

Informe d'aplicabilitat dels sistemes multi-agent

Francisco Grimaldo, Miguel Lozano, Rafael Sebastián
and Fernando Barber

Departament d'Informàtica, Universitat de València
Av. de la Universitat, s/n, 46100, Burjassot, Spain,
francisco.grimaldo@uv.es

Abstract

Aquest informe tècnic repassa els aspectes més representatius que cal tindre en compte a l'hora d'aplicar els sistemes multi-agent a l'estudi de la mobilitat urbana. En primer lloc, es defineixen els conceptes fonamentals dels sistemes multi-agent i els seus camps d'aplicació clàssics. Posteriorment, s'aprofundeix en el camp de la interacció entre agents i es detallen aspectes com ara comunicació la coordinació i la col·laboració. En acabant s'identifiquen diferents tipus de xarxes d'interacció social. Darrerament, es presenta una revisió de com el modelat multi-agent ha estat usat per altres treballs de l'estat de l'art en el camp de la mobilitat urbana.

1 Sistemes multi-agent

Un agent és una entitat física o virtual capaç d'actuar, de percebre l'entorn i de comunicar-se amb uns altres agents. És autònom, té habilitats per assolir els seus objectius i es troba localitzat a sovint dins d'un sistema multi-agent (*Multi-Agent System* o MAS) [24]. Hom ha definit un MAS com una xarxa feblement acoblada d'agents, els quals interaccionen per resoldre problemes que es troben més enllà de les seues capacitats o del seu coneixement individuals [51]. D'una manera més formal, podem descriure un MAS segons la següent *tupla* $\langle E, O, A, R, Op, L \rangle$, on:

- E - és un entorn dimensional.
- O - és un conjunt d'objectes situats en E .
- A - és un conjunt d'agents que compleix que $A \subseteq O$.
- R - és un conjunt de relacions que enllacen els objectes i els agents de O .
- Op - és un conjunt d'operacions que permeten els agents percebre, produir, consumir, transformar i manipular els objectes.
- L - és un conjunt de lleis universals que representen l'efecte de les operacions al món.

La figura 1a mostra una visió general de l'estructura d'un sistema multi-agent. En la part inferior trobem l'entorn compartit que els agents ocupen.

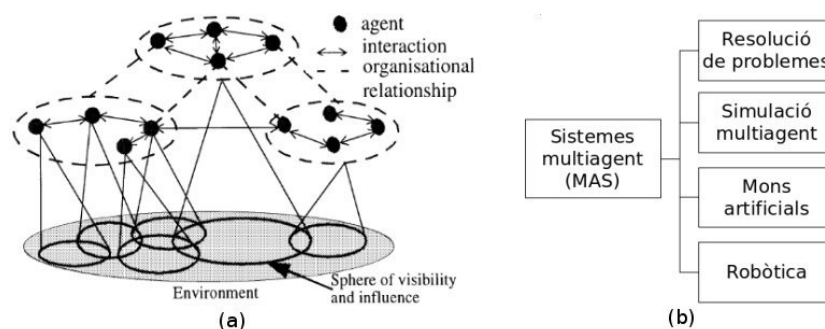


Figure 1: Sistemes multi-agent: (a) visió general i (b) àrees d'aplicació [24].

Cadascun dels agents té una esfera d'influència en aquest entorn, açò és, una porció que pot controlar total o parcialment. Quan l'entorn es controla de forma conjunta amb altres agents, les esferes se solapen. Aquesta intersecció complica la vida dels agents, ja que per aconseguir l'estat del món desitjat, els agents han de tindre en compte també l'actuació d'altres agents. La part superior de la figura mostra les interaccions que es produeixen entre els agents així com les relacions organitzacionals que els lliguen (p. ex. un agent pot ser company d'un altre o tindre autoritat sobre un altre). Atenent a la figura 1b, l'aplicació dels sistemes multi-agent abasta quatre àrees principalment:

Resolució de problemes: L'ús d'un MAS pot ser una bona alternativa a la resolució centralitzada de problemes; bé perquè la natura del problema siga distribuïda o bé perquè la distribució entre un conjunt d'agents supose una forma més eficient d'organitzar la resolució. Alguns exemples són la monitorització distribuïda d'una xarxa, les aplicacions de disseny industrial o els problemes basats en restriccions.

Simulació multi-agent: Els MAS permeten crear dominis artificials que actuen com xicotets laboratoris en els quals provar teories sobre comportaments locals. La simulació multi-agent és utilitzada hui dia per a millorar el coneixement en camps diversos (p. ex. ciències socials, educació, biologia...).

Mons artificials: Els quals poden ser utilitzats per descriure mecanismes d'interacció específics i analitzar el seu impacte en el sistema a nivell global. De manera anàloga al joc de la vida (*Game of Life*) [27], l'objectiu d'aquesta àrea és la construcció de societats d'agents i l'estudi de la seua evolució.

Robòtica: Un robot pot ser concebut com un MAS en què cada agent s'encarrega d'un objectiu específic. La consecució conjunta de tasques més senzilles i concretes farà doncs que l'objectiu global es complete. Així mateix, els MAS poden ser usats per a la coordinació de diversos robots mòbils que es troben situats dins d'un espai comú.

La **intel·ligència col·lectiva** que hom desitja obtenir no pot ser generada amb les tècniques tradicionals de la Intel·ligència Artificial. Aquestes centren l'atenció en els processos cognitius de l'agent i els tracten normalment

com sistemes independents; ja que segueixen la premissa que la intel·ligència és una propietat de l'agent. Ans al contrari, els MAS són estudiats per la d'Intel·ligència Artificial Distribuida (*Distributed Artificial Intelligence* o DAI). La DAI considera que, sense deixar de banda les capacitats cognitives individuals, la intel·ligència sorgeix com el resultat de la **interacció** entre els agents; els quals formen part d'un sistema interconnectat a través de processos socials. En conseqüència, la recerca en MAS s'ha centrat en la interacció, com a base per a l'enteniment del comportament i l'evolució d'un sistema multi-agent. En el següent punt identifiquem diferents tipus d'interacció i definim els models operacionals a què condueixen.

2 Interacció en sistemes multi-agent

La investigació al voltant de les interaccions en sistemes multi-agent sovint ha encunyat el comportament amb adjectius com *coherent*, *col·laboratiu*, *cooperatiu*, *competitiu* o *coordinat*. Diverses aproximacions han tractat d'organitzar i relacionar tots aquests termes, a l'hora de categoritzar amb precisió com interaccionen els agents. Potser una de les més brillants de totes és la taxonomia que considera tots aquests termes com especialitzacions d'un concepte abstracte anomenat **correlació** [41].

La manera més general de mesurar com un conjunt d'agents fan coses junts és mitjançant la seua informació conjunta, també coneguda com entropia conjunta o de correlació. La correlació és un terme teòric que correspon amb la no-independència estadística entre els comportaments dels agents, sense atendre a l'estructura interna ni a l'organització externa. Fonamentalment, un agent està correlacionat quan les seues accions són estadísticament dependents de les accions dels altres. Aquesta dependència provindrà d'un flux d'informació entre un agent individual i l'exterior; és a dir, l'estat de l'entorn i la resta dels agents. Aquest fet fa que l'anàlisi de la comunicació siga de capital importància en l'estudi de la interacció.

2.1 Comunicació

El flux d'informació entre un agent i l'entorn que l'envolta pot trametre's de dues maneres: directament i indirecta. Mentre que la primera duu associat un intercanvi de missatges entre els agents, la segona aprofita la capacitat comunicativa del mateix entorn, el qual pot emmagatzemar informació perquè siga percebuda per altres agents posteriorment. Tocant a la relació entre els agents, distingim dos tipus de comunicació: centralitzada i descentralitzada. En la primera categoria trobem les relacions jeràrquiques en què un agent *cap* mana sobre un agent *subordinat*. Inversament, en la comunicació descentralitzada tots els agents es parlen d'igual a igual, en anglès *peer-to-peer*. La taula 1 classifica diversos **tipus de correlació** depenent del mode de comunicació de la informació i de les relacions entre els agents.

La correlació en una topologia centralitzada pot ser exercida per un agent supervisor fent servir comandaments envers els subordinats o bé modificant certes propietats de l'entorn per restringir de forma indirecta la seua actuació. Un exemple de **comandament** el trobem en un paleta virtual que dóna ordres als seus manobres en una escena 3D. Pel que fa a la **restricció**, el paleta podria

		Relació entre els agents	
		Centralitzada	Descentralitzada
Flux d'informació	Directe	Comandament	Conversa
	Indirecte	Restricció	Competició

Table 1: Categories de comunicació.

proveir els manobres d'un conjunt de recursos determinats perquè realitzaren les seues tasques. La comunicació directa en topologies descentralitzades, també anomenada **conversa**, ha estat tractada extensament per la recerca en negociació entre agents intel·ligents així com pels agents virtuals conversacionals. La comunicació indirecta descentralitzada es produeix quan els agents perceben els canvis de l'entorn a causa de les accions dels altres agents. El problema més comú dins d'aquesta categoria és la **competició**, la qual succeeix quan els agents volen accedir a recursos limitats i compartits.

2.2 Coordinació

Un dels tipus d'interacció emprat més a sovint per la comunitat dels sistemes multi-agent és la **coordinació**. Hom pot concebre la coordinació com un cas específic de correlació en què hi ha implicat un procés de **comunicació** entre l'agent i el context que l'envolta. D'acord amb Bergenty i Ricci [5], la coordinació en MAS ha fet servir diferents formalismes que podem classificar en les següents vessants: centres de tuples, protocols d'interacció, semàntica dels llenguatges de comunicació d'agents. Totes tres tenen els seus avantatges, però també reben certes crítiques.

Els **centres de tuples** segueixen la filosofia dels models de pissarra, en els quals no es requereix contacte ni físic ni temporal entre els agents. El seu ús comporta una solució no acoblada per a la coordinació, ja que la comunicació i el processat es realitza en els centres de tuples; és a dir, fora dels agents. En conseqüència, aquests models són adequats en entorns dinàmics i oberts. Tanmateix, els seus crítics addueixen que són sistemes limitats per raó de la centralització i del fet que freqüentment només atenen el comportament observable dels agents i no realitzen cap suposició sobre les actituds mentals.

Els **protocols d'interacció** són descrits mitjançant una màquina d'estats finits. Els estats d'un protocol identifiquen els estadis en què els agents poden estar al llarg de la comunicació i les transicions representen els missatges intercanviats entre un emissor i un receptor. Diversos llenguatges de comunicació d'agents (*Agent Communication Languages* o ACL) han estat desenvolupats. Els més destacats són KQML [25] i FIPA ACL [26]. Ambdós basen la comunicació en un intercanvi asíncron de missatges. Els missatges s'estructuren seguint la teoria coneguda com actes de la parla (de l'anglès *speech-acts*), la qual fa servir fonamentalment dos camps: el verb corresponent al tipus de missatge (nomenat *performative*) i el contingut intercanviat. Els protocols d'interacció han estat reprovats per la seua escassa descripció formal (p. ex. les màquines d'estats no solen especificar formalment el contingut dels missatges). Altres crítiques han vingut de l'alt nivell d'acoblament d'aquesta solució, que moltes vegades fa que una part útil del codi de l'agent es trobe barrejada amb codi exclusiu per a

la comunicació.

La **semàntica dels ACL** aposta per la introducció de les accions comunicatives en el procés de planificació d'un agent, junt amb la resta d'accions possibles. En aquest context, les lleis de coordinació emergeixen de la interacció entre els objectius de l'agent i les restriccions en la consecució dels susdits objectius. Açò és, són el resultat dels efectes i les precondicions dels missatges i de les accions realitzades per l'agent. Llavors, la interacció no està dissenyada d'antuvi sinó que sorgeix com a resultat del procés de planificació, una missió força complexa per un planificador quan el món deixa de ser trivial.

2.2.1 Coordinació de plans

El problema de la coordinació de plans en entorns multi-agent (*Multiagent Plan Coordination Problem* o MPCP) apareix quan un conjunt d'agents ha de planificar la seua actuació de manera individual però poden traure profit amb la coordinació dels seus plans. Diferents perspectives han estat estudiades dins del MPCP [21, 18]. La coordinació amb **agents especialitzats** és un exemple en què els individus són dotats amb la capacitat exclusiva de realitzar certes accions [35] o de manipular certs objectes [9]. Aquesta aproximació redueix la complexitat del problema de coordinació però crea agents predictibles. Nogensmenys, els individus orientats a realitzar tasques en un món simulat generalment comparteixen les capacitats d'actuació; cosa que fa molt important la consideració del grau de dependència entre les activitats i els objectius dels agents.

Cox i Durfee [17] han introduït recentment una tècnica eficient de **post-planificació** per a produir plans òptims i coordinats en agents quasi independents. Hi ha tot un seguit d'investigacions en coordinació que versen sobre com sincronitzar de forma eficient els plans després que aquests ja hagen estat construïts [28, 22, 57]. Un exemple ben representatiu és *Generalized Partial Global Planning* (GPGP) [19]. En aquesta aproximació els plans amb les accions que volen realitzar els agents són intercanviats. Posteriorment, els agents barregen aquests plans i ordenen les accions fent servir unes relacions que informen sobre quines poden facilitar l'execució d'altres (veure la figura 2). El criteri és maximitzar una funció d'utilitat global que normalment està associada amb la rapidesa en l'execució del pla. Tot i això, l'ús de plans complets resultat d'una fase de post-planificació no és recomanable en els entorns de simulació. L'alt dinamisme d'aquests entorns, on els usuaris i els personatges actuen de manera asíncrona, farà que els plans siguin inaplicables en poc de temps i hagen de ser avortats. La coordinació en entorns asíncrons ha estat tractada amb agents que intercalen planificació i acció [21]. De vegades, la coordinació s'ha aconseguit mitjançant planificadors STRIPS amb noves precondicions; les quals representen restriccions que s'apliquen en temps de planificació [7]. Unes altres vegades, és una fase de **pre-plafinificació** la que aplica algun tipus de restricció, com per exemple certes lleis socials [47].

Com ja hem dit, la correlació mostrada per una població d'agents és un terme abstracte que no fa referència ni a l'organització externa de la societat ni a l'estructura interna de l'agent. L'estudi dels processos de comunicació i de les interrelacions entre els agents ens ha dut a l'anàlisi de la coordinació. En el següent punt analitzem la col·laboració com una expressió de la lògica interna d'un agent.

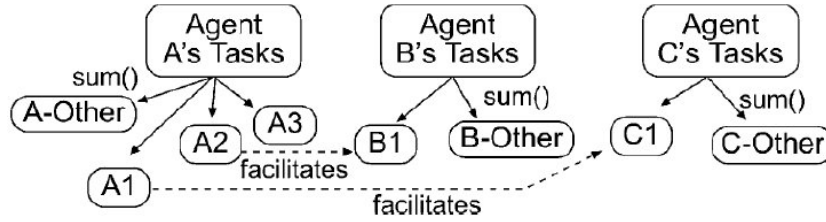


Figure 2: Exemple d'ordenació de les tasques de tres agents en GPGP.

2.3 Col·laboració

Una societat artificial pot mostrar correlació sense que els seus membres tinguin cap intencionalitat envers els altres. Per exemple, en la competició per un recurs compartit, uns agents podrien coordinar-se mentre romanen lliures de malícia o de bondat. Tanmateix, hom pot identificar dos tipus especials de correlació que apareixen lligats a les intencions internes d'un agent: la **cooperació** i la **contenció**. La cooperació requereix l'existència d'unes intencions de treball conjunt amb la resta d'agents. Ben al contrari, la contenció implica la determinació de frustrar les intencions d'un altre. Llavors, és fàcil comprendre perquè aquests qualificatius només haurien de ser atribuïts als agents cognitius; els quals tracten d'imitar les representacions i els processos cognitius humans. La cooperació no duu associada que la comunicació entre els agents haja de ser directa o indirecta. Un cas que mereix especial atenció és aquell que es produeix quan els agents cooperen i conversen directament, situació reconeguda com **col·laboració**.

Una peça clau en l'estudi del treball en equip (*teamwork*) ha estat la **teoria de les intencions conjunes** (*joint intention theory*) [14]. Segons aquesta teoria, la formació d'un equip necessita: a) que tots els agents implicats hagen adquirit el compromís d'aconseguir un objectiu comú i b) que reben aquest mateix compromís de la resta de membres de l'equip. Wooldridge i Jennings desenvoluparen un model formal de resolució col·laborativa de problemes basat en l'ús de compromisos conjunts així com de convencions o normes per definir l'admissibilitat d'un compromís [56]. Aquest paradigma ha inspirat diverses arquitectures de simulació multi-agent. Destacats en aquest àmbit són els treballs realitzats per Milind Tambe sobre el seu sistema STEAM [52]. STEAM utilitza un líder centralitzat per a la formació dels equips i la resolució de conflictes. Aquest agent divideix els objectius globals de l'equip en subobjectius que hauran de ser aconseguits per rols diferents. Una vegada assignats els rols, se suposa que els membres de l'equip poden completar les seues tasques de manera independent (veure la figura 3). Malauradament, aquesta situació ideal és difícil d'aconseguir en els mons simulats, on diferents actors poden interferir quan executen les seues accions.

Els **plans compartits** (*SharedPlans*) [31] han tractat la col·laboració com el problema d'elaborar un pla conjunt que tinga en compte l'estat mental i els objectius de múltiples participants. Aquesta aproximació necessita que els agents coneguen de primer moment el model de l'equip, és a dir, totes les actuacions possibles per aconseguir l'objectiu (encara que d'algunes no tinguin detalls específics perquè no les faran ells). Així mateix, hauran d'acordar certs procediments de decisió, com ara l'assignació d'agents a accions, de manera que

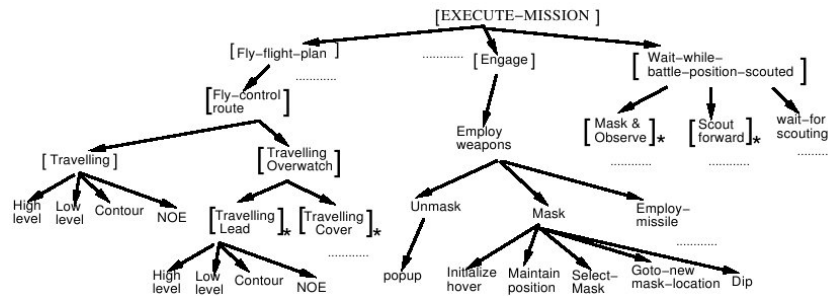


Figure 3: Descomposició d'una missió d'atac militar [52]. Els operadors marcats amb * corresponen a operadors d'equip.

puguen completar el pla global. *SharedPlans* s'ha aplicat amb èxit en diferents dominis: des del comerç electrònic a interfícies col·laboratives en sistemes d'aprenentatge a distància.

Finalment, la **delegació** de tasques també ha estat emprada per obtenir col·laboració en societats amb un model jeràrquic de responsabilitat [33]. Dins d'aquestes societats, alguns agents líders poden encarregar l'execució de certes tasques directament a altres agents subordinats. Un sistema influent en aquesta àrea és *Open Agent Architecture* (OAAA) [39]. Aquest sistema fa servir un *facilitador* de serveis com ara: la comunicació entre agents distribuïts o la subdivisió de tasques complexes en trossos més menuts que puguin ser executats independentment per múltiples agents. En comptes d'usar un agent facilitador central, el sistema RETSINA [29] fa servir la tècnica de les pàgines grogues (directoris d'agents que ofereixen certes capacitats). RETSINA intercala planificació amb execució i dóna suport a la col·laboració mitjançant un planificador que modela les tasques a través de xarxes jeràrquiques de tasques (HTN). Per tant, els actes comunicatius es troben predefinitos en l'arbre HTN. Llavors, el planificador en temps d'execució pot sol·licitar informació així com l'execució d'accions a un altre agent i suspendre eixa línia d'actuació fins que arribi el resultat.

La recerca en MAS ha estudiat els diferents tipus de correlació com un mecanisme per desenvolupar sistemes més productius. Nogensmenys, la racionalitat no és l'únic camí per aconseguir la **congruència**, definida com el grau en què les interaccions entre els agents satisfan les expectatives generals del sistema. Per exemple, els agents sovint operen en entorns compartits amb recursos limitats, cosa que apunta a l'ús de tècniques de coordinació i col·laboració. Aleshores, hom espera que aquestes relacions socials també es manifesten en el seu comportament. El raonament social ha estat estudiat profusament en la comunitat dels MAS per incorporar **elements socials** en els agents cognitius [16, 15]. Com a resultat, els models d'interacció entre els agents han evolucionat cap a les xarxes socials, les quals tracten d'imitar les estructures socials que hom pot trobar a la realitat [32].

3 Xarxes d'interacció social

La component social de la interacció ha rebut una atenció considerable en el camp dels sistemes multi-agent [34, 10]. La recerca d'elements socials que in-

fluencien la presa de decisions dels membres d'una societat artificial ha versat sobre temes com ara: els **rols**, les **relacions** de poder o confiança, les **normes**, les **preferències** dels agents, etc. De manera general, podem afirmar que tot agent immers en un grup juga un paper o rol; el qual determina les seues responsabilitats. Així mateix, els rols d'una societat defineixen sovint relacions entre els agents (p. ex. la relació de poder que existeix entre un agent líder i un subordinat). Aquestes relacions poden fer-se més complexes i arribar a construir xarxes que representen l'estructura d'una organització. Llavors, l'actuació dels agents es veu restringida, ja que han d'obeir una sèrie de regles o normes dins de l'organització. En aquest context, els agents poden canviar d'un grup a un altre quan les seues preferències internes no coincideixen amb els requeriments de l'organització. Hi ha un ampli ventall de treballs que han tingut com assumpte les normes i els contractes de compromís per formalitzar les restriccions que defineixen els comportaments acceptables dins d'una organització [47, 1]. L'anàlisi exhaustiva d'aquest problema queda fora de l'abast d'aquest informe.

Les organitzacions i les **xarxes socials** humanes han estat un tema d'estudi durant molt de temps [46]. L'objectiu de l'anàlisi de les xarxes socials és comprendre els lligams entre els individus (com els individus es relacionen els uns amb els altres) així com extraure certes propietats associades al grup sencer. La forma més comuna de representar les relacions socials d'un grup és mitjançant un **sociograma**. Un sociograma és un graf on els nodes solen representar agents o predicats mentre que els arcs que els enllacen corresponen a les relacions. Identifiquem tres categories principals de xarxes socials atenent al significat d'aquests arcs: a) les xarxes de dependència, b) les xarxes de confiança i c) les xarxes de preferència.

3.1 Xarxes de dependència

L'autonomia dels agents es troba de vegades limitada per xarxes d'interdependència, on els agents depenen els uns dels altres per aconseguir els seus propis objectius. La **teoria de la dependència**, proposada per diversos autors [12, 48], considera que un agent i és dependent d'un altre agent j pel que fa a un objectiu p quan: i manca almenys d'una de les accions o recursos necessaris per assolir p , mentre que j pot realitzar la susdita acció o està en possessió del recurs adient. Al contrari, hom diu que l'agent j té poder sobre l'agent i . Per exemple, un treball conjunt en equip pot ser representat com una agregació on cada agent depén de la resta per arribar a obtenir un objectiu compartit (veure la xarxa completa de la figura 4a). Els entorns de mercat també poden ser vists com xarxes de dependència, encara que menys cohesionades (veure la figura 4b). En aquests entorns, el desig comú perquè el mercat genere beneficis fa que les empreses implicades facen tractes i tinguen socis de negocis [15].

La teoria de la dependència dóna resposta, així, a les dues preguntes fonamentals en una societat d'agents autònoms. Un agent aconsegueix que el seu objectiu personal esdevinga social, açò és, que siga adoptat per uns altres agents, gràcies al seu poder social sobre aquests. De manera anàloga, un agent autònom forma part d'una interacció social per raó de la dependència social que el lliga a un altre agent.

El **raonament social** [49] es basa en la teoria de la dependència per implementar la formació dinàmica de coalicions. El disseny de l'estructura d'una organització amb una xarxa de dependència és interessant. Nogensmenys, el

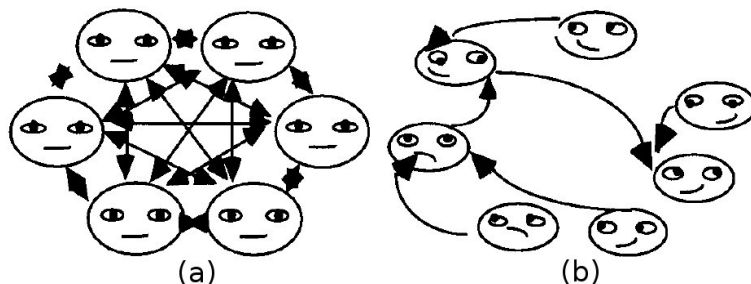


Figure 4: Exemples de xarxes de dependència: a) treball conjunt en equip i b) entorn de mercat.

model de l'organització no pot ser concebut en temps de disseny als mons oberts, on els agents poden unir-se i deixar la societat en qualsevol moment. Com que aquest tipus d'agents normalment no disposa d'una representació correcta i completa dels altres, aquesta aproximació incorpora un procediment de revisió de creences. Finalment, el model distingeix dos tipus d'interaccions socials d'acord amb les coalicions acceptades: la cooperació (diversos agents que treballen de forma conjunta per assolir un objectiu comú) i l'intercanvi social (diversos agents que treballen de forma conjunta per assolir diferents objectius individuals).

3.2 Xarxes de confiança

Els agents sovint són considerats entitats autònomes en les quals no és possible exercir control sobre el seu comportament intern. Dins d'un MAS, els agents es veuen involucrats en la realització de tasques col·lectives que requereixen la cooperació i la refiança en altres agents. La possibilitat que un agent no es comporte de manera correcta, intencionadament o no, produeix riscos de fiabilitat i robustesa a nivell del sistema, especialment en el cas de sistemes oberts. Hom ha proposat com a solució l'ús de **models de confiança** (*trust models*). Un dels primers treballs en models de confiança fou el realitzat per Steve Marsh al Regne Unit [38]. El seu model distingeix tres nivells de confiança: bàsic, general i situacional. La confiança bàsica (*Basic Trust*) és l'actitud general de l'agent per confiar en els altres. La confiança general (*General Trust*) correspon amb la confiança genèrica dipositada sobre un agent concret. Finalment, la confiança situacional (*Situational Trust*) és l'actitud de confiança envers els altres en circumstàncies específiques.

Els models de confiança proveeixen els agents amb models d'altres agents perquè puguin decidir si confien en ells o no. Habitualment, la font d'informació que s'empra en la presa de decisions confiada és la **reputació** [11]. Paradoxalment, no existeix una definició comunament acceptada per aquest terme. De bell principi, la reputació fou considerada un valor únic, associat a un agent i mantingut pel sistema, que podia fer referència a la diligència. Les xarxes socials han permès que dos agents tinguin opinions diferents sobre la reputació d'un tercer [43]. Darrerament, ha estat proposada una ontologia funcional de reputació per permetre la interoperabilitat entre diferents models de confiança [54].

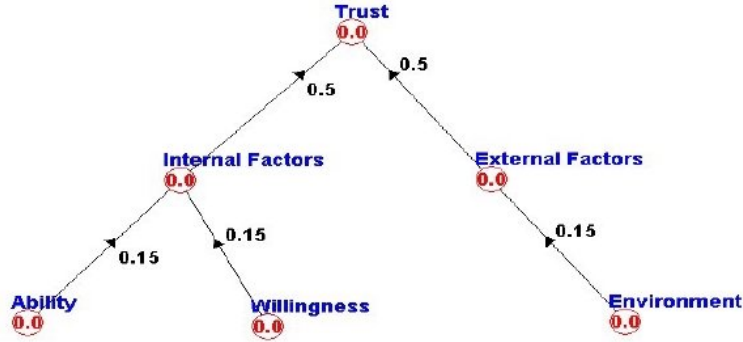


Figure 5: Estratègia de delegació de tasques amb diversos criteris de confiança definida en [23].

Això no obstant, a l'hora de confiar o delegar tasques en una xarxa de confiança, altres fonts d'informació també poden ser tingudes en compte. Per exemple, el treball de Rino Falcone [23] fa servir com a estratègia de delegació, les habilitats per a executar certes tasques (*ability*) o la predisposició per adoptar tasques externes (*willingness*). A més a més, incorpora un mecanisme per alterar aquests valors en funció de l'estat de l'entorn (veure la figura 5).

3.3 Xarxes de preferència

Hom pot entendre la presa de decisions com el procés cognitiu que permet seleccionar una alternativa d'entre un conjunt de possibilitats. En entorns col·lectius, com ara els sistemes multi-agent, aquestes decisions haurien de tindre en compte també les opinions externes. D'acord amb açò, les xarxes de preferència permeten que els agents expressen les seues **preferències individuals** mitjançant una relació d'ordre sobre el conjunt d'alternatives. Mentre que aquest conjunt siga reduït, els problemes són computacionalment senzills. Tanmateix, molts problemes presenten un conjunt d'alternatives amb estructura combinatòria. Llavors, l'elecció del llenguatge de preferència ha estat un problema tractat pregonament en el camp de la selecció social (*social choice*) [37]. En la pràctica, els agents normalment expressen les seues preferències fent servir **funcions d'utilitat**. El propòsit d'una funció d'utilitat és assignar un valor numèric que expresse l'opinió de l'agent sobre cadascuna de les solucions a un problema donat. Una antiga qüestió que afecta les funcions d'utilitat fa referència a la dificultat d'expressar una decisió humana en termes numèrics. Aquesta dificultat, apuntada ja per Jacques Ferber [24], encara resta per resoldre i necessitarà l'aportació d'altres àrees de coneixement com ara la filosofia i la psicologia.

La teoria de la selecció social no determina un mecanisme concret per a l'obtenció d'aquestes preferències. Depenent de la natura del problema, s'han utilitzat diversos **protocols** [44] com ara: les tècniques de votació, les subhastes, la negociació bilateral, la negociació distribuïda, etc. Des d'un punt de vista estratègic, la teoria de jocs (*game theory*) [40] ha estat la branca de les ciències econòmiques encarregada d'estudiar la presa de decisions en aquests contextos en què els agents no han de ser necessàriament veraxos.

Una vegada han estat obtingudes les preferències dels agents de la societat,

Solucions/CUFs	Utilitària ($\sum$)	Igualitària (min)	Elitista (max)
Anar al cinema	7	3	4
Anar al teatre	10	2	8

Table 2: Diferents benestars socials expressats amb CUFs.

cal computar quina és la solució socialment més adequada. Aquest problema ha estat tractat sota el formalisme de la repartició de recursos en entorns multi-agent (*Multi-Agent Resource Allocation* o MARA) [13]. A l'hora de prendre aquesta decisió, MARA empra el concepte de benestar social (*social welfare*) provinent de l'economia del benestar (*Welfare Economics*). Aleshores, les funcions de benestar social s'usen per definir diversos ordres socials per mitjà de l'agregació de les preferències individuals. En el cas habitual en què les preferències s'expressen mitjançant funcions d'utilitat, l'**ordre social** es defineix a través de **funcions d'utilitat col·lectives** (*Collective Utility Functions* o CUF) [45].

Per entendre el funcionament de les xarxes de preferència, imaginem el següent joc mental: "*Oriol i Marta volen eixir una nit i es plantegen dues possibilitats: anar al cinema o anar al teatre. Suposem que Oriol gaudeix més del teatre i que li assigna un valor 8, mentre que la utilitat que dona a anar al cinema és 3. Al contrari, les preferències de Marta són contràries i menys vehements, 4 per anar al cinema i 2 per anar al teatre*". La taula 2 mostra els diferents ordres socials. Una societat utilitària agafarà aquella solució que maximitza la utilitat total del grup (sumatori de les utilitats), mentre que una societat igualitària agafarà aquella solució que beneficia el més feble del grup (mínim de les utilitats). Finalment, una societat elitista agafarà aquella solució que seguirà les preferències de qui més pot guanyar amb la resolució del problema (màxim de les utilitats).

En les xarxes de preferència, la capacitat d'un agent de modificar amb un diferencial d'importància les preferències rebudes per altres agents permet la definició d'**actituds socials** [8]. Per exemple, un agent egoista reduiria les utilitats rebudes enfortint d'aquesta manera la seua opinió. Al contrari, un humanoide altruista incrementaria les utilitats rebudes en detriment de la seua preferència.

Les aproximacions basades en MARA han estat aplicades en un rang molt ample d'aplicacions reals [13]: gestió de trànsit aeri, logística, aprovisionament industrial, explotació conjunta de satèl·lits d'observació de la Terra, assignació de recursos en arquitectures mallades (*grid computing*), etc. En aquest projecte proposarem el seu ús per a la presa de decisions socials.

4 Modelat multi-agent de la mobilitat urbana

Existeixen plataformes que s'han enfrontat al problema de simular la mobilitat en àrees metropolitanes (p. ex. UrbanSim [55]). Aquests sistemes segueixen, fonamentalment, una aproximació basada en aspectes espacials per a simular àrees urbanes de gran escala amb divisions geogràfiques de tipus graella, per zones o per parcel·les. Alguns d'aquests sistemes han estat usats per a fer recerca en escenaris de selecció de rutes. Per exemple, la paradoxa de Braess

(un fenomen ben conegut: afegir una nova carretera a una xarxa de tràfic pot no reduir el temps total de viatge dels seus usuaris) s'estudia en [3] per a analitzar els efectes de donar recomanacions de rutes als conductors amb l'objectiu de dirigir-los cap a una situació en la qual els efectes de la paradoxa es redueixen.

La selecció de rutes, així com també la coordinació i el control de semàfors, ha estat també estudiada en [50, 36] mitjançant una aproximació microscòpica. Dins aquest context, el simulador SUMO (Simulation of Urban Mobility) [4] és un paquet de simulació de fluxos de trànsit de codi obert que permet simular el funcionament de grans ciutats en funció del comportament de vehicles i passatgers individuals. Des de 2001, SUMO ha estat millorat per a simular trànsit intermodal i pot ser usat per a simular la comunicació entre diferents entitats. Així, doncs, permet simular nous modes de transport i executar desplaçaments generats per un model de demanda (que no és part de SUMO, ací la font d'entrada és externa) per a poder mesurar els efectes en termes de temps, trànsit, energia, contaminació, etc. D'una altra banda, MATSim [2] és una ferramenta amb què implementar simulacions de trànsit de gran escala amb una aproximació multi-agent. Actualment, MATSim ofereix capacitats per a generar models de demanda, simulacions de fluxos de trànsit basat en agents, replanificació, un controlador per a executar simulacions de manera iterativa i mètodes per a analitzar els resultats generats per aquests mòduls. En [53] els autors presenten diferents escenaris de congestió de trànsit sobre els que apliquen tècniques d'aprenentatge per reforç per a optimitzar els paràmetres principals del model. Els agents, que disposen de les seues pròpies funcions temporals, aprenen com coordinar les seues accions amb les de la resta d'agents. Per exemple, el treball mostra com els actors que pretenen solament optimitzar el seu objectiu temporal personal condueixen a un funcionament pobre de la mobilitat des del punt de vista de la funció objectiu del gestor de la ciutat.

L'aproximació seguida per aquest projecte se centra en els aspectes socials de la presa de decisions dels agents. Els models socials i de tipus organitzatiu han estat estudiats dins del context dels sistemes multi-agent amb l'objectiu de regular l'autonomia dels agents auto-interessats. Hui dia, el funcionament d'un MAS està determinat no només per les seues capacitats deliberatives sinó també pel seu grau de sociabilitat. En aquest sentit, la sociabilitat fa referència a la capacitat de comunicar, cooperar, col·laborar i formar aliances, coalicions i equips. L'assignació d'individus a estructures organitzatives succeeix comunament en les societats humanes [42]. Aquestes organitzacions poden ser vistes com el conjunt de restriccions de comportament que els agents adopten, per exemple, quan decideixen interpretar un cert rol [20].

Aquest projecte té com a objectiu el desenvolupament d'un simulador per a l'estudi de la mobilitat urbana fent servir la plataforma multi-agent de propòsit general Jason [6]. L'elecció d'aquesta plataforma en detriment d'altres plataformes de simulació multi-agent (p.ex. Repast) suposa dos beneficis clau per al projecte. En primer lloc, la nostra aproximació centrada més en la presa de decisions dels agents que en la simulació espacio-temporal del problema es beneficiarà del modelat BDI dels agents que realitza Jason. Pensem que el modelat BDI dels agents és més adient per a descriure la simulació i els seus resultats. En segon lloc, i d'acord amb la visió preferencial de les xarxes d'interacció presentades en la secció anterior, el projecte proposa emprar un mecanisme basat en el mercat per a la presa de decisions socials anomenat MADeM (Multi-modal Agent Decision Making) [30]. Aquest model és capaç de simular diferents tipus de benestars

socials (p. ex. elitista, utilitari) així com diverses actituds socials dels seus membres (p. ex. altruisme, egoisme). El susdit mecanisme està ja implementat com una llibreria de codi obert sobre Jason, coneguda com J-MADeM i l'elecció d'una altra plataforma de simulació haguera requerit la implementació de MADeM de bell nou. En concret, es plantegem usar la llibreria J-MADeM per a modelar les decisions que cada habitant ha de prendre quan decideix amb quin mitjà de transport va a treballar cada dia (p. ex. tren, cotxe, cotxe compartit, etc.). Tot plegat, el principal objectiu del sistema proposat és el seu ús per a la recerca en plataformes de suport a la decisió de planificació metropolitana.

References

- [1] T. Agotnes, W. V. der Hoek, J. A. Rodríguez-Aguilar, C. Sierra, and M. Wooldridge. On the logic of normative systems. In *Proc. of IJCAI07: International Joint Conference on AI*, pages 1175–1180. AAAI Press, 2007.
- [2] M. Balmer, M. Rieser, K. Meister, D. Charypar, N. Lefebvre, K. Nagel, and K. Axhausen. MATSim-T: Architecture and Simulation Times. pages 57–78, 2009.
- [3] A. L. C. Bazzan and F. Klugl. Case studies on the braess paradox: Simulating route recommendation and learning in abstract and microscopic models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13(4):299–319, 2005.
- [4] M. Behrisch, L. Bieker, J. Erdmann, and D. Krajzewicz. Sumo - simulation of urban mobility: An overview. In *SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, Barcelona, Spain, 2011.
- [5] F. Bergenty and A. Ricci. Three approaches to the coordination of multi-agent systems. In *Proc. of Symposium on Applied Computing*, pages 367–372. ACM Press, 2002.
- [6] R. H. Bordini, J. F. Hübner, and M. Wooldridge. *Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak using Jason*. Wiley, 2007.
- [7] C. Boutilier and R. I. Brafman. Partial order planning with concurrent interacting actions. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 14:105–136, 2001.
- [8] S. Brainov and T. Sandholm. Power, dependence and stability in multi-agent plans. In *Proc. of AAAI '99/IAAI '99: 6th national conference on Artificial intelligence and 11th Innovative Applications of Artificial Intelligence conference*, pages 11–16, Menlo Park, CA, USA, 1999. American Association for Artificial Intelligence.
- [9] M. Brenner. A multi-agent planning language. In *Proc. of ICAPS'03 Workshop on PDDL*, 2003.
- [10] C. Castelfranchi. Modeling social action for ai agents. *Artificial Intelligence*, 103:157–182, 1998.

- [11] C. Castelfranchi and R. Falcone. Principles of trust in MAS: cognitive anatomy, social importance and quantification. In *Proc. of ICMAS'98*, pages 72–79, Paris, 1998.
- [12] C. Castelfranchi, M. Miceli, and A. Cesta. Dependence relations among autonomous agents. In *Proc. of MAAMAW'92*, pages 215–227, Amsterdam, 1992. Elsevier Science Publishers.
- [13] Y. Chevalere, P. E. Dunne, U. Endriss, J. Lang, M. Lemaitre, N. Maudet, J. Padget, S. Phelps, J. A. Rodriguez-Aguilar, and P. Sousa. Issues in multiagent resource allocation. *Informatica*, 30:3–31, 2006.
- [14] P. Cohen and H. Levesque. Teamwork. *Nous, Special Issue on Cognitive Science and AI*, 1991.
- [15] R. Conte. Artificial social intelligence: a necessity for agent systems' developments. *Knowledge Engineering Review*, 14:109–118, 1999.
- [16] R. Conte and C. Castelfranchi. *Cognitive and Social Action*. UCL Press, London, 1995.
- [17] J. S. Cox and E. H. Durfee. An efficient algorithm for multiagent plan coordination. In *Procs. of AAMAS'05: Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, pages 828–827, 2005.
- [18] M. M. de Weerdt. Plan coordination. In *Proceedings of the Doctorial Consortium of the International Conference on AI Planning and Scheduling*, pages 142–145, 2003.
- [19] K. S. Decker and V. R. Lesser. *Readings in Agents*, chapter Designing a family of coordination algorithms. Elsevier, 1997.
- [20] V. Dignum and F. Dignum. Modelling agent societies: Co-ordination frameworks and institutions. In P. Brazdil and A. Jorge, editors, *Procs. of the 10th Portuguese Conference on Artificial Intelligence (EPIA'01)*, volume 2258 of *LNAI*, pages 191–204, Berlin, 2001. Springer.
- [21] E. H. Durfee. *A modern approach to distributed artificial intelligence: Distributed Problem Solving and Planning*, chapter 3. The MIT Press, 1999.
- [22] E. Ephrati and J. S. Rosenschein. Divide and conquer in multi-agent planning. In *Procs. of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-94)*, pages 375–380, Menlo Park, CA, 1994. AAAI Press.
- [23] R. Falcone, G. Pezzulo, C. Castelfranchi, and G. Calvi. Why a cognitive trustier performs better: Simulating trust-based contract nets. In *Proc. of AAMAS'04: Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, pages 1392–1393. ACM, 2004.
- [24] J. Ferber. *Multi-Agent Systems: An introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley Publishing Company, Longman, 1999.
- [25] T. Finin, R. Fritzson, D. McKay, and R. McEntire. KQML as an agent communication language. In *Proc. of CIKM'94*. ACM Press, 1994.

- [26] FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents). FIPA ACL specifications. Available at <http://www.fipa.org>, February 2008.
- [27] M. Gardner. MATHEMATICAL GAMES: The fantastic combinations of john conway’s new solitaire game ”life”. *Scientific American*, 223:120–123, 1970.
- [28] M. P. Georgeff. Communication and interaction in multi-agent planning. In *Proceedings of the Third National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-83)*, pages 125–129, Menlo Park, CA, Aug. 1983. AAAI Press.
- [29] J. A. Giampapa and K. Sycara. Team-oriented agent coordination in the RETSINA multi-agent system. Tech. report CMU-RI-TR-02-34, Robotics Institute-Carnegie Mellon University, 2002.
- [30] F. Grimaldo, M. Lozano, and F. Barber. MADeM: a multi-modal decision making for social MAS. In *Proc. of AAMAS’08: Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, pages 183–190. ACM, 2008.
- [31] B. Grosz, L. Hunsberger, and S. Kraus. Planning and acting together. *AI Magazine*, 20(4):23–34, 1999.
- [32] H. Hexmoor. From inter-agents to groups. In *Proc. of ISAI’01: International Symposium on Artificial Intelligence*, 2001.
- [33] T. Ioeger and J. Johnson. A formal model of responsibilities in agent-based teamwork. *Applied Artificial Intelligence*, 15(10):875–916, November 2001.
- [34] N. Jennings and J. Campos. Towards a social level characterisation of socially responsible agents. In *Proc. of Software Engineering*, volume 144, pages 11–25. IEEE, 1997.
- [35] S. Kambhampati, M. Tanenbaum, and S. Lee. Combining specialized reasoners and general purpose planners. In *Proceedings of the 9th National Conference on Artificial Intelligence*, 1991.
- [36] D. Krajzewicz, E. Brockfeld, J. Mikat, J. Ringel, C. Rössel, W. Tuchscheerer, P. Wagner, and R. Wösl. Simulation of modern Traffic Lights Control Systems using the open source Traffic Simulation SUMO. 2005.
- [37] J. Lang. Some representation and computational issues in social choice. In *Proc. of . ECSQARU’05*, pages 15–26, 2005.
- [38] S. Marsh. *Formalizing Trust As a Computational Concept*. PhD thesis, University of Stirling, U.K., April 1994.
- [39] D. Martin, A. Cheyer, and D. Moran. The open agent architecture: A framework for building distributed software systems. *Applied Artificial Intelligence*, 13(1/2):91–128, 1999.
- [40] M. Osborne. *An Introduction to Game Theory*. Oxford University Press, 2004.
- [41] H. V. D. Parunak, M. Fleishcher, S. Brueckner, and J. Odell. Co-x: Defining what agents do together. In *Workshop on Teamwork and Coalition Formation, AAMAS*, 2002.

- [42] M. Prietula, K. Carley, and L. Gasser, editors. *Simulating Organizations: Computational Models of Institutions and Groups*. AAAI Press / MIT press, 1998.
- [43] J. Sabater and C. Sierra. Reputation and social network analysis. In *Proc. of AAMAS'02: International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, pages 475–482, July 2002.
- [44] T. Sandholm. Contract types for satisficing task allocation: I theoretical results. In *Proc. of AAAI Spring Symposium: Satisficing Models*, 1998.
- [45] T. Sandholm and S. Suri. Side constraints and non-price attributes in markets. In *Proc. of IJCAI Workshop on Distributed Constraint Reasoning*, 2001.
- [46] J. Scott. *Social network analysis: A handbook*. Sage publications, London, 1991.
- [47] Y. Shoham and M. Tennenholtz. On social laws for artificial agent societies: Off-line design. *Artificial Intelligence*, 73(1–2):231–252, 1995.
- [48] J. Sichman, R. Conte, C. Castelfranchi, and Y. Demazeau. A social reasoning mechanism based on dependence networks. In A. Cohn, editor, *Proc. of ECAI'94: European Conference on Artificial Intelligence*, pages 188–192. Wiley, 1994.
- [49] J. Sichman and Y. Demazeau. On social reasoning in multi-agent systems. *Revista Ibero-Americana de Inteligencia Artificial*, 13:68–84, 2001.
- [50] B. C. d. Silva, R. Junges, D. Oliveira, and A. L. C. Bazzan. ITSUMO: an intelligent transportation system for urban mobility. In *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS*, pages 1471–1472. ACM Press, May 2006.
- [51] K. Sycara. Multiagent systems. *AI Magazine*, 10(2):79–93, 1998.
- [52] M. Tambe. Towards flexible teamwork. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 7:83–124, 1997.
- [53] K. Tumer, Z. T. Welch, and A. Agogino. Aligning social welfare and agent preferences to alleviate traffic congestion. In *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems - Volume 2, AAMAS '08*, pages 655–662, Richland, SC, 2008. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [54] L. Vercouter, S. J. Casare, J. S. Sichman, and A. A. F. Brandao. An experience on reputation models interoperability based on a functional ontology. In *Proc. of IJCAI07: International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Hyderabad, India, January 2007.
- [55] P. Waddell. Urbansim: Modeling urban development for land use, transportation and environmental planning. *Journal of the American Planning Association*, 68:297–314, 2002.

- [56] M. Wooldridge and N. Jennings. Towards a theory of cooperative problem solving. In *Proc. of MAAMAW094*, pages 15–26, August 1994.
- [57] Q. Yang. *Intelligent Planning*. Springer, 1997.