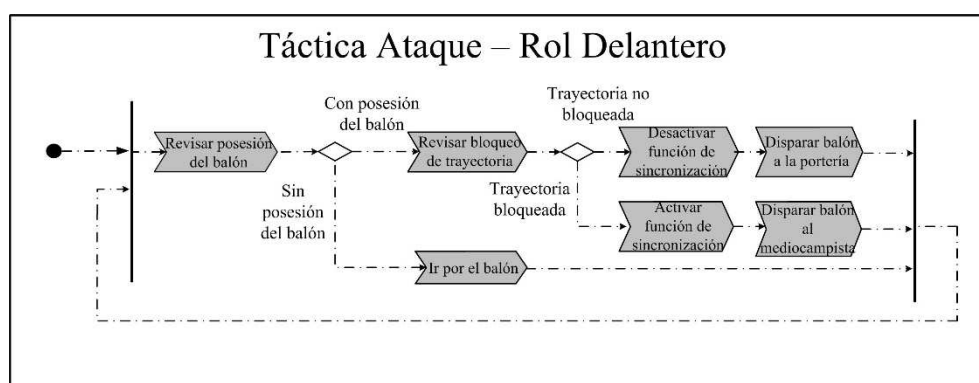


(b)

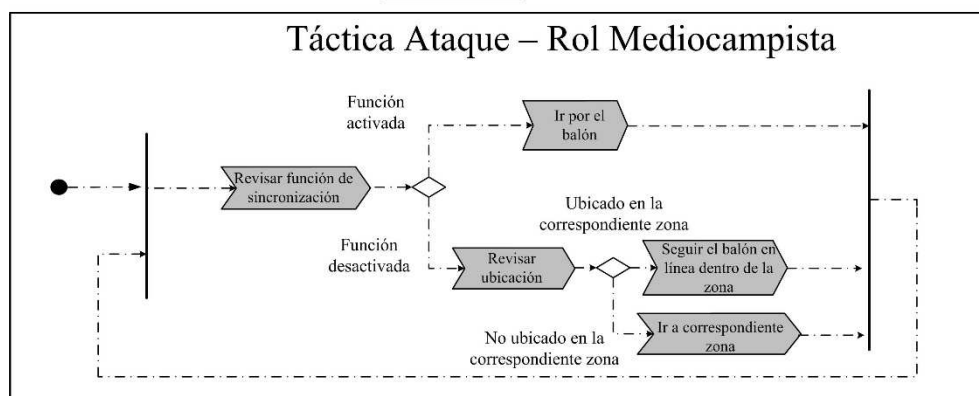
Figura 6.6. Comportamientos para los roles mediocampista y delantero

Para la táctica ataque, el principal objetivo del delantero consiste en disparar el balón a la portería oponente, con el fin de buscar una anotación. Para el caso del mediocampista, el comportamiento en principio es parecido al presentado en la Figura 6.6(b), cubriendo el costado opuesto en el que se encuentra el balón a la espera de un posible pase, o para recuperar el balón, y convirtiéndose en el nuevo delantero ante el cambio de táctica. Como es presentado en la Figura 6.7(a), el delantero revisa si tiene posesión del balón, en caso de no tenerla el jugador debe ir por el balón a su captura. Si el delantero tiene la posesión del balón, se revisa si existe un jugador oponente diferente al portero que bloquea la trayectoria del delantero a la portería rival. Si no hay bloqueo el delantero trata de anotar un gol. Si la trayectoria se encuentra bloqueada, el delantero activa la función de sincronización del mediocampista, con el propósito de coordinar un pase. En la Figura 6.7(b)

se presentan los comportamientos del mediocampista para esta táctica. Como primera medida este jugador revisa si el delantero ha activado su función de sincronización. Si esta función no está activada, los comportamientos del mediocampista son similares a los de la Figura 6.6(b), como ya se ha comentado. En el caso que esta función se encuentre activada, el mediocampista va en búsqueda del balón, con el fin de interceptarlo y generar un cambio de táctica con nueva asignación de roles, asumiendo como nuevo rol el rol delantero.



(a)



(b)

Figura 6.7. Comportamientos del delantero y mediocampista en táctica ataque.

En la Figura 6.8 se presentan las diferentes zonas propuestas con el fin de ejecutar los distintos roles (zona de portero, zona de defensa activo, zona de defensa pasivo, zona de mediocampista, zona de delantero, y zonas laterales).

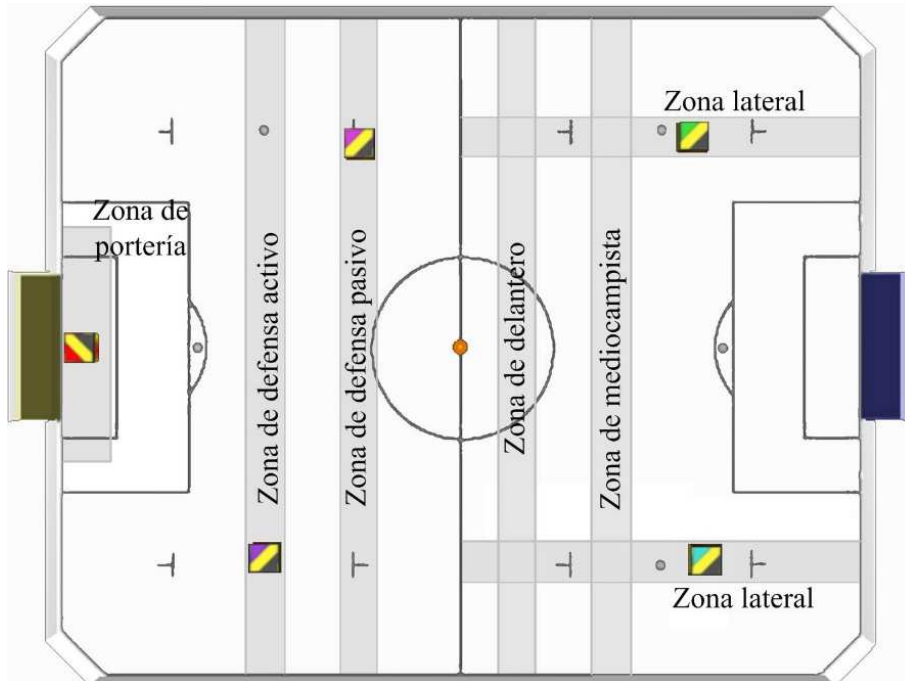


Figura 6.8. Zonas para la ejecución de roles.

6.3 Simulación y resultados

Con el propósito de validar el modelo propuesto, la estrategia ha sido implementada en *FIRA SimuroSot 5vs5 League* y programada en C++. Para esto se han realizado 100 juegos de 5 minutos y utilizando las reglas de la liga, contra el equipo que viene por defecto en el simulador programado en lenguaje LINGO y utilizado también para validación en los capítulos 4 y 5. Otros 100 juegos también han sido realizados en contra de la estrategia jerárquica presentada en el capítulo 4. Vale la pena recordar que la estrategia LINGO consiste en 5 roles constantes los cuales son un portero, dos defensas que bloquean el balón en línea a la línea de gol, y dos delanteros que van por el balón y lo disparan contra la portería del equipo rival. Como se describió en el capítulo 4, la estrategia jerárquica que fue diseñada utilizando *principle solution* consiste en una Máquina Jerárquica de Estado Finito para la selección de tácticas y comportamientos, asignando roles por medio de una función.

Los goles anotados por cada equipo se presentan en la Figura 6.9. En la Figura 6.10 se presenta el porcentaje de posesión del balón de cada equipo en los 100 partidos. En la Figura 6.11 se presenta el porcentaje de tiempo en el que se encuentra el balón en cada una de las tres zonas, durante los 100 partidos.

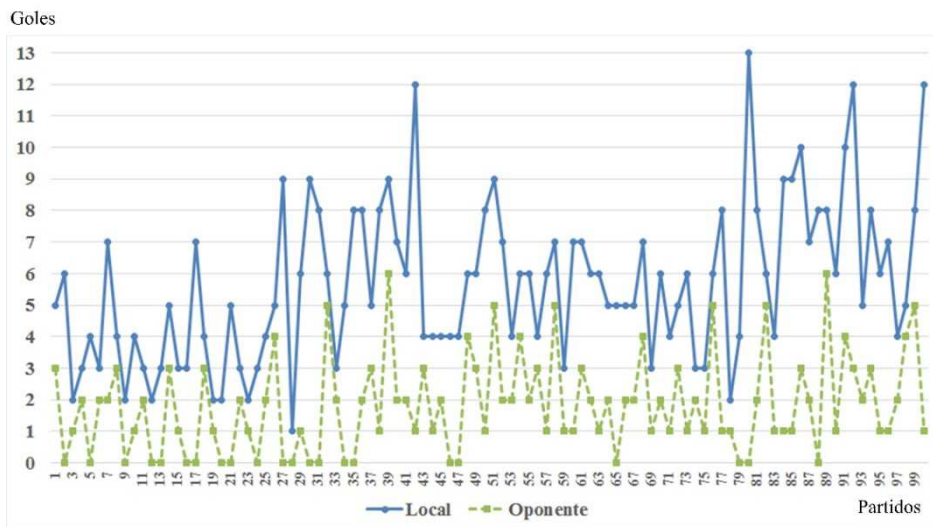


Figura 6.9. Goles por partido del equipo local, equipo que utiliza la estrategia con sincronización de comportamientos, vs el equipo oponente con la estrategia de roles constantes de FIRA.

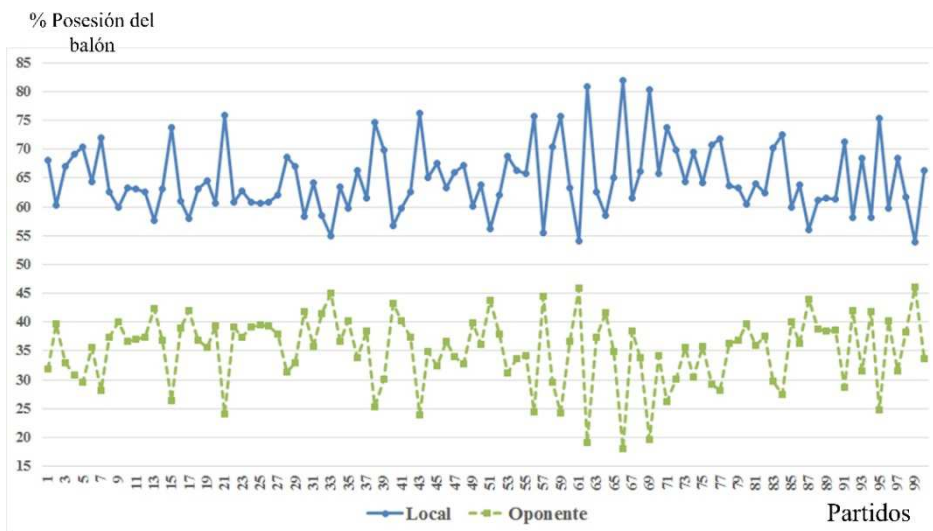


Figura 6.10. Porcentaje de posesión del balón por partido, partidos contra equipo FIRA.

Como se puede apreciar, todos los partidos han sido ganados con el equipo con la estrategia que presenta sincronización de comportamientos, en la mayoría de los casos con una diferencia de goles bastante amplia, así mismo se puede observar que la posesión del balón fue mayor para el equipo con la estrategia propuesta en todos los partidos, siendo en la mayoría de los mismos superior al 10% entre los dos equipos. Para el caso de la ubicación del balón, este se encontró en mayor medida en la zona ofensiva, siendo este porcentaje superior al 50% para la mayoría de partidos.

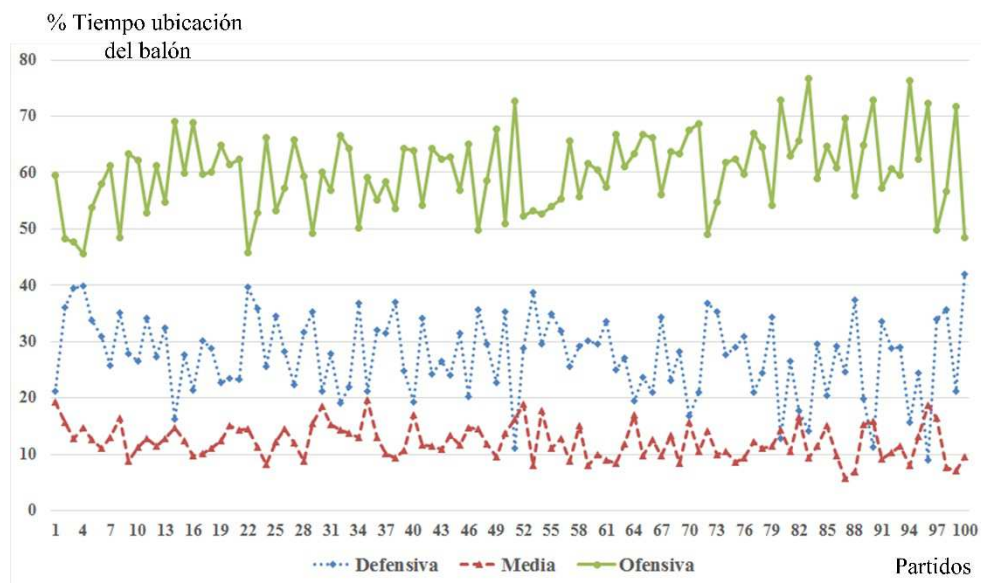


Figura 6.11. Porcentaje de tiempo de ubicación del balón en las zonas, partidos contra equipo FIRA.

En la Tabla 6.1 se presentan los promedios de diferentes resultados obtenidos de los 100 partidos realizados contra el equipo con la estrategia FIRA. Se puede apreciar que tanto el promedio de goles como la posesión del balón, así como el promedio de pases efectivos por partido es significativamente más alto para el equipo con la estrategia propuesta en este capítulo, esto es debido a un mayor aumento de comportamientos colaborativos, en especial, por la sincronización de pases entre el mediocampista y el delantero. También es necesario señalar que la zona en la que en promedio el balón está más tiempo durante los 100 partidos es la zona ofensiva. Al igual que lo reportado en el capítulo 5 en los juegos contra el equipo FIRA, se presenta una variación significativa en los goles anotados, así como en otras varia-

bles como la posesión del balón o los pases exitosos realizados, esto como se explicaba en el capítulo 5, se debía en principio al error incremental de odometría que introduce el simulador, no obstante al tener el equipo con la estrategia propuesta un mejor rendimiento, ganando siempre los partidos y realizando más pases exitosos, muestra una mejor adaptación a las condiciones ambientales que el equipo FIRA. Al igual que en los capítulos 4 y 5, el equipo FIRA presenta distintos comportamientos que producen faltas y bloqueos de juego, como atacar con varios jugadores al mismo tiempo a un oponente, o bloquear el balón interrumpiendo la continuidad del juego, en esos casos, se penalizan las faltas de acuerdo con el reglamento de la *Fira SimuroSot 5vs5 League*.

Tabla 6.1. Comparación de los parámetros de los 100 partidos contra el equipo FIRA.

Parámetros	Local	Oponente	
Promedio goles	5.66	1.8	
Desviación estándar	2.49	1.53	
Promedio posesión de balón	64.87%	35.13%	
Desviación estándar	5.98%	5.98%	
Promedio pases exitosos	6.56	1.12	
Desviación estándar	2.14	0.88	
	Z. Defensiva	Z. Media	Z. Ofensiva
Ubicación del balón	27.53%	12.30%	60.17%
Desviación estándar	7.09%	3.06%	6.89%

Al igual que en el capítulo 5, se realiza en la Tabla 6.2 una comparación de los resultados de los juegos de la estrategia con sincronización de estados contra el equipo FIRA, junto a los resultados obtenidos de la estrategia basada en roles del capítulo 5 contra este equipo FIRA, y la estrategia jerárquica del capítulo 4 contra el equipo FIRA, además con las otras 4 estrategias reportadas en la literatura que fueron validadas contra el equipo FIRA, y cuyos resultados ya han sido presentados en la Tabla 5.3. Como se puede observar, es de señalar que el equipo con la estrategia que presenta sincronización de comportamientos posee un mayor promedio de goles por partido que las estrategias propuestas en los capítulos 4 y 5, y solamente es superado por estrategias propuestas en la literatura que presentan aprendizaje. La posesión del balón es similar a los demás casos reportados, indicando de este modo una mayor precisión a la hora de anotar. D.E corresponde a la desviación estándar, y N.R se refiere a que esa información no fue reportada en la publicación referenciada.

Tabla 6.2. Comparación de resultados reportados de otras estrategias contra el equipo de FIRA.

Equipos	No. Juegos	Partidos			Promedio Goles		% Posesión Balón	
		Gan.	Emp.	Perd.	Local	Opon.	Local	Opon.
Estrategia sincronización	100	100%	0%	0%	5.88	1.8	64.87%	35.13%
					D.E: 2.49	D.E: 1.53	D.E: 5.98%	D.E: 5.98%
Estrategia capítulo 5	100	100%	0%	0%	5.29	2.17	68.3%	31.7%
					D.E: 1.93	D.E: 1.33	D.E: 8.3%	D.E: 8.3%
[47]	50	100%	0%	0%	9.74	1.78	N.R	N.R
					D.E: 2.21	D.E: 1.22		
[38]	10	70%	10%	20%	5.5	4.2	N.R	N.R
					D.E: 2.01	D.E: 2.53		
[39]	10	100%	0%	0%	5.1	3.7	71.7%	28.3%
[40]	50	100%	0%	0%	6.1	2.8	67%	37%
Estrategia capítulo 4	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%

Comparando con el resultado presentado en la Tabla 4.2, donde muestran que el promedio de pases exitosos del equipo con la estrategia presentada en el capítulo 4 es de 4.8 pases por partido, y el promedio de pases exitosos de la estrategia del capítulo 5 contra el equipo FIRA presentado en la Tabla 5.2 y que corresponde a 3.52 pases por partido, se puede observar que el número de pases exitosos utilizando la sincronización de comportamientos entre jugadores propuesta en el capítulo 6, es significativamente mayor (6.56 pases por partido contra el equipo FIRA).

Una segunda validación fue realizada jugando 100 partidos contra el equipo con la estrategia presentada en el capítulo 4 y conocido como equipo jerárquico, el cual presenta jugadas colaborativas y asignación dinámica de roles por medio de una Máquina Jerárquica de Estado Finito la cual selecciona una táctica, asigna los roles a los jugadores y selecciona comportamientos a los mismos. No obstante este equipo no presenta la sincronización de comportamientos propuesta en este capítulo. En la Figura 6.12 se observan los goles anotados por los dos equipos, la Figura 6.13 se presenta la posesión del balón de los dos equipos durante los 100 partidos, y la Figura 6.14 muestra el porcentaje de ubicación del balón en las 3 zonas, para cada partido. Se observa que el equipo con sincronización de roles ganó 92 partidos, empató 3 y perdió 5. La posesión del balón es mayor en el equipo que presenta

sincronización de comportamientos en 95 de los 100 partidos, con una diferencia superior al 10% con respecto al equipo jerárquico en 85 de los 95 partidos. No obstante se debe resaltar que el tiempo en el que el balón se encuentra en la zona defensiva es similar al tiempo en que el balón se encuentra en la zona ofensiva en la mayoría de partidos, siendo este porcentaje de tiempo mayor en la zona defensiva en 30 de 100 partidos. Estos resultados indican que la estrategia con sincronización de comportamientos colaborativos presenta un mejor rendimiento que una estrategia que en principio es bastante similar, ya que son basadas en tácticas y asignación dinámica de roles, y que presentan comportamientos colaborativos como la realización de pases, pero que no está programada con las funciones de sincronización propuestas.

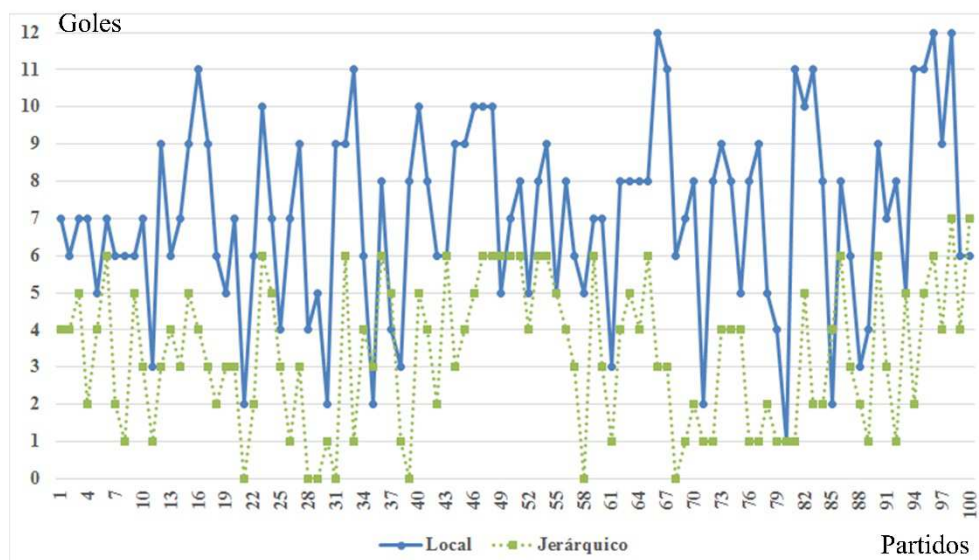


Figura 6.12. Goles por partido del equipo local, equipo que utiliza la estrategia con sincronización de comportamientos, vs el equipo oponente con la estrategia jerárquica del capítulo 4.

En la Tabla 6.3 se presenta una comparación entre los resultados obtenidos de los 100 juegos contra el equipo con estrategia jerárquica del capítulo 4 y los resultados de los 100 juegos de la estrategia basada en roles propuesta en el capítulo 5, contra el equipo de estrategia jerárquica, y cuyos resultados presentados previamente en la Tabla 5.4.

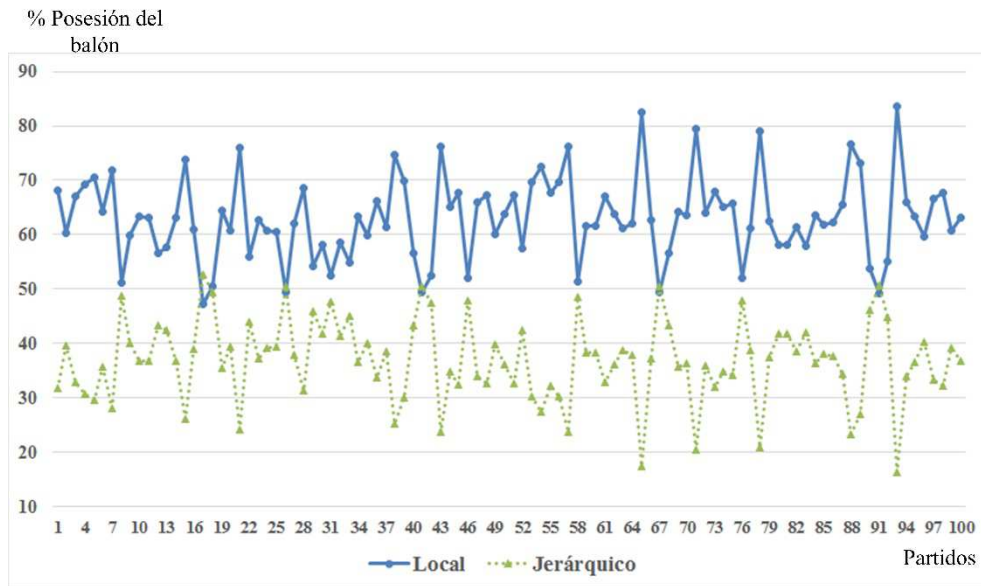


Figura 6.13. Porcentaje de posesión del balón por partido, partidos contra equipo jerárquico.

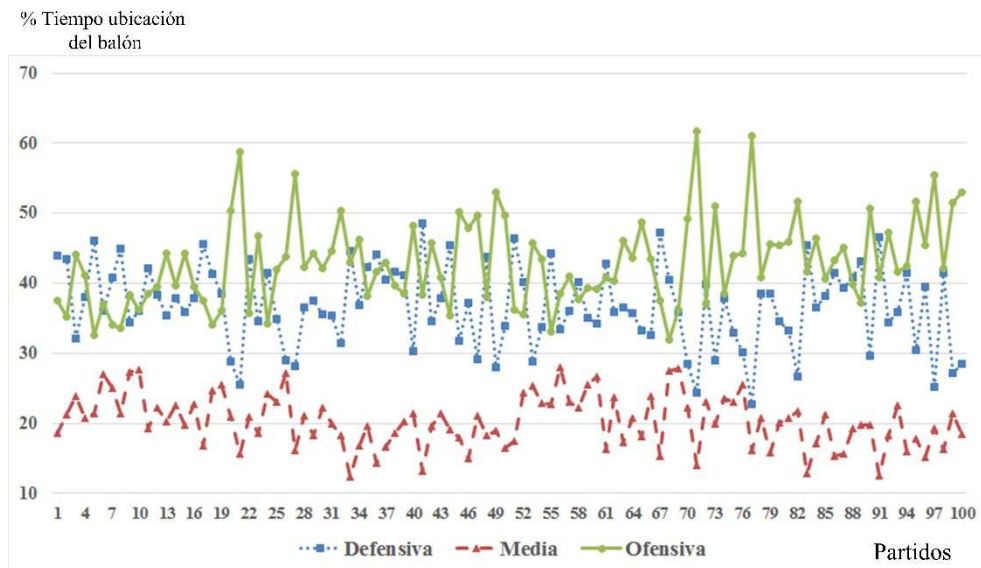


Figura 6.14. Porcentaje de tiempo de ubicación del balón en las zonas, partidos contra el equipo jerárquico.

Tabla 6.3. Comparación de parámetros de los partidos de la estrategia con sincronización de comportamientos contra el equipo con estrategia jerárquica y de los partidos realizados del equipo con la estrategia basada en roles, contra el equipo con estrategia jerárquica.

Parámetros	Roles	Jerárquica	Sincronizada	Jerárquica	
Promedio goles	6.12	4.16	7.07	3.35	
Desviación estándar	2.36	1.99	2.53	1.96	
Promedio posesión de balón	56.5 %	43.5%	63.04%	36.96%	
Desviación estándar	13.1%	13.1%	7.58%	7.58%	
Promedio pases exitosos	2.9	1.24	4.48	2.04	
Desviación estándar	1.417	1.135	1.53	1.20	
Promedio faltas y bloqueos	1.2	4.04	1.64	2.24	
Desviación estándar	1.05	1.665	0.9	1.16	
% partidos ganados	77%	15%	90%	5%	
	Defensa	Ataque	Defensiva	Media	Ofensiva
Ubicación del balón	53.3%	46.7%	36.8%	20.3%	42.9%
Desviación estándar	4.9%	4.9%	5.8%	3.7%	6.3%

La estrategia que presenta sincronización de comportamientos presenta un mayor promedio de goles por partido, doblando a su contrincante, así mismo, la estrategia con sincronización presenta un mayor promedio de la posesión del balón que la estrategia basada en roles, de igual forma el promedio de pases exitosos es mayor en la estrategia con sincronización. Aunque en los partidos con la estrategia propuesta en este capítulo se observa un aumento en el promedio de las faltas y jugadas de bloqueo por partido, este aumento no resulta ser muy significativo. Como resultado comparativo más importante, es que el equipo con la estrategia que presenta sincronización de roles presenta un mayor porcentaje de partidos ganados contra el equipo con estrategia jerárquica, que el equipo con la estrategia basada en roles en sus partidos contra el mismo rival. La ubicación del balón en las diferentes zonas es comparable, para ambos casos. Vale la pena resaltar también que la desviación estándar de las distintas mediciones es muy similar para ambos casos, corroborando esto el factor de aleatoriedad inducido por el error de odometría incremental del simulador.

En la Figura 6.15 se presenta un ejemplo de sincronización de comportamientos entre el delantero y el mediocampista, con nueva asignación de roles. En la Figura 6.15(a) el jugador 2 que tiene el rol de delantero detecta que un oponente obstruye su trayectoria de gol a la portería rival, mientras que el jugador 1 con el rol mediocampista acompaña. En la Figura 6.15(b) el jugador 2 activa la función de sincronización y envía el balón al jugador 1, el cual va por el balón. Cuando el balón se

aleja lo suficiente del jugador 2, hay un cambio de táctica y una nueva asignación de roles se realiza, de tal manera que el jugador 1 asume el nuevo rol de delantero, y el jugador 2 se convierte en el mediocampista. En la Figura 6.15(c) el nuevo delantero ha interceptado el balón teniendo posesión del mismo, en ese momento el delantero no detecta bloqueos en la trayectoria de gol, disparando y tratando de anotar, mientras que el jugador 2 acompaña en su nuevo rol de mediocampista.

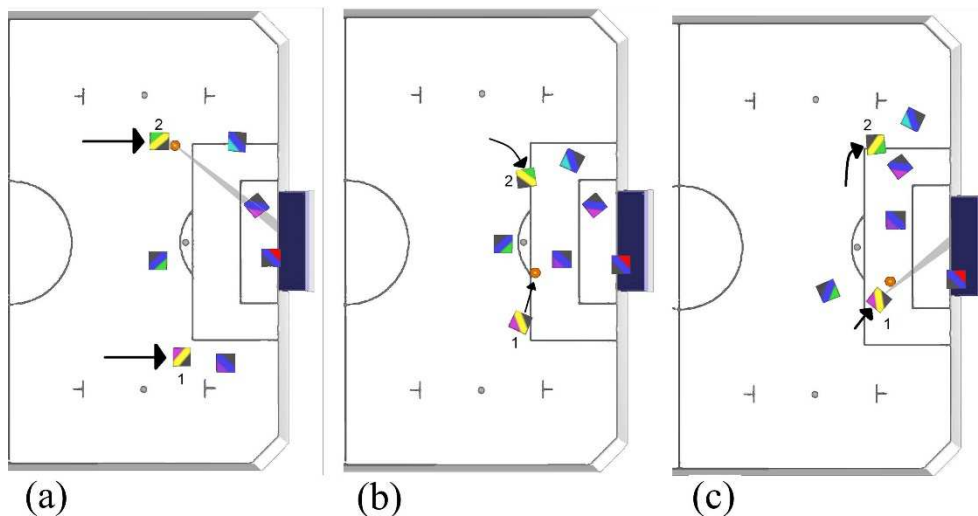


Figura 6.15. Situación de juego con bloqueo a la portería oponente.

6.4 Conclusiones del capítulo

Como se ha venido trabajando, el uso de Máquinas de Estado para la coordinación de jugadores en estrategias de fútbol de robots permite una facilidad en el diseño de las reglas con las que el equipo enfrenta el juego, ya que su diseño puede realizarse de manera intuitiva teniendo en cuenta el reglamento de las ligas en las que se compete. Dado que la coordinación de equipo es completamente necesaria en este tipo de entornos, el uso de funciones con el fin de sincronizar los comportamientos colaborativos entre roles permite coordinar dichos comportamientos diseñados a través de Máquinas de Estado, en este caso para arquitecturas centralizadas.

Así mismo, un equipo que presenta comportamientos colaborativos genera mayores resultados en ambientes competitivos, como es el caso del fútbol de robots. Si bien

mediante distintos modelos computacionales como son las Máquinas de Estado Finito para la coordinación de comportamientos entre jugadores se han mostrado resultados exitosos como se ha venido presentando en capítulos anteriores, el uso de funciones de sincronización entre jugadores permite obtener mejores resultados en la coordinación de los comportamientos frente a estrategias similares que no presentan sincronización de comportamientos, obteniendo con esto mejores indicadores en los juegos como por ejemplo, anotando más goles, realizando un mayor número de pases exitosos o presentando un mayor porcentaje de tiempo con la posesión del balón. El uso de funciones de sincronización no representa un aumento en la complejidad en la arquitectura de la estrategia, ni implica un incremento considerable de las líneas de código, ni aumentos significativos en el costo computacional. Así mismo este tipo de funciones de sincronización puede ser también aplicables a otro tipo de arquitecturas, bien sean de tipo distribuidas, o que utilicen otro tipo de modelos computacionales.

CAPÍTULO 7

ARQUITECTURA DE CONTROL INSPIRADA EN COORDINACIÓN DE EQUIPOS DE FÚTBOL DE ROBOTS, APLICADA A MICRO-REDES ELÉCTRICAS AISLADAS

7.1 Introducción

Como se ha podido observar en el apartado 2.5, la integración de la generación eléctrica distribuida está ganando una mayor atención dada la creciente penetración de las fuentes renovables de energía (*renewable energy sources* RESs), tales como las fuentes fotovoltaicas (*photovoltaic* PV) y los aerogeneradores eléctricos (*wind turbine* WT). En este aspecto, las micro-redes eléctricas han aparecido como una alternativa para la integración de las RES. Dado esto, los sistemas multi-agente han sido utilizados en diferentes aplicaciones relacionadas con micro-redes eléctricas. En este capítulo se propone una arquitectura de control para coordinar el modo de operación de una micro-red eléctrica, inspirada en una estrategia centralizada de fútbol de robots basada en tácticas, roles y comportamientos, que ha sido presentada en los capítulos 3 y 4. Esta estrategia propuesta es implementada como una arquitectura de control centralizada con percepción global de las condiciones de operación de la micro-red eléctrica, que asegura una adecuada asignación de roles y comportamientos para todas las fuentes de energía distribuidas (*distributed energy resources* DERs) con el propósito de alcanzar el objetivo del equipo (considerándose como equipo la micro-red). Para este caso el objetivo consiste en la regulación y el funcionamiento fiable del bus común de la micro-red, mediante la selección de tácticas y comportamientos cooperativos entre agentes que permitan entre otros

objetivos, la ecualización de los estados de carga SoCs de los sistemas de almacenamiento de energía (*energy storage systems* ESSs) distribuidos y el recorte de la potencia generada por las RESs cuando esto se requiera. Adicionalmente, la estrategia a continuación propuesta considera los escenarios adecuados para la carga de los ESSs basados en baterías.

7.2 Modelo de la micro-red

Una micro-red basada en fuentes renovables de energía será considerada para la validación de la arquitectura propuesta en este capítulo. Particularmente, una micro-red aislada AC trifásica compuesta por dos diferentes RESs (PV y un generador WT), cargas críticas y no críticas y ESSs distribuidas basadas en bancos de baterías serán consideradas para este caso, como se presenta en la Figura 7.1.

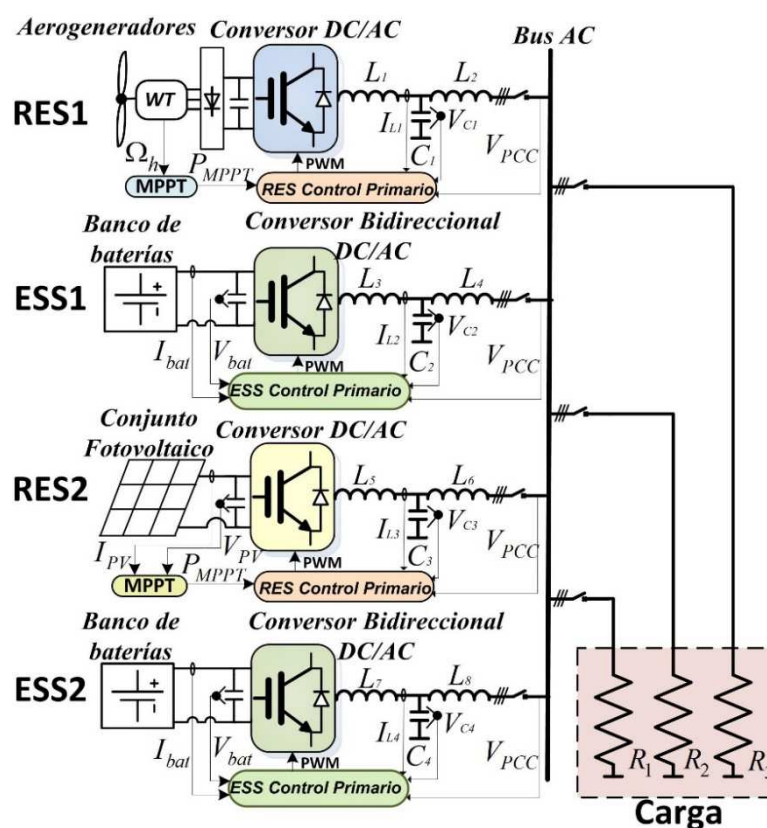


Figura 7.1. Configuración de la micro-red aislada.

Cada DER es complementada con una etapa de conversión de potencia, filtros de salida y controladores primarios los cuales son controladores locales independientes que permiten una operación autónoma y conexión paralela de cada unidad en el bus común [147]. La tendencia actual en los ESSs está orientada a la integración de los ESSs distribuidos en lugar de uno solo centralizado. En este sentido cada unidad de almacenamiento puede ser optimizada y configurada para la integración de las RESs distribuidas con diferentes características [148]. Adicionalmente aproximaciones distribuidas permiten una más fácil actualización de los sistemas que ya incluyen unidades ESSs [149]. Además de esto, en aplicaciones de micro-redes aisladas, los ESSs se basan principalmente en baterías, particularmente de plomo ácido [150]. Para este caso, se utilizan baterías de plomo ácido reguladas por válvulas.

7.2.1 Operación de los ESSs

Para el modo de operación normal de una micro-red aislada, se requiere que al menos una de las DERSs (ESSs o RESs) asuma el rol de *grid-forming*. Normalmente los ESSs asumen los roles *grid-forming*, mientras que los RESs asumen el rol de *grid-following* para suplir las deficiencias de potencia definidas por los algoritmos MPPT de la red local. En este caso los ESSs son cargados o descargados con el propósito de asegurar el balance de potencia en la micro-red. No obstante para los ESSs basados en baterías es absolutamente recomendado por los fabricantes cargar completamente las baterías entre los ciclos de descarga y evitar sobrecargas excesivas. Para esto se recomiendan dos etapas de carga que envuelven una etapa de carga con corriente limitada, seguida de una etapa de carga con tensión constante como se presenta en la Figura 7.2 [127].

En la primera etapa la batería se carga basada en el desbalance de potencia entre la generación y el consumo. Durante esta etapa los ESSs están en modo de operación *grid-forming* que operan en modo de control de tensión (*voltage control mode* VMC). Cuando los generadores de las RESs suministran suficiente energía el arreglo de las baterías será cargado hasta que la tensión de batería (*battery voltage* V_{bat}) alcance un valor umbral conocido como tensión de regulación (*regulation voltage* V_r), siendo un valor típico 2.45 ± 0.005 volts/cell. Una vez la tensión nominal ha sido alcanzada, la tensión de la batería debería mantenerse constante, esto significa que la corriente de la batería debería empezar a ser reducida por una vía controlada con el propósito de mantener la tensión de la batería constante como se presenta en la Figura 7.2 y por consiguiente el arreglo de baterías entra en la segunda etapa de carga (carga con tensión constante). Como consecuencia los correspondientes ESSs necesitan cambiar su modo de control de VCM a modo de control de corriente

sión de referencia de la tensión de salida del inversor, ω es la frecuencia angular de la tensión de salida, ω^* es la referencia de la frecuencia angular, y K_p y K_q son los coeficientes droop [152].

7.2.3 Operación de la micro-red aislada

Como se expuso anteriormente, para un funcionamiento fiable de la micro-red aislada las transiciones entre los modos de operación son definidas por las DERs. Para esto diferentes topologías de modos de operación pueden ser identificadas para la micro-red donde, al menos una de las DERs asume el rol *grid-forming* para asegurar la regulación del bus común. Para ilustrar esto en la Figura 7.5 se presentan 6 topologías de operación de la micro-red donde el rol *grid-forming* es alternado entre los ESSs y las RESs. Las unidades con el rol *grid-forming* se presentan con fuentes de tensión en serie con una impedancia de salida, siendo esto aplicable tanto a los RESs como a los ESSs por el uso de los controladores primarios unificados. Por otro lado, las unidades con el rol *grid-following* se representan como fuentes de potencia constantes en el caso de las RESs y como cargas de potencia constante en el caso de los ESSs.

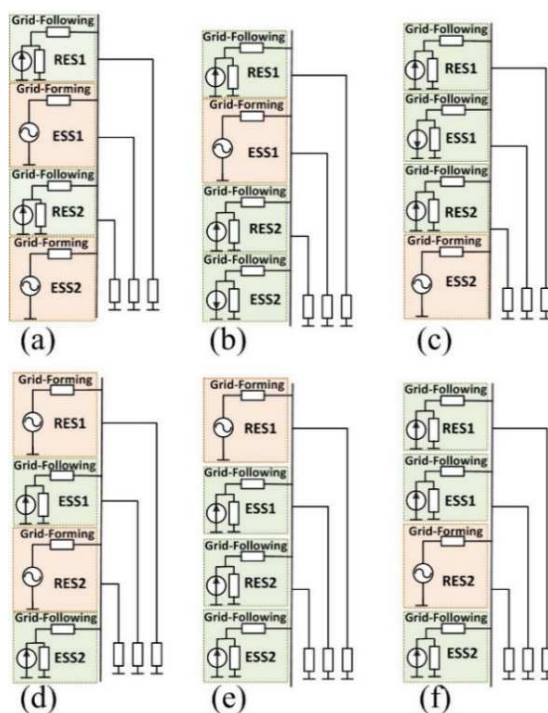


Figura 7.5. Topologías de operación de la micro-red aislada.

Dado lo anterior, se requiere una arquitectura de control para coordinar el modo de operación y con esto generar las señales de transición entre roles para cada DERs considerando las condiciones de operación de cada unidad, y el conjunto de operaciones de la micro-red. La arquitectura propuesta debe considerar también la desconexión de cargas o acciones para evitar una profunda descarga de las baterías cuando no hay energía suficiente para suministrar la demanda de la carga [153]. Para este caso, se considera una tensión mínima de desconexión (*low voltage disconnection* LVD) para la desconexión de las cargas. Dicho valor es usualmente sugerido por los fabricantes de baterías [127].

7.3 Arquitectura centralizada basada en tácticas, roles y comportamientos

7.3.1 Arquitectura de la estrategia de control

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, en fútbol de robots la estrategia se define como el plan del equipo con el propósito de ganar el partido y el cual envuelve asignación de roles, formación de jugadores y selección de comportamientos. La estrategia se divide en tácticas que corresponden a la organización del equipo para unas específicas condiciones de juego como por ejemplo el tiempo restante, el marcador del partido, la ubicación del balón u otras condiciones específicas de juego como el cobro de un tiro de esquina, teniendo en cuenta que se selecciona únicamente una táctica para ser ejecutada en un momento dado. Los roles son seleccionados para los jugadores basados en la ubicación de los mismos en el campo de juego, las acciones requeridas y los comportamientos seleccionados. Estos últimos se seleccionan a partir de las acciones que los robots deben ejecutar dependiendo de su rol y su táctica. Como se ha presentado en los capítulos anteriores, arquitecturas centralizadas han sido utilizadas para coordinar operaciones en sistemas multi-agente, como es el caso del fútbol de robots. En este escenario, una supervisión centralizada (emulando a un técnico) asegura una visión global del sistema, seleccionando una táctica adecuada, permitiendo asignar roles y comportamientos a los agentes.

En la estrategia propuesta para coordinar la operación de una micro-red AC aislada, los ESSs las RESs y la carga son considerados agentes con sus específicos objetivos y funciones. Haciendo una metáfora entre la coordinación de un equipo de fútbol de robots y la coordinación de los modos de operación de las DERs en una micro-red aislada, la estrategia corresponde al plan del equipo (la micro-red) para la regulación del bus común, asegurando los niveles de carga adecuados para los

ESSs. El equipo es compuesto por los jugadores, los cuales para este caso corresponde a los ESSs distribuidos, las RESs y la carga. La táctica consiste en la organización del equipo, dependiendo del estado de carga de los ESSs y la generación de las RESs. Los roles corresponden a la lista de comportamientos que los jugadores deben realizar dependiendo de la táctica seleccionada, con el propósito de mantener el plan del equipo. Los comportamientos corresponden a las acciones básicas de los jugadores para responder a las acciones de control requeridas, el control de comportamientos corresponde a las acciones de control de bajo nivel (controles primarios). La especificación de la estrategia de fútbol de robots que inspiró la estrategia propuesta en este capítulo se ha presentado en los capítulos 3 y 4.

En la Figura 7.6 se presenta la arquitectura global para la selección de los modos de operación en una micro-red eléctrica aislada utilizando una arquitectura centralizada. El modo de operación es seleccionado por un sistema central de toma de decisiones con percepción global de las condiciones actuales de operación de la micro-red, este sistema de toma de decisiones es implementado desde un ordenador central. Desde este sistema se seleccionan las tácticas, roles y comportamientos, emulando a la figura del técnico en un equipo de fútbol de robots. Estas decisiones son transmitidas a los agentes, que corresponden a las DERS (los ESSs, las RESs) y la carga para el caso de la micro-red, siendo estos los jugadores en el equipo de fútbol de robots. Para el caso de la micro-red, el sistema de toma de decisiones utiliza las señales de los sensores de las DERs y de la carga, las cuales son transmitidas hasta el ordenador central. La arquitectura propuesta es implementada utilizando una Máquina Jerárquica de Estado Finito para el sistema de toma de decisiones, desde donde se selecciona la táctica, basada en las condiciones actuales de operación de la micro-red, y las señales del estado de los agentes. Una vez la táctica es seleccionada, el segundo nivel de la Máquina de Estado asigna un rol dependiendo de dicha táctica. Cuando los roles son asignados, la tercera capa de la Máquina de Estado selecciona los comportamientos apropiados para cada DER, de acuerdo con el rol seleccionado. Cada transición entre tácticas, roles y comportamientos es determinada en el controlador central. La arquitectura de la estrategia de coordinación es presentada en la Figura 7.7.

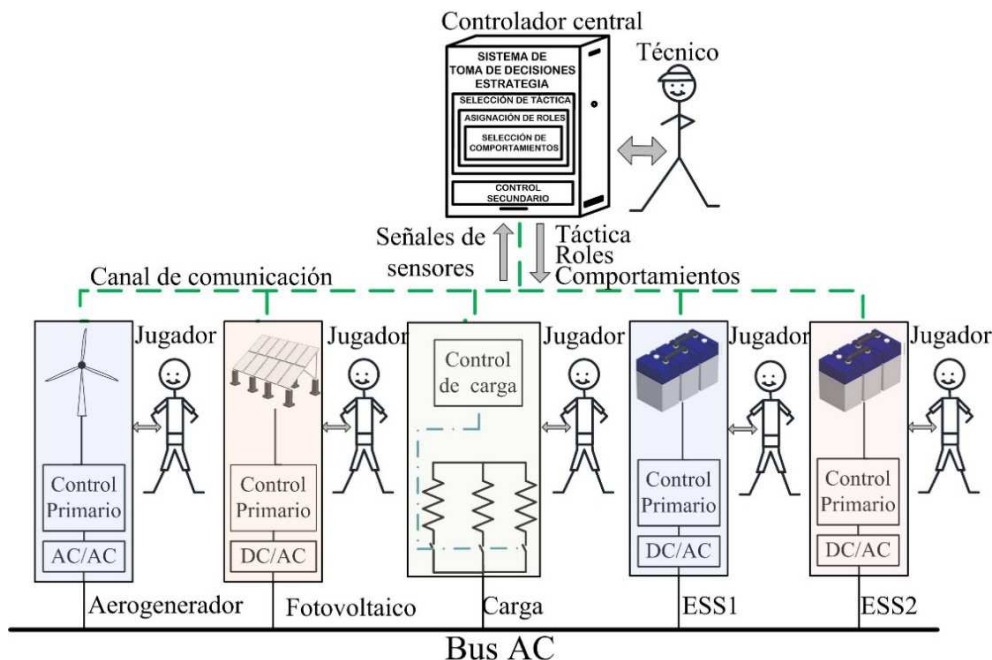


Figura 7.6. Arquitectura global de control.

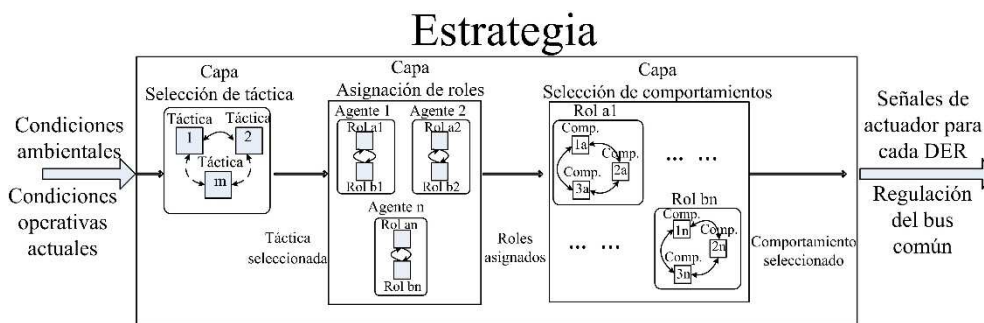


Figura 7.7. Arquitectura de la estrategia para la coordinación de los modos de operación en una micro-red aislada.

Una de las principales ventajas de la arquitectura centralizada consiste en que se pueden realizar correcciones en la desviación de la frecuencia y la tensión en el bus común. Para este propósito el control secundario es una opción, ya que no representa grandes costos en su implementación, ni afecta el diseño de la estrategia centralizada presentada en este capítulo, ya que utiliza la información de la micro-red

suministrada por los sensores a través del canal de comunicación al ordenador central, donde está implementada la estrategia. Aunque la corrección centralizada de la desviación de la frecuencia y la tensión no es el principal propósito de la estrategia propuesta, controladores secundarios para este propósito han sido implementados tal como se propusieron en [122], sin que esto haga parte de la estrategia presentada en este capítulo.

7.3.2 Selección de la táctica

Como se puede observar en la Figura 7.8, para la estrategia de control del modo de operación en la micro-red aislada se han definido tres tácticas que se seleccionan dependiendo de las condiciones operativas actuales. Dichas tácticas son: Táctica balance de potencia, la cual es activada cuando los ESSs están en estado de carga/descarga con el propósito de asegurar el balance de potencia entre la generación y el consumo; táctica recorte de potencia, que es activada cuando los ESSs están casi completamente cargados y la potencia generada desde las RESs necesita ser ajustadas para asegurar el correcto balance de potencia y evitar sobrecargas de los ESSs; y la táctica desconexión de carga, activada cuando las baterías alcanzan el valor LVD, esto con el propósito de evitar descargas profundas de las baterías de los ESSs. Esta selección es realizada por el primer nivel de la Máquina Jerárquica de Estado Finito, en este nivel los estados corresponden a las tácticas, las transiciones son definidas basadas en las condiciones de operación de los DERs, como se puede observar en la Figura 7.8. La transición $E1$ es una señal de activación que activa la estrategia una vez la micro-red es encendida y alcanza el estado estacionario. En la transición $E2$, $VH1$ y $VH2$ corresponden a señales que se activan cuando las baterías de los ESS1 y ESS2 alcanzan los valores de tensión de regulación V_r , indicando que han llegado a su máxima tensión de carga. $Ess1$ y $Ess2$ indican el rol de cada unidad ESS, siendo 0 cuando la unidad ESS está en rol *grid-following*, y 1 cuando el ESS está en rol *grid-forming*. En la transición $E3$ $Res1$ y $Res2$ indican el rol de cada unidad i RES, siendo 0 cuando la unidad está en *grid-following*, y 1 cuando la unidad está en *grid-forming*. $Pmppt1$ y $Pmppt2$ corresponden al máximo valor de potencia suministrado por el MPPT de cada RES, y $Pload$ corresponde a la potencia de consumo de la carga. Para la transición $E4$, $VL1$ y $VL2$ corresponden al estatus de la señal que indica que las baterías de los ESS1 y ESS2 respectivamente, se han descargado hasta alcanzar el valor de tensión LVD, indicando 1 cuando se ha alcanzado este valor, y 0 cuando la tensión del arreglo de baterías es superior a dicho valor. Para la transición $E5$, $Socc1$ y $Socc2$ corresponden al estatus de la señal que se activa ($Socc1=1$, o $Socc2=1$) cuando el SoC de la respectiva ESS es mayor o igual al 60%.

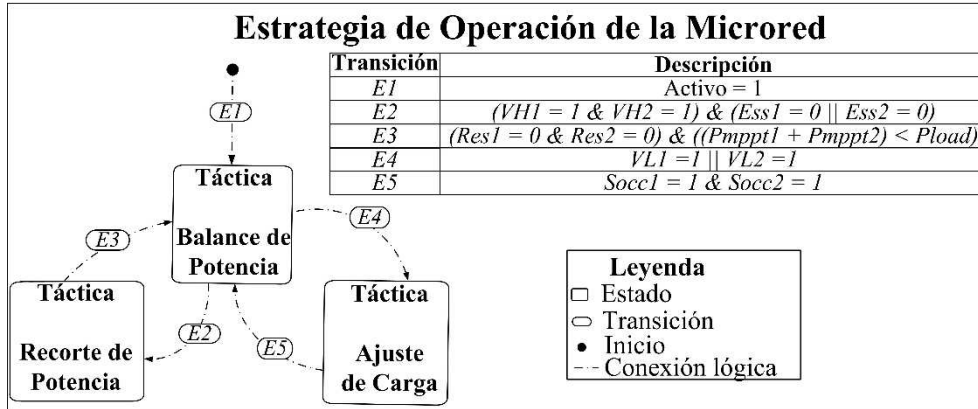


Figura 7.8. Capa de selección de táctica.

Dos roles han sido considerados para los RESs y los ESSs. El primero corresponde al rol *grid-forming*, que es asignado a los agentes encargados de la regulación del bus común. El segundo rol corresponde al rol *grid-following* el cual es seleccionado a los agentes que son controlados como fuentes de corriente. La carga mantiene un rol constante (carga completa) cuando se activan las tácticas balance de potencia y recorte de potencia. Para el caso de la táctica desconexión de carga, la carga asume el rol ajuste de carga.

7.3.2.1 Táctica balance de potencia.

En la segunda capa de la Máquina de Estado Finito se realiza la asignación de roles, dependiendo de la táctica seleccionada previamente, y de las condiciones de operación de la micro-red. En la Figura 7.9 se presenta la selección de roles para la táctica balance de potencia.

Para esta táctica las dos RESs mantienen un rol constante (*grid-following*) generando la máxima energía posible. La carga mantiene el rol constante carga completa. Los dos ESSs inician con el rol *grid-forming*, compartiendo entre los dos el balance de potencia. Cuando las transiciones *St01* o *St02* son activadas, ESS1 o ESS2 cambian sus roles a *grid-following*, esto ocurre cuando las baterías del *i* arreglo de baterías, alcanzan la tensión de regulación ($V_{bati}=Vr$):

$$VHi = \begin{cases} 1, \text{ cuando } V_{bati} \geq Vr, \\ 0, \text{ otros casos.} \end{cases} \quad (7.3)$$

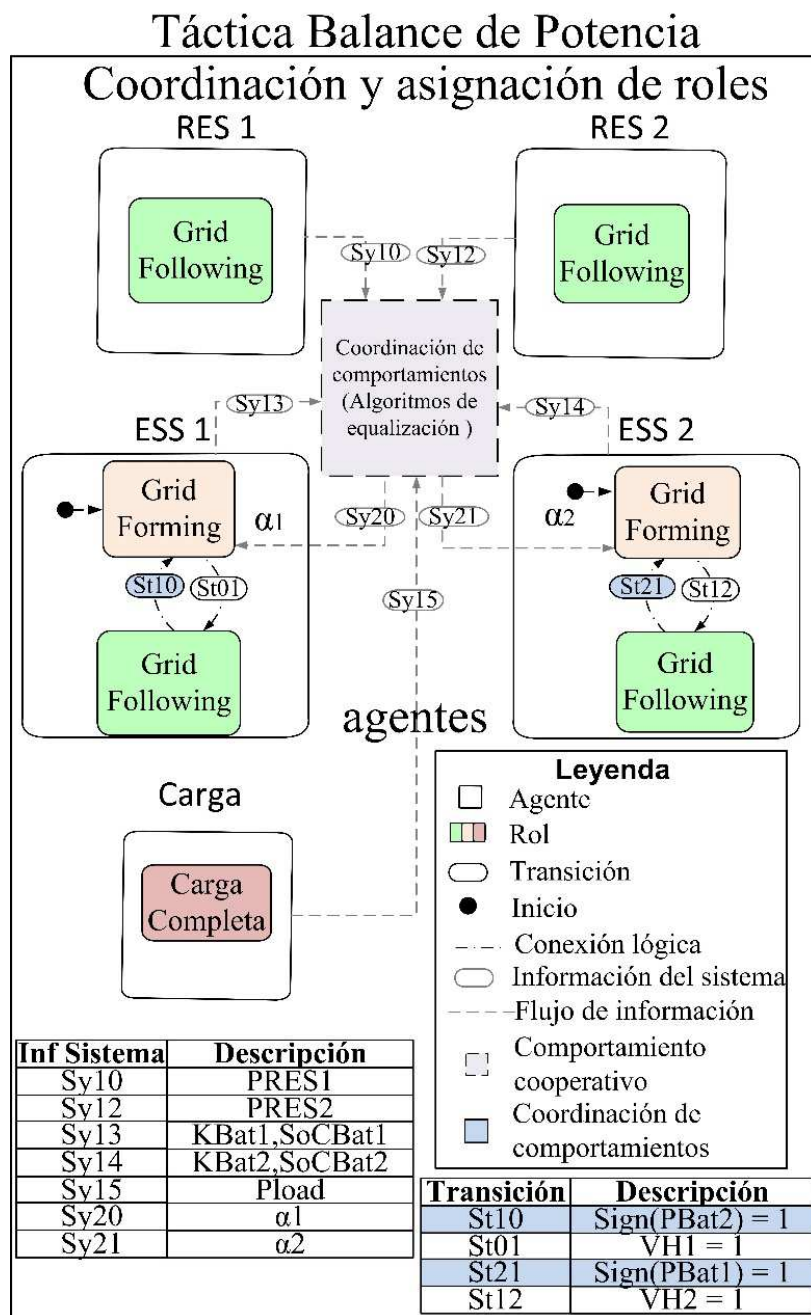


Figura 7.9. Coordinación y selección de roles en la táctica balance de potencia.

ESS1 y ESS2 pueden regresar al rol *grid-forming* cuando las transiciones *St10* o *St 21* sean activadas, respectivamente. Estos eventos ocurren cuando uno de los ESS se encuentra aún en rol *grid-forming* y el otro se encuentra con el rol *grid-following*, como se muestra en las Figuras 7.5(b) y 7.5(c). En este punto, el ESS con el rol *grid-forming* inicia su descarga ($Sign(P_{Bati})=1$). Por lo tanto la ESS en el rol de *grid-following* asume el rol *grid-forming* con el fin de compartir la responsabilidad del balance de potencia con el otro ESS. Esta respuesta puede ser considerada como coordinación de comportamientos entre dos agentes, haciendo la analogía en un ambiente de fútbol de robots donde el jugador con el rol delantero asume el rol defensa cuando las condiciones del juego lo requieren.

Aparte de lo anterior, la coordinación de comportamientos tales como la ecualización del SoC entre los ESSs es definida en esta táctica. La idea principal es que el ESS con mayor energía almacenada contribuye con mayor potencia al sistema, y el ESS con menor energía almacenada se carga más rápidamente que los demás ESSs durante el periodo de carga de batería. El proceso de ecualización del SoC presenta distintas ventajas para la operación de la micro-red, como por ejemplo reducción de las descargas profundas de las baterías, periodos de carga más rápidos y una transición más suave entre los modos de operación [154]. En este caso en particular no se ha tenido directamente en cuenta el SOH de la batería, sin embargo gracias al parámetro K_{bati} se proporciona información importante sobre diferentes parámetros que pueden indicar el SOH de las baterías tales como la capacidad de la batería. El método usado permite la ecualización inclusive cuando se presentan diferencias en las capacidades de las baterías tal y como se muestra en [155], por lo que no es necesario tener en cuenta de forma directa el SOH. Haciendo la analogía con el fútbol de robots, en el caso que dos agentes con rol defensa, el defensa más cercano al balón va a interceptarlo. Mientras tanto el otro defensa va a bloquear a un jugador oponente con el fin de evitar posibles pases entre jugadores contrincantes.

En esta aplicación, un algoritmo de ecualización como se ha propuesto en [156], es considerado como un comportamiento cooperativo para la ecualización del SoC entre los ESSs, siendo presentado en el algoritmo 7.1. El algoritmo de ecualización requiere información de todos los agentes del sistema, tal como se muestra en la Figura 7.9. Donde $Sy10$ y $Sy12$ corresponden a la potencia generada por las RES1 (PRES1) y RES2 (PRES2) respectivamente. $Sy15$ corresponde al consumo de la carga (Pload). $Sy13$ y $Sy14$ contienen información específica de cada ESS en dos parámetros. Uno es el parámetro K_{bati} , que corresponde a:

$$K_{bati} \approx \left(\frac{V_{bati} C_{bati}}{\eta_{bati}} \right) \quad (7.4)$$

donde V_{bati} es la tensión del i arreglo de baterías, C_{bati} es la capacitancia en (A/h) del i arreglo de baterías, y η_{bati} es la eficiencia carga/descarga del i arreglo de baterías. El otro parámetro es el SoC de cada batería basado en el método de conteo amperios-hora (Ah) definido como:

$$SoC(\Delta t)_{bati} = SoC(0)_{bati} - \int_0^{\Delta t} \eta_{bati} \frac{I_{bati}(\tau)}{C_{bati}} d\tau \quad (7.5)$$

donde $SoC(0)_{bati}$ es el inicial Soc del i arreglo de baterías, e $I_{bati}(\tau)$ que es la corriente instantánea de cada del i arreglo de baterías.

ALGORITMO 7.1. ALGORITMO DE ECUALIZACIÓN

1. **función** $F(K_{bati}, P_{RESi}, P_{load}, SoC_{bati}, Sing(P_{bati}))$
 2. $A = [-K_{bat1}, K_{bat2}, \Delta t, -\Delta t]$.
 3. $B = [-(P_{RES1} + P_{RES2} - P_{load}); (SoC_{bat2} - SoC_{bat1})]$
 4. **Resolver** $X = A^{-1} \times B$;
 5. $K_{max} = \max(K_{bat1}, K_{bat2})$;
 6. $K_{min} = \min(K_{bat1}, K_{bat2})$;
 7. **si** $Sing(P_{bat1})$ y $Sing(P_{bat2}) = 1$ **entonces**
 8. **si** $SoC_{bat1} > SoC_{bat2}$ **entonces**
 9. $\alpha 2 = (K_{min}/K_{max})$;
 10. $\alpha 1 = \alpha 2(K_{bat2} \cdot X(2) / K_{bat1} \cdot X(1))$;
 11. **entonces**
 12. $\alpha 1 = (K_{min}/K_{max})$;
 13. $\alpha 2 = \alpha 1(K_{bat1} \cdot X(1) / K_{bat2} \cdot X(2))$;
 14. **fin si**
 15. **entonces**
 16. **si** $SoC_{bat1} > SoC_{bat2}$ **entonces**
 17. $\alpha 1 = (K_{min}/K_{max})$;
 18. $\alpha 2 = \alpha 1(K_{bat1} \cdot X(1) / K_{bat2} \cdot X(2))$;
 19. **entonces**
 20. $\alpha 2 = (K_{min}/K_{max})$;
 21. $\alpha 1 = \alpha 2(K_{bat2} \cdot X(2) / K_{bat1} \cdot X(1))$;
 22. **fin si**
 23. **fin si**
 24. **retornar** $\alpha 1, \alpha 2$
 25. **esperar por** Δt
 26. **fin función.**
-

Las salidas del algoritmo de ecualización corresponden a las señales $Sy20$ y $Sy21$ que corresponden a los factores $\alpha 1$ y $\alpha 2$ respectivamente. Dichos factores son utilizados para ponderar los coeficientes *Droop* K_p del lazo de control *Droop* primario

de cada ESS como se vio en la Figura 7.2. Los valores nominales de los coeficientes *Droop* K_p y K_q fueron calculados considerando restricciones dinámicas tal y como se presenta en [157], en el análisis realizado en ese trabajo se puede observar que se garantiza una operación estable con una dinámica adecuada siempre que no se exceda el valor nominal del coeficiente *Droop*, por tal motivo los valores de los factores de ponderación α y β se calculan de tal forma que no sean superiores a 1. Como consecuencia, la potencia activa compartida entre los ESSs paralelos es ajustada de acuerdo con el SoC de cada unidad con propósitos de ecuación. Por consiguiente la ecuación 7.1 es modificada por la siguiente:

$$\omega = \omega^* - \alpha_i \cdot K_p \cdot P_{bati} \quad (7.6)$$

donde P_{bati} corresponde a la potencia medida suministrada por cada i unidad ESS. El algoritmo de ecuación es ejecutado durante determinados periodos de tiempo Δt que se repite periódicamente durante todo el tiempo de operación del sistema. Este tiempo se selecciona en relación con la máxima potencia disponible en las ESSs. Desde el punto de vista del fútbol de robots, los comportamientos son asignados a los agentes en la tercera capa de la Máquina Jerárquica de Estado Finito de acuerdo con la táctica y el rol seleccionado a cada jugador. En el caso de la táctica balance de potencia, se espera que las RESs sigan la referencia de potencia (P^*) dada por el algoritmo MPPT. No obstante, otros comportamientos deben ser considerados en la operación de la micro-red con el propósito de suministrar la potencia deseada, recortando la generación de potencia con el propósito de mantener el balance de potencia. Para esto una señal de estatus ($Ref(P_{RESi})$) han sido definidas para establecer diferentes referencias en los controladores de las RESs de acuerdo con:

$$P^* = \begin{cases} P_{MPPT}(RESi), & \text{cuando } Ref(P_{RESi}) = 0, \\ P_{exti}, & \text{cuando } Ref(P_{RESi}) = 1, \end{cases} \quad (7.7)$$

donde P_{exti} corresponde a la referencia de potencia programadas externamente, el cual será explicado más adelante. La secuencia de comportamientos de las RES, que tienen el rol *grid-following* en la táctica balance de poder, es presentada en la Figura 7.10, donde las RES trabajan en modo *CCM*.

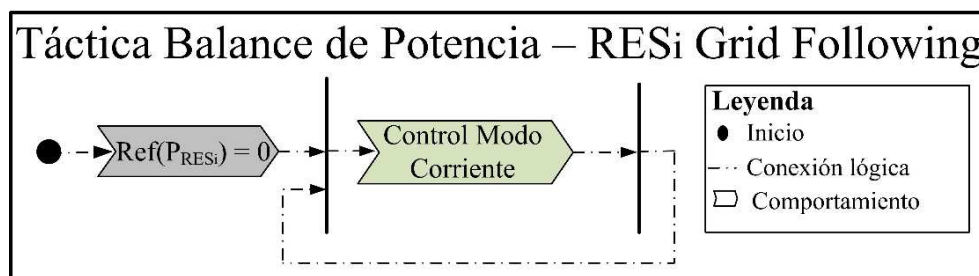


Figura 7.10. Comportamientos de las RESs para el rol grid-following, táctica balance de potencia.

La secuencia de comportamientos correspondientes para los ESSs en la táctica balance de poder y con el rol *grid-forming* es presentada en la Figura 7.11. En la primera etapa se presenta un retardo con el propósito de evitar los efectos de la respuesta transitoria del arranque del sistema y corrientes circulantes que suelen aparecer en las transiciones entre los modos CCM y VCM. Posteriormente, el i ESS lee su correspondiente factor α_i derivado del algoritmo de ecualización, y el modo VCM es activado.

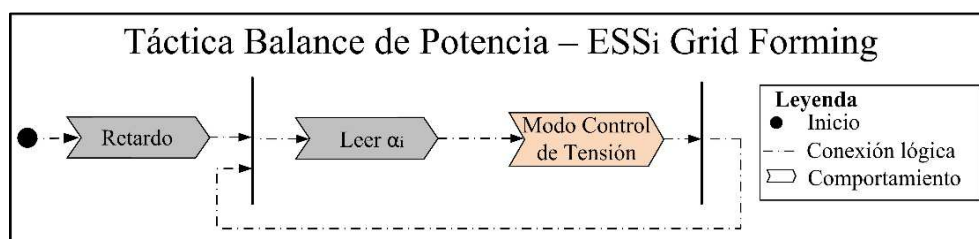


Figura 7.11. Comportamientos de los RESSs para el rol grid-forming, táctica balance de potencia.

La Figura 7.12 presenta la secuencia de comportamientos para los ESSs para el rol *grid-following*, siendo la misma secuencia para las tácticas balance de potencia y recorte de potencia, como se comentará más adelante. Para este rol existe un único comportamiento activado que corresponde al modo de operación CCM.

Un caso similar se presenta con el agente carga, que activa el rol carga constante. Durante la táctica balance de potencia la carga constante es conectada al bus común. En esta implementación, la carga es compuesta por tres cargas conectadas en paralelo, conformada por 2 cargas no críticas y una carga crítica que sería desconectada como última opción para prevenir descargas profundas de batería.

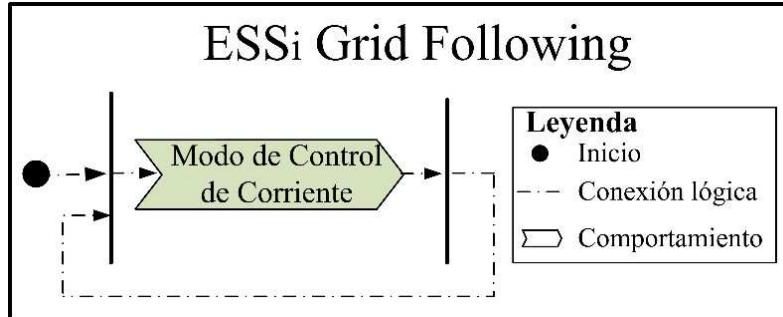


Figura 7.12. Comportamientos del ESSi en el rol grid-following.

7.3.2.2 Táctica recorte de potencia

Durante esta táctica las RESs son responsables de la regulación del bus común. En esta táctica se asume que las RESs tendrán suficiente energía para suministrar el consumo de energía requerido y asegurar el balance de potencia. Mientras tanto los ESSs consumen tanta potencia como sea posible, con el propósito de mantener la tensión del arreglo de baterías en un valor constante ($V_{bati}=V_r$). La Figura 7.13 presenta la capa de selección de roles para la táctica recorte de potencia. Para esta táctica las RESs presentan un proceso de selección de roles mientras que los ESSs mantienen el rol constante *grid-following*. Así mismo la carga mantiene el rol constante de carga completa. La micro-red en esta táctica opera con una de las topologías presentadas en las Figuras 7.5(d), 7.5(e) y 7.5(f). Iniciando con el rol *grid-forming*, una vez que son activadas las transiciones *St13* o *St23*, RES1 o RES2 cambiarían al rol *grid-following* respectivamente. Esto ocurre cuando la máxima potencia que puede ser generada por una unidad RES ha caído a un valor menor al valor de potencia compartido en ese momento (P_{RESi}).

Más específicamente la señal de estatus $CMPPT(RESi)$ que determina la transición es definida como:

$$CMPPT(RESi) = \begin{cases} 1, & \text{cuando } CMPPT(RESi) < P_{RESi}, \\ 0, & \text{cuando } CMPPT(RESi) \geq P_{RESi}. \end{cases} \quad (7.8)$$

Una vez una RES asume el rol *grid-following*, su potencia de referencia P^* es inicialmente definida por el algoritmo MPPT ($Ref(P_{RESi})=0$) como se describió en la ecuación 7.7, siempre y cuando su máximo valor de generación de potencia haya caído. No obstante es posible que la máxima potencia disponible inyectada por la unidad RES operando con el rol *grid-following* se incremente de nuevo. También es posible que el máximo valor de potencia disponible inyectado por cada unidad RES operando en el rol *grid-following*, se incremente nuevamente.

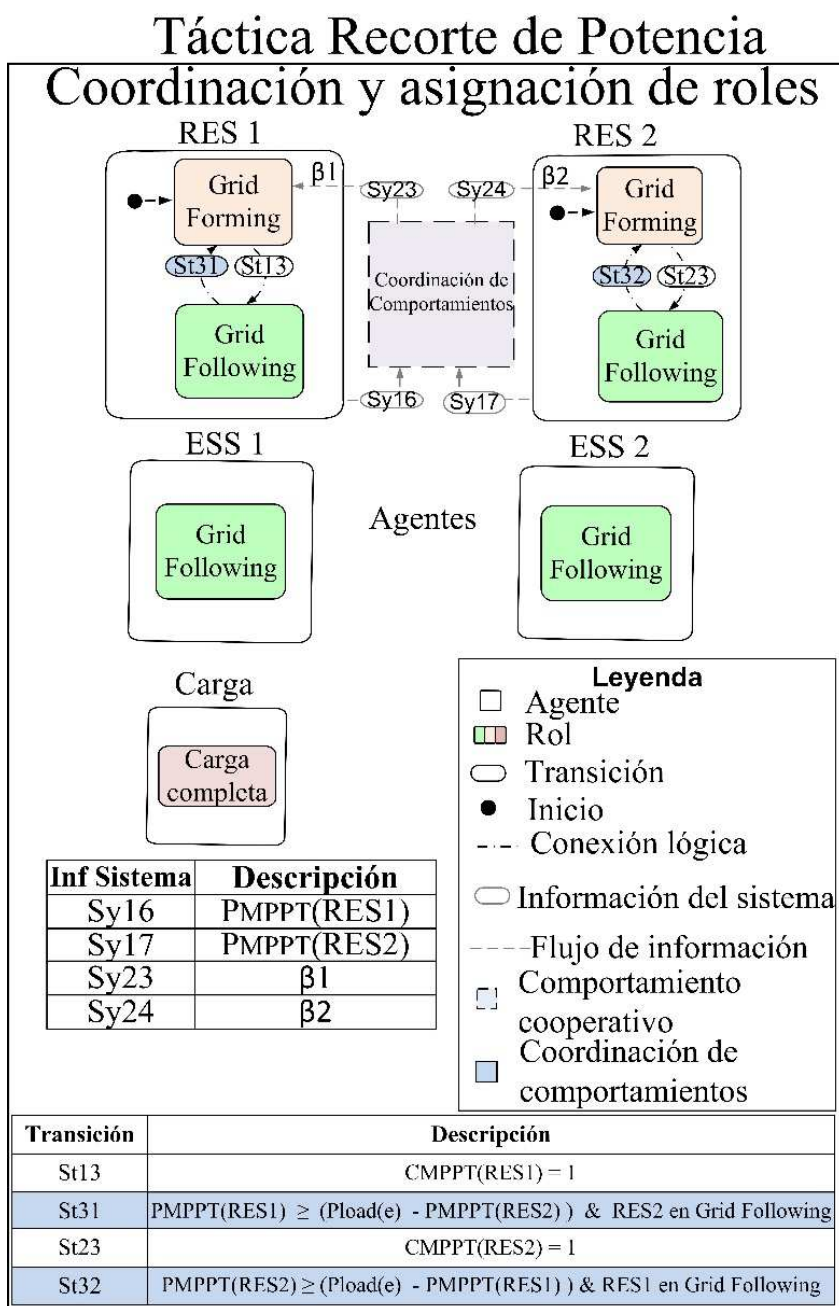


Figura 7.13. Coordinación y selección de roles en la táctica recorte de potencia.

En este caso la idea es empezar a compartir de forma igual la generación de potencia entre las dos RESs (operando con el rol *grid-forming*), cuando la energía disponible por la RES que opera con el rol *grid-following* es mayor o igual a la máxima energía suministrada por la unidad con el rol *grid-forming*. Concretamente, cuando $(P_{MPPT}(grid-following)) \geq P_{MPPT}(grid-forming)$ entonces, $(Ref(P_{RESi})=1)$ y $(P^* = P_{exti})$ donde:

$$P_{exti} = 0.5 P_{load(e)} \quad (7.9)$$

siendo $(P_{load(e)})$ representa el consumo total de potencia de la micro-red, que se calcula:

$$P_{load(e)} = P_{load} + P_{bat1} + P_{bat2}. \quad (7.10)$$

Para esto, la Figura 7.14 describe el diagrama de comportamientos para las RES1 y RES2 para el rol *grid-following*. Aun así, las RESs tienen la posibilidad de retomar el rol *grid-forming* activando las transiciones *St31* o *St32* según sea el caso. Estas transiciones son activadas en el caso que una de las unidades RESs esté en el rol *grid-forming* y la otra esté con el rol *grid-following*. Bajo estas condiciones la máxima potencia disponible por parte de la unidad RES con el rol *grid-forming* cae por debajo de la potencia en el momento suministrada $(C_{MPPT}(RES1)=1)$. En ese momento, la otra unidad RES puede reasumir el rol *grid-following* si la máxima potencia disponible en dicha unidad es mayor o igual que la diferencia entre el consumo de potencia y la potencia generada por la otra RES $(P_{MPPT}(RES2) \geq P_{load(e)} - P_{MPPT}(RES1))$.

Como se ha mencionado anteriormente, las unidades RESs asumen dos diferentes roles dependiendo de las condiciones de operación de la micro-red. Cuando las dos unidades RESs están con el rol *grid-forming* (Figura 7.5d), el balance de potencia es compartido entre estas dos unidades por medio de los lazos de control *Droop*. Para este caso, comportamientos cooperativos pueden ser definidos con el propósito de ajustar la contribución de la potencia de cada unidad RES buscando su máxima capacidad de generación. Esto quiere decir que las unidades RESs con mayor posibilidad de contribuir potencia inyectarán más que las otras. Para alcanzar esto, el coeficiente *Droop* K_p de la ecuación (7.1) es ponderado por un factor β que ajustará la contribución de la potencia de cada unidad i RES (P_{RESi}) proporcionalmente a su máxima potencia $(P_{MPPT}(RESi))$. Por esto la ecuación (7.1) se modifica de la siguiente manera:

$$\omega = \omega^* - \beta_i \cdot K_p \cdot P_{RESi} \quad (7.11)$$

donde los parámetros β_1 y β_2 son calculados basados en el algoritmo 7.2.

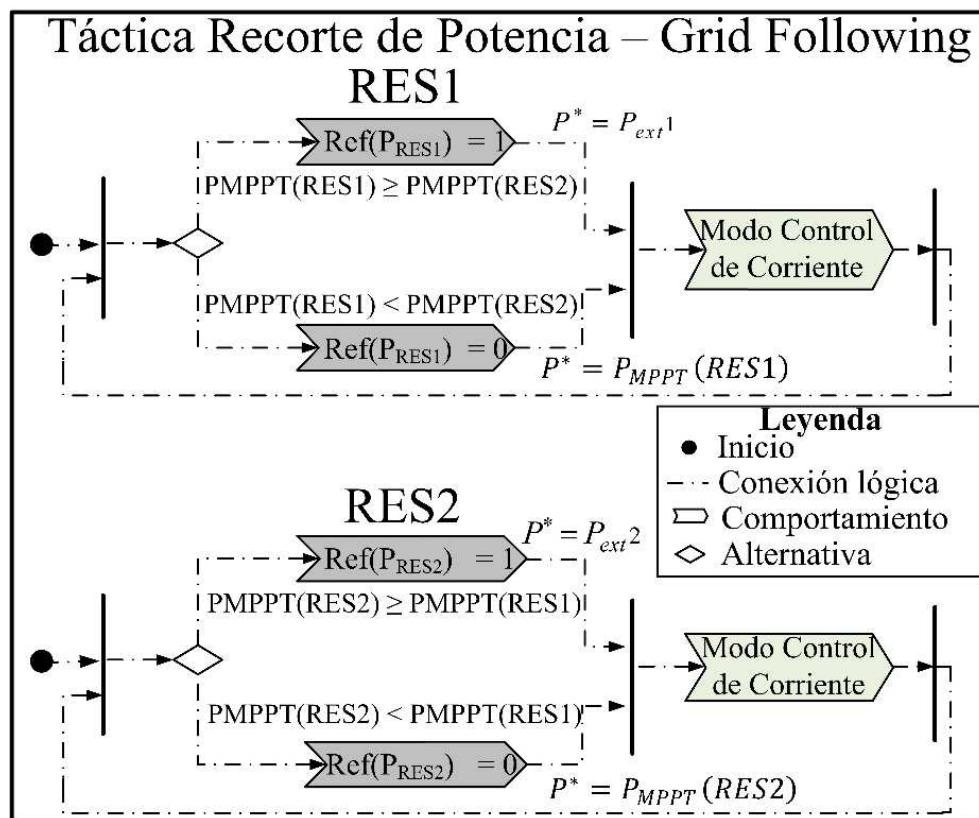


Figura 7.14. Diagrama de comportamientos de las unidades RES1 y RES2 para el rol de *grid-following*, táctica recorte de potencia.

La principal idea del algoritmo 7.2 es asignar el mayor factor de ponderación de las unidades RES a la unidad que genere la menor potencia. En la Figura 7.13 las salidas de la coordinación de comportamientos son las señales $Sy23$ y $Sy24$ que corresponden a los parámetros β_1 y β_2 , y la entrada de la coordinación de comportamientos son las señales $Sy16$ y $Sy17$ que corresponden a la máxima potencia disponible de cada RES ($P_{MPPT}(RES1)$) y ($P_{MPPT}(RES2)$). La Figura 7.15 presenta el diagrama de comportamientos de las unidades RESs con el rol *grid-forming* para la táctica recorte de potencia. Primero, se introduce un comportamiento de retardo con el fin de responder a las respuestas transitorias. Posteriormente las unidades RESs deben trabajar en modo VCM considerando el valor del factor β_i en el lazo de control *Droop*.

ALGORITMO 7.2. ALGORITMO DE CÁLCULO

1. **función** $F(P_{MPPT}(RES1), P_{MPPT}(RES2))$
2. **si** $P_{MPPT}(RES1) > P_{MPPT}(RES2)$
3. $\beta_2 = 1;$
4. $\beta_1 = B_2(P_{MPPT}(RES2)/P_{MPPT}(RES1));$
5. **entonces**
6. $\beta_1 = 1;$
7. $\beta_2 = \beta_1(P_{MPPT}(RES1)/P_{MPPT}(RES2));$
8. **fin si**
9. **retornar** β_1, β_2
10. **fin función.**

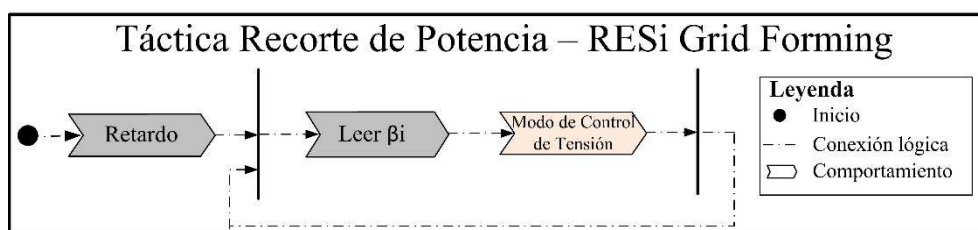


Figura 7.15. Diagrama de comportamientos de las unidades RESs para el rol *grid-forming*, táctica recorte de potencia.

Para esta táctica, el rol *grid-forming* ejecutado por los ESSs y la carga ejecutando su rol carga completa presentan comportamientos similares que los descritos para la táctica balance de potencia.

7.3.2.3 Táctica desconexión de carga

En esta táctica tanto las unidades RESs como los ESSs mantienen roles constantes. Las dos RESs tienen el rol *grid-following*, con la secuencia de comportamientos descrita en la Figura 7.10, mientras que las unidades ESSs mantienen el rol *grid-forming* con la secuencia de comportamientos descrita en la Figura 7.11. Igualmente el algoritmo de ecualización continúa trabajando para coordinar los comportamientos, con el propósito de balancear la energía almacenada entre las unidades ESSs distribuidas durante los procesos de descarga.

A pesar de esto, la carga asume el rol de ajuste de carga, cuyo diagrama de comportamientos es descrito en la Figura 7.16. La mencionada táctica ha sido considerada para el caso en el que no hay suficiente potencia por parte de las RESs para suministrarle a la carga y los ESSs están alcanzando niveles críticos de energía

7.4 Descripción de la implementación experimental y resultados

7.4.1 Descripción del montaje experimental

Con el propósito de validar la arquitectura presentada en este capítulo, se utiliza un montaje experimental que emula una micro-red AC de baja potencia. La Figura 7.17 presenta la configuración del montaje experimental que se divide en hardware y etapas de simulación en tiempo real. La sección de hardware está compuesta por 4 inversores *Danfoss* (2.2kW), filtros LCL y sensores LEM.

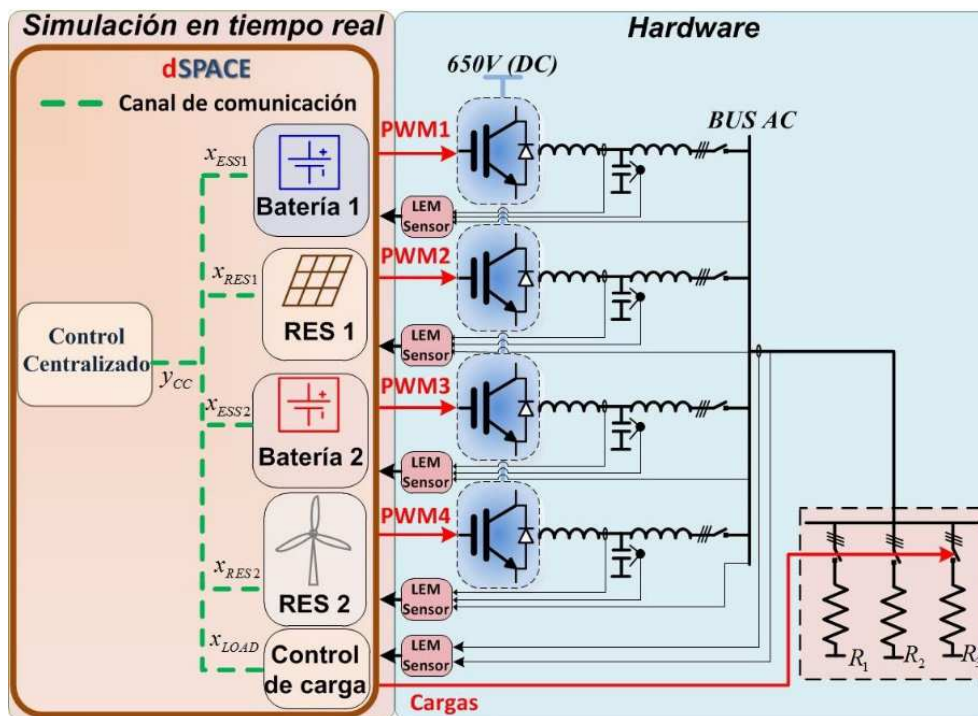


Figura 7.17. Configuración del montaje experimental.

En la Figura 7.18 se presenta una imagen del montaje experimental en el que se implementó la estrategia propuesta, en el *Microgrid Laboratory* de la *Universidad de Aalborg*. La etapa de simulación en tiempo real es implementada en una unidad *dSPACE1006* la cual emula los comportamientos de los modelos de batería y los generadores de energía renovables.

Adicionalmente la simulación en tiempo real incluye los controladores primarios, controladores secundarios y el control centralizado propuesto como estrategia. Para cada arreglo de baterías se obtiene un modelo agregado como es propuesto en [158], basado en arreglos de baterías de 48V propuesto en [159]. Canales de comunicación full-duplex son utilizados para la comunicación entre el control centralizado y los agentes donde, los datos enviados por la unidad i RES (X_{RESi}), cada unidad i ESS (X_{ESSi}) y el agente carga (X_{LOAD}) se definen como:

$$X_{RESi} = [P_{RESi}, P_{MPPT}(RESi), [C_{MPPT}(RESi)]]^T, \quad (7.12)$$

$$X_{ESSi} = [K_{bati}, SoC_{bati}, [VHi, VLi, Vfi, Sign(P_{bati}), Socci, T(SoCBati)]]^T, \quad (7.13)$$

$$X_{LOAD} = [P_{load}, V_d, f_{meas}]^T, \quad (7.14)$$

siendo V_d la amplitud del bus común y f_{meas} la frecuencia del bus común. Igualmente el set de datos desde el controlador centralizado a cada agente YCC es definido como:

$$Y_{CC} = \begin{cases} [\alpha_i, \Delta E, \Delta f, [Essi]]^T, & \text{para ESSi,} \\ [\beta_i, \Delta E, \Delta f, [Resi, Ref(P_{RESi})]]^T, & \text{para RESi,} \\ [LOADs], & \text{para LOAD.} \end{cases} \quad (7.15)$$

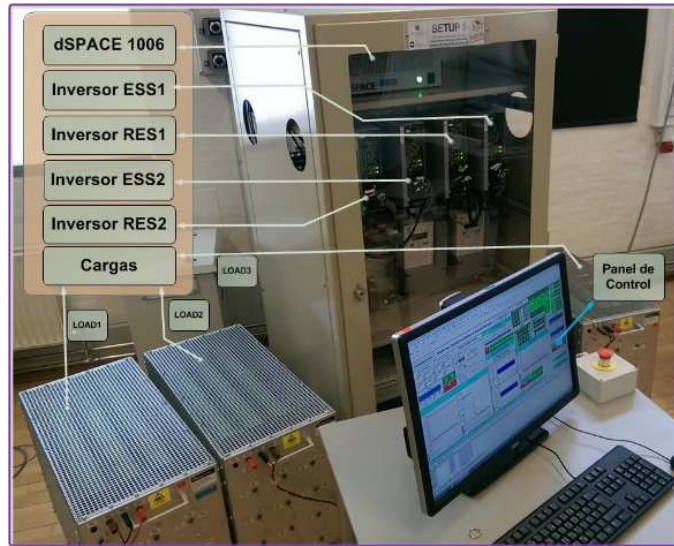


Figura 7.18. Imagen del montaje experimental.

Para los análisis desarrollados en este capítulo, los efectos de retardo en las comunicaciones se asumen despreciables. Se utilizó para la transmisión de datos una red LAN, ya que incrementa la confiabilidad y reduce el deterioro en las comunicaciones tales como pérdidas y retrasos en los paquetes [160]. Para este propósito, una red de conmutación Ethernet para redes de control industrial ha sido implementada [161], con una latencia estimada de 127 μ sec, dentro de una trama completa de 1518 *bytes*, hasta 1.85 msec en el peor caso [162]. La Tabla 7.1 presenta los principales parámetros de la micro-red considerada para la evaluación de la estrategia. La capacidad de las baterías es de 0.016 *Ah*, que permite una velocidad adecuada en los procesos de carga y descarga de las baterías. Los valores nominales de los coeficientes *Droop* (K_p y K_q) se han seleccionado basados en criterios de estabilidad de pequeña señal explicados en [157].

Tabla 7.1. Parámetros de la Micro-red.

Parámetro	Símbolo	Valor
Etapa de Potencia		
<i>Tensión Nominal</i>	E^*	120* $\sqrt{2}$ V
<i>Frecuencia Nominal</i>	f^*	50 Hz
<i>Inductores del Inversor</i>	$L1, L2$	1.8 mH
<i>Capacitor de filtros</i>	$C1$	27 μ f
<i>Cargas Resistivas Trifásicas</i>	$LOAD1$	310 Ω
	$LOAD2$	1000 Ω
	$LOAD3$	456 Ω
Arreglo de Baterías		
<i>Tensión Nominal</i>	V_{bat}	348 V
<i>Tensión de Regulación</i>	V_r	432 V
<i>Tensión Mínima de Desconexión</i>	$LVD1$	388 V
<i>Tensión Final de Descarga</i>	$LVD2$	319V
<i>Capacitancia de la Batería</i>	C_{bat}	0.016 Ah
<i>Tiempo de Ecuilización</i>	Δt	5 seg
Flujo de Control de Potencia		
<i>Coficiente Droop</i>	K_p	1.25*10 ⁻⁵ (rad)/(s)/(W)
<i>Coficiente Droop</i>	K_q	5*10 ⁻⁴ V/(VAr)
<i>Referencia de Potencia Reactiva</i>	Q^*	0 VAr

7.4.2 Resultados experimentales

Todas las figuras que presentan los resultados obtenidos de manera experimental, han sido tomadas directamente del panel de control, que se presentó en la Figura 7.18. La Figura 7.19 presenta los resultados experimentales de las unidades ESSs.

Inicialmente diferentes valores iniciales de los SoCs se han considerado para cada ESS siendo $SoC_{bat1}=65\%$ y $SoC_{bat2}=75\%$.

Primero se puede observar el estatus de la señal, que indica la táctica en la que está operando la micro-red (Balance de potencia, recorte de potencia y desconexión de cargas corresponden respectivamente a 1, 2 y 3). Segundo, se puede observar el estatus de la señal que indica el rol asignado a cada ESS (siendo $grid-forming=1$, $grid-following=0$). Tercero, se puede observar los valores de los SoC, el valor del error definido como ($error=SoC_{bat2}-SoC_{bat1}$), la tensión de cada arreglo de baterías y la potencia compartida entre los ESSs distribuidos.

Para un mejor análisis la Figura 7.19 es dividida en 5 etapas (S1 a S5) como se explica a continuación:

- S1(t_0-t_1): Las RESs generan más energía que la que consume la micro-red, por consiguiente los ESSs están siendo cargados, la táctica que ejecuta la micro-red es balance de potencia ($Tactic=1$). Mientras tanto los comportamientos cooperativos entre los agentes (algoritmo de ecualización) están siendo aplicados ecualizando los SoCs. Como se puede apreciar la potencia de cada ESS es ajustada mientras las baterías se cargan con el propósito de reducir el valor del error a cero.
- S2(t_1-t_2): En el momento t_1 los dos arreglos de baterías alcanzan la tensión de regulación V_r . Por consecuencia las unidades RESs asumen la regulación del bus común al haber cambiado la táctica a recorte de potencia. ($Tactic=2$). Los ESSs cambian su rol a $grid-following$ ($Role(ESS1)=0$ y $Role(ESS2)=0$).
- S3(t_2-t_3): En el momento t_2 no hay suficiente energía por parte de las RESs para cubrir la demanda energética de la micro-red. Como consecuencia de esto, los ESSs asumirán nuevamente los roles $grid-forming$, descargándose con el propósito de mantener el balance de potencia, retornando la micro-red a la táctica balance de potencia.
- S4(t_3-t_6): En el momento t_3 la tensión de las unidades ESSs cae a un valor menor a $LVD1$, cambiando la micro-red a táctica ajuste de carga, donde son desconectadas las cargas $LOAD1$ y $LOAD2$. En el momento t_4 las unidades ESSs empiezan su proceso de carga y gracias a esto en el momento t_5 la carga $LOAD2$ es conectada nuevamente ($SoC_{bat1} \& SoC_{bat2} \geq 40\%$). En el lapso entre t_5 y t_6 las unidades ESSs siguen su proceso de carga.

- S5(t6-t7): En el momento t6 se cumple ($SoC_{bat1} \& SoC_{bat2} \geq 60\%$), la carga *LOAD1* es conectada y la micro-red regresa a la táctica balance de potencia.

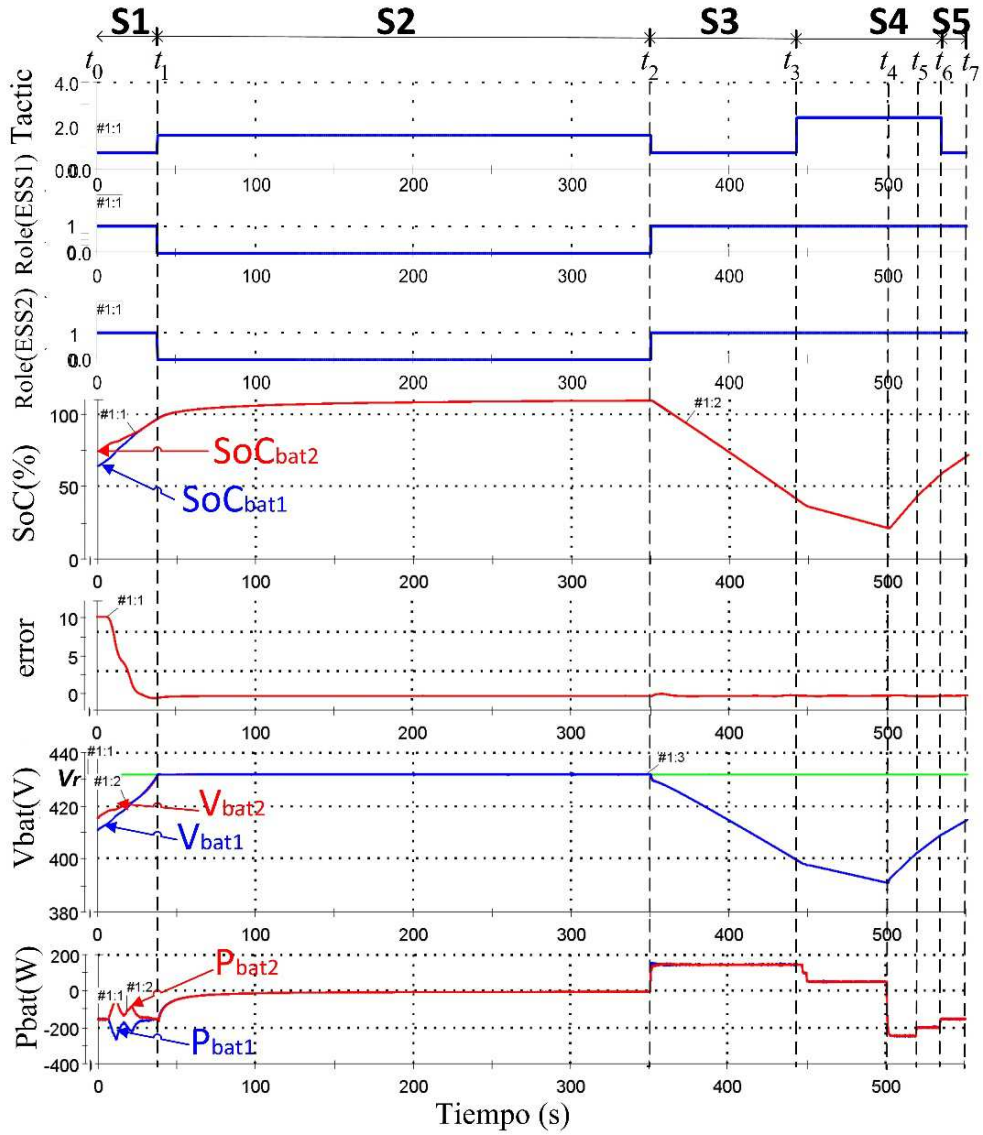


Figura 7.19. Resultados experimentales para las unidades ESSs.

La Figura 7.20 muestra el perfil de la frecuencia y la tensión del bus común durante la operación de la micro-red. En el momento t_1 se pueden apreciar los transitorios producidos por los cambios del modo de control y la regulación de los controladores secundarios, con el propósito de mantener la tensión en sus valores de referencia. Es de recordar que el diseño de los controladores secundarios no es objetivo del diseño de la estrategia propuesta en este capítulo. Si bien no se consideran cambios en la comunicación, las dinámicas de cada uno de los agentes distribuidos cambian cuando se realizan los cambios en los modos de control ya que el objetivo de control y el control como tal cambia. Los comportamientos transitorios corresponden a la respuesta del sistema para responder a las nuevas referencias del sistema ante diferentes lazos de control que definen nuevas dinámicas.

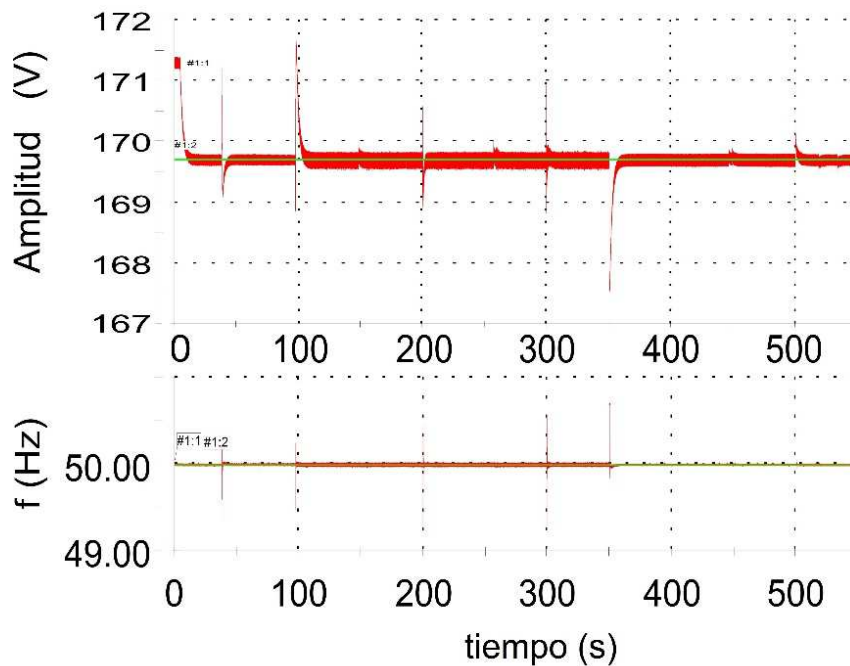


Figura 7.20. Regulación de la tensión y la frecuencia del bus común, del control secundario.

En la Figura 7.21 se presentan los resultados experimentales obtenidos para las unidades RESs. Primero se puede observar el estatus de la señal, que indica la táctica en la que está operando la micro-red (Balance de potencia, recorte de potencia y desconexión de cargas corresponden respectivamente a 1, 2 y 3). Segundo, se puede observar el estatus de la señal que indica el rol asignado a la unidad RES1 (siendo $grid-forming=1$, $grid-following=0$). Tercero, se puede observar el estatus

de la señal ($Ref(P_{RES1})$) que indica la referencia de potencia que debe seguir la RES1, de acuerdo con la ecuación 7.7, y que corresponde con el comportamiento de la unidad RES, de acuerdo con la Figuras 7.10 y 7.14. Cuarto, se puede observar la máxima referencia de potencia (P_{MPPT}). Quinto, se indica la potencia generada P_{RES1} de la unidad RES1. Posteriormente, en la misma Figura se pueden observar los diferentes estatus de señales ya descritos, para la unidad RES2.

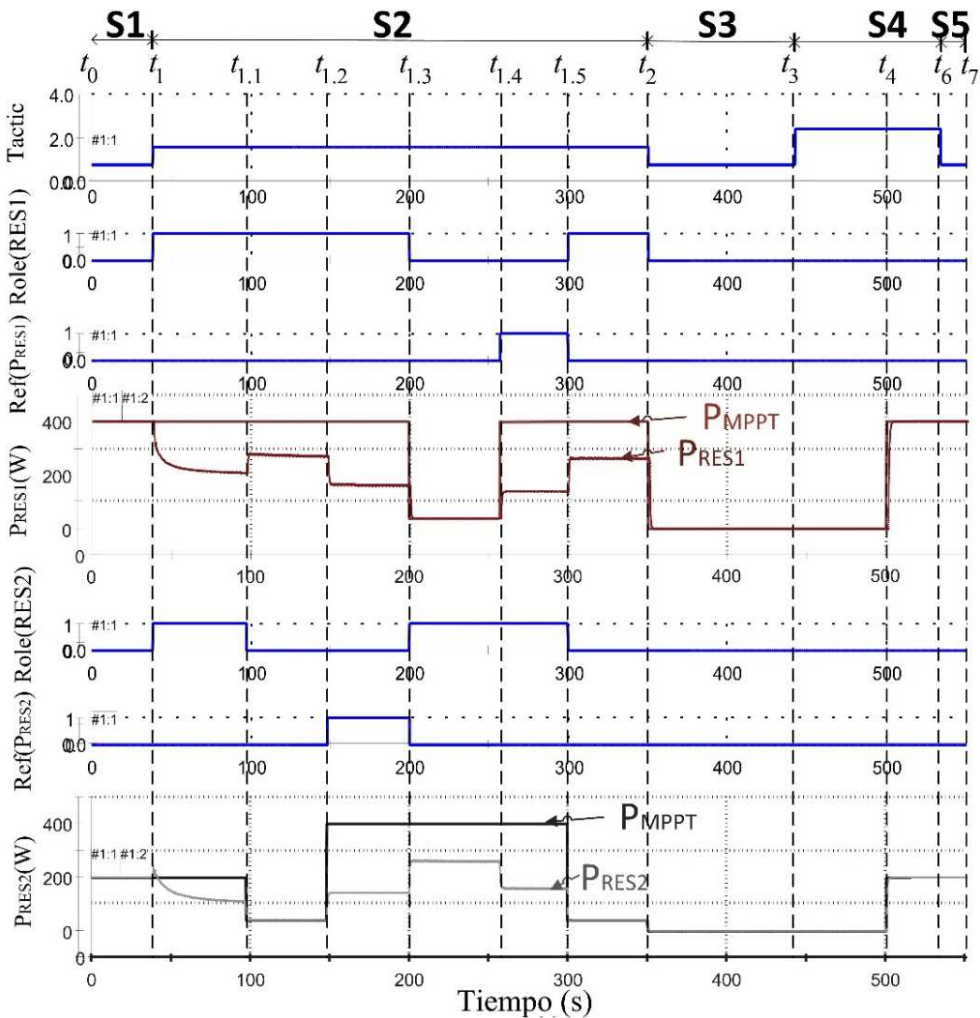


Figura 7.21. Resultados experimentales de las unidades RESs.

Igualmente la Figura 7.21 ha sido dividida en 5 etapas (S1 a S5), que corresponden a los modos de operación de la micro-red durante diferentes tácticas:

- S1(t0-t1): Las RESs generan más energía que la que consume la micro-red, por consiguiente los ESSs están siendo cargados, se ejecuta la táctica balance de potencia ($Tactic=1$). Las RESs siguen las referencias definidas por el algoritmo MPPT ($P_{MPPT}(RES1)=400W$, $P_{MPPT}(RES2)=200W$).
- S2(t1-t2): En el momento t1 los dos arreglos de baterías alcanzan la tensión de regulación V_r . Por consecuencia las unidades RESs asumen la regulación del bus común al haber cambiado la táctica a recorte de potencia. ($Tactic=2$). Inicialmente de t1 a t1.1 las dos unidades están trabajando con el rol *grid-forming*, por consiguiente la potencia es compartida proporcionalmente a sus máximas referencias de potencia y como se puede observar, la unidad RES1 suministra mayor potencia que la unidad RES2. De t1.1 a t1.2 la máxima potencia inyectada por la unidad RES2 se reduce ($P_{MPPT}(RES2)=40W$). Por esta razón RES2 cambia al rol *grid-following*, continuando la unidad RES1 con el rol *grid-forming*. En el momento t1.2 la máxima potencia suministrada por la RES2 se incrementa pero la unidad no cambia su rol. No obstante sí se observa un cambio en el comportamiento de la unidad RES2 ($Ref(P_{RES2})=1$), y la referencia de potencia P^* se define acorde con la ecuación 7.9. De los momentos t1.3 a t1.4 La máxima potencia de la unidad RES1 se reduce ($P_{MPPT}(RES1)=40W$), haciendo que la unidad Res1 asuma el rol *grid-following* y la unidad RES2 asuma el rol *grid-forming*. Ya que la unidad RES2 posee la suficiente energía para asegurar el balance de potencia del sistema. La referencia de potencia para la unidad RES1 es suministrada por el algoritmo MPPT. En el momento t1.4 la máxima potencia suministrada por la RES1 se incrementa a ($P_{MPPT}(RES1)=400W$). Como consecuencia el comportamiento de la unidad RES1 cambia ($Ref(P_{RES1})=1$), siendo la referencia de potencia P^* calculada de acuerdo con la ecuación 7.9. Finalmente de t1.5 a t2 la máxima potencia de la unidad RES2 se reduce a ($P_{MPPT}(RES2)=40W$). RES1 reasume el rol *grid-forming* mientras que RES2 asume el rol *grid-following*, suministrando su máxima potencia disponible.
- S3(t2-t3): En el momento t2 las dos unidades RES suministran potencia cero, y la táctica se cambia a recorte de potencia ($tactic=2$). Los ESSs asumirán nuevamente los roles *grid-forming*, descargándose con el propósito de mantener el balance de potencia, retornando la micro-red a la táctica balance de potencia.

- S4(t3-t6): En el momento t3 la tensión de las unidades ESSs cae a un valor menor a LVD1, cambiando la micro-red a táctica ajuste de carga ($tactic=3$), donde son desconectadas las cargas $LOAD1$ y $LOAD2$. En el momento t4 las RES incrementan su máxima potencia disponible ($P_{MPPT}(RES1)=400W$) y ($P_{MPPT}(RES2)=200W$), empezando los ESSs a recargarse.
- S5(t6-t7): En el momento t6 la táctica cambia a balance de potencia ($tactic=1$) y los agentes RESs operan en modo *grid-following* siguiendo las potencias de referencia suministradas por los algoritmos MPPT.

Finalmente la Figura 7.22 presenta el perfil de la carga durante la operación de la micro-red aislada.

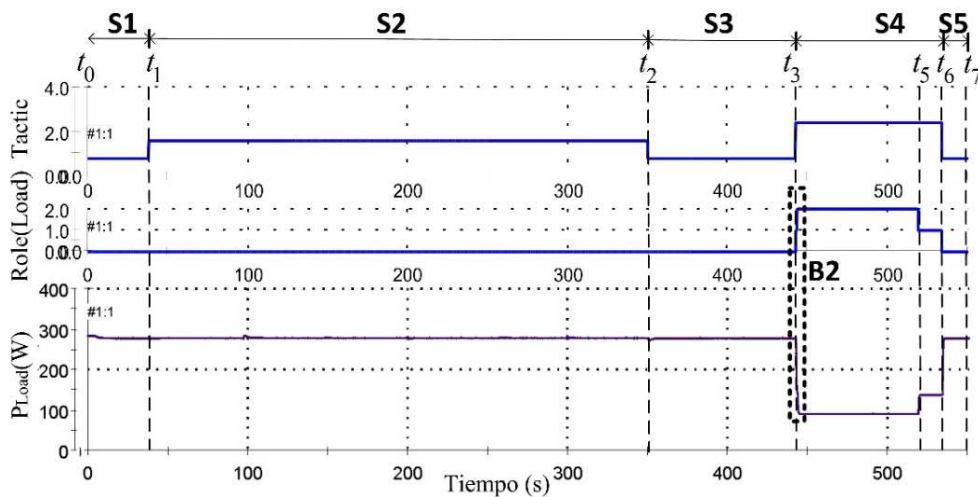


Figura 7.22. Resultados experimentales del agente carga.

Primero se presenta la señal de estatus de la táctica de la micro-red. Segundo se presenta la señal de estatus del rol asumido por la carga, siendo ($Role(load)=0$) cuando las cargas $LOAD1$, $LOAD2$ y $LOAD3$ están conectadas, ($Role(load)=1$) cuando $LOAD2$ y $LOAD3$ están conectadas, y ($Role(load)=2$) cuando la carga crítica $LOAD3$ está conectada. Durante S1, S2 y S3 el agente carga, mantiene el rol constante (carga completa). En S4 la carga es ajustada de acuerdo con los valores umbrales definidos previamente de las unidades ESSs. Para este caso, las cargas $LOAD1$ y $LOAD2$ son desconectadas, como se puede observar en el bloque B2 en la Figura 7.22, el cual es ampliado en la Figura 7.23. Es posible observar como el consumo de potencia de la carga es ajustado. Finalmente en el momento t5 se tiene

($\text{SoC}_{\text{bat1}} \ \& \ \text{SoC}_{\text{bat2}} \geq 40\%$), por consiguiente la carga $LOAD2$ es conectada. En el momento t_6 ($\text{SoC}_{\text{bat1}} \ \& \ \text{SoC}_{\text{bat2}} \geq 60\%$) la carga $LOAD1$ es conectada y la micro-red pasa a la táctica balance de potencia.

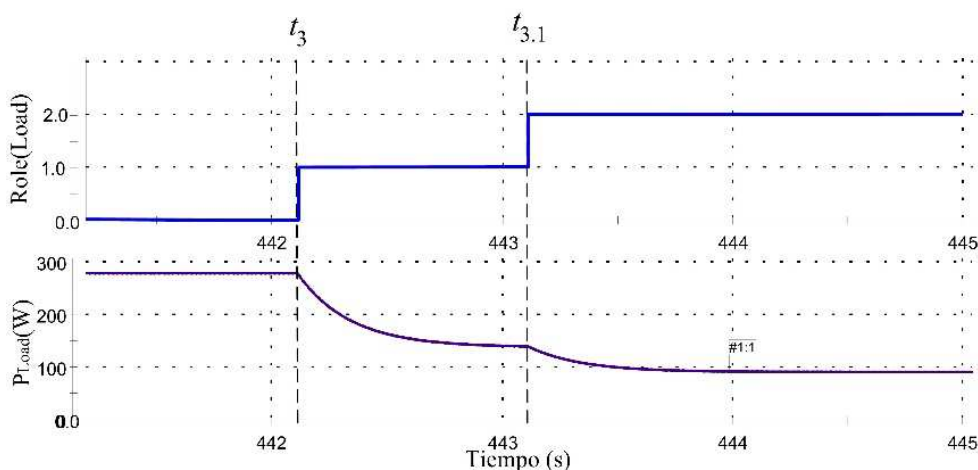


Figura 7.23. Bloque B2 de la Figura 7.22.

7.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se propone una nueva arquitectura para en una estrategia jerárquica de fútbol de robots basada en Máquinas de Estado para la selección de tácticas, asignación de roles y selección de comportamientos, adaptada para el control del modo de operación de una micro-red eléctrica AC aislada. La estrategia presentada propone una arquitectura multi-agente para coordinar el modo de operación basado en agentes hardware (DERs) quienes ejecutan un rol (*grid-forming*, *grid-following*) dependiendo de una táctica previamente seleccionada (balance de potencia, recorte de potencia, desconexión de cargas).

La estrategia centralizada propuesta presenta una mayor flexibilidad en la operación de los agentes distribuidos, permitiendo entre otras cosas coordinación de comportamientos entre los mismos. La arquitectura centralizada propuesta permite una fiable coordinación y transición entre los modos de operación de las fuentes de energía distribuidas. Adicionalmente funciones adicionales para la regulación de la tensión y la frecuencia del bus común han sido incluidas sin que esto afecte la es-

trategia de coordinación de las DERs. La aproximación propuesta abre una nueva perspectiva para el uso de otras arquitecturas distribuidas o centralizadas aplicadas en coordinación de robots para operaciones coordinadas en micro-redes eléctricas, extensible a redes eléctricas inteligentes y otro tipo de sistemas de redes de energía.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJOS FUTUROS

8.1 Conclusiones

En la presente tesis doctoral, se han propuesto arquitecturas para la coordinación de sistemas multi-agente con percepción global y control centralizado, tomando el contexto del fútbol de robots, y validándola en otros entornos que pueden ser modelados como sistemas multi-agente y poseen una necesidad de coordinación de equipo, como fue el caso del control del modo de operación en una micro-red eléctrica aislada. Se observó que los sistemas multi-agente con control centralizado siguen siendo vigentes en el contexto actual, ya que poseen importantes ventajas frente a los distribuidos como la posibilidad de obtener una percepción global del entorno, mayor procesamiento o facilidades en los procesos de deliberación, por lo cual la investigación en este tipo de arquitecturas sigue siendo completamente vigente durante las próximas décadas. Las arquitecturas propuestas son principalmente jerárquicas, están basadas en Máquinas de Estado Finito para la selección de comportamientos y según sea el caso, tácticas y roles.

Se ha realizado una revisión del estado del arte enfocada principalmente en los trabajos de arquitecturas para la coordinación de equipo en el fútbol de robots tanto en ligas de percepción global y control centralizado, como también en el caso de ligas completamente distribuidas (y con percepción limitada). Se ha observado que gran parte de las investigaciones recientes se centran en problemas de aprendizaje

de máquina, utilizando el contexto del fútbol de robots para su validación, que si bien es un problema válido y por si solo presenta un tema para tesis doctoral, se sale de los objetivos inicialmente planteados, siendo las arquitecturas propuestas a lo largo de esta tesis adaptables a distintos sistemas de aprendizaje reportados en la literatura. Algunas arquitecturas presentan alta complejidad en sus modelos dificultando el diseño de los sistemas de toma de decisiones, para la adaptación de estos modelos a otras ligas u otros entornos multi-agente.

Otros trabajos se centraba únicamente en el diseño de roles particulares como es el caso del portero, o de comportamientos puntuales, como la realización de pases entre jugadores. Tras este análisis, se observó la necesidad de diseñar arquitecturas para estrategias que permitan coordinación de equipo, que permitan de manera intuitiva la selección de las variables como por ejemplo la táctica, asignación de roles o selección de comportamientos, que sea fácilmente adaptables a otro tipo de sistemas o a cambios de reglas sin que esto requiera complejidad en su programación o implementación. También vale la pena resaltar que no es frecuente la aplicación de arquitecturas de coordinación del fútbol de robots en otra clase de sistemas, permitiendo concluir que estos diseños son altamente especializados a este tipo de entorno, dificultando su extrapolación a necesidades reales de la industria y con esto corriendo el riesgo de perder la oportunidad de aplicar estas investigaciones a un mercado más amplio.

Al diseñar una estrategia de equipo basada en tácticas, asignación dinámica de roles y selección de comportamientos mediante Máquinas Jerárquicas de Estado Finito, se encontró que la respuesta global del equipo ha sido adecuada, ganándole los juegos ampliamente frente a estrategias más básicas, seleccionando todas las tácticas diseñadas, presentando los jugadores asignación de todos los roles posibles en proporciones similares, dependiendo de las condiciones del juego. Se observaron distintos comportamientos colaborativos como la realización de pases entre jugadores, o capturas de balón; así como una adecuada respuesta de los jugadores en las transiciones no solo de las tácticas, sino ante cambio de roles o comportamientos, ya que los jugadores presentaban comportamientos fluidos sin cambios abruptos como abandonar la posesión del balón sin realizar un disparo o pase, siempre acorde a las condiciones del juego. Es de señalar que las Máquinas de Estado permiten facilidad y flexibilidad en el diseño de las estrategias, sin alta complejidad en su programación y un bajo costo computacional, permitiendo si fuera necesario, un diseño mucho más compacto y simplificado. Esta estrategia mostró ser adaptable a otras ligas de fútbol de robots con más presencias de jugadores y

nuevas reglas, así como otro entorno multi-agente, como fue el caso de la micro-red eléctrica.

Para el diseño de arquitecturas jerárquicas, se encontró que *Principle Solution* ofrece una alternativa para el diseño de estrategias de fútbol de robots centralizada, facilitando un diseño intuitivo acorde a las reglas y la selección de comportamientos que se deseen, incluyendo comportamientos colaborativos. *Principle Solution* ofrece un modelo holístico que incluye diferentes capas tanto de software como de hardware que deben ser tenidas en cuenta para el diseño de la arquitectura de coordinación de equipo, facilitando con esto el diseño de las diferentes reglas para la asignación de roles y selección de comportamientos dependiendo de las condiciones del entorno. En los casos en que es requerido cambios en el código, las modificaciones necesarias pueden ser reorganizadas a través de los diagramas, facilitando esto la identificación de las líneas de código que deben ser adaptadas. Estos cambios incluyen la adaptación o adición de nuevos roles o comportamientos, incluyendo comportamientos colaborativos. En el momento de partir de la arquitectura jerárquica basada en tácticas, roles y comportamientos, *Principle Solution* permitió una aproximación sistemática para el diseño de estrategias de coordinación en ligas con percepción global y control centralizado, permitiendo identificar las diferentes estructuras, funciones, influencias y módulos que permiten llegar a un diseño de estrategia detallado pero muy intuitivo. Siendo esto compatible con técnicas de aprendizaje de máquina que si bien no se trataron en la presente tesis, pueden servir para afinar el desempeño del sistema, en trabajos futuros.

Una vía para reducir tanto en líneas de código como en complejidad la arquitectura propuesta, pero manteniendo las ventajas hasta ahora descritas, es mediante el diseño de una arquitectura basada en roles, donde se encontró que eliminando la capa correspondiente a la táctica, una vez es asignado el rol al jugador, este ejecuta funciones que son llamadas dependiendo el rol que le haya sido asignado y mediante Máquinas de Estado selecciona los comportamientos requeridos, dependiendo de las condiciones de juego. Esta arquitectura implica una reducción en las líneas de código así como en el diseño de la arquitectura de equipo, manteniendo todas las ventajas anteriormente descritas. También se observó que el uso de funciones de sincronización en Máquinas de Estado para la selección de comportamientos, facilita el desempeño de los agentes en el momento de la realización de comportamientos colaborativos. Sin que esto implique un aumento significativo de las líneas de código, o de la complejidad de la arquitectura. Estas dos aproximaciones permiten observar que partiendo de la arquitectura jerárquica, se pueden obtener diseños más

compactos con los que se obtienen resultados muy similares, o bien se pueden realizar adaptaciones en su diseño con el fin de obtener mejores resultados

Finalmente se encontró que los modelos jerárquicos basados en tácticas, roles y comportamientos, seleccionados mediante Máquinas de Estado, pueden ser fácilmente adaptables a otro tipo de entornos de importante actualidad como son las micro-redes eléctricas. Sistemas multi-agente han tenido una amplia aplicación en sistemas eléctricos, en especial en aplicaciones de mercados energéticos o en el caso de aplicaciones de control, estos agentes se centran a nivel de software. Al existir en la micro-red el problema del control del modo de regulación del bus común, con un adecuado manejo de la carga de la batería para evitar sobrecargas o descargas profundas que afecten el tiempo de vida de las mismas, realizar un modelo de la micro-red como un sistema multi-agente basado en hardware e inspirado en una arquitectura centralizada de fútbol de robots, permitió el diseño de la estrategia de control basado en tácticas, roles y comportamientos de una manera intuitiva, fácilmente adaptable a más unidades y permitiendo una implementación sencilla de programar, sin grandes requerimientos a nivel de código y con la posibilidad de realizar comportamientos colaborativos entre los agentes, como fue el caso de los procesos de equalización para la carga y descarga de las baterías. Con esta aplicación se muestra la posibilidad de extrapolar trabajos a nivel de arquitecturas de coordinación de equipo en fútbol de robots a otra clase de sistemas, para ofrecer soluciones a problemas reales de la industria u otros campos del conocimiento sin que esto implique una alta complejidad en su diseño o su implementación.

8.2 Resultados en publicaciones

Como resultado se han publicado 3 artículos en revistas indexadas, siendo 1 del primer cuartil y 2 del 4 cuartil. Se han publicado 3 artículos en congresos con aceptación por revisión. Actualmente hay un artículo más en revisión para una revista indexada.

Publicaciones en revistas:

- J. G. Guarnizo, M. Mellado, C-Y. Low, F. Blanes. Architecting Centralized Coordination of Soccer Robots Based on Principle Solution. *Advanced Robotics*, vol. 29, nº 15, pp. 989-1004, 2015. DOI:10.1080/01691864.2015.1017534.
 - *Robotics Q4 (22/25)*.

-
- J. G. Guarnizo, M. Mellado. Arquitectura Basada en Roles Aplicada en Equipos de Fútbol de Robots con Control Centralizado. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 13, nº 3, pp. 370-380, 2016.
DOI: 10.1016/j.riai.2016.05.005.
 - *Automation & Control Systems* Q4 (49/59).
 - *Robotics* Q4 (23/25).
 - N. L. Diaz, J. G. Guarnizo, M. Mellado, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero. A Robot Soccer Coordination Inspired Control Architecture Applied to Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016.
DOI: 10.1109/TPEL.2016.2572262.
 - *Engineering, Electrical & Electronic Q1* (9/255).

Publicaciones en conferencias:

- J. G. Guarnizo, J. F. Blanes, M. Mellado, J. Simo, M. Muñoz. A Survey of Team Strategies in Robot Soccer, Focused on Standard Platform League. *XIII Workshop on Physical Agents*, Santiago de Compostela, 2012.
- J. G. Guarnizo, M. Mellado, C-Y. Low, N. Aziz. Strategy Model for Multi-Robot Coordination in Robotic Soccer. *International Conference on Advanced in Mechanical Engineering*, Malacca, Malasia, 2013.
- J. G. Guarnizo, M. Mellado. Sincronización de Máquinas de Estado Para Comportamientos Colaborativos en Fútbol de Robots. *XXXVI Jornadas de Automática*, Bilbao, 2015.

Posters:

- J. G. Guarnizo, M. Mellado. Arquitecturas Para Estrategias de Coordinación Aplicadas al Fútbol de Robots. *I Encuentro de Estudiantes de Doctorado*, Universitat Politècnica de València, 2014.
- J. G. Guarnizo, M. Mellado. Estrategias de fútbol de robots para ligas centralizadas basadas en roles. *II Encuentro de Estudiantes de Doctorado*, Universitat Politècnica de València, 2015.

Participación en otros eventos:

- Participación en la *German Open RoboCup 2012*, Magdeburg Alemania. Equipo Los Hidalgos de la *Standard Platform League*, equipo Perteneciente al Instituto AI2, Universitat Politècnica de València.

Artículos en evaluación. Con los resultados obtenidos en la presente tesis doctoral, actualmente se encuentran en evaluación el siguiente artículo en revistas:

- J. G. Guarnizo, M. Mellado. Robot Soccer Strategy Based on Hierarchical State Machine to Centralized Architectures. *Latin America Transactions, IEEE*. 2016. En revisión de correcciones.
 - *Computer Science, Information Systems* Q4 (132/143).
 - *Engineering, Electrical & Electronic* Q4 (218/255).

8.3 Trabajos futuros

A nivel de fútbol de robots, una vez estas arquitecturas están implementadas, una forma de incrementar su efectividad es mediante algoritmos de aprendizaje en los sistemas de toma de decisiones para la asignación de roles, esto con el fin de mejorar este proceso de asignación, así como de utilizar algoritmos de aprendizaje en la ejecución de comportamientos, con el propósito de mejorar acciones como la captura del balón, disparar el balón o la realización de pases. Otra posible línea de trabajo futuro, es usar algoritmos de predicción tanto en la ejecución de comportamientos, con el fin de tratar de predecir el lugar más adecuado para capturar el balón cuando no se tiene posesión del mismo, o predecir el momento más oportuno para la transición de estados que permita la selección de un comportamiento nuevo, también se puede buscar predecir los comportamientos de los oponentes. Así mismo, estas estrategias se pueden mejorar mediante algoritmos de control de trayectoria de los robots móviles, esto traería sin duda alguna un mejor rendimiento en los comportamientos de los robots, y con esto, en el resultado global en el partido.

A nivel de arquitecturas, al ser el fútbol de robots un sistema multi-agente con presencia de oponentes, se plantea el uso de algoritmos tipo depredador-presa con fines de coordinación de equipo. También se propone el uso de las funciones de sincronización de Máquinas de Estado Finito para el diseño de estrategias de equipo con arquitecturas distribuidas basadas en tácticas, roles y comportamientos, que permitan la construcción de arquitecturas de un modo más intuitivo, permitiendo asignación dinámica de roles, deliberación entre jugadores minimizando conflictos, y facilitando el diseño de comportamientos colaborativos.

Desde el punto de vista de las redes eléctricas, una posible exploración del uso de la arquitectura basada en roles permitiría una reducción en los tiempos de cómputo

del sistema de toma de decisiones, manteniendo el adecuado control del modo de operación de la micro-red. Así mismo, se puede explorar diferentes aplicaciones basadas en sistemas multi-agente con percepción global y control centralizado donde una arquitectura jerárquica basada en tácticas, comportamientos y selección dinámica de roles pueda ser utilizada, como por ejemplo en otras aplicaciones de la robótica como puede ser la navegación de robots, aplicaciones de robótica relacionadas con el arte, robótica industrial, u otro tipo de aplicaciones como puede ser en domótica, seguridad informática, aplicaciones web, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Wooldridge, *An Introduction to MultiAgent Systems*, John Wiley and Sons, 1996, p. 15.
- [2] A. Gautam y S. Mohan, "A review of research in multi-robot systems," de *Industrial and Information Systems (ICIIS), 2012 7th IEEE International Conference on*, Chennai, India, 6-9 Aug. 2012.
- [3] 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, nº 5, October 2004.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] A. Davis, "Urban search and rescue robots: from tragedy to technology," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 17, nº 2, pp. 81-83, 2002.
- [7] 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.
- [8] I. Noda, S. Suzuki, H. Matsubara, M. Asada y H. Kitano, "Overview of RoboCup-97," de *RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I*, Nagoya, 1997.
- [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, nº 3, pp. 30-36, September 1998.
- [11] 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.
- [12] J.-H. Kim y P. Vadakkepat, "Multi-agent Systems: A survey from the Robot-Soccer Perspective," *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 6, nº 1, pp. 3-17, 2000.
- [13] 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.
- [14] 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, nº 5, pp. 1291-1300, 2012.
- [15] G. Klančar, B. Zupančič y R. Karba, "Modelling and simulation of a group of mobile robots," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 15, nº 6, pp. 647-658, July 2007.
- [16] 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, nº 1, pp. 69-82, 2011.
- [17] 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.
- [18] A. Ahmad y P. Lima, "Multi-robot cooperative spherical-object tracking in 3D space based on particle filters," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, nº 10, pp. 1084-1093, 2013.
- [19] 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.
- [20] L. Mota, L. P. Reis y N. Lau, “Multi-robot coordination using Setplays in the middle-size and simulation leagues,” *Mechatronics*, vol. 21, n° 2, pp. 434-444, March 2011.
- [21] 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.
- [22] F. Stulp, H. Utz, M. Isik y G. Mayer, “Implicit Coordination with Shared Belief: A Heterogeneous Robot Soccer Team Case Study,” *Advanced Robotics*, vol. 24, n° 7, p. 1017–1036, 2010.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] F. Almeida, N. Lau y L. P. Reis, “A Survey on Coordination Methodologies for Simulated Robotic Soccer teams,” de *2010 Workshop on Multi-Agent Systems and Simulation MASS. In The Multi-Agent Logics, Languages, and Organisations Federated Workshops (MALLOW 2010)*, Lyon, 2010.
- [26] J. Fink, A. Ribeiro y V. Kumar, “Robust Control for Mobility and Wireless Communication in Cyber–Physical Systems With Application to Robot Teams,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, n° 1, pp. 164-178, January 2012.
- [27] Z. A. Baig, “Multi-Agent Systems for Protecting Critical Infrastructures: A Survey.,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 35, n° 3, p. 1151–1161, May 2012.
- [28] R. Zamora y A. K. Srivastava, “Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n° 7, pp. 2009-2018, September 2010.

- [29] J.-H. Kim y P. Vadakkepat, "Multi-Agent Systems: A Survey from the Robot-Soccer Perspective," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 6, n° 1, pp. 3-17, 2000.
- [30] J. Tam Málaga, V. Giovanni y O. R. Ricardo, "Tipos, métodos y estrategias de la investigación científica," *Pensamiento y acción*, vol. 5, pp. 145-154, 2008.
- [31] F. J. Gil Rubio, Métodos acotados de aplicación de regla de evolución para la implementación de sistemas p de transición. Tesis Doctoral., Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2013, pp. 10-11.
- [32] J.-H. Kim, H.-S. Shim, H.-S. Kim, M.-J. Jung y J.-O. Kim, "A cooperative multi-agent system and its real time application to robot soccer," de *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, Albuquerque, NM, 1997.
- [33] P. Stone y M. Veloso, "Task decomposition, dynamic role assignment, and low-bandwidth communication for real-time strategic teamwork," *Journal of Artificial Intelligence*, vol. 110, pp. 241-273, 1999.
- [34] C. Vermaak, P. Rathaba, W. d. Plessis, I. Craig y P. Saayman, "Development of a gaming strategy for soccer robots using optimal methods," de *Africon Conference in Africa, 2002. IEEE AFRICON. 6th*, 2002.
- [35] J. Gómez, W. Sotomonte y L. F. Ortega, "Comparing Multi-Agent Sstrategies in a Simulated Robot Soccer Environment: The UNCOL Team," de *Inproceedings Fira Congress Germany 2006*, 2006.
- [36] J. Wu, E. Ochodkova, J. Martinovic, V. Snásel y A. Abraham, "Analysis of loop strategies in robot soccer game," de *Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), 2011 11th International Conference on*, Cordoba, 2011.
- [37] J. Lee, D. Ji, W. Lee, G. Kang y M. G. Joo, "A Tactics for Robot Soccer with Fuzzy Logic Mediator," de *International Conference, CIS 2005, Xi'an, China, December 15-19, 2005, Proceedings Part I*, Xlan, 2005.
- [38] P. Cardoso, L. Molina y E. O. Freire, "A Methodology to Designing Strategies for Robot Soccer Based on Discrete Event Systems Formalism," de *Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium (SBR-*

-
- LARS), 2012 Brazilian, Fortaleza, 2012.
- [39] M. Yang y Y. Jia, "Action Utility Prediction and Role Task Allocation in robot soccer system," de *Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 2012 12th International Conference on*, Guangzhou, 2012.
- [40] Y. Lou, B. Chen y H. Shi, "Decision making model based on state assessment and hierarchical FSM in robot soccer," de *Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012), International Conference on*, Xiamen, 2012.
- [41] J. Wu, V. Snášel, E. Ochodková, J. Martinovič, V. Svatoň y A. Abraham, "Analysis of strategy in robot soccer game," *Neurocomputing*, vol. 109, pp. 66-75, June 2013.
- [42] V. Svatoň, J. Martinovič, K. Slaninová y T. Bureš, "Improving Strategy in Robot Soccer Game by Sequence Extraction," de *Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems 18th Annual Conference, KES-2014*, Gdynia, 2014.
- [43] V. Snášel, V. Svatoň, J. Martinovič y A. Abraham, "Optimization of Rules Selection for Robot Soccer Strategies," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 11, n° 13, pp. 1-10, 2014.
- [44] H. Shi, L. Xu, L. Zhang, W. Pan y G. Xu, "Research on self-adaptive decision-making mechanism for competition strategies in robot soccer," *Frontiers of Computer Science*, pp. 1-10, 2015.
- [45] K.-S. Hwang, S.-W. Tan y C.-C. Chen, "Cooperative strategy based on adaptive Q-learning for robot soccer systems," *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12, n° 4, pp. 569-576, August 2004.
- [46] Y. Duan, Q. Liu y X. Xu, "Application of reinforcement learning in robot soccer," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, pp. 936-950, October 2007.
- [47] K.-S. Hwang, Y.-J. Chen y C.-H. Lee, "Reinforcement Learning in Strategy Selection for a Coordinated Multirobot System," *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, vol. 37, n°

- 6, pp. 1151-1157, November 2007.
- [48] Q. Guo y B.-Y. Wu, "Study and Application of Reinforcement Learning in Cooperative Strategy of the Robot Soccer Based on BDI Model," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 6, n° 2, pp. 91-96, June 2009.
- [49] 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° 6, pp. 923-933, September 2010.
- [50] Y. Duan, B. X. Cui y X. H. Xu, "A multi-agent reinforcement learning approach to robot soccer," *Artificial Intelligence Review*, vol. 28, n° 3, pp. 193-211, October 2012.
- [51] K.-S. Hwang, W.-C. Jiang, H.-H. Yu y S.-Y. Lin, "Cooperative Reinforcement Learning Based on Zero-Sum Games," de *Mobile Robots - Control Architectures, Bio-Interfacing, Navigation, Multi Robot Motion Planning and Operator Training*, J. Będkowski, Ed., Intech, 2011, pp. 289-308.
- [52] B. Chen, C. Xiao y X. Song, "Intelligent Decision System Based on SOM-LVQ Neural Network for Soccer Robot," de *Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2012 4th International Conference on*, Nanchang, Jiangxi, 2012.
- [53] B. Chen, A. Zhang y L. Cao, "Autonomous intelligent decision-making system based on Bayesian SOM neural network for robot soccer," *Neurocomputing*, vol. 128, pp. 447-458, 2014.
- [54] S. C. Sari, Kuspriyanto y A. S. Prihatmanto, "Joint action optimization for robotic soccer multiagent using reinforcement learning method," de *System Engineering and Technology (ICSET), 2012 International Conference on*, Bandung, 2012.
- [55] G.-C. Luh, C.-Y. Wu y W.-W. Liu, "Artificial Immune System based Cooperative Strategies for Robot Soccer Competition," de *Strategic Technology, The 1st International Forum on*, Ulsan, 2006.

-
- [56] V. Hilaire, A. Koukam y S. Rodriguez, "An Adaptative Agent Architecture for Holonic Multi-Agent Systems," *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, vol. 3, n° 1, pp. 2-24, March 2008.
- [57] Y.-T. Wang y C.-H. Chen, "Design of an Action Select Mechanism for Soccer Robot Systems Using Artificial Immune Network," *Tamkang Journal of Science and Engineering*, vol. 11, n° 4, pp. 415-424, 2008.
- [58] K. Jolly, K. Ravindran, R. Vijayakumar y R. Sreerama Kumar, "Intelligent decision making in multi-agent robot soccer system through compounded artificial neural networks," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, n° 7, pp. 589-596, July 2007.
- [59] C.-J. Wu y T.-L. Lee, "A Fuzzy Mechanism for Action Selection of Soccer Robots," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 39, n° 1, pp. 57-70, January 2004.
- [60] S.-L. Wu, Y.-R. Liou, W.-H. Lin y M.-H. Wu, "A Multi-agent Algorithm for Robot Soccer Games in Fira Simulation League," de *FIRA RoboWorld Congress*, San Francisco, 2007.
- [61] 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.
- [62] J. Bruce, S. Zickler, M. Licitra y M. Veloso, "CMDragons: Dynamic passing and strategy on a champion robot soccer team," de *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, Pasadena, C.A, 2008.
- [63] G. Zuo, S. Zhang, G. Zhong y R. Sun, "Two-agent collaborative shooting method using BP neural network," de *Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS), 2010 IEEE International Conference on* , Xiamen, 2010.
- [64] 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.

- [65] R. A. Rabelo, H. T. Macedo, E. O. Freire y R. M. Oliveira, "Automatic Code Generation of SIMUROSOT Game Strategies: an Approach based on Finite State Machines," *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, vol. 38, n° 2, pp. 1-8, March 2013.
- [66] C. Candea, H. Hu, L. Iocchic, D. Nardi y M. Piaggio, "Coordination in multi-agent RoboCup teams," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 36, n° 2-3, pp. 67-86, August 2001.
- [67] R. Emery, K. Sikorski y T. Balch, "Protocols for collaboration, coordination and dynamic role assignment in a robot team," de *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, Washington, DC, 2002.
- [68] C. Wang, X. Chen, X. Zhao y S. Ju, "Design and Implementation of a General Decision-making Model in RoboCup Simulation," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 1, n° 3, pp. 207-212, 2004.
- [69] C. McMillen y M. Veloso, "Distributed, Play-Based Role Assignment for Robot Teams in Dynamic Environments," de *Distributed Autonomous Robotic Systems 7*, Springer, 2006, pp. 145-154.
- [70] D. Camacho, F. Fernández y M. A. Rodelgo, "Roboskeleton: An architecture for coordinating robot soccer agents," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 19, n° 2, pp. 179-177, 2006.
- [71] C. E. Agüero, V. Matellán, J. M. Cañas y V. M. Gómez, "SWITCH! Dynamic roles exchange among cooperative robots," de *Second International Workshop on Multi-Agent Robotic Systems (MARS 2006)*, Setúbal, 2006.
- [72] G. Kontes y M. G. Lagoudakis, "Coordinated Team Play in the Four-Legged RoboCup League," de *Tools with Artificial Intelligence, 2007. ICTAI 2007. 19th IEEE International Conference on*, Patras, 2007.
- [73] M. Arias Ruiz y J. Ramirez Uresti, "Team Agent Behavior Architecture in Robot Soccer," de *Robotic Symposium, 2008. LARS '08. IEEE Latin American*, Natal, Rio Grande do Norte, 2008.

-
- [74] J. Wang, T. Wang, X. Wang y X. Meng, "Multi-robot decision making based on coordination graphs," de *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on*, Changchun, 2009.
- [75] J. Testart, J. Ruiz del Solar, R. Schulz, P. Guerrero y R. Palma-Amestoy, "A Real-Time Hybrid Architecture for Biped Humanoids with Active Vision Mechanisms," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 63, n° 2, pp. 233-255, August 2011.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] C. Y. Low, N. Aziz, . M. Aldemir, M. Mellado, R. Dumitrescu y H. Anacker, "Principle Solution for Designing Collaborative Humanoid Soccer Robots," de *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS 2012)*, Sarawak, 2012.
- [79] C. Y. Low, N. Aziz, M. Aldemir, R. Dumitrescu, H. Anacker y M. Mellado, "Strategy planning for collaborative humanoid soccer robots based on principle solution," *Production Engineering*, vol. 7, n° 1, pp. 23-34, October 2012.
- [80] H. Costelha y P. Lima, "Robot task plan representation by Petri nets: modelling, identification, analysis and execution," *Autonomous Robots* , vol. 33, n° 4, pp. 337-360, November 2012.
- [81] C.-C. Wong, C.-T. Cheng y H.-M. Chan, "Design and Implementation of an Autonomous Robot Soccer System," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, n° 228, pp. 1-13, 2013.
- [82] Y. Hao, Z. Liang, J. Liu, J. Li y H. Zhao, "The Framework Design of Humanoid Robots in the RoboCup 3D Soccer Simulation Competition," de *Control and Automation (ICCA), 2013 10th IEEE International Conference*

- on, Hangzhou, 2013.
- [83] P. H. Abreu, D. Castro Silva, F. Almeida y J. Mendes-Moreira, “Improving a simulated soccer team's performance through a Memory-Based Collaborative Filtering approach,” *Applied Soft Computing*, vol. 23, pp. 180-193, October 2014.
- [84] 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° 4, pp. 670-681, July 2007.
- [85] R. Geetha Ramani, P. Viswanath y B. Arjun, “Ant Intelligence in Robotic Soccer,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 5, n° 1, pp. 49-58, 2008.
- [86] 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° 3, p. 6082–6090, April 2009.
- [87] M. Lauer, R. Hafner, S. Lange y M. Riedmiller, “Cognitive concepts in autonomous soccer playing robots,” *Cognitive Systems Research*, vol. 11, n° 3, pp. 287-309, September 2010.
- [88] S. Abeyruwan, A. Seekircher y U. Visser, “Dynamic Role Assignment using General Value Functions,” de *7th Workshop on Humanoid Soccer Robots, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Osaka, 2012.
- [89] S. Araghi, A. Khosravi, M. Johnstone y D. Creighton, “A novel modular Q-learning architecture to improve performance under incomplete learning in a grid soccer game,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, n° 9, p. 2164–2171, October 2013.
- [90] J. Y. Kuo, F.-C. Huang, S.-P. Ma y Y.-Y. Fanjiang, “Applying hybrid learning approach to RoboCup's strategy,” *Journal of Systems and Software*, vol. 87, n° 7, pp. 1933-1944, July 2013.
- [91] M. Z. Ali, A. Morghem, J. Albadarneh, R. Al-Gharaibeh, P. N. Suganthan y R. G. Reynolds, “Cultural Algorithms applied to the evolution of robotic soccer team tactics: A novel perspective,” de *Evolutionary Computation*

-
- (CEC), 2014 IEEE Congress on, Beijing, 2014.
- [92] R. G. Reynolds, “An Introduction to Cultural Algorithms,” de *Third Ann. Conf. on Evolutionary Programming*, San Diego, 1994.
- [93] X. Li, W. Chen, Z. Zhai y J. Wang, “The Application of Hybrid Distributed Reinforcement Learning Algorithm in RoboCup 2D Soccer Simulation System,” de *First International Conference, ICIRA 2008*, Wuhan, 2008.
- [94] 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, nº 9-10, p. 1014–1039, June 2009.
- [95] P. F. Palamar, V. A. Ziparo, L. Locchi, D. Nardi y P. Lima, “Teamwork Design Based on Petri Net Plans,” de *RoboCup 2008: Robot Soccer World Cup XII*, 2009.
- [96] B. Jozi, A. Fakharian y A. Karachi, “Hierarchical Behavior Structure for NAO Robot Utilizing Fuzzy Inference Systems,” de *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on*, Wuhan, 2010.
- [97] J. R. Ferreira Neri, M. R. Zатели, C. H. Farias dos Santos y J. A. Fabro, “A Proposal of QLearning to Control the Attack of a 2D Robot Soccer Simulation Team,” de *Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium (SBR-LARS), 2012 Brazilian*, Fortaleza, 2012.
- [98] A. Raza, U. Sharif y S. Haider, “On learning coordination among soccer agents,” de *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012 IEEE International Conference on*, Guangzhou, 2012.
- [99] S. Raza, S. Haider y M.-A. Williams, “Teaching coordinated strategies to soccer robots via imitation,” de *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012 IEEE International Conference on*, Guangzhou, 2012.
- [100] J. Yang, Y. Zhuang y C. Li, “Towards Behavior Control for Evolutionary Robot Based on RL with ENN,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, nº 157, pp. 1-16, 2013.
- [101] J. Cunha, R. Serra, N. Lau, L. S. Lopes y A. J. Neves, “Learning robotic soccer controllers with the Q-Batch update-rule,” de *Autonomous Robot*

- Systems and Competitions (ICARSC), 2014 IEEE International Conference on*, Espinho, 2014.
- [102] J. Cunha, R. Serra, N. Lau, L. S. Lopes y A. J. R. Neves, “Batch Reinforcement Learning for Robotic Soccer Using the Q-Batch Update-Rule,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 80, n° 3, pp. 385-399, December 2015.
- [103] H. Akiyama, S. Aramaki y T. Nakashima, “Online Cooperative Behavior Planning Using a Tree Search Method in the RoboCup Soccer Simulation,” de *Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS), 2012 4th International Conference on*, Bucharest, 2012.
- [104] J. Cravo, F. Almeida, P. . H. Abreu, L. P. Reis, N. Lau y L. Mota, “Strategy planner: Graphical definition of soccer set-plays,” *Data & Knowledge Engineering*, vol. 29 Part A, p. 110–131, November 2014.
- [105] O. Esquivel-Flores y H. Benítez-Pérez, “Reconfiguración Dinámica de Sistemas Distribuidos en Tiempo-Real Basada en Agentes,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 9, n° 3, pp. 300-313, 2012.
- [106] C. Bravo, J. Aguilar-Castro, A. Ríos, J. Aguilar-Martin y F. Rivas, “Arquitectura Basada en Inteligencia Artificial Distribuida para la Gerencia Integrada de Producción Industrial,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 8, n° 4, pp. 405-417, 2011.
- [107] A. Campbell y A. S. Wu, “Multi-agent role allocation: issues, approaches, and multiple perspectives,” *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, vol. 22, n° 2, pp. 317-355, March 2011.
- [108] P. Garcia, J. M. Balmaceda, S. Schiaffino y A. Amandi, “Automatic Detection of Team Roles in Computer Supported Collaborative Work,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, n° 4, pp. 1066-1074, June 2013.
- [109] M. Baldoni, G. Boella, N. Dorni, A. Mugnaini y R. Grenna, “Organizations and roles as primitives in the JADE framework.,” de *Workshop*, 2008.
- [110] E. A. Kendall, “Role modeling for agent system analysis, design, and

-
- implementation,” *Concurrency, IEEE*, vol. 8, n° 2, pp. 34-41, 2000.
- [111] M. El Barachi, S. Rabah, N. Kara, R. Dssouli y J. Paquet, “A multi-service multi-role integrated information model for dynamic resource discovery in virtual networks,” de *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE*, Shanghai, 2013.
- [112] L. Zhou, V. Varadharajan y M. Hitchens, “Trust Enhanced Cryptographic Role-Based Access Control for Secure Cloud Data Storage,” *Information Forensics and Security, IEEE Transactions on*, vol. 10, n° 11, pp. 2381-2395, November 2015.
- [113] W.-Y. Yu, V.-W. Soo y M.-S. Tsai, “Power distribution system service restoration bases on a committee-based intelligent agent architecture,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 42, pp. 92-102, May 2015.
- [114] L. Hernández, C. Baladrón, J. M. Aguiar, B. Carro, A. Sánchez-Esguevillas, J. Lloret, D. Chinarro, J. J. Gomez-Sanz y D. Cook, “A Multi-Agent System Architecture for Smart Grid Management and Forecasting of Energy Demand in Virtual Power Plants,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, n° 1, pp. 106-113, January 2013.
- [115] L. Bayindir, “A review of swarm robotics tasks,” *Neurocomputing*, vol. 172, pp. 292-321, January 2016.
- [116] H. Zhu, “A Role-Based Architecture for Intelligent Agent Systems,” de *Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications, 2006. DIS 2006. IEEE Workshop on*, Prague, 2006.
- [117] D. Wu, F. Tang, T. Dragicevic, J. C. Vasquez y J. M. Guerrero, “A Control Architecture to Coordinate Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems in Islanded Microgrids,” *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 6, n° 3, pp. 1156-1166, May 2015.
- [118] J. A. Peças Lopes, C. L. Moreira y A. G. Madureira, “Defining control strategies for MicroGrids islanded operation,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, n° 2, pp. 916-924, May 2006.

- [119] H. Mahmood, D. Michaelson y J. Jiang, “Strategies for Independent Deployment and Autonomous Control of PV and Battery Units in Islanded Microgrids,” *Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of*, vol. 3, n° 3, pp. 742-755, September 2015.
- [120] T. L. Vandoorn, J. C. Vasquez, J. De Kooning, J. M. Guerrero y L. Vandevelde, “Microgrids: Hierarchical Control and an Overview of the Control and Reserve Management Strategies,” *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol. 7, n° 4, pp. 42-55, Dec. 2013.
- [121] J. Rocabert, A. Luna, . F. Blaabjerg y P. Rodríguez, “Control of Power Converters in AC Microgrids,” *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol. 27, n° 11, pp. 4734-4749, November 2012.
- [122] D. Wu, F. Tang, T. Dragicevic, J. C. Vasquez y J. M. Guerrero, “Autonomous Active Power Control for Islanded AC Microgrids With Photovoltaic Generation and Energy Storage System,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 29, n° 4, pp. 882-892, Dec. 2014.
- [123] A. H. Fathima y K. Palanisamy, “Optimization in microgrids with hybrid energy systems – A review,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, p. 431–446, May 2015.
- [124] W. Shi, X. Xie, C.-C. Chu y R. Gadh, “Distributed Optimal Energy Management in Microgrids,” *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 6, n° 3, pp. 1137-1146, May 2015.
- [125] B. Wang, M. Sechilariu y F. Locment, “Intelligent DC Microgrid With Smart Grid Communications: Control Strategy Consideration and Design,” *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, n° 4, pp. 2148-2156, December 2012.
- [126] M. Mao, H. Huang y L. Chang, “Real-time energy coordinated and balance control strategies for microgrid with photovoltaic generators,” de *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2013 4th IEEE International Symposium on*, Rogers, AR, 2013.
- [127] IEEE Standards Coordinating Committee 21, “1561-2007 - IEEE Guide for Optimizing the Performance and Life of Lead-Acid Batteries in Remote Hybrid Power Systems,” 2008.

-
- [128] N. L. Diaz Aldana, D. Wu, T. Dragicevic, J. C. Vasquez y J. M. Guerrero, "Fuzzy droop control loops adjustment for stored energy balance in distributed energy storage system," de *IEEE ECCE-ASIA 2015.*, Seoul, 2015.
- [129] G. Zhabelova, V. Vyatkin y V. N. Dubinin, "Toward Industrially Usable Agent Technology for Smart Grid Automation," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 62, n° 4, pp. 2629-2641, April 2015.
- [130] P. Nguyen, W. Kling y P. Ribeiro, "A Game Theory Strategy to Integrate Distributed Agent-Based Functions in Smart Grids," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 4, n° 1, pp. 568-576, March 2013.
- [131] C. P. Nguyen y A. J. Flueck, "Agent Based Restoration With Distributed Energy Storage Support in Smart Grids," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, n° 2, pp. 1029-1038, June 2012.
- [132] B. Ramachandran, S. K. Srivastava, C. S. Edrington y D. A. Cartes, "An Intelligent Auction Scheme for Smart Grid Market Using a Hybrid Immune Algorithm," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, n° 10, pp. 4603-4612, October 2011.
- [133] H. Dagdougui y R. Sacile, "Decentralized Control of the Power Flows in a Network of Smart Microgrids Modeled as a Team of Cooperative Agents," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 22, n° 2, pp. 510 - 519, March 2014.
- [134] C. M. Colson y M. M. Hashem Nehrir, "Comprehensive Real-Time Microgrid Power Management and Control With Distributed Agents," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 4, n° 1, pp. 617-627, March 2013.
- [135] O. Palizbana, K. Kauhaniemia y J. M. Guerrero, "Microgrids in active network management—Part I: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 36, pp. 428-439, August 2014.
- [136] W. Liu, W. Sheng, X. Meng, Z. Wu y W. Chen, "Decentralized Multi-Agent System-Based Cooperative Frequency Control for Autonomous Microgrids With Communication Constraints," *IEEE Transaction on Sustainable Energy*, vol. 5, n° 2, pp. 446-456, 2014.

- [137] Q. Li, F. Chen, M. Chen, J. M. Guerrero y D. Abbott, "Agent-Based Decentralized Control Method for Islanded Microgrids," *Smart Grid*, pp. 1-13, 2015.
- [138] C.-X. Dou y B. Liu, "Multi-Agent Based Hierarchical Hybrid Control for Smart Microgrid," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 4, n° 2, pp. 771-778, June 2013.
- [139] Y. Chen, Z.-L. Liu y Y.-B. Xie, "A knowledge-based framework for creative conceptual design of multi-disciplinary systems," *Computer-Aided Design*, vol. 44, n° 2, pp. 146-153, February 2012.
- [140] J. Gausemeier, U. Frank y S. Kahl, "Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems," *Research in Engineering Design*, vol. 20, n° 4, pp. 201-223, November 2009.
- [141] J. Gausemeier, R. Dumitrescu y D. Nordsiek, "Integrative development of product and production system for mechatronic products," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, pp. 772-778, August 2011.
- [142] J. Luckel, T. Hestemeyer y X. Liu-Henke, "Generalization of the cascade principle in view of a structured form of mechatronic systems," de *Advanced Intelligent Mechatronics, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/ASME International Conference on*, Como, 2001.
- [143] R. A. Bianchi y M. F. Martins, "Heuristically-Accelerated Reinforcement Learning: A Comparative Analysis of Performance," de *14th Annual Conference, TAROS 2013*, Oxford, 2014.
- [144] Y.-S. Lee y S.-B. Cho, "A Hybrid System of Hierarchical Planning of Behaviour Selection Networks for Mobile Robot Control," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 11, n° 57, pp. 1-13, 2014.
- [145] Y. Jiang, X. Zhang, L. Tang, W. Liu, J. Fan y Y. Liu, "Multi-Robot Remote Interaction with FS-MAS," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, n° 141, pp. 1-8, 2013.
- [146] J. Testart, J. Ruiz del Solar, R. Schulz, P. Guerrero y R. Palma-Amestoy, "A Real-Time Hybrid Architecture for Biped Humanoids with Active Vision Mechanisms," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 63, n° 2, pp.

233-255, August 2011.

- [147] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatzargyriou y A. Dimeas, "Microgrids management," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 6, n° 3, pp. 54-65, May-June 2008.
- [148] F. Marra, G. Yang, C. Træholt, J. Østergaard y E. Larsen, "A Decentralized Storage Strategy for Residential Feeders With Photovoltaics," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 5, n° 2, pp. 974-981, March 2014.
- [149] E. Liegmann y R. Majumder, "An Efficient Method of Multiple Storage Control in Microgrids," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 30, n° 6, pp. 3437-3444, November 2015.
- [150] J. G. de Matos, F. S.F.e Silva y L. A. de S. Ribeiro, "Power Control in AC Isolated Microgrids With Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 62, n° 6, pp. 3490-3498, June 2015.
- [151] C. Li, H. Shi, Y. Cao, J. Wang, Y. Kuang, Y. Tan y J. Wang, "Comprehensive review of renewable energy curtailment and avoidance: A specific example in China," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1067-1079, January 2015.
- [152] J. M. Guerrero, . L. García de Vicuña, J. Matas y M. Castilla, "A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 19, n° 5, pp. 1205-1213, September 2004.
- [153] R. Majumder, "Some Aspects of Stability in Microgrids," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 28, n° 3, pp. 3243-3252, August 2013.
- [154] N. L. Diaz, W. Dan, T. Dragicevic, J. C. Vásquez y J. M. Guerrero, "Stored energy balance for distributed PV-based active generators in an AC microgrid," de *Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE*, Denver, CO, 2015.
- [155] N. L. Díaz, A. C. Luna, J. C. Vásquez y J. M. Guerrero, "Equalization algorithm for distributed energy storage systems in islanded AC microgrids," de *Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of*

the IEEE, Yokohama, 2015.

- [156] N. L. Diaz, A. C. Luna, J. C. Vásquez y J. M. Guerrero, “Energy management system with equalization algorithm for distributed energy storage systems in PV-active generator based low voltage DC microgrids,” de *DC Microgrids (ICDCM), 2015 IEEE First International Conference on*, Atlanta, GA, 2015.
- [157] N. L. Diaz, E. A. Coelho, J. C. Vasquez y J. M. Guerrero, “Stability analysis for isolated AC microgrids based on PV-active generators,” de *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE*, Montreal, QC, 2015.
- [158] Z. Miao, L. Xu, V. R. Disfani y L. Fan, “An SOC-Based Battery Management System for Microgrids,” *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 5, n° 2, pp. 966-973, March 2014.
- [159] T. Dragicevic, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez y D. Skrlec, “Supervisory Control of an Adaptive-Droop Regulated DC Microgrid With Battery Management Capability,” *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 29, n° 2, pp. 695-706, February 2014.
- [160] Q. Shafiee, C. Stefanovic, T. Dragicevic, P. Popovski, J. C. Vasquez y J. M. Guerrero, “Robust Networked Control Scheme for Distributed Secondary Control of Islanded Microgrids,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 61, n° 10, pp. 5363-5374, October 2014.
- [161] R. A. Gupta y M.-Y. Chow, “Networked Control System: Overview and Research Trends,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, n° 7, pp. 2527-2535, July 2010.
- [162] Siemens Canada Limited Application Note 8, “Latency on a switched ethernet network”.