

Coordinación de agentes: tipos, técnicas, modelos y lenguajes

Agents coordination: types, techniques, models and languages

Rosanna N. Costaguta, Ph.D y Rubén E. Fares, Ing.

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías,
Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina
rosanna@unse.edu.ar, estebanfares@hotmail.com

Recibido para revisión 30 de marzo de 2010, aceptado 28 de octubre de 2010, versión final 22 de noviembre de 2010

Resumen— El presente artículo tiene por objetivo presentar una revisión comprensiva del tema coordinación en sistemas basados en agentes. Con este propósito se introduce el concepto de agente y a los sistemas multiagentes, se define qué se entiende por coordinación, se analizan y comparan diferentes tipos de coordinación, y se describen técnicas mediante las cuales puede implementarse la coordinación. Finalmente, se comparan modelos y lenguajes de coordinación existentes en la actualidad.

Palabras Clave— Coordinación de Agentes, Sistemas Multiagentes, Modelos de Coordinación, Lenguajes de Coordinación.

Abstract—In this paper we present a comprehensive review of the coordination issues in agent-based systems. First, we introduce the concepts of agent and multiagent systems, and define the concept of coordination between agents. Then, we analyze and compare different types of coordination and describe some techniques by which coordination can be implemented. Finally, we compare different coordination models and languages.

Keywords— Agent Coordination, Multiagent Systems, Coordination Models, Coordination Languages.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente la Inteligencia Artificial (IA) se aplica a una gran cantidad de áreas o campos donde es requerido el intelecto humano. El más reciente paradigma de esta disciplina es el denominado "paradigma de agentes" [4], [24] que aborda el desarrollo de entidades que puedan actuar de forma autónoma y razonada. Los investigadores y desarrolladores del área han generado múltiples definiciones para el término agente, cada uno de ellos teniendo en cuenta sus propias necesidades y/o

experiencias. Algunos ejemplos de estas definiciones son: entidad que percibe y actúa sobre un entorno [42]; sistema cuyo comportamiento se determina como resultado de un proceso de razonamiento basado en sus aptitudes [49]; componente de software y/o hardware capaz de actuar para realizar tareas en beneficio del usuario [29]; y se podría continuar citando algunos autores más. Actualmente no existe acuerdo respecto a las propiedades que debe esgrimir un agente, algunas de ellas son [15], [28], [49]: continuidad temporal, autonomía, sociabilidad, racionalidad, reactividad, pro-actividad, adaptatividad, movilidad, veracidad y benevolencia. Tal como afirman Botti y Julián [4], tampoco existe consenso sobre el grado de importancia de cada una de estas propiedades, si bien se coincide en la opinión de que sirven para diferenciar a los agentes de meros programas software. Además, considerando estas propiedades se obtienen distintas taxonomías donde existen agentes autónomos, agentes colaborativos, agentes de interfaz, agentes reactivos, agentes híbridos, agentes astutos, y otros tipos producto de la combinación de dos o más de las categorías citadas.

Desde un punto de vista ingenieril, un agente es una pieza de software que funciona dependiendo de un sistema operativo y de varios recursos computacionales y electrónicos [27]. En la actualidad el desarrollo de aplicaciones complejas, compuestas por varios subsistemas e incluyendo distintos agentes que interactúan entre sí, dio surgimiento a los conocidos sistemas multiagentes (SMA). Un SMA está compuesto por un número determinado de agentes, donde cada uno posee sus propias habilidades y objetivos, cierta especialización en cuanto a la tarea que debe realizar y un nivel limitado de conocimiento en relación directa con dicha tarea. Si bien todo SMA posee una misión, su grado de cumplimiento dependerá del grado de consecución logrado por parte de los agentes que lo conforman

respecto a los objetivos que cada uno de ellos persigue. Debido a esto los SMA propician la toma de decisiones distribuidas, lo cual permite que cada agente mantenga su autonomía para decidir qué hacer para cumplir sus propósitos dentro de su entorno, se elimina la necesidad de contar con un agente que posea toda la información del sistema, se produce una mejor respuesta ante fallas por cuanto la toma de decisiones está descentralizada, es posible llevar a cabo acciones coordinadas entre los agentes e incluso reorganizarlos dinámicamente en adaptación a los cambios que se produzcan [27]. Sin embargo, todas estas características dependen de una exitosa coordinación entre todos los componentes del SMA.

El objetivo de este trabajo es presentar una revisión comprensiva del tema coordinación en SMA. El presente artículo se organiza como sigue. En el próximo apartado se define el concepto de coordinación, se presenta su vinculación con las interdependencias entre acciones y entre agentes, y también se enuncian algunas de las razones por las cuales la coordinación es necesaria. En el apartado III se describen y comparan las diferentes clasificaciones encontradas respecto a los tipos de coordinación. En el apartado IV se introducen los mecanismos de coordinación, y se describen brevemente algunas de las técnicas actualmente utilizadas. El apartado V se aboca a definir un modelo de coordinación, describiendo cada uno de sus elementos constitutivos. En esta sección también se definen los lenguajes de coordinación, se describen y se comparan algunos desarrollos específicos. Finalmente, en el apartado VI se enuncian algunas conclusiones.

II. LA COORDINACIÓN

Esta sección tiene por objetivo analizar qué se entiende por coordinación en el ámbito de los SMA. Al mismo tiempo, en apartados creados especialmente, se describe la relación entre este concepto y las dependencias entre acciones y entre agentes. También se identifican algunas razones por las cuales es necesario coordinar las tareas de agentes múltiples.

A. Definición

La mayoría de las definiciones encontradas resultan ser una conceptualización al área de agentes de la definición generada dentro de la Teoría de las organizaciones, para quien la coordinación es vista como la gestión de dependencias entre actividades organizativas [25].

Bajo este enfoque, la coordinación en el ámbito de los SMA, se refiere a la distribución de tareas a fin de alcanzar los objetivos comunes [14]. Tal distribución se consigue cuando los agentes pueden seleccionar las acciones apropiadas, las veces adecuadas, y en una secuencia correcta [8]. Jennings [20] asocia esta selección con un proceso de razonamiento llevado a cabo por los agentes. En dicho proceso se deben evaluar las acciones propias, y también anticipar las de los otros agentes, con la

intención de procurar y asegurar que los actos de la comunidad, formada por todos los agentes, resulten coherentes. La coherencia implica que las acciones de los agentes puedan realizarse sin generar conflictos entre unos y otros, es decir, logrando que los agentes se comporten como una unidad [29]. Lesser [22] sostiene que además de las selecciones de acciones y su posterior ordenamiento en una forma correcta, para coordinar también se requiere la comunicación de resultados entre los agentes, afirmando además que sin esto es imposible lograr que el grupo trabaje efectivamente. Así vista, la coordinación de actividades de los agentes comienza a ser necesaria cuando existen interdependencias, tema que se desarrolla en el apartado que continúa.

B. Dependencias entre actividades y entre agentes

Varios investigadores resaltan la vinculación de las dependencias o interrelaciones existentes entre las acciones o actividades a desarrollar por varios agentes con la coordinación de dichas tareas [7], [8], [16], [22], [43], [48]. Los trabajos encontrados se sostienen sobre la clasificación de interdependencias dada por Von Martial [46], basándose en dos categorías principales:

1) Interrelación Negativa: Dadas dos acciones A1 y A2, a ser realizadas por sendos agentes, existe entre ellas una interrelación negativa si no pueden efectuarse simultáneamente. Esta imposibilidad puede deberse a la incompatibilidad de objetivos o metas perseguidas por los agentes involucrados, o a la competencia por el uso de recursos limitados. Este tipo de interrelación también recibe el nombre de interrelación conflictual.

2) Interrelación Positiva: Dadas dos acciones A1 y A2, a ser realizadas por sendos agentes, existe entre ellas una interrelación positiva si al realizarlas favorecen la concreción de las tareas de otros agentes, tendiendo así a aumentar la eficiencia del sistema por no efectuar las actividades independientemente unas de otras. Las interrelaciones positivas también reciben el nombre de interrelaciones sinérgicas. Dentro de esta categoría se pueden encontrar tres subtipos particulares:

- *Interrelaciones positivas de igualdad:* donde las acciones A1 y A2 no están vinculadas a agentes específicos y por tanto pueden ser efectuadas por cualquiera de ellos.
- *Interrelaciones positivas de subsunción:* Cuando la acción A1 de un agente determinado forma parte del conjunto de acciones B de otro agente, de tal suerte que cuando B es cumplimentado puede afirmarse que el primer agente al mismo tiempo concretó A1.
- *Interrelaciones positivas de favor:* Cuando simplemente una acción finalizada favorece la realización de otras acciones.

Detectar los tipos de interrelaciones existentes entre las actividades resulta importante dentro de la temática de la

coordinación de tareas. Tal como afirma Ferber [16], coordinar implica articular las acciones individuales realizadas por cada agente a fin de lograr un sistema con operación de alto rendimiento. En otras palabras, analizar las interdependencias permite identificar ciertas acciones particularmente sensibles para el objetivo que se persigue en el sistema, ya sea porque sus ejecuciones simultáneas generan conflictos o porque favorecen a niveles de rendimiento individuales y globales.

Schumacher [43] sostiene que para una coordinación efectiva es necesario detectar y administrar dependencias de índole diversa dentro de un SMA. Este autor propone considerar las dependencias existentes entre los propios agentes, analizándolas desde dos puntos de vista: subjetivo y objetivo. Así, Schumacher [43] define como dependencias objetivas a las que son resultado de la composición adoptada por la organización de los agentes. También son conocidas como dependencias inter-agente. Las dependencias subjetivas resultan del análisis del comportamiento de cada agente individual interactuando con otros. Algunas veces se las denomina dependencias intra-agente. En opinión del autor citado, ambos tipos de dependencias conviven en todo SMA.

C. Razones para coordinar

Algunas de las razones por las cuales es necesario coordinar las acciones de múltiples agentes son las siguientes [16], [20], [29], [48]:

- Los agentes individualmente no poseen las competencias requeridas para resolver el problema completo, o necesitan de los resultados que únicamente otros agentes pueden generar.
- Los recursos son limitados, por tanto sus utilizaciones deben optimizarse, evitándose también los conflictos por su uso.
- Existe la necesidad de satisfacer restricciones globales para que la solución alcanzada sea considerada exitosa.
- Existen interdependencias positivas y/o negativas entre las acciones a realizarse.
- Para incrementar la eficiencia, cuando por ejemplo la información descubierta por una agente puede ser usada por otro, tal que juntos resuelven el problema más rápido.
- Para evitar el caos y la anarquía en la que pueden caer fácilmente las sociedades cuyos individuos sólo poseen metas, vistas y conocimientos locales o propios.

En general, la necesidad y la importancia de una coordinación de acciones efectiva aumentan en aquellas situaciones donde se observa una combinación de las razones arriba citadas [22]. Sin coordinación los beneficios de la resolución de problemas descentralizados desaparecen y la comunidad de agentes puede degenerar rápidamente en un conjunto de individualidades caóticas e incoherentes [20].

III. TIPOS DE COORDINACIÓN

En el presente apartado se introducen cuatro clasificaciones referidas a tipos de coordinación. Finalizando el apartado se incluye un cuadro comparativo que resume las diferencias y similitudes entre las categorías presentadas

A. Coordinación subjetiva y objetiva

En [30], [32], [34], [43], [47], [51] se clasifica a la coordinación en subjetiva y objetiva. La coordinación subjetiva corresponde al punto de vista del agente, y la objetiva, a la óptica del diseñador del SMA considerado como un todo. Según [34], [43] ambos tipos de coordinación deben ser necesariamente integrados en un SMA, puesto que no diferenciar claramente estos dos tipos de coordinación presentes complicará el diseño y posterior implementación del sistema, por ejemplo, podría suceder que aspectos intra-agentes (subjetivos) fueran utilizados para describir las configuraciones del sistema (objetivas).

La coordinación subjetiva afecta la manera en que los agentes individuales creen e interactúan, permite monitorear todas las interacciones que son percibidas y resultan relevantes para el agente, y también posibilita determinar cuáles son las acciones que debe llevar a cabo para alcanzar sus objetivos individuales. En general, los actos de un agente coordinado subjetivamente están dirigidos por sus propias percepciones y por la comprensión del comportamiento, metas y capacidades de los otros agentes del sistema. La coordinación subjetiva aplica técnicas explícitas de coordinación que administran dependencias intra-agente (planificación, negociación, etc.)[43].

La coordinación objetiva se vincula con la organización del ambiente donde actúa el agente, y con la forma en que son permitidas y reguladas las interacciones de los agentes con el ambiente, y de los agentes entre sí. Así la coordinación objetiva se alcanza, por un lado, definiendo si existe o no algún modelo que explícitamente describa la organización de los agentes en el sistema, y por otro lado, analizando si las interacciones son sincrónas, asíncronas, anónimas o de interlocutores identificados [43].

B. Coordinación directa e indirecta

Los trabajos de [5], [36] diferencian a la coordinación en directa e indirecta. En la coordinación directa los agentes explícitamente inicián una comunicación y acuerdan un protocolo de comunicación. El intercambio de conocimiento se efectúa sobre la base de la comunicación directa entre los agentes. Este tipo de coordinación requiere saber con certeza quiénes son los interlocutores, dónde se encuentran y cuándo se dará tal interacción. Con la coordinación indirecta los agentes interactúan a través de pizarras, u otros tipos de espacios de información compartidos que promueven la comunicación indirecta a través de mensajes almacenados y recuperados. Las interacciones en este tipo están regladas por

la información intercambiada más que por las acciones de comunicación en sí

C. Coordinación dirigida por los datos y por el control

En [10], [11], [37], [43] se distingue entre coordinación dirigida por los datos y dirigida por el control. Con la coordinación dirigida por los datos los agentes interactúan por medio del intercambio de estructuras de datos en algún espacio de datos compartido. Tal espacio es el medio a través del cual se comunican los agentes involucrados. Mientras algunos envían sus datos al espacio compartido y luego realizan otras tareas, asincrónicamente otros agentes recuperan dichos datos. En estos casos un agente que envía o produce información no necesita conocer la identidad de quien la recuperará o consumirá desde el espacio compartido (o viceversa), o si los datos enviados ya han sido recuperados o leídos por alguien. Con este tipo de coordinación no se tienen en cuenta los cambios de estado de los agentes coordinados, se preserva así la autonomía y el dinamismo de los agentes quienes suelen ser diseñados para obtener información más que para controlar. Es el tipo de coordinación recomendado para aplicaciones abiertas, donde el número de agentes es posiblemente desconocido. También recibe el nombre de coordinación basada en el medio.

Con la coordinación dirigida por el control los agentes interactúan a través de eventos. El comportamiento de los agentes se define entonces por la ocurrencia de un evento y los cambios de estado asociados en el agente. En este tipo de coordinación el acento está colocado en los eventos de comunicación y no se pone ninguna atención a los datos que se están intercambiando. Así, los agentes productores y consumidores de información son considerados cajas negras que se comunican a través de interfaces claramente definidas. Esta clase de coordinación también recibe el nombre de coordinación basada en el canal.

D. Coordinación acoplada/desacoplada tiempo/espacio

Para realizar esta clasificación en [6] se considera la combinación de tiempo y espacio en sus variantes acoplado y desacoplado. Se habla de acoplamiento espacial cuando los interlocutores están debidamente identificados, si es posible el anonimato entonces existe desacoplamiento. El acoplamiento temporal implica sincronización de actividades, y el desacoplamiento asincronía. Debido a esto se presentan cuatro tipos de coordinación: coordinación directa, orientada a meetings, basada en pizarras y tipo-LINDA.

En la coordinación directa los agentes usan acoplamiento espacial para comenzar una comunicación identificando explícitamente a los agentes implicados y acordando un protocolo de comunicación. También implica acoplamiento temporal, es decir comunicación sincrónica.

En la coordinación orientada a reuniones existe desacoplamiento espacial, los agentes interactúan en el contexto de la reunión sin conocer explícitamente las identidades de los participantes.

Existe acoplamiento temporal, puesto que los agentes deben comunicarse y sincronizar sus participaciones en las reuniones.

En la coordinación basada en pizarras los agentes interactúan a través de espacios de datos compartidos, usándolos como repositorios para almacenar y recuperar mensajes. Las interacciones se producen desacopladas temporalmente pero acopladas espacialmente, acordándose cabeceras de mensajes comunes para operar en la pizarra.

En la coordinación tipo-LINDA los agentes interactúan con un desacoplamiento total espacio-temporal. Se utilizan espacios de tuplas como contenedores de mensajes, de manera similar al uso de pizarras. La recuperación de los mensajes se efectúa a través de un mecanismo asociativo que posibilita equiparar tuplas a patrones específicos, y recuperar así, la información correspondiente. Este tipo de coordinación describe justamente la manera en que opera el modelo/lenguaje LINDA [38], por ello hereda su nombre. Linda se describe en el apartado V de este trabajo.

E. Comparación de las técnicas analizadas

Este apartado pretende plantear las similitudes y diferencias detectadas sobre las clasificaciones encontradas para la coordinación de agentes. A tales efectos se eligieron para realizar la comparación los siguientes aspectos: el tipo de dependencia, a fin de determinar si evalúa dependencias inter o intra-agente, la identidad de los interlocutores, es decir, si se requiere la identificación de los agentes coordinados o pueden operar bajo el anonimato; el tipo de comunicación, indicando si corresponde sincronía o asincronía; y finalmente, el medio de comunicación, tratando de determinar explícitamente cual es el medio utilizado para materializar la coordinación. En Tabla 1 se resumen los aspectos analizados. Se podría afirmar que la distinción entre coordinación subjetiva y objetiva se encuentra a un nivel superior de abstracción que las restantes clasificaciones analizadas. Incluso sería factible considerar dichas categorías como subtipos posibles dentro de la coordinación objetiva.

IV. TÉCNICAS DE COORDINACIÓN

Existen varios enfoques para alcanzar la coordinación en SMA. Cualquiera de ellos implementa y utiliza mecanismos, compuestos por una variedad de protocolos y estructuras, que posibilitan administrar las distintas formas de dependencias que naturalmente se dan cuando los agentes poseen objetivos interconectados, cuando comparten un ambiente común, o cuando existen recursos compartidos [45].

Todos los mecanismos de coordinación tienen propiedades y características distintas, resultando adecuados para diferentes tipos de tareas y ambientes, por lo que es imposible afirmar que exista un mecanismo universalmente bueno [45]. Básicamente se pueden agrupar en cuatro categorías, según sea su filosofía de base, a saber: estructura organizacional, contratación, planificación multiagente, y negociación [16], [20], [29], [43], [48]. A continuación se incluye la Tabla II que describe las categorías citadas.

Tabla 1. Comparación de tipos de coordinación de agentes

Referencias	Categorías	Dependencias	Interlocutores	Comunicación	Medio
[30], [32], [34], [43], [47], [51]	Subjetiva	intra-agente	Identificados/ Anónimos	Síncrona/ Asíncrona	Planning/ Negociación/ Base organizacional
	Objetiva	inter-agente	Identificados/ Anónimos	Síncrona/ Asíncrona	Mensajes/ Espacio compartido
[5], [36]	Directa	inter-agente	Identificados	Síncrona	Mensajes
	Indirecta	inter-agente	Anónimos	Asíncrona	Espacio compartido
[10], [11], [37], [43]	Dirigida por datos	inter-agente	Anónimos	Asíncrona	Espacio compartido
	Dirigida por control	inter-agente	Identificados	Síncrona	Mensajes
[6]	Directa	inter-agente	Identificados	Síncrona	Mensajes
	Orientada a reuniones	inter-agente	Anónimos	Síncrona	Mensajes
	Basada en pizarras	inter-agente	Identificados	Asíncrona	Espacio compartido
	Tipo-LINDA	inter-agente	Anónimos	Asíncrona	Espacio compartido

V. MODELOS Y LENGUAJES DE COORDINACIÓN

El paradigma de coordinación se fundamenta en la separación de los aspectos de computación y de interacción de los componentes que integran el sistema, lo cual justamente ha dado surgimiento a diversos modelos y lenguajes de coordinación [43]. Así, la presente sección se aboca al tratamiento de estos temas, definiendo lo que se entiende por modelo de coordinación y describiendo sus elementos constitutivos, planteando la vinculación entre estos modelos y los lenguajes de coordinación. La sección finaliza con un cuadro comparativo que resume las diferencias y similitudes detectadas entre varios modelos y lenguajes.

A. Modelos de coordinación

Un modelo de coordinación se define a través de tres elementos [9], [10], [11], [43]: los coordinables, elementos o entidades que están siendo coordinadas (agentes); los medios de coordinación, abstracciones que permiten llevar a cabo las interacciones de manera coordinada dentro del sistema (pizarras, mensajes, etc.); y las leyes de coordinación, que definen el comportamiento de los medios de coordinación en respuesta a los eventos de interacción. También puede utilizarse la notación de tupla (E, L, M) propuesta por [37], donde E simboliza a los coordinables, L a los medios utilizados, y M al marco semántico que gobierna al modelo, es decir, a sus leyes. Como puede observarse, expresadas de manera diferente, ambas propuestas coinciden en la definición de los elementos que constituyen un modelo de coordinación.

Según [11] un modelo de coordinación brinda el marco formal en que deben expresarse las interacciones de los agentes de software. Así, el modelo se relaciona con la creación y destrucción de agentes, con las actividades de comunicación, con la sincronización y distribución de las acciones del agente, etc. Para [47] los modelos de coordinación sirven para administrar la coordinación objetiva, descripta en la sección anterior, ya que se vinculan esencialmente con el ambiente multiagente como un todo.

B. Lenguajes de coordinación

Un lenguaje de coordinación es la encarnación lingüística de un modelo de coordinación [17]. Esto implica que el lenguaje de coordinación debe proveer construcciones, a través de llamadas a bibliotecas de funciones/procedimientos o de extensiones del propio lenguaje de la aplicación, para implementar las funcionalidades del modelo [43]. Es decir, un lenguaje de coordinación provee los medios para componer y controlar la arquitectura de software constituida por componentes concurrentes a través de la administración de sus dependencias [43].

C. Algunos ejemplos de modelos y lenguajes de coordinación desarrollados

Existen numerosos ejemplos respecto a desarrollos de modelos y lenguajes de coordinación, algunos de ellos se describen brevemente a continuación:

- **Modelo/lenguaje LINDA [38]:** Históricamente es el primer miembro genuino de la familia de los lenguajes de coordinación [37]. Se basa en el intercambio de información a través de objetos de datos denominados tuplas, las cuales se ubican en un espacio de datos compartido denominado espacio de tuplas. En un proceso desacoplado en tiempo y espacio, los agentes generadores y receptores de tuplas se valen del espacio compartido para comunicarse. LINDA utiliza un conjunto de primitivas para agregar, borrar y testear la presencia o ausencia de datos en el espacio compartido. Las tuplas contenedoras de información son recuperadas asociativamente por medio de patrones adecuados que permiten realizar la equiparación de una o más tuplas.
- **Modelo ECM/Lenguaje STL [21]:** Las entidades coordinadas se organizan en blops que responden a una organización jerárquica. La comunicación entre las entidades coordinadas se establece a través de conexiones entre procesos y blops por medio de puertos definidos a tales efectos. Los puertos sirven como puntos de comunicación para las conexiones entre las entidades o entre los blops. Los tipos de comunicación permitida son tres: punto a punto, usando un clásico pase de mensajes; envío de

mensajes para grupos; y comunicación sobre la base de un espacio de datos compartido tipo pizarra.

- **Modelo IWIN/Lenguaje MANIFOLD [1], [38]:** Las entidades coordinadas se organizan en dos tipos, administradores o coordinadores y trabajadores. Un administrador es responsable de establecer y satisfacer las necesidades de comunicación del grupo de trabajadores que controla. Un

trabajador está completamente desinformado de quién es el que necesita sus resultados, si existe, o desde dónde está recibiendo los datos que procesa. La actividad está dirigida por los eventos de comunicación. El coordinador espera por la ocurrencia de algún evento específico, usualmente generado por uno de los trabajadores que coordina, para entrar en un estado determinado y realizar una actividad dada.

Tabla 2. Técnicas Implementadas Para Coordinación de agentes

Categoría	Descripción	Evaluación
<i>Estructura organizacional</i>	<p>Una estructura organizacional puede ser vista como un patrón de información y relaciones de control entre individuos. Aquí la coordinación se realiza explotando la estructura subyacente “a priori”. La propia organización define implícitamente las responsabilidades de los agentes, sus capacidades, conectividad y flujo de control. Esto define un marco para la actividad y la interacción, definiendo roles, rutas de comunicación y relaciones de autoridad. Bajo esta categoría los mecanismos de coordinación se implementan a través de dos formas. En la primera, un agente principal planifica y distribuye tareas a los agentes subordinados, quienes pueden o no comunicarse entre sí, pero deben reportar los resultados al agente principal. Esta forma es conocida como <i>maestro/esclavo</i> y es apta para organizaciones jerárquicas. La segunda alternativa consiste en el uso de una <i>pizarra</i>, donde los agentes depositan mensajes o los recuperan. Es la opción para estructuras organizativas no jerárquicas.</p> <p>En [50] se presenta un sistema desarrollado con una arquitectura de pizarra.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La estructura <i>maestro/esclavo</i> resulta adecuada para agentes que responden al mismo tipo de organización. • El uso de las <i>pizarras</i> presupone homogeneidad entre los agentes coordinados. Por otro lado, si los agentes involucrados son numerosos, pueden generarse severos cuellos de botella.
<i>Contratación</i>	<p>Aquí existe una estructura organizacional descentralizada, donde los agentes pueden asumir dos roles. El primero es desempeñado por un <i>administrador</i> que parte el problema en subproblemas y busca agentes a quienes contrata para que los resuelvan. Estos agentes constituyen el segundo rol, los <i>contratistas</i>. En este tipo de estructura cada agente puede actuar simultáneamente como administrador y contratista. El protocolo más utilizado en este caso es el de <i>Red de contratos</i>.</p> <p>En [18] se describe un sistema que implementa una red de contratos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Resulta adecuada cuando la tarea puede descomponerse en subtareas que presentan un mínimo acoplamiento. • No resuelve conflictos ya que presupone que los agentes intervenientes son benevolentes y no-antagónicos.
<i>Planificación multiagente</i>	<p>A fin de evitar inconsistencias o acciones conflictivas los agentes construyen un plan multiagente que detalla todas las acciones e interacciones futuras requeridas para alcanzar las metas. Esta planificación puede ser centralizada o distribuida. En la <i>planificación centralizada</i> existe un agente coordinador que recibe todos los planes parciales desde los agentes individuales. Un análisis de los mismos le permite identificar potenciales inconsistencias e interacciones conflictivas. El agente coordinador intentará modificar los planes parciales combinándolos en un plan multiagente donde se eliminan las interacciones conflictivas. En la <i>planificación distribuida</i> cada agente cuenta con un modelo de los planes de los otros agentes que le permiten actualizar sus planes individuales a fin de remover conflictos. Para realizar y mantener estos modelos los agentes necesitan comunicarse entre sí.</p> <p>En [26] se presenta una aplicación cuyos agentes se coordinan a través de una planificación descentralizada.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La planificación, <i>centralizada</i> o <i>distribuida</i>, requiere mayores recursos de comunicación y cómputo que las categorías restantes. Esto se debe a que los agentes deben compartir y procesar cantidades importantes de información. • La <i>planificación distribuida</i> resulta de mayor complejidad que la <i>centralizada</i>. La causa de esta situación es la inexistencia de un agente con una visión global del sistema.
<i>Negociación</i>	<p>En [29] se establece que negociar implica un proceso de comunicación a través del cual un grupo de agentes alcanzan un acuerdo mutuamente aceptado respecto a algún tema conflictivo. Una parte significativa de los trabajos en el área de coordinación tratan el tema de la negociación. Esta situación se debe a que muchas de las propuestas involucran algún tipo de negociación entre los agentes.</p> <p>En [19] se describe un sistema que coordina a sus agentes con un protocolo de negociación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La <i>negociación</i> es útil para resolver conflictos es la distribución de tareas o recursos. Por otro lado, requiere que los agentes involucrados presenten una estructura descentralizada.

- **Modelo TuCSoN/Lenguaje ReSpecT [36], [39], [40], [41]:** Se basa en una noción de medio de coordinación programable llamado centro de tupla. Estos centros resultan una ampliación del concepto de espacio de tupla creado por LINDA, donde el comportamiento de cada centro puede ser

extendido o programado acorde con las necesidades de la aplicación. Al igual que en LINDA los agentes interactúan intercambiando tuplas en un espacio de datos compartido, por medio de la convocatoria a alguna de las primitivas que permiten crear, borrar o recuperar tuplas. Este modelo fue

desarrollado para coordinar agentes en aplicaciones de Internet. Así, cada nodo de Internet es propietario de un centro de tupla identificado. Y aunque los agentes perciben a esos centros como espacios de tupla estándares, es posible que debido a su calidad de programables puedan manifestar comportamientos diferentes. Esto se logra a través de un conjunto de tuplas de especificación que regulan las reacciones del centro de tupla ante cada evento de comunicación saliente o entrante. Por esta capacidad dichos centros son considerados por [40] como artefactos de coordinación personalizables de propósito general.

- **Modelo/Lenguaje [2]:** Se basa en las nociones formales de componentes, clases y objetos. Los objetos se comunican anónimamente en forma síncrona o asíncrona por medio del envío o recepción de datos transmitidos a través de canales. Los canales se crean y destruyen dinámicamente. Cada nuevo canal posee un identificador y se conecta inicialmente sólo con su objeto creador. Una vez que tal identificador se comunica a otros objetos utilizando canales existentes, es posible establecer nuevos vínculos, definiendo de esta forma un espacio virtual de objetos interconectados. Dado que los canales pueden ser síncronos o asíncronos, es posible establecer ambos tipos de comunicación.
- **Modelo/Lenguaje KLAIM [3]:** Inspirado en el modelo de coordinación LINDA. KLAIM administra múltiples espacios de tupla a través de los denominados coordinadores de nodos. Con una estructura maestro/esclavo, cada nodo posee un espacio de tupla y procesos en ejecución.
- **Modelo/Lenguaje LOG [13]:** Permite coordinación síncrona y asíncrona. Se basa en el uso de un espacio de datos compartido o pizarra. Cuenta con tres primitivas que al estilo LINDA permiten crear, remover o chequear la presencia de los términos intercambiados por las entidades coordinadas, tales primitivas son tellT, getT y readT.
- **Modelo/Lenguaje SecSpaces [23]:** Posee primitivas para enviar, leer o chequear mensajes en un espacio de datos

compartido, de forma similar a LINDA. No existe desacoplamiento espacial puesto que los receptores y productores de mensajes son identificados y autenticados.

- **Modelo/Lenguaje CoLaS [12]:** Se basa en la noción de grupos de coordinación. Cada grupo es una entidad para la cual se especifica y facilita la coordinación de sus integrantes o participantes quienes se abocan a la realización de una tarea común. Cada participante es un objeto activo que puede enviar y recibir mensajes, y que juega un rol determinado dentro del grupo. La comunicación es asíncrona y tanto los receptores como los generadores de mensajes están debidamente identificados.
- **Modelo/Lenguaje LAURA [44]:** Introduce el concepto de espacio de servicios mediante agentes que piden u ofrecen su realización. Estos servicios se describen mediante estructuras similares a las tuplas utilizadas en LINDA. Existe desacoplamiento espacial y temporal.

A continuación, y para finalizar esta sección, se presenta la Tabla III que resume las similitudes y diferencias detectadas sobre los modelos y lenguajes de coordinación descriptos. Para realizar la comparación se eligieron los siguientes aspectos: el tipo de comunicación, indicando si corresponde sincronía o asíncronía; el tipo de interlocutor, es decir, si se requiere la identificación de los agentes coordinados o pueden operar bajo el anonimato; y por último, la técnica de coordinación utilizada.

VI. CONCLUSIONES

La realización de este trabajo permitió establecer claramente qué abarca el concepto de coordinación en el ámbito de los SMA, así como su vinculación con las dependencias entre acciones y entre agentes. También fue posible identificar y comparar las diferentes clasificaciones a las que actualmente está sujeta la coordinación de agentes. Se describieron brevemente las técnicas utilizadas para coordinar, y se

Tabla 3. Comparación de Modelos y Lenguajes de Coordinación

Modelo/Lenguaje	Comunicación			Interlocutor		Técnica	
	Síncrona	Asíncrona	Anónimo	Conocido	Organización	Negociación	Contratación
<i>LINDA</i>		X	X		X		
<i>ECM/STL</i>	X	X	X	X	X		
<i>IWIN/MANIFOLD</i>	X	X	X		X		X
<i>TuCSoN/ReSpecT</i>	X	X	X	X	X	X	
$\sigma\pi$	X	X	X		X		
<i>KLAIM</i>	X			X	X		
μLOG	X	X	X	X	X		
<i>SecSpace</i>	X			X	X		
<i>CoLaS</i>	X			X	X		
<i>LAURA</i>	X	X			X		X

clarificaron los conceptos de modelo y lenguaje de coordinación. Finalmente, se describieron y compararon algunos desarrollos específicos en el área de la coordinación de agentes.

En particular, la comparación realizada sobre las clasificaciones encontradas, respecto a la coordinación de agentes, permitió concluir que mayoritariamente se tratan de tipos que consideran dependencias inter-agente, donde se manifiestan con igual proporción la capacidad de comunicación síncrona o asíncrona, y la posibilidad de coordinar agentes anónimos o identificados. Sin embargo, son pocos los tipos analizados capaces de administrar la coordinación de ambas situaciones simultáneamente, es decir, tanto comunicación síncrona como asíncrona, y tanto agentes identificados como anónimos.

En cuanto a los modelos y lenguajes de coordinación analizados en este trabajo, se concluyó en que la mayoría fueron creados para soportar una comunicación asíncrona, ya sea para interlocutores anónimos o identificados, en igual proporción, pero donde la técnica de coordinación utilizada se basa mayoritariamente en la observancia de una estructura organizacional.

REFERENCIAS

- [1] Arbab F. (1998). "Coordination and its relevance". In Proc. IEEE International Workshop on Database and Expert Systems Applications, pp. 529-535.
- [2] Arbab F., Bonsangue M. y Boer F. (2000). "A Coordination Language for Mobile Components". In Proc. ACM Symposium on Applied Computing, pp. 166-173.
- [3] Bettini L., Loretto M. y Pugliese R. (2002). "An Infrastructure Language for Open Nets". In Proc. ACM Symposium on Applied Computing, pp. 373-377.
- [4] Botti V. y Julián V. (2000). "Agentes inteligentes: el siguiente paso de la Inteligencia Artificial", Novatica, Vol. 145, pp. 95-99.
- [5] Cabri G., Leonardi L. y Zambonelli F. (1998). "The Impact of the Coordination Model in the Design of Mobile Agent Applications". In Proc. Annual International Conference Computer Software and Applications. IEEE CS Press.
- [6] Cabri G., Leonardi L. y Zambonelli F. (2000). "Mobile-Agent Coordination Models for Internet Applications". IEEE Computer, pp. 82 -89.
- [7] Chen W. y Decker K. (2002). "Coordination Mechanisms for Dependency Relationships among Multiple Agents". In Proc. ACM AAMAS 2002.
- [8] Chen W. y Decker K. (2004). "Managing Multi-Agent Coordination, Planning, and Scheduling". In Proc. ACM AAMAS 2004.
- [9] Ciancarini P. (1996). "Coordination Models and Languages as software Integrators". In ACM Computing Surveys, Vol. 28 (2), pp. 300-302.
- [10] Ciancarini P., Omicini A. y Zambonelli F. (1999). "Coordination Models for Multi-Agent Systems". AgentLink (3), pp. 3-6.
- [11] Ciancarini P., Omicini A. y Zambonelli F. (2000). "Multiagent System Engineering: the Coordination Viewpoint". In Jennings and Lesperance (Edit.) Intelligent Agents VI. Agent Theories, Architectures, and Languages. Vol. 1757 of LNAI, Springer-Verlag, pp. 250-259.
- [12] Cruz J. y Duchase S. (1999). "Coordinating Open Distributed Systems". In Proc. IEEE International Workshop in Future Trends in Distributed Computing Systems, pp. 125-130.
- [13] De Bosschere K. y Jacquet J. (2001). "Synchronous Coordination in the uLog Coordination Model". In Proc. ACM Symposium on Applied Computing, pp. 151-158.
- [14] Dignum V. y Dignum F. (2005). "Task ad Social Coordination in Agent Organizatios". In Proc. ACM AAMAS, pp. 1183-1184.
- [15] Franklin S. y Graesser A. (1996). "Is it an Agent? or just a Program?", In. Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories; Architectures and Languages.
- [16] Ferber J. (1999). Multi-Agent Systems. An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison-Wesley.
- [17] Gelernter D. y Carreiro N. (1992). "Coordination Languages and their Significance". Communications of the ACM. Vol. 35 (2).
- [18] Haugeneder H. y Steiner D. (1998). "Cooperating Agents: Concepts and Applications". In Jennings and Wooldridge (Edit.) Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets, Springer, 175-202.
- [19] Jacobi S., Madrigal-Mora C., León-Soto E., y Fischer K. (2005). "AgentSteel: An agent-based Online System for the Planning and Observation of Steel Production". In ACM Proc. AAMAS, pp.114-119.
- [20] Jennings N. (1996). "Coordination Techniques for Distributed Artificial Intelligence". In O'Hare and Jennings (Edit.) Foundations of Distributed Artificial Intelligence, Wiley, pp. 187-210.
- [21] Krone O., Chantemargue F., Dagaeff T., Schumacher M., y Hirsbrunner B. (1998). "Coordinating Autonomous Entities". In Proc. ACM Symposium on Applied Computing, pp. 149-158.
- [22] Lesser V. (1998). "Reflections on the Nature of Multi-Agent Coordination and Its Implications for an Agent Architecture". Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Vol. 1, Kluwer, pp. 89-111.
- [23] Lucchi R. y Zavattaro G. (2004). "WSSecSpaces: a Secure Data-Driven Coordination Service for Web Services Applications". In Proc. ACM Symposium on Applied Computing, pp. 487-491.
- [24] Maes P. (1994). "Agents that reduce work and information overload", Communication of the ACM, Vol 37(7).
- [25] Malone T. y Crowston K. (1994). "The Interdisciplinary Study of Coordination". In ACM Computing Surveys, Vol. 26 (1), pp. 87-119.
- [26] Marc F., Fallah-Seghrouchni A y Degirmenciyan I. (2003). "Distributed Coordination based on Temporal Planning for Tactical Aircraft Simulation". In Proc. International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp. 1060-1061.
- [27] Mas A. (2005). "Agentes de software y sistemas multiagentes". Pearson Prentice Hall, España.
- [28] Nwana H. (1996). "Software Agents: an overview", The Knowledge Review, Vol. 11 (3), pp. 205-244.
- [29] Nwana H., Lee L. y Jennings N. (1996). "Coordination in software agent systems". BT Technology Journal, Vol. 14 (4), pp. 79-88.
- [30] Omicini A. (2002). "Towards a Notion of Agent Coordination Context", Chapter 12, Process Coordination and Ubiquitous Computing, CRC Press.
- [31] Omicini A., Ricci A., Rimassa G. y Viroli M. (2003). "Integrating

- Objective & Subjective Coordination in FIPA: A Roadmap to TuCSoN". In Proc. Workshop from Objects to Agents WOA, pp. 85-91.
- [32] Omicini A., Ricci A. Viroli M. y Rimassa G. (2004a). "Integrating Objective & Subjective Coordination in Multi Agent Systems". In Proc. ACM Symposium on Applied Computing, pp. 449-455.
- [33] Omicini A., Ricci A. Viroli M., Castelfranchi C. y Tummolini L. (2004b). "Coordination Artifacts: Environment-based Coordination for Intelligent Agents". In Proc. ACM AAMAS, pp. 286-287.
- [34] Omicini A., Ossowski S. y Ricci A. (2004c). "Coordination Infrastructures in Engineering of Multiagent Systems", Chapter 14, Methodologies and Software Engineering for Agent Systems: The Agent-Oriented Software Engineering Handbook. Kluwer.
- [35] Omicini A. y Zambonelli F. (1998). "Tuple Centres for the Coordination of Internet Agents", In Proc. ACM Symposium on Applied Computing, pp. 183-190.
- [36] Omicini A. y Zambonelli F. (1999). "Coordination for Internet Application Development", Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Vol. 2, Kluwer, pp. 251-269.
- [37] Papadopoulos G. y Arbab F. (1998a). "Coordination Models and Languages". In Advances in Computers, Vol. 46, Academic Press, pp. 329-400.
- [38] Papadopoulos G. y Arbab F. (1998b). "Modelling Activities in Information Systems Using the Coordination Language Manifold". In Proc. ACM Symposium on Applied Computing, pp. 185-193.
- [39] Ricci A. y Omicini A. (2002). "Agent Coordination Contexts: Experiments in TuCSoN". In Proc. Workshop From Objects to Agents, pp. 14-21.
- [40] Ricci A. y Omicini A. (2003). "Supporting Coordination in Open Computational Systems with TuCSoN", In Proc. IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises, pp. 365-370.
- [41] Ricci A. y Viroli M. (2005). "A Timed Extension of ReSpecT". In Proc. ACM Symposium on Applied Computing, pp. 420-427.
- [42] Russell S. y Norvig P. (1995). "Artificial Intelligence: A Modern Approach", Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- [43] Schumacher M. (2001). "Objective Coordination in MAS Engineering", Vol. 2039 of LNAI, Springer-Verlag, pp. 33-49.
- [44] Tolksdorf R. (1993). "Laura: A Coordination Language for Open Distributed Systems". In Proc. IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, pp. 39-46,
- [45] Excelente-Toledo C. y Jennings N. (2004). "The Dynamic Selection of Coordination Mechanisms". Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Vol. 9, Kluwer, pp. 55-85.
- [46] Von Martial F. (1992). Coordinating Plans of Autonomous Agents. Springer-Verlag.
- [47] Weyns D., Schumacher M., Ricci A., Viroli M., and Holvoet T. (2005). "Environments for Multiagent Systems". The Knowledge Engineering Review, Vol. 0 (0), Cambridge University Press, pp. 1-15.
- [48] Wooldridge M. (2002). An Introduction to Multi Agent Systems. Wiley.
- [49] Wooldridge M. y Jennings N. (1995). "Intelligent Agents: Theory and Practice", The Knowledge Engineering Review, Vol. 10 (2), pp. 115-152.
- [50] Wulfhorst R., Nakayama L., y Vicari R. (2003). "A Multiagent Approach for Musical Interactive Systems". In ACM Proc. AAMAS, pp. 584-591.
- [51] Zinky J., Siracuse S., y Shapiro R. (2005). "Using QoS-Adaptive Coordination Artifacts to Increase Scalability of Communication in Distributed Multi-Agent Systems". In Proc. IEEE International Conference Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent System KIMAS.



Rosanna Costaguta. Doctora en Ciencias de la Computación, Máster en Ingeniería de Software, Especialista en Enseñanza de la Educación Superior, e Ingeniera en Computación. Profesora e investigadora.

Actualmente se desempeña como Investigadora y Profesora adjunta en la Licenciatura en Sistemas de Información de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, en la Universidad Nacional de Santiago del Estero (Argentina). Sus actividades docentes se desarrollan en las asignaturas Inteligencia Artificial, Base de Datos y Simulación. Sus principales áreas de investigación son: sistemas personalizables, e-learning, técnicas de aprendizaje de máquina y sistemas basados en agentes.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

120 años 
TRABAJO Y RECTITUD