

Workshop su “Scienze Cognitive ed Economia” organizzato dalla Associazione Italiana di Scienze Cognitive, 21 settembre 2002, Rovereto

La simulazione come strumento di indagine per l'economia

Pietro Terna

Dipartimento di Scienze economiche e finanziarie G.Prato, Università di Torino
pietro.terna@unito.it

SINTESI

Si presenta l'utilizzazione della simulazione con l'uso del computer come via per compiere esperimenti mentali complessi, ma anche per catturare – con un grado di formalizzazione adeguatamente flessibile – la complessità della realtà.

In particolare la realtà economica, anche per discutere le critiche al metodo economico che emergono dalle scienze cognitive.

I modelli qui proposti sono popolati da agenti che agiscono e interagiscono (tra loro e con l'ambiente) e che eventualmente modificano il proprio comportamento sulla base dell'apprendimento. La costruzione di questo tipo di modelli è semplificata dall'uso di protocolli di programmazione ad oggetti qual è Swarm (www.swarm.org) e dall'adozioni di schemi di riferimento che chiariscano il ruolo dell'ambiente, degli agenti, delle loro regole di comportamento e le modalità di modificazione di tali regole (sistemi di produzione o sistemi esperti, reti neurali, sistemi a classificatori, algoritmi genetici, ...).

Gli agenti privi di capacità di adattamento sono qui considerati “senza mente”; altrimenti, “con mente”. L'ambiente in cui operano può essere neutrale o adeguatamente strutturato da regole (es. la borsa).

Si può mostrare che agenti “senza mente” che compiono transazioni in un ambiente neutrale producono risultati complessi, ma non realistici; in un ambiente strutturato, pur essendo sempre molto semplici, producono invece risultati realistici, quali bolle e *crash* in un mercato di borsa.

Agenti “con mente” (reti neurali, chiamate a riprodurre schemi di coerenza interna agli agenti), operando in un ambiente neutrale, producono risultati di ordine spontaneo nella prospettiva hayekiana; in un ambito strutturato (la borsa, come sopra) evolvono complesse strategie di comportamento.

Le stesse metodologie possono infine essere estese all'esplorazione di reti sociali (qui l'impresa ed i sistemi di imprese) con prospettive di analisi teorica, ma anche con

risvolti applicativi concreti (simulazioni di contesti produttivi; rappresentazione della conoscenza).

LA SIMULAZIONE COME ESPERIMENTO MENTALE COMPLESSO E COME STRUMENTO PER LA RAPPRESENTAZIONE DELLA REALTÀ

Il primo uso della simulazione in economia¹ – ma l'analisi può agevolmente essere estesa anche alle altre scienze sociali – è quello della conduzione di esperimenti mentali, con dimensioni e profondità dei problemi tali da richiedere l'ausilio del calcolo ordinato che l'elaboratore elettronico ci assicura.

Il secondo uso - altrettanto importante e complementare al primo, ma a mio avviso sottovalutato – è l'impiego dei modelli di simulazione come strumenti per la rappresentazione formale della realtà. Rappresentazione possibile anche quando la realtà si presenti molto complicata, raggiungendo il livello di dettaglio necessario.

E' quindi importante guardare alla simulazione via computer come terza via nella realizzazione dei modelli, all'interno della classificazione che comprende (i) i modelli letterario-descrittivi, (ii) quelli matematico-statistici e infine (iii) quelli realizzati (con la finalità della simulazione) con codice informatico (Gilbert e Terna, 2000; Ostrom 1998).

I modelli letterario-descrittivi sono pienamente flessibili, ma la rappresentazione della realtà che consentono non è solidamente verificata da processi di calcolo che ne sperimentino la capacità di essere coerenti con fenomeni noti, generando situazioni plausibili.

I modelli statistico-matematici sono di per sé orientati alla computabilità, ma con il peso delle semplificazioni, per lo più necessarie e talora volutamente ricercate, che ne determinano la distanza dalla realtà. Distanza accettata o addirittura preferita in economia, se si segue l'impostazione *as if* secondo cui si utilizzano modelli non realistici se ed in quanto si possa ritenere che i risultati siano comunque utili, sino al paradosso (Friedman, 1953) secondo cui: "*Truly important and significant hypotheses will be found to have «assumptions» that are wildly inaccurate descriptive representations of reality, and, in general, the more significant the theory, the more unrealistic the assumption ...*". Situazioni limite come quella ipotizzata si trovano alla base della costruzione dell'edificio delle aspettative razionali, con l'assunzione che gli agenti abbiano razionalità piena, informazione completa, illimitata capacità computazionale e, implicitamente, anche la conoscenza del modello da cui discendono le conseguenze delle loro azioni. Come nota Sargent (1993), in questo

¹ Per una introduzione non troppo tecnica alla simulazione con agenti, di contenuto soprattutto economico, si segnala Batten (2000).

modo si attribuiscono agli attori economici conoscenze maggiori di quelle a disposizione dell'econometrico che costruisce il modello.

In economia la mancanza di realismo, o di plausibilità, non può essere difesa con la qualità dei risultati ottenuti dalle applicazioni (Hahn, 1994); soprattutto non è compatibile con direzioni di ricerca in cui si dia rilievo alla capacità degli agenti di apprendere e di adattarsi alla complessità del contesto in cui operano.

I modelli di simulazione realizzati nel computer rappresentano quindi una significativa risposta alle esigenze della flessibilità e adattabilità descrittiva, da un lato, e della possibilità di computazione, dall'altro. Un codice informatico è insieme dotato di requisiti formali, di adattabilità e flessibilità e, ovviamente, di calcolabilità.

Si tratta di applicazioni della simulazione che producono un reale contributo di comprensione e scoperta, in particolare se sviluppate disegnando il comportamento di singoli agenti chiamati a operare e scambiare informazioni in un contesto a sua volta descritto con il codice informativo. In questo contesto ben si applicano le considerazioni (Burton, 2001) che concludono un recente libro sui modelli di computazione e le teorie dell'organizzazione (Lomi e Larsen, 2001). La portata di quelle considerazioni - pur presentate in un ambito di simulazione che prevalentemente utilizza la simulazione tramite costruzioni fondate su equazioni - è molto ampia.

Con Burton individuiamo nella simulazione lo strumento per analizzare “mondi” che esistono o che potrebbero esistere. In primo luogo la simulazione consente di riprodurre un mondo “come è”, in modo tale da poter svolgere con il modello le analisi che svolgeremmo sul mondo reale. In secondo luogo, ci consente di operare su mondi “come potrebbero essere”, sia indicando parametri che nel mondo reale non si presentano, sia disegnando situazioni artificiali, “*produced by art rather than nature*” (Simon, 1981).

Inoltre Burton sottolinea i caratteri di specificabilità, versatilità ed efficienza della simulazione.

La simulazione richiede che specifichiamo il mondo che stiamo studiando, da semplice a complesso; eventualmente, iniziando con una costruzione semplice e via via modificandola, sino a che divenga complessa. Inoltre, la costruzione di un modello di simulazione non ci consente di utilizzare “scatole nere” di cui trascurare il contenuto e beneficamente ci impone la formulazione di ipotesi da verificare in ogni parte del modello. Infine, nella simulazione introduciamo delle specificazioni di comportamento, non delle ipotesi di comportamento.

Gli strumenti di simulazione sono versatili, in quanto con un modello ben costruito possiamo svolgere *test* su ipotesi, esplorare nuove idee, generare basi di dati, costruire mondi più “ampi” di quello reale.

Infine la simulazione rappresenta una strada di ricerca efficiente, che può portare a risultati utili con sforzi minori di quelli richiesti dagli esperimenti (si pensi alla difficoltà nella conduzione degli esperimenti in economia) o dalla ricerca di dati sul campo, soprattutto perché consente di seguire cammini a volta a volta differenti, esplorando possibilità evolutive diverse e più casi di dipendenza dalla sequenza degli eventi (*path dependence*).

A queste tre caratteristiche, aggiungiamo il valore maieutico della simulazione, che consente – nella fase di costruzione del modello – di estrarre la conoscenza consapevole o no che, di un certo mondo, hanno sia gli attori che ne fanno parte, sia gli studiosi. In molti casi, e non solo nei più semplici, la costruzione del modello di simulazione è di per sé produttiva di indirizzi per la soluzione di problemi noti o latenti.

LA RAPPRESENTAZIONE DELLA REALTÀ ECONOMICA E LA COMPLESSITÀ: UNA RISPOSTA ALLA CRITICA CHE PROVIENE DALLE SCIENZE COGNITIVE²

Nonostante le caratteristiche positive sopra riportate, la simulazione - e in particolare la simulazione fondata su agenti - non ha trovato spazio sufficiente nelle scienze sociali; certo, non in economia.

Sappiamo che rappresenta un cambiamento fondamentale nel metodo (Parisi, 2001); che raccoglie ormai non pochi lavori (Tsfatsion, 2001). Abbiamo anche riviste elettroniche specializzate: il *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, JASSS (jasss.soc.surrey.ac.uk) e l'*Electronic Journal of Evolutionary Modeling and Economic Dynamics*, e-JEMED (www.e-jemed.org).

E' però anche indubitabile che i risultati sono al momento ancora insufficienti a costituire massa critica per il riconoscimento della validità del metodo al di fuori della schiera degli specialisti. Una forte critica interna è quella di Pryor (2000), in un lavoro auto-ironico: guardando indietro, uno sconosciuto autore del 2028 (quando un asteroide sarà caduto sulla Terra), osserva che “in un tipico libro sulla complessità della fine degli anni '90 (...) quasi tutti i lavori non contengono applicazioni empiriche reali, a parte qualche interessante aneddoto”.

L'interdisciplinarietà metodologica, che va dalla simulazione alla scienza della complessità, rappresenta un altro problema rilevante: è ben evidente che i lavori di carattere interdisciplinare ed eterodossi hanno inevitabilmente meno peso di quelli legati al nucleo delle varie discipline, nell'ortodossia.

² Questo paragrafo sottintende una interazione con il lavoro di Parisi (2002), preparato per questo stesso incontro.

La mia opinione però è ancora un'altra ed è l'insufficiente attenzione che si è prestata alla costruzione dei modelli di simulazione come via per rappresentare la realtà.

Catturare la realtà e farne modello significa proporre a sé e agli altri studiosi un punto di partenza di invalutabile valore e rigore; certo per fare ciò in modo utile è necessaria una buona dose di realismo della rappresentazione, senza eccedere in fatti e comportamenti stilizzati. Prendendo a prestito una espressione utilizzata da Roberto Serra, studioso attento alle applicazioni di queste metodologie in ambito aziendale, "dobbiamo decidere dove collocarci tra vetri di *spin* e videogiochi". Da un lato, caso limite dell'astrattezza, possiamo immaginare modelli che sfruttano le analogie tra un determinato contesto economico-sociale e quelle di un vetro di *spin* (dove la disposizione degli atomi che rappresentano le impurità mostra comportamenti propri della complessità); dall'altro, caso limite della descrizione diretta, possiamo spingerci a modelli simili a videogiochi, con la rappresentazione immediata dei fenomeni. Per poter creare modelli utili a rappresentare realtà sociali e scegliendo tra vetri di *spin* e videogiochi, dobbiamo probabilmente scegliere di "sporcarci le mani" collocandoci il più possibile vicino ai secondi.

Ciò si scontra con problemi fondamentali: oltre due secoli di ricerca economica non hanno ancora raggiunto risultati concreti (nel senso di utili a capire la realtà) che siano coerenti con l'intuizione dell'esploratore della natura umana Adam Smith, dalla Teoria dei sentimenti morali alla Ricchezza delle nazioni: l'economia (intesa come ciò che accade nella società, con la formazione dei prezzi e delle quantità oggetto di scambio, con lo sviluppo o la sua mancanza, con i cicli economici, ...) è il risultato dell'azione umana, ma non è un progetto degli uomini.

Alla luce di quanto ora sappiamo sulla complessità, l'economia come scienza³ dovrebbe quindi occuparsi maggiormente di come realmente agiscono gli individui, mentre ha dedicato e dedica così tante energie ad immaginare schemi generali da cui far discendere ogni conseguenza.

Che l'economia non sia un progetto degli uomini (ovviamente l'economia come insieme di accadimenti economici) è tema difficile da comunicare in modo convincente sia ad interlocutori che per carenza di conoscenze spiegano le vicende economiche in termini semplicistici, come effetto dell'azione di pochi; sia a interlocutori tecnicamente raffinati, che operano da protagonisti nell'economia e sopravvalutano i risultati della azione propria e di quella degli altri soggetti con cui interagiscono.

Ovviamente esistono soggetti che operano nelle nicchie dell'economia e traggono profitti da disegni più o meno complessi; ad esempio, si avvantaggiano del fatto di avere compreso, per un breve tratto di tempo, come stanno operando altri soggetti e quali ineluttabili conseguenze quelle azioni produrranno. Ma questa non è l'economia

³ Ecco il problema del doppio significato di economia in italiano, richiamato in Parisi (2002).

(i fatti economici) intesa come grande flusso di eventi, bensì un insieme di rivoli e rivoletti.

Soprattutto la storia insegna che la sperimentazione di un progetto degli uomini in economia, avvenuta nel secolo scorso al seguito della grande utopia del comunismo, ha avuto un pessimo esito.

Proprio perché l'economia non è un progetto degli uomini che si trovano a realizzarla, ha senso e valore etico il grande disegno dell'economia matematica, che trova in Walras il momento fondativo più alto (Baranzini e Tatti, 2002): i fatti economici sono percepiti dai soggetti che li identificano secondo più tipi (reali, come ad esempio prezzi, domanda, offerta, ...); quei tipi reali devono essere riferiti a tipi ideali, con un procedimento di astrazione, perché è su quei tipi ideali che si applica l'economia politica pura, come insieme di proposizioni matematiche.

Le proposizioni matematiche per Walras “sono” l'economia (a questo punto non è forse più necessaria la distinzione tra economia come insieme di fatti economici e come disciplina che li studia); siamo infatti molto lontani dall'uso del linguaggio matematico come formalismo dotato di controlli interni di coerenza e rigore. L'economia matematica con Walras diventa il vero mondo da indagare, valido in sé, dalla cui comprensione discende la capacità di valutare gli accadimenti economici quotidiana e di governarli.

Da Walras ad oggi sono stati compiuti tantissimi passi e sono stati conseguiti anche numerosi successi, con lo sviluppo della capacità di investigazione di aspetti dell'economia (come insieme di fatti economici) anche del tutto controintuitivi (si pensi al grandioso edificio dell'economia monetaria). Ma sono successi che si scontrano con grandi difficoltà teoriche e pratiche; con la necessità di presupporre caratteristiche non realistiche per gli attori economici (si veda il riferimento a Sargent, 1993, sopra).

L'alternativa radicale alla ricerca del progetto dell'economia nell'astrazione dell'economia matematica sta nel riconoscere che l'economia (l'insieme dei fatti economici) è un sistema complesso di cui nessuno degli agenti ha conoscenza o rappresentazione adeguata; anzi, molti agenti non hanno nessuna rappresentazione. Forzando le tinte, gli agenti economici sono lontani dal sistema dell'economia tanto quanto le formiche sono lontane dal loro formicaio.

La domanda su “come si è formato quel sistema complesso?” trova una risposta nell'economia evoluzionista, con una frase emblematica in un recente lavoro dei capiscuola Nelson e Winter (2002, p.31):

The general account we have given of how individual skills, organizational routines, advanced technologies and modern institutions come into being has stressed trial-and-error cumulative learning, partly by individuals, partly by organizations, partly by society as a whole. We do not deny the vital role played in

the progress of all these variables by the body of knowledge — in modern days often scientific knowledge — that humankind has accumulated, that directs its problem solving and makes those efforts powerful. But then one can ask the same question about the origins of that powerful body of knowledge: how did humans of such bounded rationality manage to do that? Again, the answer we evolutionary theorists would give is that it evolved.

Qualche chiarimento sui termini “complesso” e “complicato”: un motore a scoppio è certamente molto complicato, ma smontandolo riusciamo a comprendere come ciascuna sua parte interviene nel sistema, di cui afferriamo molto bene il funzionamento; un formicaio è un sistema complesso (Hölldobler e Wilson, 1997), il cui funzionamento è difficile da comprendere; soprattutto, l'esame isolato delle diverse componenti (i diversi tipi di formiche) ci dice pochissimo sul ruolo delle diverse parti e sulla meccanica del sistema. Un aspetto ulteriore, non irrilevante: in un sistema complicato, un solo piccolo particolare fuori uso blocca il funzionamento dell'insieme; i sistemi complessi sono invece robusti rispetto al malfunzionamento delle parti. Per comprendere il formicaio - come per comprendere l'economia o suoi sub-sistemi quali i consumi ed i mercati - occorre studiare contemporaneamente le componenti (le limitatissime formiche, differenziate per funzioni, o i "semplici" agenti economici) ed il sistema aggregato che ne deriva (formicaio o mercato), con le tecniche innovative messe a disposizione dalla simulazione.

Ad esempio, la complessità dell'andamento dei mercati non può essere spiegata né analizzando i consumatori come singoli punti considerati a sé, né studiando la domanda quale fenomeno aggregato, ma solo tenendo conto delle azioni e delle interazioni dei e tra i consumatori, che scelgono prodotti diversi, e i comportamenti e le interazioni delle singole imprese.

Il tutto con effetti intrinsecamente difficili da prevedere via via che l'analisi si fa dettagliata per prodotti, periodi, aree territoriali . . . Altrettanto difficili da indirizzare o correggere da parte di chicchessia, nonostante le illusioni di chi si occupa di *marketing* e delle ansie di chi teme l'economia di mercato.

Studiare l'economia nella prospettiva della complessità significa anche ricollegarsi all'opera dell'economista (e psicologo, politologo) Friedric von Hayek.

Il pensiero di Hayek (si veda, ad esempio, Hayek 1967) confrontato con la teoria della complessità mostra interessantissime analogie, ma anche significative differenze. Seguendo Kilpatrick (2001), ricordiamo che nella descrizione del sistema economico formulata da Hayek i mercati non sono sempre in equilibrio; possono essere autorganizzati dagli agenti come accade nella realtà; infine, i mercati reali sono in modificazione continua.

Queste opinioni sono condivise dai moderni studiosi della complessità, ma ci sono anche differenze: per Hayek il mercato è quasi sempre capace della miglior soluzione, tanto che ogni intervento pubblico non può che peggiorare la situazione. In altre

parole, il mercato può non funzionare, ma i pianificatori non possono fare meglio. Invece nella visione dei teorici della complessità, i pianificatori centrali possono avere successo nel migliorare i mercati, ma la loro azione può anche essere irrilevante o controproducente, senza che sia facile valutarne a priori l'effetto.

Le differenze non sono comunque enormi. Con Arthur, Durlauff e Lane (Arthur e al., 1997) possiamo esaminare la visione economica cosiddetta di Santa Fe (il riferimento è al Santa Fe Institute, nel New Mexico, dedicato agli studi sulla complessità) e individuare le analogie con il lavoro di Hayek.

La visione di Santa Fe può essere sintetizzata come insieme di precise condizioni per lo studio dell'economia; condizioni tra l'altro difficili da trattare con l'apparato matematico tradizionale: (i) interazione dispersa, (ii) nessuna capacità di gestione globale, (iii) organizzazioni gerarchiche che si intersecano, (iv) adattamento continuo, (v) innovazione continua, (vi) dinamica – intesa come sequenza di modificazioni del sistema nel tempo - senza equilibrio.

Ritornando alla lezione della storia, si è sostenuto più volte che il comunismo ha fallito l'obiettivo della costruzione del suo progetto di economia perché non aveva i *computer* necessari per calcolare i modelli di equilibrio economico generale necessari per determinare i prezzi dei beni e dei fattori produttivi per far operare il sistema di incentivi e di informazioni necessarie all'apparato produttivo per assumere in modo relativamente decentrato le decisioni necessarie (decisioni del resto impossibili da assumere in modo accentrato).

In questo modo si aderisce alla ricerca *à la* Walras, individuando il progetto dell'economia nell'astrazione e perfezione dei modelli; all'opposto, quello che sarebbe stato necessario riprodurre artificialmente è “il funzionamento del formicaio”.

La strada è ancora lunga per chi studia le formiche, ma lo è ovviamente ancor di più per chi è ai primi passi di uno studio dell'economia che rinuncia all'atmosfera limpida dell'economia matematica e ai risultati di modelli meravigliosi come quello dell'equilibrio economico generale, per avvicinarsi alle incoerenze, alle imprecisioni, alla irrazionalità degli accadimenti quotidiani.

Come vedremo, la simulazione ci mostra che l'azione di individui capaci di apprendimento, oppure anche molto semplici, può riprodurre risultati non ovvii, come le bolle e i *crash* di un mercato borsistico.

La necessità di spostare sempre più l'attenzione agli individui, rafforzando la pionieristica azione di chi si occupa di economia sperimentale, rende evidente l'esigenza di una collaborazione profonda tra scienza cognitiva e economia, per studiare come si comportano i soggetti economici reali in una vasta gamma di situazioni e contesti. Ciò significa porre attenzione a comportamenti in società tra loro molto diverse, anche con attenzione alle economie primitive, per scoprire se

esistano e quali siano i fondamenti dei comportamenti economici, gli *ex ante* individuali da cui possano emergere i comportamenti aggregati.

L'attenzione alla componente cognitiva è ben evidente nell'opera di Hayek, in particolare quando ritorna (Hayek, 1952, p.V) agli interessi giovanili per la psicologia, premettendo, con un delizioso richiamo a Pope⁴, che "*A great deal of explanation would be necessary were I to try and justify why an economist ventures to rush in where psychologists fear to tread*", ma che "*In the end it was concern with the logical character of social theory which forced me to re-examine systematically my ideas on theoretical psychology*".

LA COSTRUZIONE DEI MODELLI DI SIMULAZIONE FONDATI SU AGENTI

L'esigenza prioritaria sta dunque nella ricerca sui soggetti economici e sulla relazione di questi ultimi e la complessità

Non si tratta di riaprire l'annosa discussione tra individualismo metodologico e istituzionalismo, ma di riconoscere quanto di straordinariamente forte sta nella analisi cosiddetta della complessità, per cui la somma dei soggetti (dei quali, in chiave di individualismo metodologico è comunque necessario sapere di più) produce risultati non lineari, o non previsti o non prevedibili, rispetto ai singoli componenti. In questa chiave non è necessariamente vera l'implicazione hayekiana della forma forte dell'individualismo metodologico (i termini collettivi devono essere esplicitamente definibili per mezzo di termini individuali) secondo cui non esistono tendenze o risultati economici che gli individui non riescono a modificare, a patto che lo vogliano e posseggano l'informazione necessaria. Su questi temi vedere anche Conte e Terna (2000).

Un campo molto prossimo è la ricerca sull'intelligenza degli sciami (Bonabeau e al., 1999), in cui si presta attenzione soprattutto a sistemi biologici (insetti collettivi) e a sistemi robotici, ma il lavoro può essere esteso a sistemi sociali. Le capacità dei sistemi studiati hanno infatti la caratteristica di trascendere le abilità dei singoli individui costituenti: in molti casi si rilevano comportamenti di gruppo affidabili e efficaci che derivano da semplici regole di interazione tra individui o tra individui e ambiente.

Si tratta dunque di studiare l'azione dei soggetti economici in termini cognitivi e contemporaneamente di verificare – con la simulazione – quali siano le conseguenze di ciò che via via si riesce a comprendere sui soggetti, se si tiene conto di azioni, reazioni e interazioni degli agenti; dell'imitazione; dell'apprendimento; ...

⁴ Alexander Pope (1711), *An Essay on Criticism*. Lewis, London, verso 625: "*For fools rush in where angels fear to tread.*"

La costruzione di questo tipo di modelli è semplificata dall'uso di protocolli di programmazione ad oggetti qual è *Swarm* e dall'adozioni di schemi di riferimento che chiariscano il ruolo dell'ambiente, degli agenti, delle loro regole di comportamento e le modalità di modificazione di tali regole (sistemi di produzione o sistemi esperti, reti neurali, sistemi a classificatori, algoritmi genetici, ...).

Swarm non è certamente l'unico strumento disponibile; ad esempio sto attualmente collaborando alla stesura di due libri con elevato contenuto comparativo, prendendo in considerazione:

Swarm, <http://www.swarm.org>;

Ascape, <http://www.brook.edu/dynamics/models/ascape/>;

Repast, <http://repast.sourceforge.net/>;

Starlogo, <http://el.www.media.mit.edu/groups/el/Projects/starlogo/>;

SDML, <http://www.cpm.mmu.ac.uk/sdml/>.

e l'elenco potrebbe continuare, ad esempio con un prodotto IBM (Bigus e al., 2002), denominato ABLE (<http://www.alphaworks.ibm.com/tech/able>).

Swarm ha il vantaggio della maggior diffusione, della robustezza del codice, di essere totalmente neutrale rispetto alla struttura degli agenti⁵, di essere il primo e più riuscito tentativo di “lingua franca” della simulazione ad agenti, di avere stabilito un protocollo di scrittura del codice, di essere accompagnato da una *mailing list* molto collaborativa, che aiuta neofiti ed esperti.

Il progetto *Swarm*, nome che sta per sciame (di consumatori, aziende, unità produttive, ma anche insetti, pesci, molecole ...) è nato, a metà anni '90, all'interno del *Sante Fe Institute* (www.santafe.edu), proprio per realizzare una “lingua franca” della simulazione ad agenti. Si tratta non tanto di un programma, quanto di una biblioteca di funzioni, sviluppare tramite classi e metodi, secondo l'impostazione della programmazione a oggetti, che utilizza classi astratte per realizzare esemplari (*instance*) specifici (nella Figura 1: gli insetti, lo spazio del cibo, . . .); esemplari che reagiscono a ordini/messaggi (i metodi). Il tutto corredato da un protocollo utile per utilizzare le classi in modo ben formato, scrivendo in Objective C e, più recentemente in Java, le proprie applicazioni.

La tipica struttura di una applicazione scritta in *Swarm* prevede la presenza di due livelli. Si veda la Figura 1 in cui sono indicati (i) gli oggetti che devono essere costruiti all'interno del modello; nel nostro esempio: un reticolo su cui far muovere gli oggetti della simulazione; uno spazio in cui sarà codificata la presenza o assenza

⁵ Da <http://sourceforge.net/projects/swarm> leggiamo che “*Swarm* è un nucleo informatico e una biblioteca di codici informatici per la simulazione multi-agente di sistemi complessi. L'architettura di base di *Swarm* consiste in una collezione di agenti interattivi in modo parallelo: all'interno di tale architettura può quindi essere sviluppata una varietà molto ampia di modelli basati su agenti.”

di qualche caratteristica (il cibo, nel nostro esempio); la classe degli agenti della simulazione, qui semplici insetti che si muovono a caso e utilizzano il cibo, da cui far discendere gli esemplari di insetti inclusi in un lista cui - grazie al protocollo *Swarm* che prevede che i messaggi possano essere indifferentemente inviati agli oggetti o alle liste che li contengono - invieremo il comando di compiere un passo.

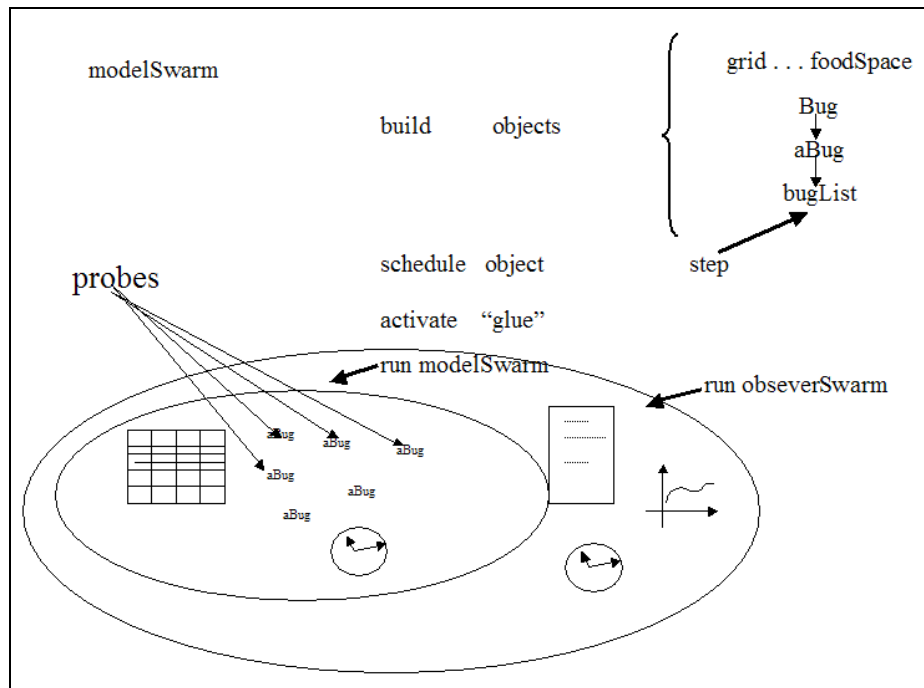


Figura 1 – Una struttura esemplificativa di una simulazione con *Swarm*

Nella Figura 1 è anche indicata (ii) la costruzione di oggetti relativi alla gestione del tempo e cioè le sequenze degli eventi che, all'interno dell'esperimento, devono succedersi; infine (iii) un passaggio di caricamento congiunto degli oggetti che rappresentano gli agenti della simulazione e di quelli che gestiscono gli eventi del tempo ("incollati" in memoria). Infine, la definizione di due livelli di astrazione che consentono: (a) di gestire l'osservatore - "noi" che, con opportuni strumenti quali grafici, tabelle, istogrammi, osserviamo l'effetto dello scorrere del tempo all'interno del modello, con i relativi accadimenti - e (b), ad un livello subordinato nella scala dei tempi anche se autonomo dal punto di vista del contenuto, il funzionamento dell'esperimento vero e proprio.

Swarm consente sia di guardare al funzionamento del modello dal livello dell'osservatore, sia di entrare direttamente all'interno dei singoli oggetti che popolano la simulazione, grazie a sonde che, sviluppate automaticamente con la costruzione degli oggetti, permettono di tenerne sotto controllo variabili e funzioni mentre la simulazione procede.

Nella Figura 1 sono anche rappresentati due orologi, uno relativo all'ambiente dell'osservatore, l'altro relativo all'ambiente dell'esperimento; gli orologi possono gestire il tempo con incrementi definiti secondo le esigenze della simulazione (all'interno dell'unità di tempo possono essere definiti da 1 a n passi, cui corrispondono o no eventi, quindi anche passi "vuoti") e sono automaticamente sincronizzati grazie alle proprietà che ereditano in quanto derivati dalla biblioteca di classi *Swarm*. Ciò semplifica molto uno degli aspetti più complessi della scrittura dei programmi per la conduzione di esperimenti di simulazione, vale a dire la gestione sincronizzata e ben coordinata degli eventi nel tempo.

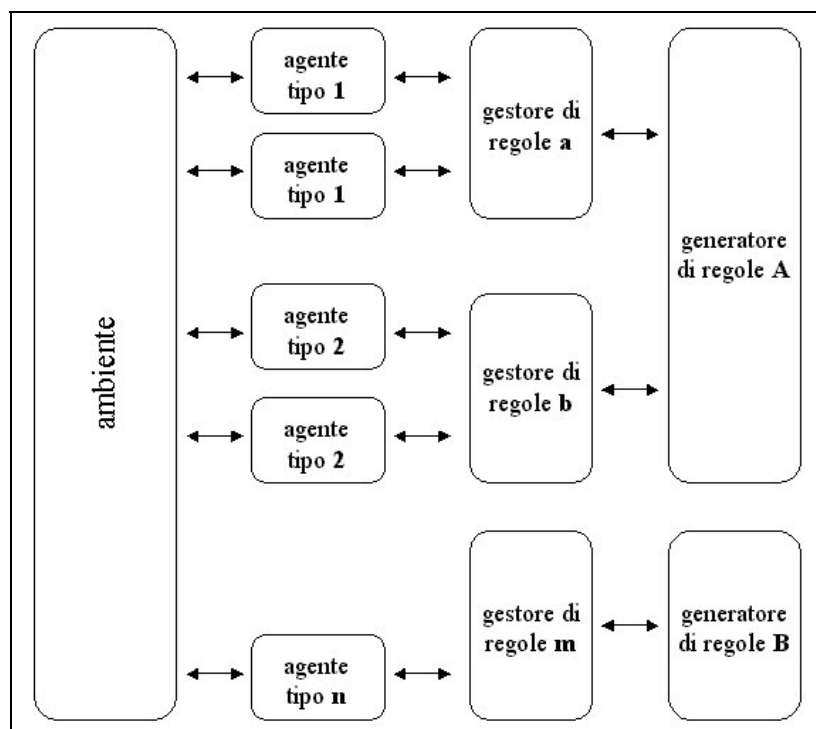


Figura 2 - Schema ERA, Environment-Rules-Agents

Come costruire gli oggetti che rappresentano gli agenti all'interno delle nostre simulazioni? La proposta dello schema ERA, *Environment-Rules-Agents* (Terna, 2000a)⁶, riportato nella Figura 2, è quella di gestire quattro diversi strati nella costruzione del modello e degli agenti.

- (i) Un primo strato rappresenta l'ambiente in cui gli elementi sono chiamati ad interagire. All'interno del protocollo di *Swarm* corrisponde al Modello Swarm della Figura 1 (normalmente la classe è definita *ModelSwarm*), vale a dire il contesto all'interno del quale si definiscono gli agenti, se ne strutturano le liste, si individuano gli eventi nel tempo, si chiariscono le

⁶ Vedere anche <web.econ.unito.it/terna/ct-era/ct-era.html>.

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 oggetti creati dal Modello.

- (ii) Un secondo strato è appunto quello degli agenti, che possono essere costruiti come esemplari di una o di più classi, a loro volta generate ereditando proprietà, caratteri, dati e metodi da classi più generali.
- (iii) 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 (classi dette *RuleMaster*), comunicandogli i dati necessari ed ottenendo le indicazioni di azione.
- (iv) Il quarto strato tratta la costruzione delle regole. Esattamente come gli agenti interrogano i gestori di regole, i gestori di regole interrogano i generatori di regole (classi dette *RuleMaker*) per modificare la propria linea di azione.

Questo 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 sostituire a volta a volta gestori di regole con caratteristiche diverse, semplicemente sostituendo gli oggetti introdotti nel modello. Ad esempio: un sistema a regole fisse; una rete neurale; un algoritmo genetico, un sistema classificatore.

A loro volta reti neurali, algoritmi genetici, sistemi classificatori ecc. avranno la necessità di ricorrere a generatori di regole, differenziati a seconda della loro rispettiva tipologia: ciò sarà facilitato proprio dalla modularità del disegno adottato.

Un'importante precisazione metodologica riguarda il terzo e il quarto strato, indicati in (iii) e (iv) sopra: grazie ai produttori di regole, ed ai gestori di regole, è possibile sviluppare ogni tipo di agente che possa essere scritto con un codice informatico; ciò vale in particolare per gli agenti cosiddetti cognitivi o BDI (*Beliefs, Desires, Intentions*), cioè agenti costruiti in modo che esprimano comportamenti correlati a un protocollo di comportamento, cui si attribuiscono significati.

AGENTI SENZA E CON "MENTE" IN AMBIENTI STRUTTURATI E NON STRUTTURATI

Dal punto di vista dell'interazione con la scienza cognitiva è molto importante tentare una classificazione degli agenti utilizzati nelle simulazioni a seconda della sofisticazione dei meccanismi di scelta e decisione, con o senza adattamento e soprattutto capacità di apprendere.

Con un certo grado di approssimazione, se gli agenti sono privi di capacità di adattamento sono catalogati “senza mente”; altrimenti, “con mente”. Altro aspetto: l’ambiente in cui operano può essere neutrale o adeguatamente strutturato con regole (es. la borsa); in altri termini può prevedere o no istituzioni in cui/con cui interagire, costruite *ex ante* o emergenti dalla simulazione stessa. Sulla presenza della “mente” negli agenti, le risposte stanno su un continuo che va dalla proposta della massima semplicità⁷ (Axelrod, 1997) alla costruzione di agenti cognitivi ad alto livello (agenti BDI).

Modificando Terna (2001), ma solo come ordine espositivo, una possibile articolazione semplificata è:

- a) agenti “senza mente” operanti in un ambiente non strutturato;
- b) agenti “senza mente” operanti in un ambiente strutturato;
- c) agenti “con mente” operanti in un ambiente non strutturato;
- d) agenti “con mente” operanti in un ambiente strutturato.

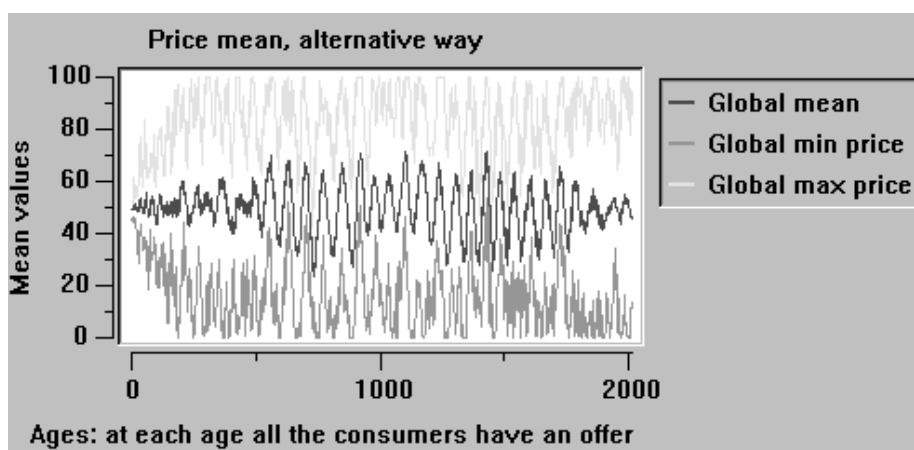


Figura 3. L’esperimento inizia da una situazione equilibrata, con bassa reattività e bassa sensitività.

Per ricercare caratteri comuni all’interno di ciascuna delle quattro situazioni occorrerebbe accumulare prove condotte con criteri e condizioni confrontabili, in misura ben superiore a quelle disponibili; qui di seguito si tenta comunque una comparazione esemplificativa, fondata su modelli sviluppati dall’autore in condizioni paragonabili: di tutti i tipi di agenti è perfettamente nota la modalità di funzionamento interno ed esterno (tra agenti e tra agenti e ambiente); per tutte le simulazioni presentate si è usato Swarm.

⁷ 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 Keep It Sufficiently Simple (tanto da corrispondere agli agenti reali).

AGENTI SENZA “MENTE” IN UN AMBIENTE NON STRUTTURATO (A)

Si può mostrare che agenti “senza mente” che compiono transazioni in un ambiente neutrale producono risultati complessi, ma non realistici: in Terna (2002b) si conduce un esperimento di mercato con regole di comportamento fissate a priori, quindi senza apprendimento; gli agenti scambiano tra loro, incontrandosi nell’ambiente in modo casuale.

L’esperimento mostra l’emergere di sequenze caotiche di prezzi in un semplice modello interattivo di compratori e venditori, equipaggiati con regole minimali. Consumatori e venditori operano in ordine casuale ad ogni ciclo di tempo: ogni consumatore cerca un venditore e confronta il proprio prezzo soglia, al di sopra del quale non compera, con quello del venditore. La sequenza degli eventi, che comprende l’aggiornamento dei prezzi di ciascun compratore e di ciascun venditore, è rigida⁸.

In tutti gli esperimenti condotti all’interno di questo schema il risultato è quello di un prezzo ciclico, con transizioni caotiche da una fase all’altra. La prima è una emergenza imprevista, ma in qualche modo prevedibile, dato che il meccanismo sopra descritto introduce un ciclo delle scorte nel modello. La seconda è una emergenza imprevedibile e difficile da progettare: il caos è ovviamente osservabile nei fenomeni economici e sociali, ma non è agevole predisporre uno schema di *reverse engineering* in grado di produrlo come interazione tra agenti.

Negli esperimenti riportati nelle Figure da 3 a 6, consumatori e venditori hanno gli stessi parametri iniziali, che si modificheranno con la simulazione. La memoria del sistema sta nell’interazione tra consumatori e venditori.

⁸ La sequenza è:

- i. ad ogni intervallo di tempo t , ogni consumatore artificiale (agente) incontra un venditore artificiale (altro agente), scelto casualmente;
- ii. il venditore stabilisce il proprio prezzo di vendita, scelto in un piccolo intervallo;
- iii. il consumatore accetta l’offerta solo se il prezzo di vendita cade al di sotto del suo livello di prezzo di acquisto;
- iv. ad ogni intervallo di tempo t , ogni agente (consumatore o venditore) incrementa il proprio contatore delle transazioni di 1 unità, se compie una transazione; lo diminuisce di 1 unità nel caso opposto;
- v. quando i loro contatori valgono meno o uguale -1, i consumatori aumentano il livello del proprio prezzo di acquisto;
- vi. quando i loro contatori valgono più o uguale 1, i consumatori diminuiscono il livello del proprio prezzo di acquisto;
- vii. quando i loro contatori valgono meno di -1, i venditori riducono di un ammontare casuale scelto tra zero e un valore fisso, entrambi i limiti l’intervallo all’interno del quale scelgono, in modo casuale, il proprio prezzo di vendita;
- viii. quando i loro contatori valgono più di 1, i venditori aumentano di un ammontare casuale scelto tra zero e un valore fisso, entrambi i limiti l’intervallo all’interno del quale scelgono, in modo casuale, il proprio prezzo di vendita.

Le differenze tra le figure⁹, come indicato nelle didascalie, sono dovute a scelte di parametri, descritte nel lavoro richiamato.

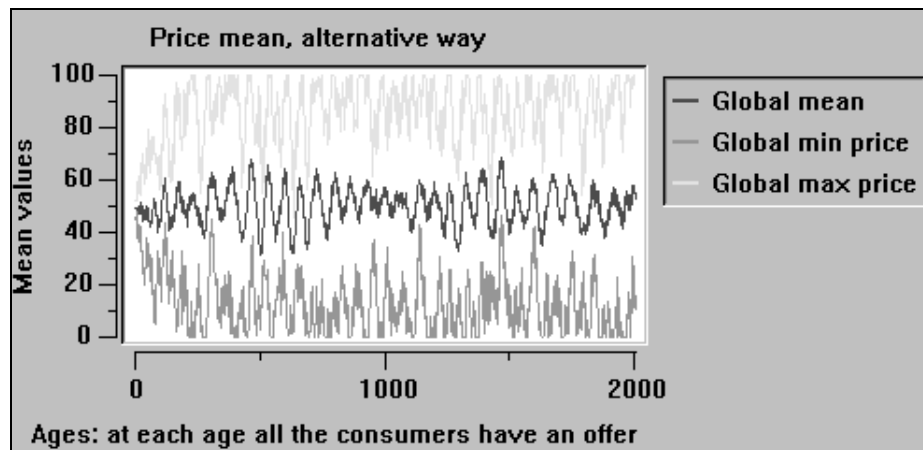


Figura 4. L'esperimento inizia da una situazione equilibrata, con bassa reattività e alta sensibilità.

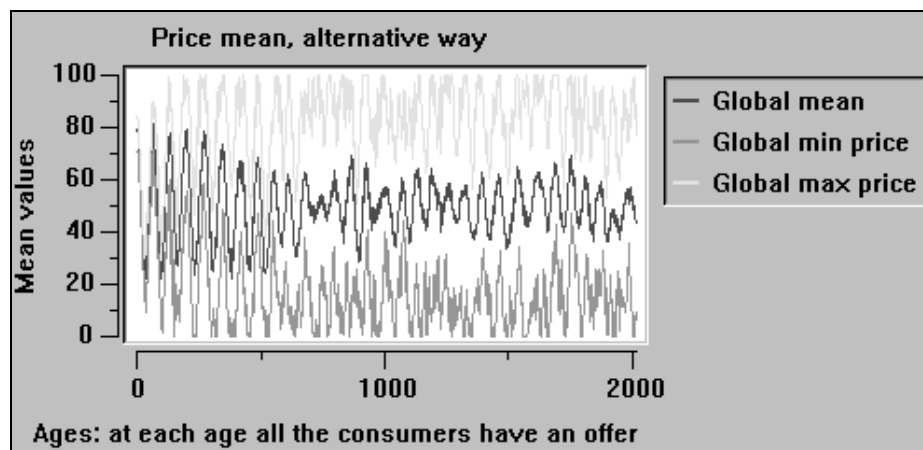


Figura 5. L'esperimento inizia da una situazione non equilibrata, con bassa reattività e bassa sensibilità.

I risultati ottenuti sono interessanti per l'emergenza di un fenomeno complesso, con elementi di caos generato indirettamente dagli agenti e non direttamente da equazioni "maliziose". Si tratta però di risultati non interessanti sul piano del riscontro dei fenomeni prodotti con il mondo reale.

⁹ I prezzi riportati sono medie, minimi e massimi di tutti i prezzi offerti in ogni ciclo. (La "alternative way" dei titoli è riferita ad un problema interno di calcolo).

AGENTI SENZA “MENTE” IN UN AMBIENTE STRUTTURATO (B)

Sono invece molto diversi i risultati che si possono ottenere operando in un ambiente strutturato: agenti molto semplici che operano con riferimento ad un meccanismo di contrattazione telematica qual è quello di una borsa senza “grida”, producono risultati molto realistici, con bolle e *crash*.

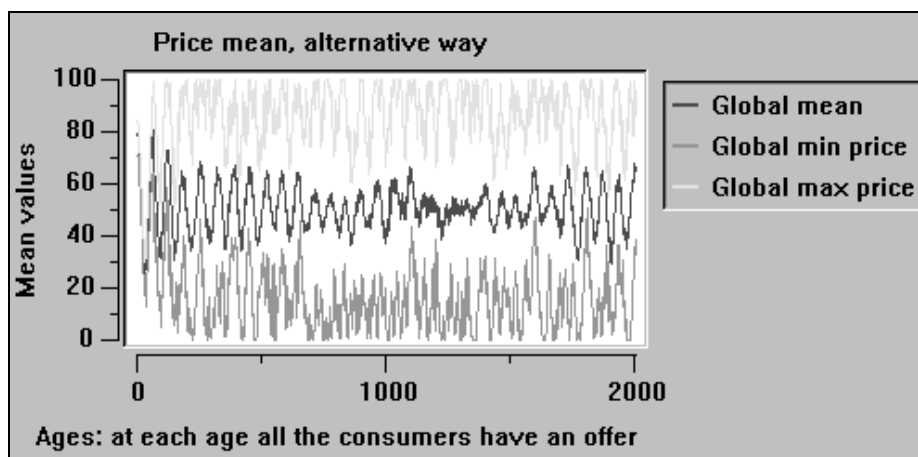


Figura 6. L'esperimento inizia da una situazione non equilibrata, con bassa reattività e alta sensitività.

Nella impostazione base, che genera i risultati di andamento dei prezzi della Figura 7, gli agenti che popolano la simulazione (Terna, 2001) scelgono a caso, con eguale probabilità, se acquistare o vendere; trasmettono al *book* della borsa simulata un ordine con prezzo limite pari all'ultimo prezzo oggetto di effettivo scambio (dato noto in tempo reale agli operatori di una borsa telematica) più/meno uno scostamento casuale scelto in un intervallo limitato. Le transazioni avvengono ad opera del *book*, in sequenza, quando è possibile abbinare due contratti, come accade nel mondo reale. Non si usano quindi equazioni per determinare il prezzo che eguaglia domanda e offerta in un dato intervallo di tempo.

Le bolle, e quasi simmetricamente i *crash*, si formano prevalentemente (con buona correlazione) quando un lato del *book* è molto più “corto” dell'altro, per il prevalere (casuale) di acquisti o di vendite. E' molto interessante il fatto che un risultato complesso emerga da agenti semplici. Ancor più interessante il fatto che la presenza di un ambiente strutturato induca risultati realistici, che a priori parrebbero possibili soltanto con l'impiego di agenti ben più sofisticati.

AGENTI CON “MENTE” IN UN AMBIENTE NON STRUTTURATO (C)

In Terna (2000b) abbiamo invece agenti “con mente” (reti neurali, secondo lo schema CT descritto qui di seguito) che, operando in un ambiente neutrale, producono risultati di ordine spontaneo nella prospettiva hayekiana.

Si propone una impostazione esplicitamente connessionista, fondata sulla metodologia delle reti neurali. La tecnica, detta dei Cross Target¹⁰ (CT), è sviluppata per costruire agenti che operino senza fare ricorso a regole (economiche) definite a priori. Si consideri (Figura 8) lo strato di *output* di una rete neurale artificiale che rappresenta un agente, suddiviso in due parti, caratterizzate come: 1) nodi di uscita relativi ad azioni da compiere (congetture in merito); 2) nodi di uscita relativi agli effetti di tali azioni (sempre: congetture in merito). Con i CT, sia i *target* necessari per l'apprendimento della rete dal lato delle azioni, sia quelli necessari dal lato degli effetti, sono determinati in modo incrociato. I primi sono costruiti in coerenza con gli *output* della rete concernenti gli effetti (lato 2), allo scopo di sviluppare la capacità di decidere azioni che producano i risultati attesi. I secondi sono costruiti in coerenza con gli *output* della rete relativi alle congetture di azione (lato 1), con lo scopo di sviluppare la capacità dell'agente di stimare gli effetti delle azioni che sta decidendo.

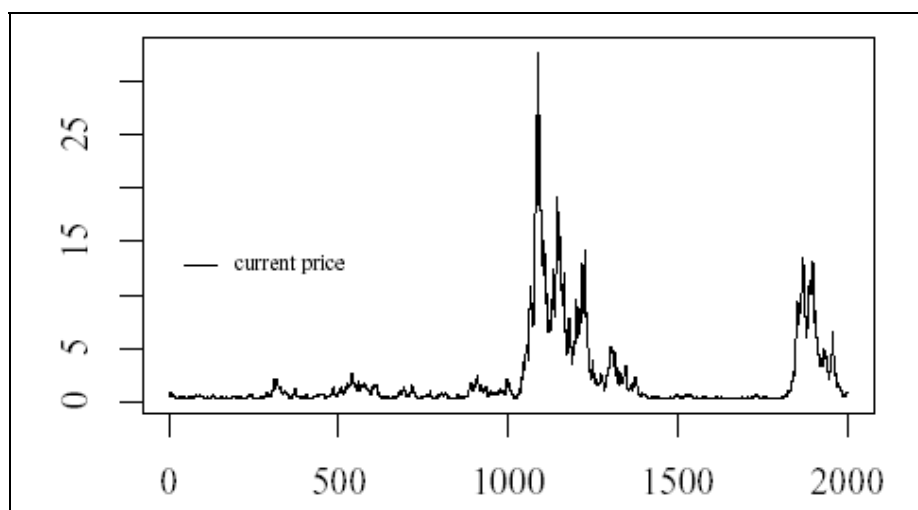


Figura 7. Sequenza di prezzi di una simulazione base, solo con agenti che operano in modo casuale.

L'idea guida è che un agente economico sviluppi con l'apprendimento la capacità di valutare in modo coerente: quale azione deve compiere per ottenere un risultato specifico; quali conseguenze derivano da un'azione data. La tecnica dei CT pone quindi l'apprendimento al centro dell'attenzione, con lo scopo essenziale di condurre esperimenti senza il carico di troppe ipotesi economiche a priori. Si può verificare che i CT possono riprodurre il comportamento di soggetti economici sulla base di un apparato interno spesso elementare o "ingenuo", ma con risultati che dall'esterno appaiono complessi. Per un osservatore, questo tipo di agente apparentemente opera con piani e obiettivi, mentre internamente non ha nulla che possa essere riferito a tali entità. Le capacità richieste all'agente sono in linea con le caratteristiche proprie dei modelli a razionalità limitata, in quanto a *set* informativo e capacità computazionali.

¹⁰ Si veda anche <http://web.econ.unito.it/terna/ct-era/ct-era.html>.

Per un approfondimento del metodo, si veda l'Appendice dedicata al metodo dei CT.

Si introduce ora uno schema sperimentale che, fondato sui CT, fa esplicito uso di agenti che apprendono, per verificare le conseguenze della presenza, nel nostro modello, della capacità di adattamento degli agenti. Gli agenti, differenziati tra produttori e consumatori, si incontrano in modo casuale e formulano proposte di scambio.

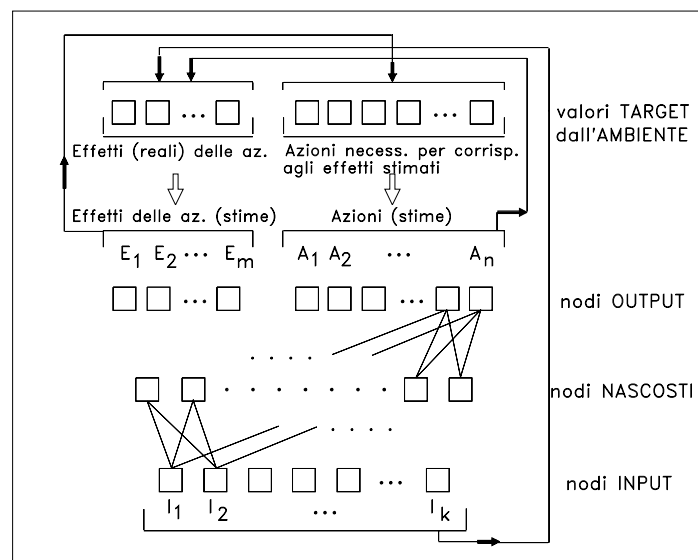


Figura 8. Metodo dei *cross target*: interpretazione della RNA sottostante.

La configurazione della simulazione, simile a quella del punto (A), è la seguente.

- La struttura di *input* della rete neurale che simula l'agente consumatore comprende la spesa del periodo precedente, il fabbisogno del periodo precedente, il prezzo proposto dall'agente nel periodo precedente, la quantità proposta dall'agente nel periodo precedente.
- La struttura di *input* della rete neurale che simula l'agente produttore comprende il ricavo del periodo precedente, il flusso produttivo del periodo precedente, il prezzo proposto dall'agente nel periodo precedente, la quantità proposta dall'agente nel periodo precedente.
- Gli *output* della rete neurale che simula il consumatore e i relativi *target* sono: la congettura sul prezzo di scambio; la congettura sulla quantità scambiata; questi due primi valori sono effetti, nella terminologia dei CT, ma dipendenti anche dall'azione di un altro agente; non essendo in questo caso rilevante lo sviluppo di una capacità di previsione di tali valori, non partecipano ai *target* incrociati determinanti per l'apprendimento sulle azioni. Altri *output*: la spesa congetturata; il fabbisogno di beni nell'intervallo di tempo; p e q , prezzo e

quantità proposti per lo scambio. Per i dettagli e la costruzione dei *target* incrociati si rinvia a Terna (2000b).

- Gli *output* della rete neurale che simula il produttore e i relativi *target* sono: la congettura sul prezzo di scambio; la congettura sulla quantità scambiata (vedi sopra); il ricavo congegnato; il flusso produttivo nell'intervallo di tempo; p e q , prezzo e quantità proposti per lo scambio. Per i dettagli vale detto quanto sopra.

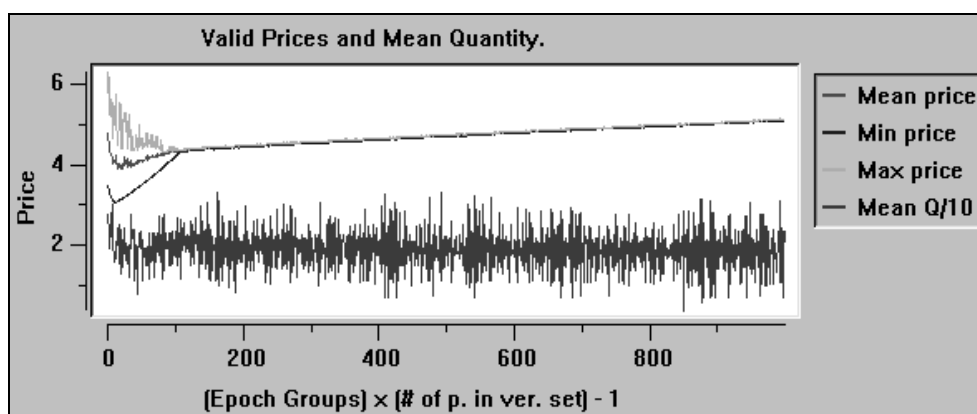


Figura 9. Senza EO e senza apprendimento ripetuto.

- Operano 10 consumatori e 10 produttori (la funzione di produzione non è definita; semplicemente i produttori dispongono della quantità offerta), che si incontrano casualmente ogni giorno, come nel modello del punto (A). Lo scambio è possibile se il prezzo proposto dal produttore è minore di quello proprio del consumatore; lo scambio avviene al prezzo del produttore; la quantità è la minore tra quella del consumatore e quella del produttore; se lo scambio non avviene, il prezzo indicativo sarà quello del consumatore (serve a formare la media dei prezzi); la quantità sarà 0.
- Sono anche introdotti degli obiettivi esterni (EO, vedere l'Appendice): ridurre la spesa e mantenere costante il fabbisogno, per il consumatore. Simmetricamente, aumentare i ricavi e mantenere costante il flusso produttivo, per il produttore.

Con riferimento a Hayek (1937), il modello utilizza agenti che tendenzialmente incorporano la proposizione empirica dell'esistenza di un equilibrio, che però non è né descritto, né misurato, né reso operativo (con un "come si fa a raggiungerlo"). Con la loro azione, e con l'apprendimento, che determina la capacità di valutare gli *output* sulla base degli *input*, si sviluppano gli andamenti delle Figure da 9 a 11.

I grafici si leggono interpretando le curve, dal basso verso l'alto, come: quantità media degli scambi (divisa per 10 per motivi di scala); prezzo minimo, medio e

massimo degli scambi fatti o potenziali (prezzo del consumatore che non scambia, in tal caso).

L'equilibrio spontaneo compare anche senza l'azione degli EO; in via interna; dati i valori congetturali medi che la rete neurale esprime all'inizio, la leggera tendenza all'aumento del prezzo può essere spiegata sulla base di adeguamenti ai valori di fabbisogno (per i consumatori) e di flusso produttivo (per i produttori), autogenerati. L'apprendimento provoca stabilizzazione e convergenza al mercato.

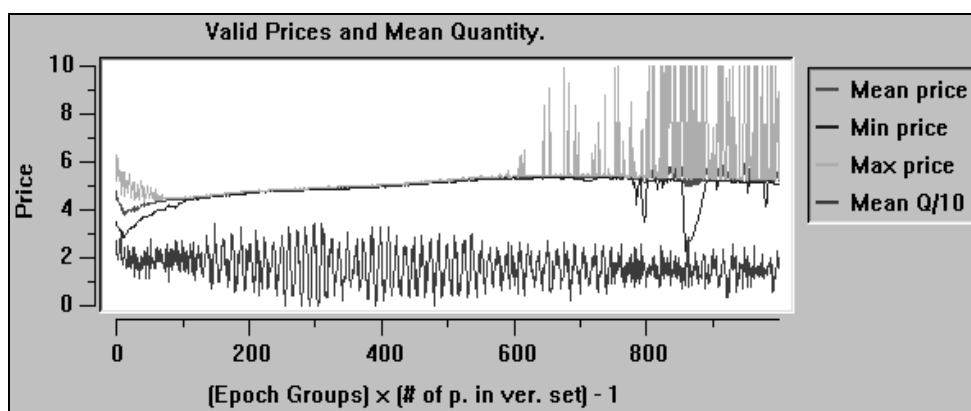


Figura 10. Senza EO, con limitato apprendimento ripetuto.

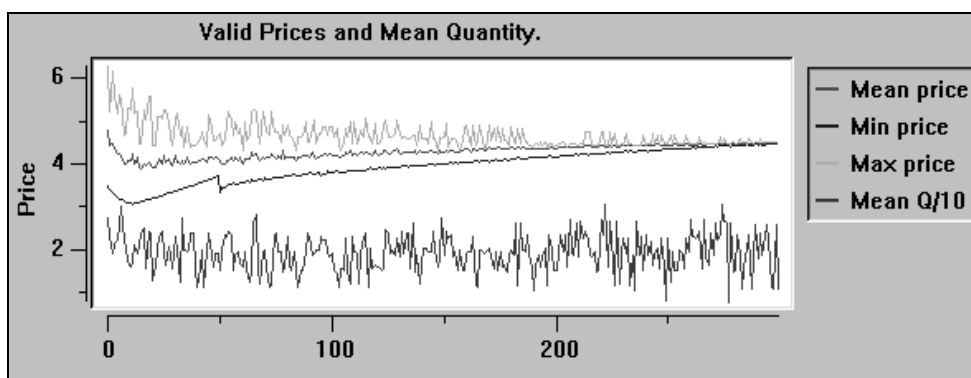


Figura 11. Senza EO, con apprendimento ripetuto.

Richiamando la classificazione in quattro punti su cui stiamo riflettendo, si nota che come nei casi precedenti la complessità emerge da agenti semplici e, soprattutto, che la presenza della capacità di apprendere, anche soltanto sviluppando coerenza interna negli agenti, determina un risultato realistico (nei mercati ci sono prezzi cui tutti gli operatori convergono), ottenuti con parsimonia di mezzi (non c'è struttura del mercato) e in accordo con l'impostazione della proposizione hayekiana dell'emergere dell'ordine dal comportamento non coordinato degli agenti.

AGENTI CON “MENTE” IN UN AMBIENTE STRUTTURATO (D)

In Terna (2001) abbiamo anche il caso di agenti “con mente” (reti neurali, secondo lo schema CT), che evolvono complesse strategie di comportamento operando in un ambito strutturato (la borsa, come sopra).

La Figura 12 mostra l’andamento del patrimonio (liquidità più azioni) di un agente CT che inizia l’attività con patrimonio nullo, ma con capacità di indebitamento illimitata. Opera in borsa con l’immissione di ordini con limiti di prezzo gestiti dal *book* come nel caso (B) sopra visto; lo schema CT fa corrispondere le decisioni di acquisto/vendita con le congetture sugli effetti (patrimonio), valutando queste ultime non ai prezzi correnti, ma secondo una previsione determinata da un previsore esterno che a sua volta è una rete neurale. L’agente segue l’EO (vedere l’appendice) di incrementare il proprio patrimonio.

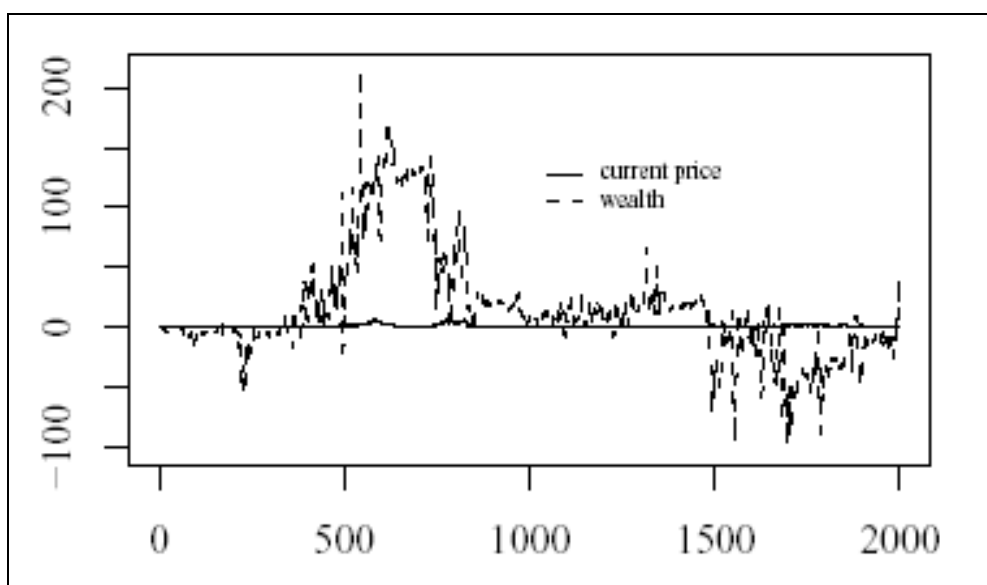


Figura 12. Andamento del patrimonio di agenti CT che interagiscono con molti di agenti casuali, essendo anche presente un piccolo gruppo di agenti che seguono rigidamente la previsione di una rete neurale e un piccolo gruppo di agenti che praticano lo *stop loss*. (Nel grafico compare anche l’andamento dei prezzi).

Come nei casi precedenti, agenti semplici producono comportamenti complessi, con la novità che in un ambiente strutturato il risultato dell’azione di un agente adattivo (“con mente”) produce non solo risultati complessi in termini aggregati, ma anche - a livello microindividuale - strategie non ovvie di azione: nel nostro caso, l’agente CT ha sviluppato una modalità di azione che gli permette di ottenere risultati economicamente positivi anche in presenza di turbolenza di prezzi (sino al ciclo 1500). Si noti che i movimenti di prezzi sono comunque tali da corrispondere a bolle e a *crash*.

I risultati presentati non sono ovviamente generalizzabili, ma possono essere letti come indicativi di una possibile schematizzazione:

	Ambiente non strutturato	Ambiente strutturato
Agenti senza mente	Possono determinare risultati aggregati complessi, con il rischio della poca plausibilità dei risultati	Possono determinare risultati aggregati complessi e plausibili
Agenti con mente	Possono determinare risultati aggregati complessi e plausibili	Possono determinare risultati aggregati complessi e plausibili, con la eventualità di risultati di rilievo a livello micro-individuale

In estrema sintesi: nei modelli ad agenti con interazione non sono necessari agenti particolarmente sofisticati per creare situazioni complesse; la capacità di *learning* e la struttura esterna agli agenti sono però determinanti per la qualità dei risultati.

APPLICAZIONI IN CONTESTI DI IMPRESA

Le stesse metodologie possono infine essere estese ad esplorazioni di reti sociali (l'impresa, la nascita dell'impresa, i sistemi di imprese) con prospettive di analisi teorica, ma anche con risvolti applicativi concreti (simulazioni di contesti produttivi; rappresentazione della conoscenza).

La simulazione come strumento di indagine per l'economia, da cui prende le mosse questa relazione, certamente si manifesta di massimo interesse nell'investigazione delle realtà aziendali secondo la metodologia della complessità.

In Terna (2002) si presenta uno strumento di simulazione fondato su Swarm e denominato jVE (*java Virtual Enterprise*) con cui si scompone il funzionamento di una azienda o di un sistema di aziende: si tratta di una rappresentazione tramite sequenze di numeri ("ricette"), ciascuno dei quali rappresenta un passo nella realizzazione di un bene, merce o servizio che sia. Nella Figura 13 sono proposti alcuni esempi, da semplici (1-2; 2-13) a meno semplici (8-28-27-7). Sempre nella Figura 13 sono rappresentate alcune unità produttive capaci di svolgere ciascuna un passo (o passi diversi, se l'unità è multifunzionale) della produzione all'interno delle varie ricette, oppure di operare come interlocutori del mercato, *front end*. Le singole unità produttive possono essere autonomi micro-meccanismi operanti nel sistema economico, oppure unità integrate all'interno di imprese.

Nella Figura 14 si indica come i passi della produzione, muovendo dall'evento *a*, che rappresenta un ordine, ad esempio coincidente con la sequenza indicata in 8-28-27-7, siano via via gestiti da unità produttive diverse, anche affrontando problemi di scelta, come nel caso dell'evento *x*.

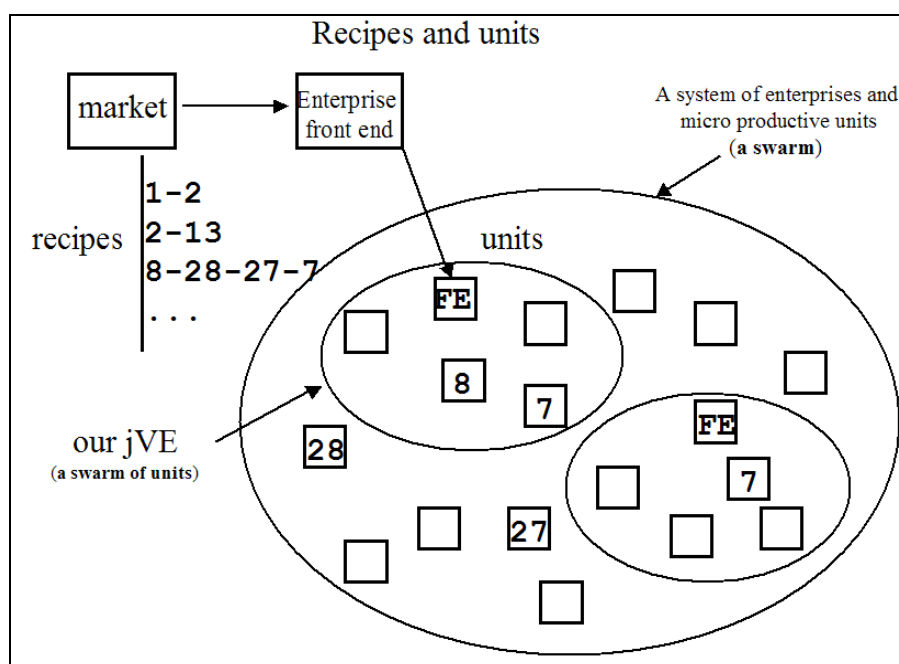


Figura 13. Una visione statica del modello jVE.

L'informazione relativa ai passi da compiere è gestita in modo totalmente decentrato, considerando ogni ordine come un modulo che riporta la storia dei passi già espletati e la sequenza di tutti gli accadimenti necessari per la produzione.

Il modello è basato su un doppio formalismo e su una doppia struttura informatica per descrivere le operazioni da compiere (i beni da produrre) e le unità che compiono le operazioni necessarie (chi fa che cosa): in questo modo, costruendo la simulazione di un'azienda reale o di una situazione astratta emergono facilmente le difformità organizzative, le situazioni di carenza o di impossibilità ad operare, cui è possibile porre rimedio nella simulazione e quindi nella realtà (o nel disegno astratto).

L'obiettivo teorico di questo tipo di simulazioni, che hanno del resto un interessante lato applicativo concreto a casi di specifiche aziende come documentato in Terna (2002), è quello di poter compiere dei passi di simulazione dinamica nella direzione della formazione delle imprese, della relativa interazione, del significato dell'azione imprenditoriale.

Con questa prospettiva si può approfondire un continuo di analisi che va dall'impostazione di Kirzner (1997) a quella di Burt (1992): in estrema sintesi, dal

ruolo dell'imprenditore che coglie le occasioni di profitto attuando azioni correttive a seguito di errori altrui, alla concezione della società come tessuto non continuo, ma segnato da "buchi" (di relazioni, informazioni, collegamenti), colmando i quali nascono le occasioni di impresa.

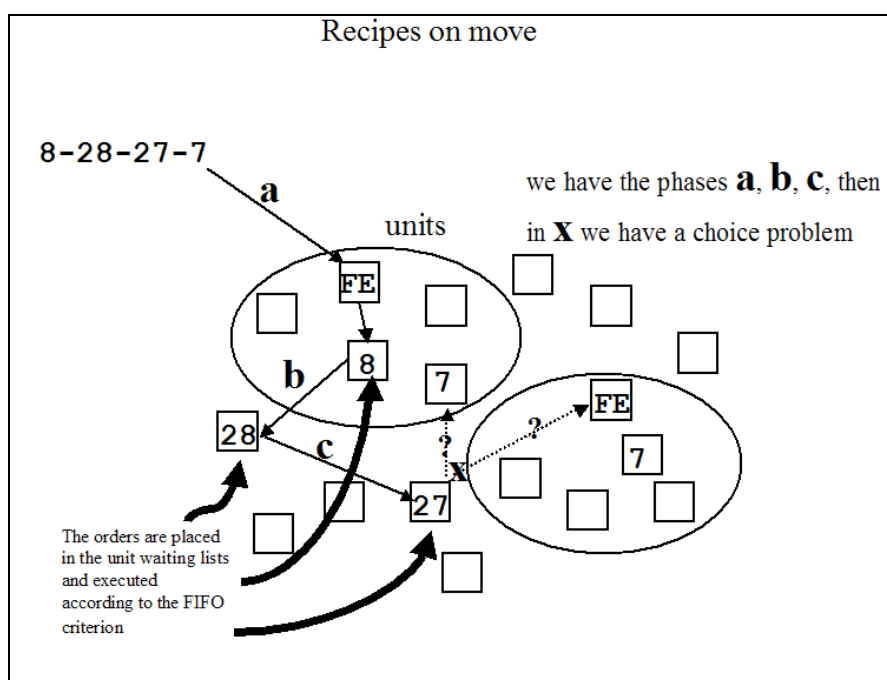


Figura 14. Una visione dinamica del modello jVE.

Di conseguenza, è del massimo interesse costruire modelli di simulazione che siano fondati su una formulazione astratta e generale di processo di produzione, ma che incorporino anche una realistica visione della realtà, per verificare le conseguenze di processi continui di adattamento e innovazione "a prova ed errore".

CONCLUSIONI? OPPURE UN PROGETTO DI LAVORO

Non una conclusione, ma un progetto di lavoro. Quello che si propone, al termine di questa discussione sulla simulazione come strumento di indagine per l'economia, è un progetto di lavoro e di collaborazione che trova nella Società Italiana di Scienze Cognitive un ambito ideale di sviluppo.

Il progetto per la creazione di un repertorio di applicazioni della simulazione con condizioni rigorose di ripetibilità, articolando i modelli per tipi di agenti e ambiente, nonché secondo le tecnologie utilizzate, per avviare un lavoro di ripetizione delle diverse realizzazioni con l'utilizzazione di contenitori *software* via via diversificati (controllo della robustezza dei risultati, anche in ambienti diversi) e con tipologie di

agenti differenziate (ricerca della correlazione dei risultati con la struttura degli agenti).

APPENDICE: IL METODO DEI CROSS TARGET (CT)

In una rete neurale a tre strati, definiamo gli *output* suddividendoli: 1) da un lato, in azioni che il soggetto compie o meglio congettura di compiere; 2) dall'altro, in congetture in merito agli effetti di quelle azioni. La Figura 8 descrive un agente che agisce e apprende all'interno di uno schema CT. L'elemento centrale dell'algoritmo, che può essere interpretato come strumento di costruzione di modelli di comportamento senza uso di ottimizzazione, è una rete neurale, ma la costruzione – forse più complessa e meno neutrale - potrebbe anche fondarsi su altre metodologie.

L'azione e l'apprendimento si svolgono in quattro fasi ogni "giorno"; un giorno è la somma degli eventi necessari per realizzare un ciclo completo di produzione degli *output*, valutazione degli errori, retropropagazione degli stessi, correzione dei pesi o parametri della rete. I pesi sono all'inizio determinati a caso, equidistribuiti in un dato intervallo.

Le quattro fasi sono descrivibili come segue.

- *Output* della rete: sulla base dei valori di *input* e dei pesi (pesi con valori in quel particolare "giorno", essendo l'apprendimento continuamente ripetuto) la rete valuta (fa congetture su) le azioni da compiere (lato destro della Figura 8) e gli effetti di tali azioni (lato sinistro della Figura 8).
- *Target* per il lato sinistro della figura: i *target*, o valori che la rete deve imparare a riprodurre, per quel che riguarda le congetture sugli effetti sono costruiti sulla base delle azioni decise nell'altro lato della rete. In questo modo le valutazioni sugli effetti diventano (tendono a diventare) coerenti con le valutazioni sulle azioni.
- *Target* per il lato destro della figura: le differenze tra *target* e *output* della rete misurate nella fase 2) possono essere interpretate in modo inverso, come punto di partenza per la modificazione delle azioni al fine di avvicinarle alle congetture sugli effetti. Dunque il processo di avvicinamento è duplice: dagli effetti verso le azioni e viceversa, costruendo appunto i *target* in modo incrociato. Essendo spesso indeterminate le formule inverse necessarie per la costruzione dei *target* delle azioni, le correzioni sono distribuite in modo casuale tra tutti i *target* da costruire; inoltre, se più correzioni si riferiscono ad uno stesso *target*, si prende in considerazione soltanto la maggiore in modulo.
- *Backpropagation*: si effettua infine l'apprendimento, correggendo i pesi della rete al fine di ottenere stime di effetti più prossime alle conseguenze delle

azioni congeturate e congetture di azione più coerenti con le stime sugli effetti.

Con una opportuna variabilità in *input*, si ripetono le quattro fasi indicate per più cicli o "giorni", con un adattamento continuo della rete alle modificazioni ambientali. Analizzando dopo ogni "giorno" le matrici dei pesi, si rileva che la matrice che collega i nodi *input* a quelli *hidden* si modifica marginalmente, mentre il cambiamento più rilevante si concentra nella matrice che collega i nodi *hidden* a quelli *output*. La rete è quasi certamente sotto-adattata e di conseguenza l'agente simulato sviluppa una capacità solo locale di agire nell'ambiente.

Si può indicare l'apprendimento presentato sopra come apprendimento a breve termine, individuando per contro anche un apprendimento a lungo termine o apprendimento ripetuto, in analogia con la distinzione tra memoria a breve termine e memoria a lungo termine: 1) la fase di apprendimento e azione sin qui esaminata produce agenti che modificano continuamente i propri pesi, adattandosi in modo locale ai cambiamenti dell'ambiente; 2) *ex post* è possibile introdurre un nuovo apprendimento, sulla base dei dati storici ottenuti da quanto è via via accaduto durante la fase precedente; ne deriva una rete in grado di reagire correttamente, senza più modificare i pesi, a cambiamenti di rilievo che intervengano nell'ambiente. Il secondo tipo di apprendimento può avvenire anche periodicamente, su un breve tratto di dati (ad esempio, ogni 50 giorni sui precedenti 100); oppure su un campione dei dati storici.

Con i CT si ottengono agenti che agiscono sulla base della coerenza interna prima delineata. Ciò è sufficiente a determinare lo sviluppo (autonomo) di micromeccanismi capaci, separatamente o congiuntamente, di determinare azioni complesse, in analogia a quanto illustrato nella letteratura sui *robot* connessionisti.

Per affinare l'utilità dei CT nella conduzione di esperimenti economici, offrendo al contempo agli sperimentatori strumenti per il controllo e la regolazione degli agenti, si introducono alcune sofisticazioni del metodo: 1) introduzione di obiettivi esterni (EO), per influenzare le stime degli effetti, come sopra definiti; 2) introduzione di proposte esterne (EP), per influenzare le congetture relative alle azioni, sempre come sopra definite.

Gli EP e gli EO sono *target* esterni: gli EO sostituiscono quelli costruiti in modo incrociato, che sono però comunque calcolati al fine di disporre delle valutazioni necessarie per le correzioni dal lato delle azioni; invece gli EP rappresentano uno dei *target* a volta a volta disponibili per l'apprendimento dal lato delle azioni, tra cui è scelto il maggiore in modulo.

BIBLIOGRAFIA

ARTHUR W.B., DURLAUFF S., LANE D. (1997), *The economy as an evolving complex system II*. Addison-Wesley, Reading, MA.

AXELROD R. (1997). "Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences." 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.

BARANZINI R., TATTI E. (2002), Léon Walras e il metodo matematico dell'economia pura: al di là della forma. *Economia Politica*, n.1, pp.65-89.

BATTEN D.F. (2000), *Discovering Artificial Economics: How Agent Learns and Economies Evolve*. Boulder, CO, Westview Press.

BIGUS J.P., SCHLOSNAGLE D.A., PILGRIM J.R., MILLS W.N. III, DIAO Y. (2002), ABLE: a toolkit for building multiagent autonomic systems. *IBM SYSTEM JOURNAL*, vol.41, n.3, pp.350-371.

BONABEAU E., DORIGO M., THERAULAZ G. (1999), *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. New York, Oxford University Press.

BURT R.S. (1992), *Structural Holes – The Social Structure of Competition*. Cambridge, MA, Harvard University Press.

BURTON R. (2001), Afterword, in A. Lomi e E.R. Larsen (a cura di), *Dynamics of Organizations – Computational Modeling and Organization Theories*. Menlo Park, CA, AAAI Press / The MIT Press.

CONTE R., TERNA P. (a cura di) (2000), Una discussione sulla simulazione in campo sociale: mente e società. *Sistemi intelligenti*, 2, XII, pp.326-331.

FRIEDMAN M. (1953), The Methodology of Positive Economics, in *Essay in positive economics*, University of Chicago Press, Chicago, pp.3-43.

GILBERT N., TERNA P. (2000), How to build and use agent-based models in social science. *Mind & Society*, n. 1, pp.57-72.

HAHN F. (1994), An Intellectual Retrospective. *Quarterly Review*, pp. 245-258.

HAYEK F.A. (1937), Economics and Knowledge, in *Individualism and Economic Order*, London e Henley, Routledge e Kegan Paul, 1949; trad. it. Conoscenza e economia, in *Problemi di filosofia della scienza economica*, Roma, La Nuova Italia Scientifica, 1983; ripreso in F.A. von Hayek, *Conoscenza, Mercato e Pianificazione*, Bologna, Il Mulino, 1988, pp.227-252.

HAYEK F. (1952), *The Sensory Order*. University of Chicago Press, Chicago.

- HAYEK F. (1967), *Studies in philosophy, politics and economics*. University of Chicago Press, Chicago.
- HÖLLDOBLER B., WILSON E.O. (1997), *Formiche – Storia di una esplorazione scientifica*. Adelphi, Milano. Ed. originale 1994, *Journey to the Ants - A Story of Scientific Exploration*.
- KILPATRICK H.E. JR. (2001), Complexity, Spontaneous Order and Friedrich Hayek: Are Spontaneous Order and Complexity Essentially the Same Thing? *Complexity*, Vol. 6, N. 4.
- KIRZNER I. (1997), Entrepreneurial discovery and the competitive market process: an Austrian approach. *Journal of Economic Literature*, vol.XXXV, n.1, pp. 60-85.
- LOMI A., LARSEN E.R. (a cura di) (2001), *Dynamics of Organizations – Computational Modeling and Organization Theories*, Menlo Park, CA, AAAI Press / The MIT Press.
- NELSON R.R., WINTER S.G. (2002), Evolutionary Theorizing in Economics. *Journal of Economic Perspectives*, vol.16, n.2, pp.23-46.
- OSTROM T. (1988), Computer simulation: the third symbol system. *Journal of Experimental Social Psychology*, 24:381-392.
- PARISI D. (2001), *Simulazioni - La realtà rifatta nel computer*. Mulino, Bologna.
- PARISI D. (2002), *Economia o economia?* Presentato a “Scienze Cognitive e Economia”, Workshop organizzato dalla Associazione Italiana di Scienze Cognitive, Rovereto.
- PRYOR F.L. (2000), Looking Backwards: Complexity Theory in 2028, in D. Colander (ed.) *The complexity vision and the teaching of economics*. Cheltenham, Edward Elgar, pp. 63-69.
- SARGENT T.J. (1993), *Bounded Rationality in Macroeconomics*, Clarendon Press, Oxford.
- TERNA P. (2000a), Economic Experiments with Swarm: a Neural Network Approach to the Self-Development of Consistency in Agents' Behavior, in F. Luna and B. Stefansson (a cura di), *Economic Simulations in Swarm: Agent-Based Modelling and Object Oriented Programming*. Dordrecht and London, Kluwer Academic, pp.73-104.
- TERNA P. (2000b), Hayek e il connessionismo: modelli con agenti che apprendono, in G. Clerico e S. Rizzello (a cura di), *Il pensiero di Friedrich von Hayek*. Torino, Utet.
- TERNA P. (2001), Cognitive Agents Behaving in a Simple Stock Market Structure, in F. Luna and A. Perrone (a cura di), *Agent-Based Methods in Economics and Finance: Simulations in Swarm*. Dordrecht and London, Kluwer Academic, pp.188-227.

TERNA P. (2002), Simulazione ad agenti in contesti di impresa. *Sistemi intelligenti*, 1, XIV, pp.33-51.

TESFATSION L. (2001), Agent-Based Computational Economics: Growing Economies from the Bottom Up. *Artificial Life*, vol.8, n.1, pp.55-82.