

La nuova scienza economica
Economia e Sistemi complessi

Pietro Terna

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

SINTESI

Si presenta¹ l'utilizzazione della simulazione con l'uso del *computer*, come via per la complessità della realtà, costruendo modelli che ci permettano di meglio comprendere l'economia, dai mercati, all'impresa, alle reti di imprese, tenendo conto di azioni e reazioni dei soggetti economici.

I modelli di simulazione 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. Gli agenti privi di capacità di apprendimenti o adattamento sono denominati "senza mente"; altrimenti, "con mente". L'ambiente in cui operano può essere neutrale o adeguatamente strutturato da regole (es. la borsa oppure uno spazio di collaborazione tra imprese in cui si sviluppi una catena di fornitura).

Con i modelli che presentiamo si può ricercare il legame tra semplicità degli agenti e struttura del sistema-ambiente in cui sono inseriti, trovando risultati complessi con agenti sia senza mente, sia con mente: la differenza è che con i primi compaiono risultati interessanti soltanto operando in ambienti strutturati (es. la borsa); con i secondi, vale a dire agenti che apprendono, il modello può anche essere non strutturato e in tal caso assistiamo alla formazione di un sistema sociale, di una istituzione, anche partendo da zero.

La costruzione dei modelli è semplificata dall'uso di protocolli di programmazione ad oggetti quali Swarm² oppure NetLogo³ oppure il recente JAS⁴ e dall'adozione di schemi che chiariscano il ruolo dell'ambiente, degli agenti, delle loro regole di comportamento e le modalità di modificazione di tali regole (sistemi esperti, reti neurali, sistemi a classificatore, algoritmi genetici, ...).

¹ Questo lavoro presenta, rielaborate e aggiornate, riflessioni in parte contenute in Terna (2003), cui si rimanda per una trattazione più ampia.

² <http://wiki.swarm.org>

³ <http://www.ccl.sesp.northwestern.edu/netlogo/>

⁴ <http://jaslibrary.sourceforge.net>

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; simulazione di sistemi, ad esempio formati da banche ed imprese industriali).

ESPERIMENTO MENTALE E RAPPRESENTAZIONE DELLA REALTÀ

In economia, con la simulazione ad agenti (Batten 2000, per una introduzione), conduciamo esperimenti mentali, tali da richiedere l'ausilio del calcolo automatico.

Altrettanto importante è l'impiego dei modelli di simulazione per rappresentare la realtà, anche quando quest'ultima si presenti molto complicata. La simulazione via *computer* è dunque una strada per realizzare modelli (Gilbert e Terna, 2000; Ostrom 1998), al di là delle vie tradizionali della descrizione o delle formule.

I modelli letterario-descrittivi, propri della retorica, sono totalmente flessibili, ma la rappresentazione della realtà che ne deriva non consente rielaborazioni quantitative della rappresentazione della realtà presentata (che cosa sarebbe accaduto se ... Nelson avesse avuto meno navi nella battaglia di Trafalgar).

I modelli statistico-matematici sono di per sé orientati alla computabilità, ma con il peso delle necessarie semplificazioni: la battaglia di Trafalgar può essere descritta sulla base di equazioni differenziali, ma come trattare, con quelle equazioni, la disposizione delle navi nel teatro di battaglia?

Le semplificazioni determinano la distanza dei modelli dalla realtà. Si tratta di una 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 ...*". Così fa il grande edificio delle aspettative razionali, con l'assunzione che gli agenti abbiano, implicitamente, anche la conoscenza del modello da cui discendono le conseguenze delle loro azioni. Come nota Sargent (1993), in questo modo si attribuiscono agli attori economici conoscenze maggiori di quelle 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 invece una 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. La battaglia di Trafalgar può allora essere descritta indicando la posizione, il movimento, l'azione di ciascuna delle navi, con le relative caratteristiche (ogni nave è un agente), e può essere calcolata nei suoi esiti facendo operare le navi sia come è accaduto storicamente, sia in modo controfattuale, valutando che cosa sarebbe accaduto se, ad esempio, gli schieramenti fossero stati disposti diversamente.

In questo contesto ben si applicano le considerazioni (Burton, 2001) che accompagnano un recente libro su modelli di computazione e teorie dell'organizzazione (Lomi e Larsen, 2001). 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 specificiamo 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 permette di utilizzare "scatole nere" di cui trascurare il contenuto e quindi ci impone la formulazione di dettagliate descrizioni in ogni parte del modello: in particolare, 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 talvolta dalla stessa 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 utile già solo per il fatto di compiere una operazione di emersione della conoscenza.

LA COMPLESSITÀ

La scelta della simulazione rappresenta un cambiamento fondamentale nel metodo (Parisi, 2001), con numerosissime applicazioni (Tsfatsion 2001, ma anche, con aggiornamento continuo, <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm>) e riviste elettroniche specializzate come il *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, JASSS (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk>) e l'*Electronic Journal of Evolutionary Modeling and Economic Dynamics*, e-JEMED (<http://www.e-jemed.org>). In Italia sta nascendo CESSBA (Centro sulla Simulazione Sociale Basata su Agenti, <http://www.istc.cnr.it/cessba/>). Una sintesi recentissima dei contenuti dei lavori ad agenti è David e al. (2004).

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 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: i lavori di carattere interdisciplinare ed eterodossi hanno inevitabilmente meno peso di quelli legati al nucleo delle varie discipline, nell'ortodossia.

La simulazione è in effetti vincente se serve a catturare la realtà e a farne modello, proponendo un punto di partenza di invalutabile valore e rigore; per questo 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.

Con ciò incontriamo anche problemi fondamentali, in primo luogo 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 sappiamo sulla complessità, l’economia deve occuparsi maggiormente di come realmente agiscono gli individui, mentre ha dedicato e ancora dedica 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.

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.

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.

Qualche chiarimento sui termini “complesso” e “complicato”: un motore a scoppio è certamente molto complicato, ma smontandolo riusciamo a comprendere come ciascuna sua parte intervenga 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 il mercato - 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 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.

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: <http://www.santafe.edu>) e individuare le analogie con il pensiero hayekiano, che è così importante nell'aver rimesso in discussione l'apparato tradizionale dell'economia.

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, all'irrazionalità degli accadimenti quotidiani.

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. 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.

MODELLI DI SIMULAZIONE E AGENTI

La costruzione di modelli di simulazione con agenti per comprendere la realtà dell'economia è semplificata dall'uso di protocolli di programmazione ad oggetti qual è *Swarm* e dall'adozione 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 esperti, reti neurali, sistemi a classificatori, algoritmi genetici, ...). Con *Swarm*, si indicano altri prodotti (o metodologie):

Swarm, <http://www.swarm.org> e, soprattutto in futuro, <http://wiki.swarm.org>;

JAS, <http://jaslibrary.sourceforge.net/>;

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

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

NetLogo, <http://www.ccl.sesp.northwestern.edu/netlogo/>;

Anylogic, <http://www.xjtek.com/anylogic/>

e l'elenco potrebbe continuare, ad esempio con un prodotto IBM (Bigus e al., 2002), denominato ABLE (<http://www.alphaworks.ibm.com/tech/able>) o con DAML, www.daml.org. *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* collaborativa, che aiuta neofiti ed esperti.

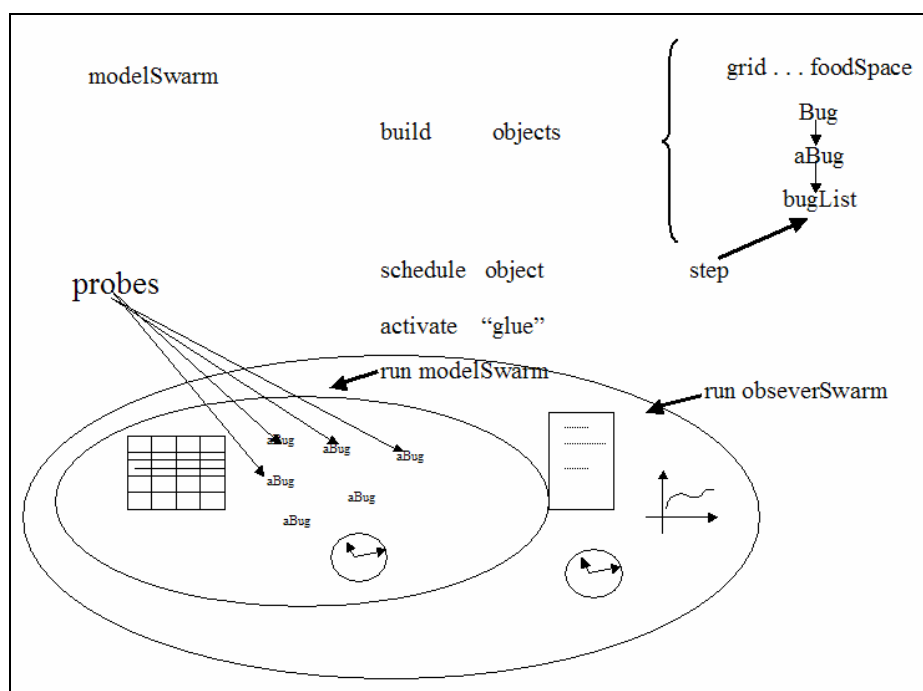


Figura 1 – Una struttura esemplificativa di una simulazione con *Swarm*

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 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

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.”

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.

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.

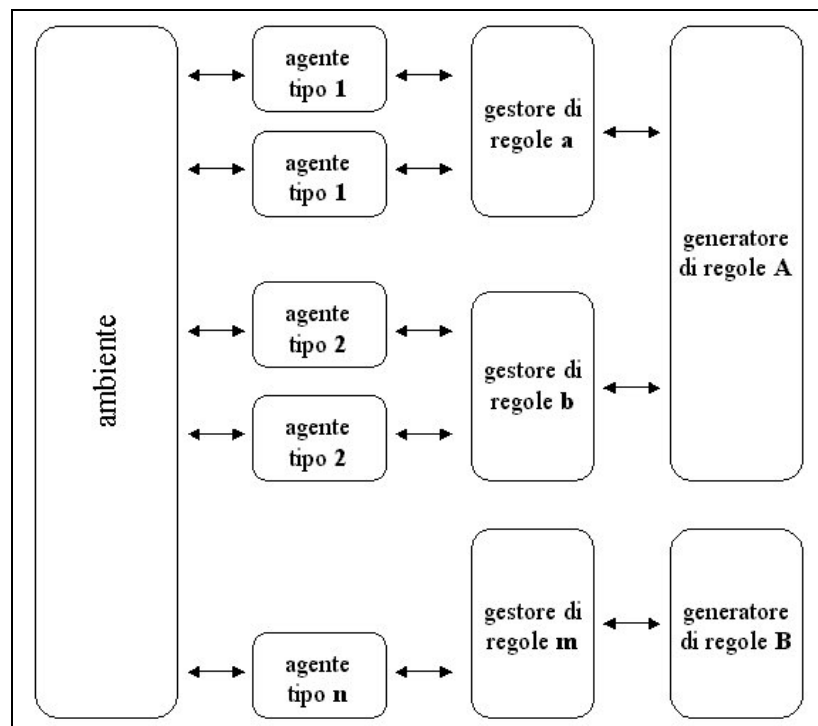


Figura 2 - Schema ERA, Environment-Rules-Agents

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.

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, 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 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 "gestori di regole" o *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 "generatori di regole" o *RuleMaker*) per modificare la propria linea di azione.

Se il codice è scritto secondo le modalità descritte, è relativamente agevole sostituire a volta a volta gestori e generatori di regole con caratteristiche diverse, semplicemente sostituendo gli oggetti introdotti nel modello. Ad esempio: un sistema a regole; una rete neurale; un algoritmo genetico, un sistema classificatore.

LA "MENTE" NEGLI AGENTI

Con un certo grado di approssimazione, se gli agenti sono privi di capacità di adattamento sono qui catalogati "senza mente"; altrimenti, "con mente" (ricordando, come detto sopra, che si tratta della assenza o presenza di capacità di adattamento e apprendimento). 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

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

stanno su un continuo che va dalla proposta della massima semplicità⁷ (Axelrod, 1997) alla costruzione di agenti cognitivi ad alto livello (agenti BDI).

Una possibile articolazione semplificata è (Terna, 2001):

- 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.

Si può mostrare che agenti “senza mente” (caso a) 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, con i consumatori e i 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, il quale a sua volta modifica il prezzo dopo un certo numero di cicli in cui non opera. La sequenza degli eventi, che comprende l’aggiornamento dei prezzi di ciascun compratore e di ciascun venditore, è rigida.

Negli 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 implicitamente un ciclo delle scorte nel modello. La seconda è una emergenza imprevedibile e difficile da provocare deliberatamente: 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.

Sono invece molto diversi (caso b) 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*.

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

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).

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.

In Terna (2000b) abbiamo invece (caso c) agenti "con mente" (reti neurali) che, operando in un ambiente neutrale, producono risultati di ordine spontaneo nella prospettiva hayekiana.

La metodologia di sviluppo delle reti neurali, detta dei Cross Target⁸ (CT), è sviluppata per costruire agenti che operino senza fare ricorso a regole (economiche) definite a priori.

L'idea guida è che l'agente sviluppi con l'apprendimento la capacità di valutare in modo coerente sia quale azione deve compiere per ottenere un risultato specifico, sia quali conseguenze derivino da un'azione data: dispone quindi di due famiglie diverse di *target*, che può "incrociare" per l'apprendimento. Con i CT si possono riprodurre i comportamenti 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.

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, si determinano la stabilizzazione e la convergenza del mercato.

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

⁸ Si veda anche <http://web.econ.unito.it/terna/ct-era/ct-era.html>.

risultato realistico (nei mercato 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.

In Terna (2001) abbiamo anche (caso d) la presenza 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 simulazione mostra l'andamento del patrimonio (liquidità più azioni) di un agente CT che opera in borsa con l'immissione di ordini con limiti di prezzo gestiti dal *book* come nel caso b) sopra; 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 generata da una rete neurale che opera come un esperto terzo.

La novità è la presenza - a livello microindividuale - di strategie non ovvie di azione: l'agente CT ha sviluppata una modalità di azione che gli permette di ottenere risultati economicamente positivi anche in presenza di turbolenza di prezzi.

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

Tabella 1 – Una sintesi su agenti, mente e ambiente

In estrema sintesi (Tabella 1): 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.

LA SIMULAZIONE E L'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, con applicazioni di grande interesse nell'investigazione delle realtà aziendali secondo la metodologia della complessità.

Si fa ora riferimento (Terna, 2002) ad uno strumento di simulazione fondato su Swarm e ora denominato jES (*java Enterprise Simulator*, on line a <http://web.econ.unito.it/terna/jes>), con cui si riproduce 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 3 sono proposti alcuni esempi, da semplici (1-2; 2-13) a meno semplici (8-28-27-7). Sempre nella Figura 3 sono rappresentate alcune unità produttive capaci di svolgere ciascuna un passo (o passi diversi, se l'unità è multifunzionale) della produzione. Le singole unità produttive possono essere autonomi micro-mechanismi operanti nel sistema economico, oppure unità integrate all'interno di imprese.

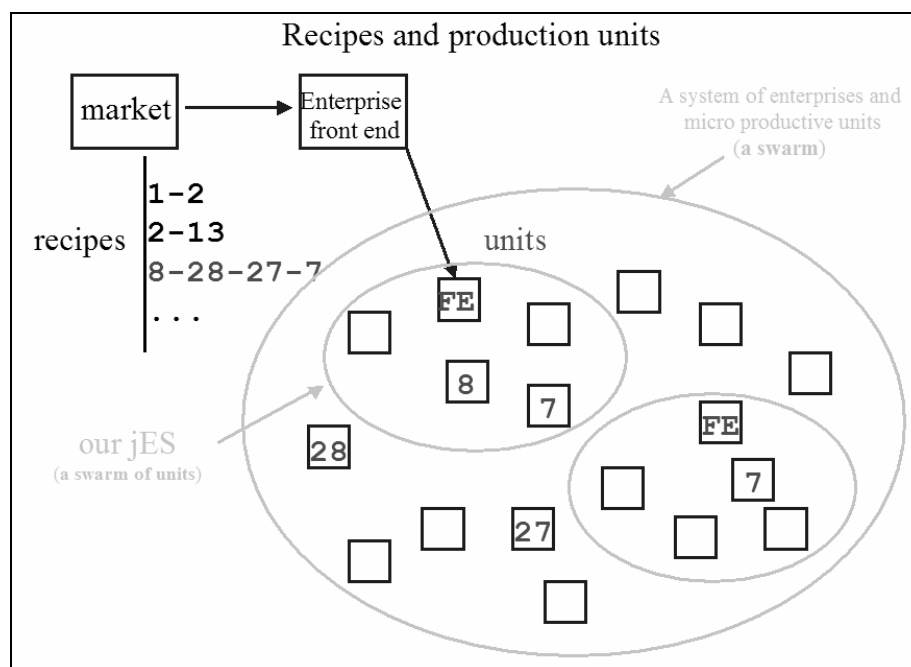


Figura 3. Una visione statica del modello jES.

Per descrivere le operazioni da compiere (i beni da produrre) e le unità che compiono le operazioni necessarie (chi fa che cosa), il modello è basato su un doppio formalismo e su una

doppia struttura informatica: in questo modo, costruendo la simulazione di un'azienda reale, o di una situazione organizzativa astratta, emergono facilmente le incoerenze e le carenze, 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 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.

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".

APPLICAZIONI

Il modello di simulazione di impresa descritto ha avuto numerose applicazioni, in imprese dei comparti del tessile, dell'abbigliamento, della meccanica, dei servizi pubblici (la gestione delle chiamate di emergenza al 118 della provincia di Torino). Gran parte dei risultati ottenuti sono descritti all'indirizzo <http://web.econ.unito.it/terna/tesi.html> dove sono riportate numerose tesi sperimentali svolte utilizzando jES.

L'essenza di questi risultati è ricostruire nel *computer*, ad una scala molto fedele, il funzionamento di una realtà organizzativa, con tutte le sue caratteristiche, indicando le unità in grado di svolgere ciascun compito, da un lato, e i compiti da svolgere, dall'altro; quindi mostrare il funzionamento di quella realtà come è o come potrebbe essere. Non sono in grado di assicurare che un cambiamento introdotto con successo nel modello di simulazione produca lo stesso esito positivo nel mondo reale, ma sono pressoché certo che un cambiamento che si presenti come disastroso nel modello simulato, lo sarà anche nella realtà.

Un aspetto molto interessante di questo tipo di modellistica è quello delle scelte da compiere nel momento delle decisioni. Gli agenti che devono decidere richiedono l'indicazione su che

cosa fare all'oggetto "gestore di regole" della figura 2, oggetto che può contenere semplici regole, oppure un sistema esperto, oppure una rete neurale, un algoritmo genetico, un sistema a classificatore; il "gestore di regole" si rivolgerà al "generatore di regole" per modificare i parametri della rete neurale, ottenere una soluzione da un algoritmo genetico e così via.

L'oggetto "gestore di regole" può anche eventualmente operare come *avatar*⁹ di una persona, cui via via chiede che cosa fare tramite una pagina *web* dove compaiono sia gli *output* della simulazione in tempo reale, sia le caselle di *input* necessarie per raccogliere le scelte del soggetto che interviene – tramite l'*avatar*, nella simulazione.

In questo modo è possibile sia verificare come le persone scelgono in un contesto organizzativo, sia svolgere una fase di *training*, se la persona che interagisce con la simulazione, ha bisogno di accumulare esperienza, ancorché virtuale, nei confronti di un determinato contesto organizzativo.

Infine le applicazioni¹⁰, relative a reti di aziende che compaiono, si sviluppano e possono anche fallire, uscendo dalla simulazione. Le aziende simulate operano secondo le indicazioni della metodologia jES indicata sopra e possono collaborare o no a seconda dell'appartenenza o no ad una rete sociale, generando risultati del sistema simulato interessanti e realistici. Un attore importante della simulazione del sistema a rete sono le banche, dalla cui interazione con il sistema delle imprese industriali emergono indicazioni sulle regole di affidamento adottate, ad esempio per sperimentare le nuove regole cosiddette di Basilea 2.

Si tratta di un lavoro aperto, con ampie prospettive di collaborazione.

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.

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

⁹ Con *avatar* si designa l'incarnazione di una deità Indu (specialmente Visnu), ma anche l'agente che rappresenta una persona in una applicazione informatica (gioco oppure no).

¹⁰ Si vedano http://web.econ.unito.it/terna/jes/jesevol_swarmfest2004.pdf e http://web.econ.unito.it/terna/jes/jes_open_foundation.pdf

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, AAI 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.

DAVID N., MARIETTO M.B., SICHMAN J.S. AND COELHO H. (2004), The Structure and Logic of Interdisciplinary Research in Agent-Based Social Simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, VII, <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/3/4.html>>

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.

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*.

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, AAI Press / The MIT Press.

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.

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.

TERNA P. (2003), La simulazione come strumento di indagine per l'economia. *Sistemi intelligenti*, 2, XV, pp.347-376.

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