

Pietro Terna

Scelte e azioni della pubblica amministrazione: la prospettiva della complessità e l'aiuto della simulazione ad agenti

1. Nuovi strumenti e perché usarli

Per la prima volta nell'ambito delle elaborazioni della conoscenza, grazie alla simulazione e in particolare alla simulazione ad agenti (in cui parti di codice informatico operano emulando il comportamento di agenti del mondo reale) siamo in grado di costruire modelli che rappresentano veri e propri artefatti di sistemi organizzativi e di più ampi sistemi economici e sociali; artefatti che possono operare in un computer, ponendoci in grado di (a) sperimentare gli effetti di cambiamenti che introduciamo nell'artefatto; (b) disporre di una lente di ingrandimento per capire gli accadimenti della realtà.

(a) Sperimentare gli effetti di cambiamenti: ci dotiamo di strumenti di simulazione in grado di riprodurre minutamente un fenomeno organizzativo o economico o sociale scomposto in tutti i passi, azioni, eventi che lo compongono, individuando tutti gli attori che presiedono a gli eventi: in altre parole, l'elenco minuto delle azioni da compiere e di chi le porta a termine; l'abbinamento tra azioni e attori avviene secondo una scansione temporale simulata che riproduce il trascorrere del tempo. La metodologia è esposta in dettaglio nel paragrafo 4.1, anche con riferimento alla ricostruzione di un interessante esempio di applicazione al sistema di chiamate di emergenza sanitaria, il «118» (paragrafo 4.2). In quel caso è stata ricostruita una sequenza di situazioni realmente accadute e, sulla stessa base, di situazioni plausibili anche se rare e quindi non riscontrate negli accadimenti del passato. Inoltre si sono verificate soluzioni alternative in termini di presenza e reperibilità degli operatori per fronteggiare densità impreviste, ma soprattutto non prevedibili, di chiamate d'urgenza.

I risultati della simulazione verificano la compatibilità o no tra necessità (trattamento dell'emergenza) e risorse (operatori, infermieri, medici, ambulanze), con l'introduzione

di differenti proposte per fronteggiare le possibili situazioni. Nelle applicazioni al mondo reale occorre essere cauti nel considerare come pienamente affidabili le riposte del simulatore, ma in modo asimmetrico: se nella simulazione una determinata scelta è risultata avere successo, con cautela possiamo provare ad applicarla nella realtà; se è fallita nella simulazione, sin che non si sono compresi con sicurezza i motivi di quel fallimento analizzando il modello di simulazione con il necessario dettaglio, sino alla scala micro strutturale, è del tutto inopportuno provare ad applicarla nella realtà.

Le applicazioni di questa impostazione sperimentale nel campo delle organizzazioni complesse, con l'uso di artefatti informatici per condurre esperimenti, sono soltanto limitate dalla capacità di progettazione e realizzazione necessarie per far fronte ai possibili campi di applicazione: il campo di azione della pubblica amministrazione è esemplare in questa prospettiva.

Personalmente ho in corso tre simulazioni in campi tra loro molto diversi, non solo economici in senso stretto, di interesse per il settore pubblico. Si tratta di applicazioni (i) al funzionamento dei pagamenti interbancari e del mercato monetario in presenza di crisi di liquidità; (ii) alle dinamiche sociali emergenti in un'area già economicamente solida ed ora in difficoltà, con l'emergere della povertà, in presenza di una dislocazione territoriale della popolazione con elementi di criticità in un territorio parzialmente montano e di un significativo grado di invecchiamento della popolazione; (iii) alle dinamiche di classe nella scuola primaria in un'area territoriale ben definita, con la presenza di fenomeni di difficile raggiungimento di equilibri educativi, con l'interazione con il sistema delle famiglie e con le possibili proposte di intervento.

(b) Lente di ingrandimento: se fronteggiamo un insieme di accadimenti, azioni, reazioni che producono effetti aggregati non facili da comprendere e aggregare, ma ben documentati da dati sufficientemente analitici, o ben identificati grazie alle conoscenze quantitative o qualitative di esperti, possiamo costruire un simulatore ad agenti, chiamati ad operare nel computer sulla base di ipotesi plausibili e modificabili dallo sperimentatore, allo scopo di poter confrontare i dati emergenti dalla simulazione con gli eventi del mondo reale. Su questi insiemi di dati si applicano tecniche di analisi statistica, anche molto progredite: se le serie «naturali» e quelle «artificiali» mostrano significative

concordanze, la ricostruzione artificiale – rispetto a cui sappiamo come gli agenti operano e decidono – opera come una lente di ingrandimento applicata ai micro fenomeni della realtà.

Una applicazione in questa direzione è quella citata relativa alla gestione della liquidità a breve termine delle banche ed alle relative transazioni nel mercato monetario, con la necessità per la Banca d'Italia¹ di sempre meglio definire i comportamenti dei tesorieri, in parte informali, in parte propri della cosiddetta conoscenza tacita (vedere il paragrafo 5.1). Si tratta di un caso molto interessante anche perché rende evidente l'importanza di investigare come si opera in termini di micro strutture, in questo caso i riferimenti utilizzati nelle scelte di chi offre o richiede moneta e indica un tasso dell'interesse o prezzo basato sull'ultima transazione eseguita oppure sull'ultimo prezzo esposto e non ancora applicato.

Da questa premessa, in parte fondata su esempi, si intravedono le potenzialità, ma anche le difficoltà teoriche e tecniche implicite in questo campo di applicazione della simulazione: alla base di tutto sta il ruolo della complessità, concetto che deve essere introdotto accuratamente.

2. Un punto di partenza generale

Complicato e complesso sembrano sinonimi, ma non lo sono nel linguaggio scientifico, soprattutto dopo il «*more is different*», motto della complessità tratto dal titolo di un famoso articolo (Anderson, 1972). Anderson, poi premio Nobel per la fisica, propone in quell'articolo una riflessione su che cosa accade quando degli elementi – atomi, molecole, formiche, persone ... -, in un certo numero, interagiscono.

L'interazione spesso porta ad una disordinata interdipendenza con la difficoltà dell'osservatore a comprendere che cosa accade e che cosa «emerge» da quella interazione: eventualmente ... un gigantesco ingorgo di autoveicoli che, quando

¹ Ringrazio Luca Arciero e Claudio Impenna (Banca d'Italia, Ufficio Sorveglianza sul Sistema dei Pagamenti) e Claudia Biancotti e Leandro D'Aurizio (Banca d'Italia, Servizio Statistiche economiche e finanziarie) per avermi introdotto a questo non semplice problema di simulazione, dai risvolti estremamente concreti.

finalmente ne usciamo, non riusciamo a comprendere come sia nato, oppure un problema apparentemente o sostanzialmente inestricabile di amministrazione e gestione. La chiave di volta della complessità sta nel numero delle parti in causa, come nell'esempio dell'acqua che bolle: la transizione che spezza l'ordinato crescere della temperatura in un tazza d'acqua, quando l'acqua diventa vapore e non è più nella tazza, è un fenomeno che emerge dall'interazione delle molecole e dipende anche dal numero delle molecole, tanto che non si produce al di sotto di una certa soglia. Qualcosa di simile accade in economia e più in generale nelle scienze sociali?

Con Anderson (1972, p.396) possiamo affermare di sì, con queste righe conclusive dell'articolo, solo apparentemente scherzose.

In conclusione, propongo due esempi economici di quel che spero di avere detto.

Marx ha sostenuto che le differenze quantitative diventano qualitative, ma un dialogo in Parigi negli anni '20 sintetizza la cosa ancor più chiaramente:

FITZGERALD: I ricchi sono differenti da noi.

HEMINGWAY: Sì, hanno più soldi.

Insistiamo ancora sul problema dimensionale, con riferimento all'amministrazione pubblica. Nella mia esperienza personale di studente universitario c'è il ricordo della segreteria che operava del tutto manualmente negli anni '60; ora è completamente automatizzata e il numero delle persone che operano all'interno è 4-5 volte quello dei tempi in cui ero studente; la crescita relativa del personale è molto più grande del rapporto tra il numero di studenti di ora e di allora. Che cosa è accaduto? La crescita della difficoltà nel trattamento dei dati non è per nulla lineare; inoltre il problema da trattare, con la molteplicità dei percorsi di carriera, è molto più ricco di sfaccettature; il primo è l'aspetto di dimensione, già esaminato; il secondo è l'effetto di azione e interazione.

Infatti la seconda chiave di lettura della complessità, che dipende dalla prima (*more is different*) è l'interazione tra gli elementi che compongono il sistema di cui ci occupiamo, siano atomi o formiche o persone ... La presenza dell'interazione e delle regole che la determinano, regole esplicite o inesprese e talvolta inconsce per chi le applica, è una determinante chiave della complessità.

Una terza caratteristica è la necessità di considerare simultaneamente due o più livelli di descrizione del fenomeno che studiamo, ad esempio la descrizione delle singole formiche con le relative regolarità di comportamento e quella del formicaio, con le specificità delle dinamiche di quella entità aggregata, ad esempio la termoregolazione, assai stabile tra estate e inverno.

Le tre definizioni non sono in contraddizioni e ciascuna da sola è probabilmente carente. E' necessario disporre di una visione generale ed un recente lavoro di Holland (2006) ci permette di introdurre il tema della complessità in una prospettiva molto generale, con riferimento ai campi di applicazione del paradigma:

Numerosi difficili problemi contemporanei sono riconducibili a sistemi adattivi complessi (CAS). I CAS sono sistemi con un grande numero di componenti, spesso definiti agenti, che interagiscono, si adattano o apprendono. Un breve elenco di problemi CAS ne dimostra la diffusione e importanza.

- Promuovere l'innovazione in economie dinamiche.
- Gestire la crescita sostenibile.
- Prevedere i cambiamenti nel commercio globale.
- Comprendere i mercati.
- Conservare gli ecosistemi.
- Controllare l'Internet (es. contro i virus e lo spam).
- Rafforzare il sistema immunitario.

Molto di questi temi sono obiettivi specifici dell'azione della pubblica amministrazione, i cui risultati dipendono strettamente dal grado di complessità del fenomeno con cui si interagisce, con il rischio di vedere vanificate le proprie azioni o, ancor peggio, di agire in modo controproducente. Alla complessità (esterna) del mondo con cui si interagisce si somma, con effetti di amplificazione, la complessità organizzativa (interna) dell'attore che a volta a volta consideriamo, in questo caso la pubblica amministrazione.

I sistemi complessi, sempre con Holland (2006), hanno caratteristiche chiave, quali: (1) il parallelismo, con moltitudini di agenti che interagiscono e producono un gran numero di segnali e informazioni simultaneamente; (2) l'azione condizionale, per cui gli agenti adottano schemi del tipo *se/allora*, con l'azione conseguente ad *allora* che può a sua

volta essere un segnale che genera interazioni e retroazioni; (3) la presenza di moduli o blocchi di regole, che agiscono in sequenza come le *subroutines* di un programma; (4) la capacità di adattamento ed evoluzione, con il cambiamento continuo negli agenti.

Una precisazione importante è che gli agenti dispongano di capacità creative e di cambiamento, ancorché semplici, ma connotate da obiettivi, perseveranza nell'acquisirli, coerenza tra azioni ed effetti, proprie di un contesto cognitivo.

3. Dinamiche di rete ed elementi cognitivi negli agenti

Quanto precede deve essere integrato considerando sia le strutture di rete, che concorrono a determinare le azioni dei soggetti tramite le loro interazioni, sia l'investigazione delle competenze cognitive che è necessario attribuire agli agenti affinché la simulazione, quale lente di ingrandimento applicata alla realtà, sia effettivamente utile. Da un lato infatti non studiamo le azioni e reazioni di individui isolati, ma di sistemi di persone che, all'interno della pubblica amministrazione ed al di fuori di essa operano seguendo legami di tipo gerarchico, collaborativo, amicale, di vicinato, sino alle patologie delle reti malavitose; inoltre, persone che operano con piani, desideri e credenze, che ne influenzano il comportamento.

Seguendo Gros (2008), possiamo comprendere la difficoltà propria di gestire un simile livello di analisi, ragionando di cognizione e intelligenza in un sistema computazionale.

(p.218) La teoria dei sistemi cognitivi ha due obiettivi di lungo termine: comprendere il funzionamento del cervello umano e sviluppare un sistema cognitivo autonomo. Il raggiungimento di entrambi gli obiettivi è piuttosto lontano, ma si procede in entrambe le direzioni, con un certo grado di sovrapposizione. La teoria è comunque ai suoi primi passi e non è al momento chiaro in quale modo il primo sistema cognitivo artificiale che realizzeremo assomiglierà al nostro organo cognitivo, il cervello.

Certo passi avanti interessanti sono possibili, come dimostrano lavori molto recenti sul linguaggio e la coscienza, ad esempio Gao e Holland (2008), ma non siamo pronti a scrivere in modo agevole modelli di scelta individuale che siano coerenti con la descrizione del loro comportamento all'interno di una organizzazione.

Dal punto di vista delle decisioni in una organizzazione (Simon, 1977), aspetto cruciale per l'uso della simulazione ad agenti nella pubblica amministrazione, il quadro è ulteriormente complicato dal fatto che l'analisi economica non ci offre alcun aiuto nella creazione dei modelli, in quanto all'interno delle organizzazioni non esiste un sistema di scambio in cui i prezzi siano coerenti con produzione, scarsità e bisogni e quindi risultano cruciali i comportamenti individuali.

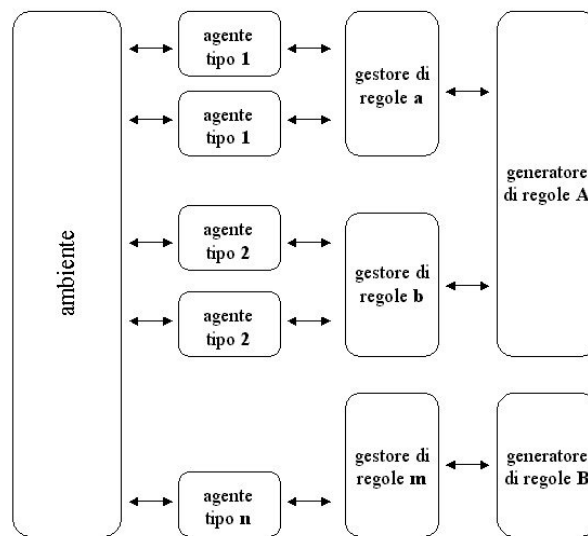


Fig. 1. Lo schema ERA (*Environment, Rules, Agents*).

All'estremo opposto della costruzione cognitiva degli agenti sta il ben noto principio KISS², richiamato ad esempio in Axelrod (1997), strada che conduce a risultati anche importanti, come i sistemi di borsa artificiale in cui agenti operanti con intelligenza zero, in modo casuale, generano dinamiche realisticamente simili a quelle dei veri mercati di borsa (Farmer 2003, 2005): ciò è utile per comprendere come certe sovrastrutture teoriche non servano, ma non per capire come operano le persone in una realtà organizzativa, anche se quello del comportamento casuale, in particolare nelle scelte, è un test di riferimento sempre molto utile. Consideriamo ad esempio un agente reale che

² KISS: Keep It Simple, Stupid! Rosaria Conte, in una discussione a ICCS & SS II a Parigi, settembre 2000, ha proposto di rileggere KISS come *Keep It Simple as Suitable*; la mia controproposta è stata allora *Keep It Sufficiently Simple* (tanto da corrispondere agli agenti reali).

compia scelte sulla base di un sistema esplicito di regole oppure sulla base della propria conoscenza tacita, inespresa e spesso inesprimibile: la possibilità di confrontare gli effetti della sua azione, all'interno di un sistema simulato, con quelli derivanti dalle scelte di un agente che agisca in modo casuale, è un altro aspetto della lente di ingrandimento per la lettura del mondo reale che ci viene offerta dalla simulazione ad agenti, là dove la presenza della «trappola» della complessità non ci consenta di analizzare azioni ed effetti in modo diretto, secondo singoli nessi causali.

Come costruire modelli così articolati di simulazione ad agenti? La proposta è quella di uno schema che consenta anche di trasformare le idee della simulazione ad agenti per le scienze sociali in un codice concretamente eseguibile, secondo il diagramma a blocchi ERA³ (Gilbert e Terna, 2000) riportato nella fig.1, considerando quattro diversi strati nella costruzione del modello e degli agenti.

Un primo strato rappresenta l'ambiente all'interno del quale sono chiamate ad interagire le diverse componenti della simulazione. Nel protocollo di *Swarm*⁴ corrisponde al Modello Swarm, vale a dire il contesto all'interno del quale si definiscono gli agenti, si individuano gli eventi nel tempo, si chiariscono le regole di interazione tra gli agenti grazie ai metodi (interpretabili come messaggi che gli agenti sono in grado di gestire, anche reagendo con azioni e informazioni) definiti all'interno degli oggetti⁵ creati dal modello. Un secondo strato è quello degli agenti, che possono essere costruiti come

³ Vedere anche <http://web.econ.unito.it/terna/ct-era/ct-era.html>.

⁴ Swarm (www.swarm.org) è stato il primo ambiente completo (Minar e altri, 1996) per la costruzione di modelli di simulazione ad agenti ed è tutt'ora un punto di riferimento per la comunità scientifica che si occupa di quel tipo di modelli. Ora è considerato soprattutto importante il protocollo definito nell'originale impostazione di Swarm: una presentazione rigorosa e chiara del protocollo è contenuta nel tutorial originale di Swarm (1996?) scritto per il linguaggio Objective C da Chris Langton e dallo Swarm development team (allora presso il Santa Fe Institute); si trova a <http://ftp.swarm.org/pub/swarm/apps/objc/sdg/swarmapps-objc-2.2-3.tar.gz> (vedere i testi riportati nei file README, nella cartella tutorial e nelle sotto-cartelle). Il tutorial è stato adattato a Java (Staelin, 2000) e a Python (Terna, 2008). Il protocollo Swarm costituisce inoltre, esplicitamente o implicitamente, l'ossatura di molti altri ambienti di simulazione ad agenti.

⁵ La terminologia usata, con «metodi», «oggetti» fa riferimento alla programmazione a oggetti, tecnica basilare per la costruzione di modelli di simulazione fondati su agenti; con la programmazione a oggetti si usano classi (insiemi) come prototipi di esemplari (gli esemplari, in italiano, sono spesso denominati istanze - da *instances* - con l'improprio impiego di un termine assonante, ma che vuol dire tutt'altra cosa, fatto proprio dal gergo informatico); avremo ad esempio la classe dei gatti, cui appartengono esemplari specifici come Felix o Garfield; gli esemplari sanno rispondere a metodi-messaggi, come «muovi», «miagola» definiti nella classe e di conseguenza presenti negli esemplari.

esemplari tratti da una o di più classi, a loro volta generate ereditando proprietà, caratteristiche, dati e metodi da classi più generali. Il terzo strato gestisce le modalità attraverso cui gli agenti decidono il proprio comportamento. Ad ogni scelta, l'agente interroga un oggetto sovraordinato, definito gestore di regole, comunicandogli i dati necessari ed ottenendo le indicazioni di azione. Il quarto strato tratta la costruzione delle regole: così come gli agenti interrogano i gestori di regole, i gestori di regole - per modificare la propria linea di azione - interrogano i generatori di regole.

Lo schema rappresenta sia un tentativo di rendere rigorosamente ordinato il codice informatico di una simulazione, sia una scelta nella direzione della modularità. Se il codice è stato scritto secondo le modalità descritte, è infatti agevole introdurre a volta a volta gestori di regole con caratteristiche diverse, semplicemente sostituendo gli oggetti utilizzati nel modello. Ad esempio, utilizzando come gestore di regole: un sistema a regole fisse (senza generatore di regole, in questo caso); una rete neurale; un algoritmo genetico; un sistema a classificatore (*classifier system*), un algoritmo di *reinforcement learning*. A loro volta tali algoritmi avranno la necessità di ricorrere a generatori di regole differenziati a seconda della loro rispettiva tipologia: ciò sarà facilitato dalla modularità del disegno adottato.

Rispetto alla discussione introdotta sulla complicatezza degli agenti, con una costruzione che può andare all'intelligenza zero, con regole del tipo «decidi a caso», non migliorabili e quindi fisse; a regole fisse più sofisticate, fatte di «se ... allora ... altrimenti» anche concatenate e con eventuali elementi casuali (in questa prospettiva possiamo anche richiamare i sistemi esperti, propri di un ramo dell'intelligenza artificiale), a tecniche di *soft computing* o di ricerca operativa, sino all'uso di gestori di regole in carne ed ossa, esterni al codice.

Le tecniche di *soft computing* sono costituite da algoritmi che riproducono nel computer il funzionamento: (i) di una rete neurale, cioè la capacità di produrre un output (sotto forma di un vettore di valori) in presenza di un input (sempre un vettore di valori), adattando l'output alla miglior riproduzione dei valori attesi sulla base di suggerimenti esterni; (ii) di un algoritmo genetico, che evolva capacità negli agenti o veri e propri nuovi agenti sulla base della pressione selettiva darwiniana; (iii) di sistemi a classificatore, che

operino anche'essi geneticamente, ma evolvendo non individui, ma regole. Si tratta di metodologie che consentono di popolare i modelli i simulazione ad agenti con individui artificiali capaci di apprendimento ed adattamento. Una importante integrazione, derivante dalla ricerca operativa, è quella del *reinforcement learning*, o apprendimento con rinforzo, con cui gli agenti imparano sulla base di prove ed errori, come molto spesso accade nel mondo reale, sino ad essere in grado di collegare il miglior vettore di scelte ad ogni situazione. Su questi aspetti e in particolare su reti neurali e apprendimento con rinforzo, si veda Terna e Taormina (2007).

Come operano queste tecniche all'interno di una simulazione ad agenti? Una possibilità è quella dell'apprendimento all'interno del modello, con gli agenti che operano e decidono sulla base di informazioni incomplete e indicazioni molto confuse, ricevendo dal modello di simulazione stesso le indicazioni sul successo o insuccesso delle loro azioni e scelte. Sulla base di quelle indicazioni e delle tecniche indicate, è possibile fare in modo che gli agenti migliorino il loro comportamento, con l'esperienza e l'apprendimento.

Un elemento a sé è quello dell'impiego di persone all'interno della simulazione, con la tecnica degli avatar⁶: ritornando alla fig.1 gli agenti (secondo strato) per decidere chiedono ad un gestore di regole «persona reale» che cosa fare. Tecnicamente è relativamente semplice, ad esempio prospettando tramite una pagina web la situazione e utilizzando le risposte immesse in quella pagina come indicazioni per l'agente artificiale. Gli scopi sono molteplici e vanno dalla formazione ad operare in un determinato ambiente o situazione, anche mettendo a contatto persone e agenti artificiali, alla costruzione di esperimenti per comprendere come le persone si comportino in determinati contesti e situazioni, all'immissione di competenza ed esperienza, dall'esterno, in un sistema di simulazione.

La simulazione ad agenti è ancora più utile e realistica se si tiene esplicitamente conto del fatto che nella realtà operiamo e decidiamo in funzione di *routines*, di prezzi, di impulsi

⁶ Dal glossario inglese-italiano di Babylon, www.babylon.com – s. avatar (mitologia induista) l'incarnazione della divinità; (Internet), segno grafico rappresentante un utente nei gruppi di discussione o in uno spazio virtuale.

improvvisi non razionali, ma anche moltissimo in funzione di ciò che fanno i nostri interlocutori, i nostri vicini, intendendo per tali altri individui cui siamo prossimi per ragioni di spazio fisico o tramite collegamenti sociali, amicali, familiari, lavorativi, che prescindano dallo spazio.

E con questo si ritorna alle dinamiche di rete con cui inizia questo paragrafo, dal «semplice» schema della segregazione (Schelling, 1978), in cui si osservano gli effetti inattesi di decisioni di per sé innocue (volendo avere per vicini una minoranza di simili si contribuisce alla nascita di zone di segregazione esclusivamente formate da simili), al lavoro recente e imponente sulle reti, sia direttamente interconnesse in modo completo (un agente è connesso ai propri vicini, che sono connessi ai loro vicini e così via), sia *small world* (con la presenza di legami a distanza tra agenti, che rendono facilmente raggiungibili, per tutti, soggetti lontani, direttamente o indirettamente), con i fenomeni di percolazione, che spiegano la diffusione o no di scelte, azioni, stati in reti di attori sociali, sulla base di scelte individuali, ma influenzate dalla rete. Si tratta di strumenti molto potenti per spiegare i comportamenti e gli effetti di politiche, di primario interesse per l'azione della pubblica amministrazione.

3. Gli strumenti

Con quali strumenti possiamo costruire questi modelli? Iniziamo dall'ultima considerazione, delle reti sociali e del loro effetto all'interno dei modelli di simulazione. Possiamo provare ad avere diretta esperienza di questi fenomeni installando (molto facilmente) un sistema gratuito di simulazione sviluppato presso la Northwestern University di Chicago, vale a dire NetLogo (ccl.northwestern.edu/netlogo/) con il quale vediamo funzionare nel nostro computer gran parte delle situazioni di rete interessanti per i nostri modelli.

Che cosa sono NetLogo, o StaLogo, prodotto molto simile? Iniziamo con Starlogo TNG, il cui tutorial⁷ in linea a education.mit.edu/starlogo-tng/complexity/ presenta sequenze animate molto interessanti. StarLogo TNG, il cui indirizzo web esplicita l'appartenenza

⁷ In linea a education.mit.edu/starlogo-tng/complexity/.

al mondo MIT, rappresenta un recente progresso degli ambienti di simulazione ad agenti ispirati al Logo (il Logo è ben vivo ... vedere el.media.mit.edu/Logo-foundation/: era il linguaggio proposto negli anni settanta e ottanta per diffondere la conoscenza dell'informatica nelle scuole), con TNG che sta per *The Next Generation*. Prossima generazione, con due caratteristiche innovative: si programma muovendo e incastrando blocchi come se si costruisse un puzzle⁸; i risultati delle simulazioni, come si può vedere in linea, hanno un aspetto molto simile a quello di un videogioco. Si tratta di programmi, come tutti quelli qui richiamati, di libera utilizzazione.

NetLogo è meno dotato dal punto di vista della grafica 3D e si programma in modo più tradizionale, ma dispone di strumenti importantissimi, quali la capacità di trattare indicazione geografiche tratte dai sistemi informativi geografici (GIS), cui si fa riferimento nel paragrafo 5.2 in relazione al modello sociale del territorio biellese; quella di trattare matrici e vettori (e anche tabelle fondate su nomi, quasi come un database relazionale); di accettare integrazioni scritte in Java dagli utilizzatori; di gestire file di input e output; di sviluppare, accanto alla simulazione ad agenti, la dinamica dei sistemi.

Per iniziare ad utilizzare la simulazione ad agenti NetLogo o StarLogo TNG sono dunque strumento estremamente utili e relativamente facili da utilizzare.

Per progetti di larga scala è però necessario rifarsi a strumenti aperti e completamente programmabili, richiamando il protocollo di Swarm prima citato.

Esistono molti strumenti di questo tipo, da Swarm stesso (www.swarm.org), a RePast (repast.sourceforge.net/), Ascape (www.brook.edu/dynamics/models/ascape/), JAS (jaslibrary.sourceforge.net/) e altri ancora, a cui aggiungo il progetto SLAPP da me sviluppato (eco83.econ.unito.it/terna/slapp).

Il progetto SLAPP, Swarm-Like Agent Protocol in Python, ha lo scopo di offrire agli studiosi interessanti alla programmazione ad agenti un insieme di esempi di programmi di semplice interpretazione e adattabilità; è dunque una collezione di esempi (riutilizzabili) che mostrano come sia possibile sviluppare agevolmente il protocollo di Swarm, utilizzando Python (www.python.org). La scelta di quel linguaggio open source è dovuta

⁸ Per questo aspetto StarLogo TNG è molto simile ad un altro ambiente, assai utile per imparare – per i giovani e i meno giovani – a programmare si tratta, sempre con sorgente MIT, di Scratch, scratch.mit.edu.

alla sua semplicità, accompagnata dalla completezza ed al rigore dell'impostazione. Inoltre il linguaggio dispone di moltissime biblioteche di funzioni scritte da autori diversi e può connettersi ad altri strumenti software, come l'ambiente statistico R (cran.r-project.org o semplicemente immettere la lettera R in Google ...), che SLAPP usa sia per il calcolo statistico ed econometrico, sia per la produzione di grafici. Esistono biblioteche di funzioni per le reti sociali, per il collegamento diretto a fogli elettronici e così via.

Le caratteristiche principali degli esempi di SLAPP; che riproducono passo dopo passo il protocollo di Swarm (vedere sopra) sono introdotte nel tutorial, con la sequenza:

- *plainProgrammingBug* – abbiamo un unico agente (*bug*), costruito senza programmazione a oggetti, che si muove su una superficie; il tempo secondo cui l'agente agisce muovendosi è gestito tramite un ciclo ripetitivo;
- *basicObjectProgrammingBug* – abbiamo sempre un unico agente, ma è ora un esemplare di *bug* della classe *Bug*; il tempo è ancora è gestito tramite un ciclo ripetitivo;
- *basicObjectProgrammingManyBugs* – con la programmazione a oggetti è semplice creare più esemplari dalla stessa classe, per cui ora abbiamo molti *bug* costruiti secondo le indicazioni della classe *Bug*; il tempo è ancora è gestito tramite un ciclo ripetitivo;
- *objectSwarmModelBugs* – molti *bug* come esemplari di *Bug*, tutti all'interno di un *modello*, strato sperimentale della simulazione, costruito come esemplare della classe *Modelli*; il tempo è gestito tramite un orologio simulato che esegue *gruppi di azioni*, a loro volta esemplari della classe *Gruppi di azioni*; gli eventi possono essere modificati dinamicamente da altri eventi o dagli agenti del modello;
- *objectSwarmObserverBugs* – come nel caso precedente abbiamo un esemplare di *modello* che contiene esemplari di *bug*, un orologio, esemplari di *gruppi di azioni*, il tutto incluso in uno strato più astratto della simulazione, che è un esemplare di *osservatore* della classe *Osservatore*; l'*osservatore* possiede il *modello*, un suo *orologio* e suoi *gruppi di azioni* che contengono gli eventi necessari per osservare il *modello*.

Nella sequenza del calcolatore, con riferimento all'ultima specificazione (*objectSwarmObserverBugs*), il programma inizia creando l'osservatore, i suoi oggetti ed eventi; tra quegli oggetti c'è il modello, creato dall'osservatore con i relativi oggetti ed eventi. Ogni elemento trattato apparterrà ad una specifica classe.

Il tutto è tenuto volutamente ad un elevato livello di astrazione, ma se il lettore non specialista prova a seguire la descrizione che precede in modo strettamente letterale, individuerà gli elementi e i passi di un esperimento artificiale di simulazione, condotto nel laboratorio-computer; il lettore esperto della parte computazionale può invece rapidamente familiarizzarsi con il codice in linea.

4. Uno strumento specializzato per la simulazione di strutture organizzative, con un caso di applicazione

Per costruire modelli di simulazione ad agenti di organizzazioni in senso lato (un sottosistema della pubblica amministrazione, un'azienda, un distretto produttivo, una Facoltà universitaria, ...) è utile disporre di uno strumento di simulazione definito in modo generale e astratto, avendo però ben presente il tema della simulazione organizzativa.

4.1. La metodologia jES

Si propone un secondo protocollo dopo quello di Swarm. Si tratta di jES, che significa java Enterprise Simulator (web.econ.unito.it/terna/jes) e che evolverà verso il protocollo AESOP (Agents and Emergencies for Simulating Organizations in Python); jES non solo è un protocollo, è anche un vero e proprio programma⁹, che si appoggia sulla libreria di funzioni Swarm (che stanno all'origine del protocollo che ha lo stesso nome). Anche AESOP sarà un programma, costruito secondo le modalità di SLAPP.

L'analogia più illuminante per comunicare scopo e contenuti di jES è quella dei simulatori di volo disponibili per i nostri computer. Esattamente come un simulatore di

⁹ Il codice informatico di jES è opera di chi scrive e di numerosi studenti che hanno lavorato con lui; il loro nome è riportato nei file delle classi Java che hanno contribuito a sviluppare.

volò riproduce gli effetti di ciò che noi «giocatori» comunichiamo al computer, generando tutte le azioni ed interazioni conseguenti nel complicato modello che emula l'aereo in volo, jES riproduce le conseguenze degli ordini, contenenti le «ricette», che sono immessi nel modello, con tutte le interazioni che ne conseguono in una organizzazione. Se chi interagisce con il simulatore di volo commette errori, l'aereo precipita; se sceglie la migliore traiettoria di volo possibile, l'aereo compie nel modo migliore il percorso richiesto: il simulatore riproduce le conseguenze delle scelte, non propone scelte. Allo stesso modo jES non è un ottimizzatore per le scelte organizzative e, in campo aziendale, non è né un gestore degli ordini di produzione (scheduler, in gergo).

Con la metodologia proposta si intende «far funzionare» nel computer l'organizzazione simulata, non solo rappresentarla in modo animato sulla base di sequenze predeterminate di eventi; nel modello gli eventi accadono in modo indipendente, generando interazioni anche imprevedibili tra atti produttivi e unità produttive, secondo le modalità proprie dei contesti in cui si sviluppa la complessità. E' anche possibile operare sulle scelte: come anticipato esaminando il *soft computing*, si utilizza la capacità di un modello di simulazione di offrire le indicazioni necessarie per far operare reti neurali, sistemi a classificatore, apprendimento con rinforzo. Inoltre è anche possibile utilizzare un simulatore qual è jES per analizzare modi diversi di operare, ricercando scelte ottimizzanti, oppure modificando condizioni interne o esterne all'organizzazione simulata per scoprire le conseguenze di quei cambiamenti nei risultati.

Mini dizionario del modello: (i) una unità è una struttura produttiva, eventualmente corrispondente ad una cellula produttiva in una struttura più vasta; una unità è in grado di svolgere almeno uno dei passi indicati nelle ricette; (ii) un ordine è un oggetto (in senso informatico) che rappresenta una generica azione da compiere; ogni ordine contiene le informazioni necessarie per realizzarlo; (iii) una ricetta è una sequenza di passi, espressi con un formalismo numerico, da compiere per realizzare un ordine; si fa riferimento alla ricetta di cucina come prototipo per la descrizione dei componenti, delle quantità e delle sequenze necessari per ottenere un risultato; il termine ricetta è anche utilizzato in economia industriale.

Classificazione delle componenti di un modello:

- che cosa fare: lato del modello che descrive gli ordini da eseguire, contenenti le ricette, con il formalismo *What to Do* (WD)
- chi fa che cosa: lato del modello che descrive le unità in grado di eseguire i passi delle ricette contenute negli ordini, con il formalismo *which is Doing What* (DW)
- la sequenza temporale degli accadimenti: con il formalismo *When Doing What* (WDW).

Sulla base del dizionario e della classificazione che precedono, è ora agevole chiarire che ogni applicazione realizzata con jES deve gestire una triplice fonte di informazioni: le ricette; le unità; il lancio degli ordini contenenti le ricette.

Un punto molto importante da chiarire è quello della origine degli ordini: casuale o programmata. Può essere casuale, utilizzando un «generatore di ordini» al quale si forniscono tre informazioni: i numeri che contraddistinguono i passi produttivi utilizzabili per costruire le ricette (le fasi di attività delle unità); la lunghezza (complicatezza) delle ricette, le ripetizioni per ogni singolo passo, per variare le durate delle esecuzioni. La produzione di ordini può anche essere preordinata, utilizzando (invece del generatore di ordini) un «distillatore di ordini» che utilizza un repertorio di ricette e si fonda su una sequenza di eventi che sarà eseguita ripetutamente.

Accanto alle ricette esiste la descrizione delle unità che operano nella simulazione, con l'indicazione dell'attività o delle attività che ogni unità sa svolgere. Le unità sono semplici o complesse a seconda che sappiano svolgere uno solo o più compiti; per ciascuna si specificano costi variabili e fissi riferiti a unità di tempo, nel caso in cui i costi siano valutabili e rilevanti ai fini della simulazione, ed anche indicazioni sui ricavi (uno dei passi delle ricette può essere la vendita di prodotti, servizi ...).

4.2. L'applicazione al caso del 118

Questa impostazione può essere applicata a realtà tra loro molto diverse (si vedano le tesi di laurea che richiamano jES nella mia pagina web.econ.unito.it/terna). Un esempio di

diretto interesse per la pubblica amministrazione è quello dei servizi di emergenza, cioè il 118.

Un tipico sistema di pronto soccorso può essere suddiviso nella funzione del centralino, nella postazione di valutazione sanitaria, nel settore ambulanze che assegna le ambulanze alle missioni. Gli agenti, oltre agli operatori delle postazioni indicate, sono i sistemi formati dalle ambulanze e dal personale operativo delle stesse. Il centralino svolge funzione di filtro, reindirizzando le chiamate non pertinenti e destinando quelle proprie alla postazione di valutazione sanitaria, dove il personale ha competenze di carattere medico e infermieristico e decide l'invio dell'ambulanza ed il tipo; assunta la decisione, il colloquio telefonico non è comunque concluso, in quanto si forniscono via telefono indicazioni relative ad azioni da compiere in attesa dell'arrivo dei soccorsi, soprattutto nei casi più gravi; ciò fa sì che il colloquio possa anche essere non breve e in momenti di particolare ricorso al sistema si può determinare una congestione della postazione di valutazione sanitaria, con problemi nella gestione del centralino, a monte. Per una descrizione più analitica vedere le tesi di Desotgiu, Badino e Guerra nel sito citato sopra.

Si tratta di un sistema fortemente critico, in cui ogni cambiamento deve essere attentamente valutato prima di essere attuato: ecco quindi l'opportunità di «rifarlo» nel computer, in senso proprio: il sistema di pronto soccorso ricostruito dentro al computer, con tutte le sue caratteristiche e i suoi particolari, con blocchi di codice informatico che riproducono l'azione degli operatori, uno per uno e con le relative interazioni.

L'impostazione del modello di simulazione ad agenti relativo a questo caso è duplice: prima di tutto si è ricostruito il funzionamento del modello ex post, per un ciclo di 24 ore di eventi, in un giorno normale. Con l'impostazione ex post le ricette, gestite da un distillatore di ordini, sono una copia «uno a uno» degli accadimenti effettivamente registrati. La sequenza di lancio degli ordini contenenti le ricette (WDW) deriva da una raccolta di eventi effettivamente accaduti. Il simulatore predisposto riproduce fedelmente quanto accaduto nel passato, con i relativi effetti, come riprova della correttezza della costruzione.

Si passa quindi, nello sviluppo del modello, alla simulazione ex ante: non sappiamo quale ambulanza sarà assegnata alla missione e dovrà essere il sistema di simulazione a

indicare quale tra le ambulanze sarà assegnata ad una certa missione, compatibilmente alle indicazioni delle ricette ora relative non più ad una fase di attività coincidente con una ambulanza specifica, ma ad una fase di lavorazione identificata con la sua tipologia, essendo possibile per più ambulanze svolgere quel compito. In tal modo è possibile sia verificare gli effetti di scelte diverse rispetto a quelle praticate nella realtà esaminata oppure porre il sistema in condizioni di sovraccarico, non verificate nei dati raccolti, ma plausibili. Le condizioni di sovraccarico che abbiamo simulato, con un generatore casuale di ordini, sono quelle di un raddoppio degli eventi, condizione molto forte, che diventa rilevante nelle ore di punta di inizio, centro e fine giornata. Si tratta di un risultato che può fornire utili indicazioni in merito alla politica di formazione e impiego del personale al fine di disporre di persone in grado di svolgere una funzione di riserva, con forme di reperibilità adatte ad affrontare situazioni di emergenza.

5. Altri casi, con la simulazione ad agenti come lente di ingrandimento per affrontare la complessità

Altri casi sono relativi a lavori al momento aperti, utili per approfondire il significato e l'uso dei modelli di simulazione per comprendere la realtà.

5.1. Un modello sulla liquidità nelle transazioni tra banche

Un primo modello è relativo alla simulazione ai pagamenti tra banche e ai movimenti nel mercato dei depositi o della liquidità interbancaria¹⁰. Il comportamento dettagliato dei tesorerieri delle banche non è noto nei dettagli, né può essere indagato con osservazione diretta, sia per motivi di oggettiva difficoltà, sia per l'emergere di elementi di conoscenza tacita, difficili da riportare in un questionario o in un colloquio. Per contro le grandi linee, come le decisioni di ritardare o no i pagamenti, o i dettagli più minuti, come le modalità operative nel mercato monetario, possono modificare in modo rilevante l'andamento della liquidità nel sistema.

¹⁰ Si fa riferimento al sistema dei pagamenti interbancari operante in Italia e in altri paesi europei ed al mercato italiano telematico dei prestiti a breve termine tra banche, rispettivamente l'RTGS (Real Time Gross Settlement payment system) e l'eMID (electronic Market of Interbank Deposit).

La simulazione ad agenti è in questo caso lente di ingrandimento per comprendere la realtà in quanto si generano serie storiche artificiali di transazioni tra banche e di movimenti nel mercato monetario, con ipotesi plausibili relative al comportamento dei tesorieri; quelle serie artificiali sono confrontate con serie reali per scoprire analogie strutturali, rilevate anche con le tecniche dell'econometria, mostrando che particolari caratteristiche delle serie reali compaiono anche in quelle artificiali se si introducono specifiche ipotesi di comportamento degli agenti, in particolare ritardi sistematici nelle transazioni. Allo stesso modo una serie realistica di transazioni di cui conosciamo gli effetti sul mercato monetario in termini di tasso dell'interesse può essere riprodotta dal simulatore "come è stata" oppure – con opportune correzioni probabilistiche, come "sarebbe stata" senza ritardi, con effetti molto diversi sulla dinamica dei tassi a breve. Ecco quindi la simulazione come lente di ingrandimento.

Nella determinazione dell'andamento dei tassi la simulazione mostra quanto siano importanti microstrutture determinanti i dettagli dei comportamenti, come il prezzo o tasso cui si fa riferimento per le decisioni, che può essere quello di una transazione eseguita o di un'offerta o domanda di moneta ancora aperte, con significative differenze, così come significative differenze derivano dall'azione dei tesorieri concentrata in intervalli di tempo ristretti o diluita nel tempo.

Un esempio di attualità sul tema delle microstrutture e sul loro effetto è la discussione su alcune regole a lungo applicate e poi sospese nel luglio 2007 dalla SEC (l'autorità di controllo sulla borsa americana). Si tratta delle norme utilizzate per regolare le transazioni immediatamente successive ad un picco di valore (*uptick*), allo scopo di evitare effetti dirompenti delle vendite allo scoperto: la regola stabilisce che, con qualche eccezione, un titolo azionario venduto allo scoperto debba essere trattato ad un prezzo superiore a quello dell'ultima vendita avvenuta o allo stesso prezzo dell'ultima vendita se a sua volta superiore al precedente prezzo di vendita. E' stato riportato (Pozen e Bar-Yam, 2008) che l'abolizione della regola – dopo un esperimento pilota del 2005 – abbia contribuito alla così rilevante caduta dei corsi di borsa nel 2008, tanto che una revisione dell'esperimento pilota conduce a risultati molto differenti (Harmon e Bar-Yam). Ecco un esempio di azione pubblica nella regolazione per la quale la simulazione ad agenti,

condotta con comportamenti degli operatori con e senza *uptick rule*, rappresenta nuovamente una lente di ingrandimento per comprendere la realtà.

5.2. Un modello sulle dinamiche sociali e il disagio economico in un territorio delimitato

Un secondo modello è relativo alla dinamica di un territorio industriale, già molto sviluppato – il biellese – ed ora oggetto di profonde trasformazioni sociali, con la comparsa di forme di disagio economico precedentemente sconosciute. Come agire in questa situazione?

Prima di tutto occorre confrontare i dati del territorio con gli interventi alla scala sia delle scelte degli enti locali e delle istituzioni economiche, sia delle azioni delle diverse iniziative di volontariato, per confrontare bisogni e risposte. Per ottenere il risultato di un buon raccordo è necessario raccogliere i dati sulle diverse azioni, in modo anche molto leggero (dove si opera, in quali periodi, con quali azioni e scopi), ma anche offrire un immediato riscontro a chi agisce, con la capacità di analizzare dati e realtà. Per questo si sta avviando una analisi- simulazione del territorio biellese; analisi che si propone di essere molto realistica anche negli aspetti territoriali, con la realizzazione di un sottosistema geografico, realizzato attingendo alla cartografia regionale e alle utilissime elaborazioni messe in linea dalla Provincia di Biella¹¹.

L'analisi deve in primo luogo proporsi di coinvolgere i soggetti decisori delle diverse realtà istituzionali, religiose, culturali, associative, economiche e finanziarie che operano nel territorio. Ciò richiede una interazione sia diretta sia mediata, continua e ripetuta, anche con ampi riflessi negli strumenti di comunicazione per arrivare all'opinione pubblica, il tutto offrendo sin dai primi passi, e a tutti, l'interazione in linea con il modello di analisi, da presentare in una forma il più possibile grafica. Il modello è strettamente correlato alla realtà territoriale, con la capacità di rispondere a complessi quesiti espressi nella forma "che cosa se ...", potendo agire su una molteplicità di fattori, quali ad esempio le unità familiari con la dinamica di reddito; l'invecchiamento nella società con le forme di disagio sociale che per diversi motivi stanno emergendo;

¹¹ Visibili all'indirizzo cartografia.provincia.biella.it.

l'immigrazione, anche come forma di compensazione demografica, anche se molto parziale; le esigenze dei giovani; le esigenze di innovazione e cambiamento, in campo produttivo e sociale; la produzione e il lavoro; gli effetti dei trasferimenti (pensioni) verso una società più anziana; i nuovi tipi di consumo che ne derivano, con effetti sul commercio e sui servizi; la sanità e i bisogni sanitari degli anziani; gli effetti del volontariato per le famiglie, per gli anziani, per i giovani; la trasformazione dell'uso del tempo (nella vita e nella settimana) di non lavoro; i rischi di fuga dei giovani da una società anziana.

Lo scopo della lente di ingrandimento in questo caso è dunque quello di sperimentare in linea “che cosa succede se ...” e “che cosa si può fare per ...”, interagendo con una comunità piuttosto coesa e ricercando l'aiuto della stampa locale, come elemento di risonanza dell'operazione.

5.3. Un modello dell'interazione insegnanti-alunni nella scuola primaria

Infine un terzo lavoro in corso, con una terza modalità di uso della lente di ingrandimento della simulazione ad agenti, è quello della ricostruzione delle dinamiche di classe nella scuola primaria, tra insegnanti ed alunni, anche tenendo conto dell'azione delle famiglie e del contesto di riferimento.

L'osservazione condotta da ricercatori specializzati nella scienza della formazione interagisce con un modello di simulazione in cui comportamenti sono inizialmente definiti sulla base delle indicazioni degli insegnanti: il primo effetto che si riscontra è che quelle indicazioni sono arricchite dalla interazione con il modello di simulazione ed anche con la semplice idea di costruire quel modello, confermando che il primo risultato che si ottiene nel costruire con il computer l'artefatto di una realtà sociale o economica è quello di comprenderla meglio; il secondo effetto è l'interazione tra osservazioni e arricchimento del modello e tra arricchimento del modello e ritorno alle osservazioni, con l'attenzione di chi sa di poterle riportare in un modello.

La finalità del lavoro è quella di comprendere quali migliori azioni possano essere messe in atto per meglio gestire le dinamiche di una classe, tenendo conto dei continui cambiamenti che il sistema sociale induce nell'azione educativa.

6. Quasi un nuovo programma di ricerca

In questo ultimo caso, ma anche nei precedenti, quasi si intravede un nuovo possibile percorso di ricerca, che consenta di comprendere quello che sta al centro di ogni modello e cioè i rapporti di causa ad effetto, superando il filtro (talvolta deformante) della complessità, dalla cui descrizione inizia questo scritto.

Bibliografia

- ANDERSON P.W. (1972), *More is Different*, in «Science», 177(4047), pp.393-396.
- AXELROD R. (1997), *Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences*, in Conte, R., Hegselmann, R. and Terna, P. (a cura di), *Simulating Social Phenomena, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 456*, pp.21-40, Berlin: Springer.
- FARMER J.D., PATELLI P. E ZOVKO I.I. (2003), *The Predictive Power of Zero Intelligence in Financial Markets*, WP 03-09-051, Santa Fe Institute, www.santafe.edu/research/publications/workingpapers/03-09-051.pdf.
- FARMER J.D., PATELLI P. E ZOVKO I.I. (2005), *The Predictive Power of Zero Intelligence in Financial Markets*, in «PNAS», 102(6), pp.2254-2259.
- GAO H.H. E HOLLAND J.H. (2008), *Agent-based Models of Levels of Consciousness*, WP 08-12-048, Santa Fe Institute, www.santafe.edu/research/publications/workingpapers/08-12-048.pdf.
- GILBERT N., TERNA P. (2000), *How to build and use agent-based models in social science*, in «Mind & Society», n. 1, pp.57-72.
- GROS C. (2008), *Complex and Adaptive Dynamical Systems, a Primer*. Berlin, Springer-Verlag.
- HARMON D. E BAR-YAM Y. (2008), *Technical Report on SEC Uptick Repeal Pilot*, NECSI Technical Report 2008-11, www.necsi.edu/research/UptickTechReport.pdf.
- HOLLAND J.H. (2006), *Studying complex adaptive systems*, in «Journal of Systems Science and Complexity», 19(1), pp.1-8.
- MINAR, N., BURKHART R., LANGTON C., E ASKENAZI M. (1996), *The Swarm simulation system: A toolkit for building multi-agent simulations*. WP 96-06-042, Santa Fe Institute, Santa Fe, www.swarm.org/images/b/bb/MinarEtAl96.pdf.

POZEN R.C. E BAR-YAM Y. (2008), *There's a Better Way to Prevent 'Bear Raids' - The SEC should restore the uptick rule*, The Wall Street Journal, November 18th, online.wsj.com/article/SB122697410070336091.html.

SCHELLING T. (1978), *Micromotives and Macrobehavior*. Norton, New York.

SIMON, H.A. (1997), *Administrative Behavior: A Study of Decision-Making Processes in Administrative Organizations*. THE FREE PRESS, Simon & Schuster, New York.

STAELIN C.J. (2000), *jSIMPLEBUG, a Swarm tutorial for Java*, www.cse.nd.edu/courses/cse498j/www/Resources/jsimplebug11.pdf (solo testo) o eco83.econ.unito.it/swarm/materiale/jtutorial/JavaTutorial.zip (testo e programmi).

TERNA P. E TAORMINA R. (2007), *Modelli di simulazione con agenti intelligenti: il sorprendente mondo dei camaleonti*, in «Sistemi intelligenti», 3, XIX, pp.391-426.

TERNA P. (2008), *Swarm-Like Agent Protocol in Python*, eco83.econ.unito.it/slapp.