

3 ORGANIZACIONES MULTIAGENTE

Las relaciones de interacción que se establecen entre los agentes favorece la aparición de estructuras organizativas en el sistema multiagente. La caracterización de estas organizaciones puede llevarse a cabo desde distintos puntos de vista. El estudio de dichas organizaciones en sus distintas dimensiones, así como la revisión de algunos casos concretos, permiten situar adecuadamente el concepto de organización dentro del paradigma de los sistemas multiagente.

3.1 Concepto de organización

Junto al concepto de interacción, la organización es uno de los pilares básicos para los sistemas multiagente.

Una organización puede definirse como el conjunto de relaciones dinámicas, existente entre componentes e individuos, que da lugar a una unidad o sistema dotado de cualidades no poseídas a nivel individual. La organización garantiza un elevado grado de interdependencia y fiabilidad, lo que posibilita la duración de la misma en el tiempo a pesar de eventuales interrupciones.

En los sistemas multiagente existen numerosas relaciones asociadas a la delegación de tareas, transmisión de datos, sincronización de acciones, acceso a recursos, etc. Las organizaciones son, simultáneamente, la base que las sustenta y el modo en que estas se manifiestan.

Una organización también puede verse como la agregación de elementos de menor nivel y, a su vez, como un componente de organizaciones de nivel superior.

El estudio de las organizaciones contempla los tres aspectos siguientes: análisis funcional, análisis estructural y concreción de parámetros.

3.2 Análisis funcional

El análisis funcional de una organización describe las funciones de un sistema multiagente en sus diferentes dimensiones.

Desde este punto de vista, una organización puede verse como un sistema de roles. Cada uno de estos roles queda definido por las propiedades mostradas por los agentes que los desempeñan dentro de la propia organización.

3.2.1 Clasificación de los roles

Los roles o papeles describen la posición de los agentes en la organización. Estos pueden agruparse en torno a seis funciones:

- Función de representación: hace referencia al modelado del entorno y de otras organizaciones.
- Función organizativa: como su propio nombre indica, se encarga de la organización de las actividades (planificación, localización, seguimiento, coordinación, etc.).
- Función conativa: relativa a las fuentes, limitaciones y selección de actividades. Engloba a funciones de motivación, restricciones y toma de decisiones.
- Función de interacción: dedicada a la creación de vínculos en el interior de la propia organización y hacia fuera de la misma. Se apoya en las funciones de percepción y de ejecución.
- Función productiva: se encarga de las actividades a realizar para llevar a cabo un trabajo o resolver un problema.
- Función vegetativa: se encarga de la preservación de la estructura y los agentes que componen la organización.

Todas estas funciones, necesarias para el adecuado funcionamiento de la organización, están relacionadas entre sí tal y como se muestra en la Figura 1. Pese a no aparecer explícitamente en la clasificación ni en la figura, no debe olvidarse el papel de la función de coordinación, que se encuentra en un plano general afectando a todas las demás.

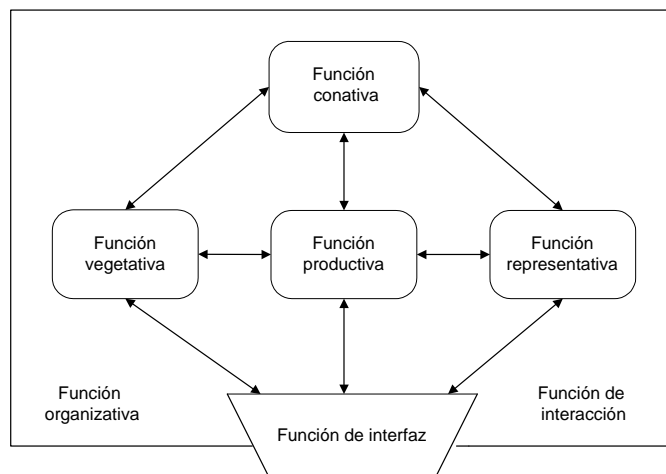


Figura 1: Relación entre los distintos tipos de funciones (Fuente: Ferber, 1999).

3.2.2 Dimensiones de análisis

Existen cinco dimensiones de análisis para cada una de las funciones ya presentadas.

-
- Dimensión física: trata de la implementación, arquitectura de la organización y sus recursos.
 - Dimensión social: relativa al lugar y papel jugado por una organización en otra de mayor escala.
 - Dimensión relacional: se ocupa de las interacciones e intercambios entre organizaciones. En este nivel se definen los protocolos de interacción.
 - Dimensión ambiental: ligada a la capacidad de una organización para actuar, percibir y razonar en relación con el mundo exterior.
 - Dimensión personal: se encarga de la representación del propio individuo, la adquisición de conocimiento y la preservación de la estructura.

El estudio de las distintas funciones (vegetativa, organizativa, etc.) desde todas estas perspectivas completa el estudio funcional de una organización.

3.3 Análisis estructural

El análisis estructural intenta poner orden entre las posibles interacciones existentes entre los agentes. Para ello, distingue entre las relaciones abstractas que conectan a los agentes y la evolución en el tiempo de las mismas.

Esta es una división compleja que necesita, en primer lugar, determinar qué representa un agente y cuál es su relación con el problema a resolver. Es decir, cuáles son las capacidades del agente y la relación que este establece con la tarea (si existe distribución, redundancia, etc.).

3.3.1 Posibles aproximaciones al problema

El abordaje de esta tarea puede enfocarse, desde el punto de vista de la informática, de dos formas distintas: centrado en las funciones (enfoque funcional) o bien, basado en el individuo y el producto (orientación a objetos).

- Diseño orientado a objeto.

Se centra en la entidad en cuestión. En cierta medida, supone una extensión del análisis orientado a objetos, pues considera a los agentes como objetos con autonomía y capacidad para razonar sobre lo que les rodea.

- Enfoque funcional.

Esta es la aproximación más sencilla para agentes no situados físicamente. Se basa en considerar a los agentes como especialistas, caracterizados por su papel y la función que desempeñan en la organización.

La perspectiva elegida de entre las anteriores afecta a la creación del sistema. El segundo enfoque resulta más tradicional frente al primero, que considera a los agentes como entidades autónomas y se basa en la definición de modelos de interacción y resolución de problemas desde un punto de vista distribuido.

Otra posible forma para dividir al sistema multiagente puede basarse en los enfoques horizontal/vertical.

- División vertical: asocia a cada función una actividad compleja centrada en una aplicación específica. Este es un enfoque muy ligado a la solución de un problema determinado.
- División horizontal: enfatiza lo que es compartido por las funciones verticales, tales como funciones de inferencia, memorización, percepción, coordinación, etc. Resulta, en consecuencia, una aproximación al problema más genérica que la anterior.

Una vez establecidas algunas formas para conocer u orientar las tareas de los agentes, puede definirse el concepto de relaciones abstractas.

3.3.2 Relaciones abstractas

Las relaciones abstractas describen las formas de relación que se dan entre las clases funcionales o roles de los agentes. Estas pueden ser estáticas o dinámicas según su variación con el tiempo.

Existen siete tipos de relaciones básicas: de conocimiento, comunicación, subordinación, operativa, informativa, conflictiva y competitiva.

Además de por las propiedades de los vínculos entre los agentes, las organizaciones pueden caracterizarse por su capacidad para adaptarse y evolucionar según las necesidades. Para ello, las organizaciones tienen que ser capaces de modificarse.

De este modo, y atendiendo a las posibles formas de acoplamiento entre los agentes, se distinguen tres tipos de organización:

- Organización de acoplamiento fijo. En ellas cada agente tiene un rol invariable. Este enfoque no permite modelar sistemas multiagente.
- Organización de acoplamiento variable. Se caracteriza por una estructura organizacional fija cuyas implementaciones específicas son variables. Se trata de un enfoque muy usado en sistemas multiagente.
- Organización de acoplamiento evolutivo. Permite la evolución de las relaciones entre los agentes.

Por último, la estructura organizativa puede venir fijada a priori por el diseñador, conociéndose, en ese caso, las relaciones abstractas de antemano. Otra posibilidad es la representada por las organizaciones emergentes, en las que las actuaciones y relaciones entre los agentes son las que dan lugar a la aparición de la organización. Este último caso, está típicamente relacionado con los sistemas reactivos. En los sistemas evolutivos existe cierta emergencia pero esta está controlada por diagramas ya establecidos.

3.4 Parámetros de concreción

El problema que se plantea el diseñador del sistema es, una vez conocida la tarea a desarrollar, saber cómo hay que distribuir las distintas propiedades entre los agentes para la eficiente consecución del objetivo marcado.

El estudio del reparto de las propiedades entre los agentes determina las características de redundancia y especialización del sistema.

El diseñador y organizador del sistema tiene como objetivo la creación de un sistema de elevado nivel de representación y que sea capaz de adaptarse a posibles cambios en el entorno. Para conseguir esto, puede apoyarse en una función de representación/rendimiento. Si esta se ocupa únicamente de los parámetros de redundancia y especialización, debe buscarse un equilibrio que permita un elevado nivel de eficiencia y, al mismo tiempo, adaptabilidad. Así, un incremento de la especialización conlleva un mejor desarrollo de la función a realizar pero disminuye las posibilidades de adaptación que, por el contrario, se verían favorecidas por el incremento en el número de agentes polivalentes.

A modo de resumen, se puede decir que, para definir a una organización hay que asociar las características obtenidas de los análisis funcional y estructural con los factores de redundancia y especialización. En consecuencia, una organización puede venir descrita por:

- El enfoque seleccionado (orientado a objeto, horizontal, etc.) y la función productiva (recursos, operaciones, etc.).
- La caracterización de la misma con respecto a las seis funciones elementales contempladas desde el punto de vista de las cinco dimensiones de análisis.
- El conjunto de roles asociados con las funciones y las relaciones abstractas.
- Las relaciones subordinadas que estructuran la autoridad en la organización.
- El tipo de acoplamiento y constitución.
- Valores de los parámetros de concreción, es decir, redundancia y especialización.

De entre todas las arquitecturas posibles que pueden obtenerse mediante la variación de los valores de los parámetros vistos, las presentadas en la Tabla 1 han demostrado ser aproximaciones válidas.

Tabla 1: Tipos de arquitecturas (Fuente: Ferber, 1999).

Tipo de arquitectura	Enfoque	Tipo de componente	Estructura de subordinación	Estructura de acoplamiento	Constitución
Modular horizontal	Funcional horizontal	Módulo	Jerárquica	Fija (progresiva)	Predefinida
Pizarra	Funcional	Tarea	Jerárquica (Meta)	Variable	Predefinida
Inclusiva/Incluída	Funcional vertical	Primitiva de tarea	Jerárquica	Fija	Predefinida
Tareas competitivas	Funcional vertical	Tarea y primitiva de acción	Jerárquica (Competición)	Variable	Predefinida
Leyes de producción	Funcional	Regla	Jerárquica (Meta)	Variable	Predefinida
Clasificadores	Funcional vertical	Regla	Jerárquica	Evolutiva	Predefinida
Conexionista	Funcional vertical	Neurona formal	Igualitaria	Fija (por peso)	Predefinida
Sistema dinámico	Funcional vertical	Relación Estímulo-orden	Igualitaria	Fija (progresiva)	Emergente
Multiagente	Objeto/ Funcional	Agente	Igualitaria	Variable	Emergente

La Figura 2 permite fijar las ideas expuestas hasta ahora. En ella aparece el desglose de las dimensiones desde las que se puede caracterizar una organización, así como las propiedades concretas asociadas a dichas dimensiones.

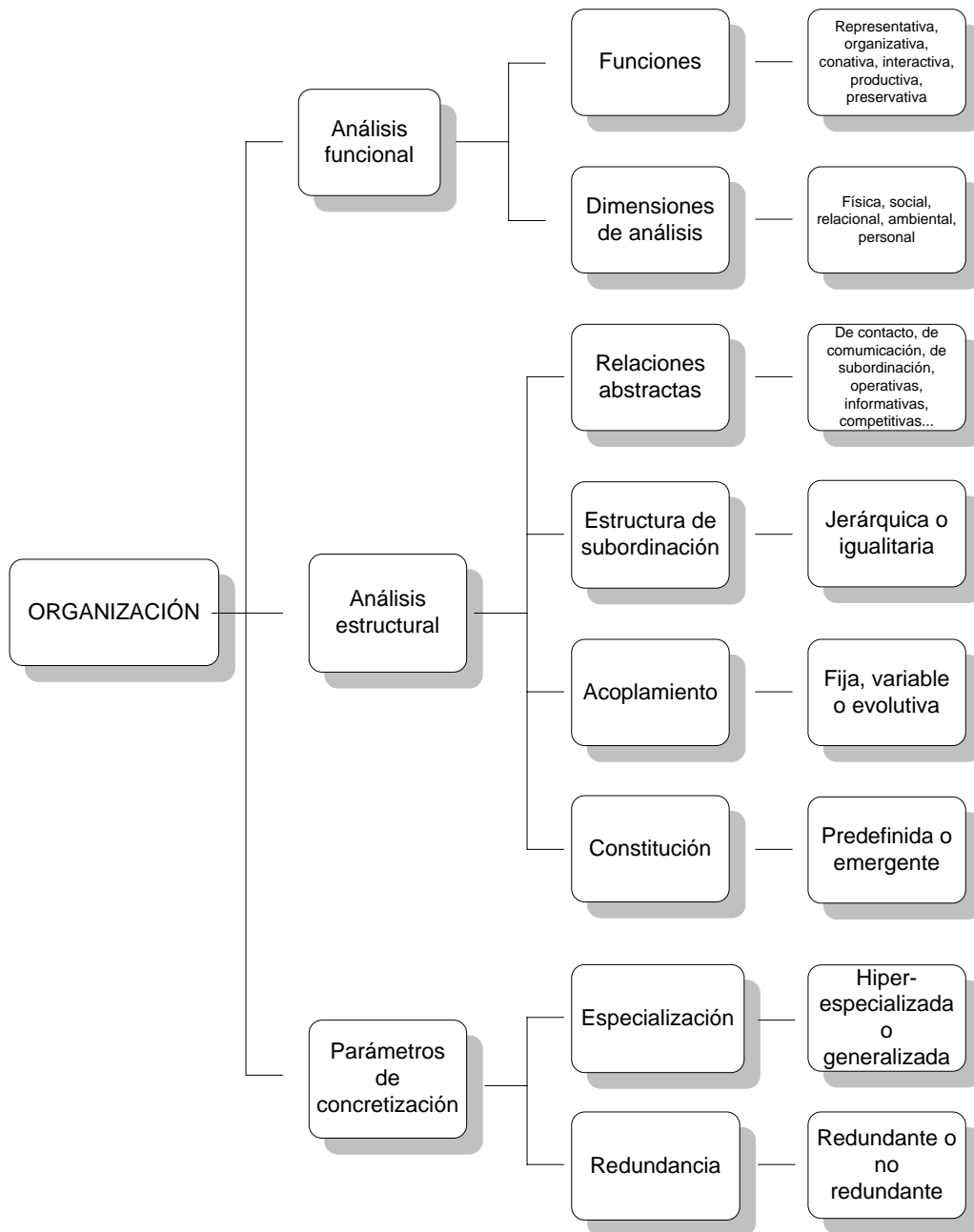


Figura 2: Elementos de una organización artificial (Fuente: Ferber, 1999).

3.5 Principios aplicables a la concreción de una organización

Diversos estudios han desarrollado distintas organizaciones según los objetivos que se querían alcanzar. Como resultado de ello, nacen una serie de recomendaciones o pautas cuyo seguimiento facilita o proporciona al menos una base para la definición de una organización concreta.

3.5.1 Perspectiva inicial

La concepción de una organización asociada a un sistema multiagente es una tarea bastante compleja. La organización, ya sea vista desde una perspectiva estructural o funcional, necesita reorganizarse y adaptarse dinámicamente a las circunstancias cambiantes del entorno sin que exista un control *top-down* procedente de otro sistema. Algunos autores implementan esta propiedad en sus sistemas mediante la construcción de agentes complejos con capacidad de razonar sobre tareas de coordinación y relación. No obstante, estas capacidades también pueden conseguirse aplicando a los sistemas de agentes artificiales principios derivados de sistemas naturales, tales como poblaciones de insectos o bandadas de pájaros, entre otros (Van Dyke Parunak, 1997).

Para un análisis desde este punto de vista, conviene tomar como referencia las siguientes definiciones de sistema multiagente, agente y entorno:

- Sistema multiagente: <agente,entorno,interaccion>
- Agente: <estado, entrada, salida, proceso>
- Entorno: <estado, proceso>

Es muy importante destacar el hecho de que el entorno tiene un comportamiento activo. En él se desarrollan procesos propios que cambian su estado independientemente de las acciones llevadas a cabo por los agentes. Esta idea es la ya reflejada en las denominadas leyes del universo.

En cuanto a las interacciones entre agente y entorno, hay que señalar que estas pueden considerarse desde cuatro perspectivas distintas, las cuales son el resultado de las combinaciones entre base de tiempo continuo o de eventos discretos para ambos elementos, agentes y entorno. En general, el mundo real se considera un sistema heterodinámico, pues el entorno se modela con base de tiempo continuo, y el agente con eventos discretos.

3.5.2 Principios derivados de sistemas naturales

Sistemas naturales, tales como las colonias de hormigas o los nidos de termitas, son capaces de desarrollar grandes estructuras a partir de ciertos principios de auto-organización. El estudio y la identificación de estos principios permite extrapolarlos a sistemas artificiales para conseguir los comportamientos deseados.

Los principios derivados de los sistemas naturales pueden ser distintos según el tipo de investigación que se tome como referencia. Los trabajos más destacados en este ámbito son los que a continuación se presentan.

La teoría del Orden Oculto (*Hidden Order*) (Holland, 1995), trata los sistemas adaptativos complejos, (*Complex Adaptive Systems, CAS*), similares a los MAS. Estos sistemas vienen caracterizados por ser no lineales, verificar el principio de agregación y de diversidad, y por la

existencia de flujos en la red de agentes. En cuanto a los comportamientos y mecanismos que se dan en ellos, los agentes pueden reconocerse y diferenciarse. Estos agentes constan de modelos internos formados por bloques constructivos para poder anticiparse así a cambios en el entorno.

Resnick (1994) trata de comprender con sus estudios cómo se ven los sistemas descentralizados desde fuera. A partir de dichos estudios extrae conclusiones sobre la influencia de factores tales como la realimentación positiva, la aleatoriedad, la distinción entre un conjunto y los elementos de los que está compuesto y, por último, los procesos originados en el entorno, en la creación de orden y la auto-organización de la estructura global.

Por último, Kelly (1994) busca los principios que gobiernan la emergencia de comportamientos, entre los que destacan los referidos a descentralización, diversidad (crecimiento por *chunking*) y entropía (búsqueda del desequilibrio persistente). No obstante, estos estudios son más de carácter filosófico que ingenieril.

De estos tres estudios y sus perspectivas se obtienen el siguiente conjunto de principios, que deben tenerse en cuenta para la creación de la arquitectura del sistema multiagente. Principios que, además, se alejan de las primeras ideas para la creación de sistemas monolíticos.

- Los agentes deben corresponderse con objetos en lugar de con funciones abstractas.
- Los agentes deben ser pequeños en masa, tiempo y medida.
- El sistema debe ser descentralizado sin que exista un punto único de control o fallo.
- Debe existir diversidad entre los agentes, lo que puede conseguirse mediante aleatoriedad o repulsión.
- Debe existir un mecanismo para disipar energía en el macronivel del sistema.
- Los agentes tienen que ser capaces de compartir lo que han aprendido del entorno, ya sea a nivel individual, generacional o social.
- Planes y ejecución de acciones han de ser procesos concurrentes y no secuenciales.

3.5.3 Ejemplo de aplicación

El denominado equipo asíncrono, *A-Team* (Talukdar et al., 1998), ya visto como ejemplo de sistema cooperante, vuelve a ser un buen ejemplo de la aplicación de los principios recomendables para la creación de la arquitectura del sistema multiagente.

Para facilitar la identificación de estos, se introduce en primer lugar la formalización adoptada para el agente y los conceptos en los que esta se apoya.

3.5.3.1 Diseño de una estructura A-Team

Un *A-Team* no es más que un conjunto de agentes autónomos y un conjunto de memorias interconectadas formando una red fuertemente cíclica. Para este formalismo, el agente se compone de una memoria de entrada, una memoria de salida, un operador y un sistema de control (ver Figura 3). Los operadores modifican los objetos de entrada, siguiendo para ello las pautas dadas por el sistema de control. Posteriormente, los objetos resultantes se pasan a la memoria de salida.

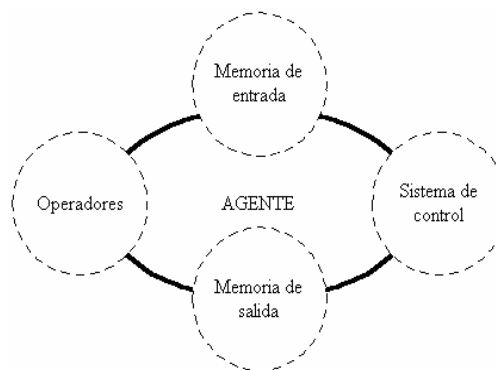


Figura 3: Modelo de un agente (Fuente: elaboración propia).

El diseño de un *A-Team* puede realizarse atendiendo a una serie de pasos que se enumeran a continuación:

- Paso 1: Seleccionar un problema relacionado con el que se quiere resolver.
- Paso 2: Elección del conjunto de nodos mediante asignación de una o más memorias a cada miembro del problema.
- Paso 3: Elección de un conjunto de operadores y algoritmos de construcción para los miembros del problema.
- Paso 4: Asignación de cada algoritmo de construcción a un agente autónomo.
- Paso 5: Elección de agentes destructores.
- Paso 6: Elección de una interconexión de memorias y agentes fuertemente cíclica.

Los agentes descritos en los primeros pasos son los denominados agentes constructores, cuya tarea es la de añadir soluciones a las memorias de salida. Esta acción debe ser equilibrada por los agentes destructores, que borran soluciones triviales y evitan, de este modo, el desbordamiento de las memorias. La acción de los agentes destructores también permite mejorar la calidad general de la población de soluciones eliminando patrones indeseados (Talukdar, 1998).

En el caso de los agentes destructores, toda la inteligencia se encuentra concentrada en el sistema de control. Las tres tecnologías empleadas para la eliminación de soluciones son

Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm*, GA), Recocido Simulado (*Simulated Annealing*, SA) y Búsqueda Tabú (*Tabu Search*, TS).

Para la consecución de soluciones de alta calidad en períodos de tiempo razonables, pueden añadirse nuevos ciclos, bien desde el paso 1 o el paso 3. La adición de agentes de menor o mayor complejidad y en determinado orden, puede dar lugar a notables mejoras de velocidad en la obtención de soluciones.

3.5.3.2 Modelo de memoria de flujo constante (*Constant Drift Memory*)

El comportamiento y la explicación de los fenómenos ocurrientes en un *A-Team* pueden explicarse usando el modelo CDM, *Constant Drift Memory*.

Los conceptos y pautas básicas en los que se apoya este modelo son:

- Cualquier forma de cooperación puede ser representada por un flujo de datos.
- Para cualquier flujo de datos, los comportamientos de interés ocurren en una única memoria.
- Todas las memorias en flujos de datos fuertemente cíclicos, pueden ser modeladas con exactitud mediante las denominadas memorias cíclicas.
- Todas las memorias cíclicas pueden ser modeladas por las CDM.

Como consecuencia de estas premisas, y de la implementación y estudio de estos sistemas, se deducen una serie de conclusiones aplicables a la estructura de los *A-Teams*.

- La red tiende a ser efectiva en términos de escala. Es decir, la adición de nuevos agentes conlleva una mejora en la calidad de la solución y su velocidad de obtención. En consecuencia, encontrar una solución de alta calidad no requiere de coordinación o planificación; sino de agentes actuando independientemente sin control central.
- Los procesos de construcción y destrucción son duales, de forma que una destrucción adecuada puede compensar una construcción mal orientada y viceversa.
- Las salidas y representaciones del modelo, las condiciones de alcance de la solución no guardan relación con el tipo de agente y su granularidad. En consecuencia, grandes agentes pueden actuar con pequeños, y agentes mecánicos con humanos.

Estas conclusiones han sido verificadas para problemas de optimización. Sin embargo, para el campo de los sistemas multiagente, algunas de ellas están aún por probar.

Como ya se dijo al inicio del capítulo, se hace patente en este ejemplo la entrelazada relación existente entre los conceptos cooperación, organización y estructura.

3.6 Arquitectura centrada en red

El estudio de los sistemas multiagente, como ya ha quedado patente, engloba numerosos campos según los distintos análisis y enfoques que den al sistema. Estos subcampos son, por ejemplo, relativos a la adaptación (respuesta del sistema a cambios) o a la emergencia del fenómeno global a partir de las interacciones de los componentes del sistema. Sin embargo, también debe señalarse la importancia de las teorías de redes (influencia de la topología y propiedades de la red en el comportamiento mostrado), aspecto aún no nombrado explícitamente.

Los sistemas multiagente también son denominados Sistemas Adaptativos Complejos (*Complex Adaptive Systems, CAS*) en algunas corrientes. Esta línea de estudio se centra en el estudio de muchos componentes que interactúan entre sí. Esa interacción se supone gobernada por leyes simples, mientras que el comportamiento global emergente es complejo.

Esta línea de investigación trató de solucionar los inconvenientes derivados del uso de arquitecturas reactivas y BDI de agentes para la creación del sistema multiagente. Nació así la denominada arquitectura centrada en red (*Network Centric Multiagent Architecture, NCMAA*), (Yang et al., 2005).

Las principales características y ventajas ofrecidas por la NCMAA son:

- Cada entidad es una red en sí misma o parte de una red, por lo que la validación del comportamiento del sistema puede realizarse usando parámetros de medida de redes (grados de conectividad, longitud del camino medio, etc.)
- Uso de teoría estadística inferencial para desarrollar el razonamiento a nivel de la red del grupo, evitándose así la dificultad de razonar a nivel de agentes (sujeto a interacciones no lineales).
- Hallar particiones de una estructura en red es sencillo, por lo que en este caso, es fácil dividir el sistema en subredes a las que asignarles distintos procesos. Es decir, permite la implementación de paralelización de un modo sencillo y fácilmente automatizable.

Todo el sistema se diseña a partir de teoría de redes, tanto las entidades, como el motor de simulación o, incluso, las relaciones entre los agentes.

El sistema distingue entre una red estática (red de familias) y otra dinámica (relativa a las relaciones de comunicación) según la topología de la misma cambie o se mantenga constante.

La arquitectura propuesta por NCMAA se estructura en dos niveles o capas como se aprecia en la Figura 4:

- Capa superior: se corresponde con un diagrama de influencias donde se representa la interdependencia entre los distintos conceptos del sistema. Por ejemplo, los tipos de relaciones existentes entre los agentes y cómo se influyen unos a otros.

- Capa inferior: dedicada a las máquinas de estado finito que controlan el motor de simulación del sistema. Es decir, controlan la ejecución de cada red del sistema, así como el reloj global del mismo.

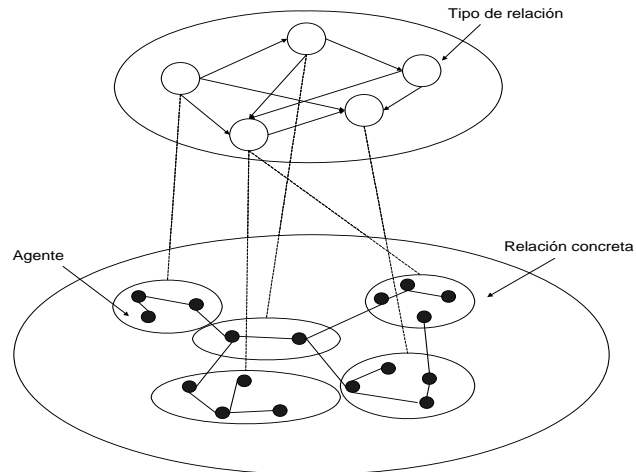


Figura 4: Arquitectura de dos niveles (Fuente: Yang et al., 2005).

Algunas cuestiones no resueltas en la NCMAA hacen referencia al tipo de red más apropiado para conseguir un determinado comportamiento global.