

# Simulazione, modelli ad agenti e scienze sociali

Pietro Terna, Riccardo Boero, Matteo Morini  
Michele Sonnessa

10 ottobre 2005



# Indice

<b>Premessa</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introduzione «dall'esterno della disciplina economica»</b>	<b>1</b>
<i>Domenico Parisi</i>	
1.1. La scienza è disciplinare, ma la realtà non lo è . . . . .	1
1.2. Un nuovo metodo . . . . .	4
1.3. Una nuova scienza economica . . . . .	7
1.4. Le due sfide alla scienza economica standard . . . . .	13
<b>I Modelli ad agenti</b>	<b>21</b>
<b>2 Modelli ad agenti: introduzione</b>	<b>23</b>
<i>Pietro Terna</i>	
2.1. Modelli e simulazione . . . . .	23
2.2. Complessità . . . . .	24
2.3. Simulazione ad agenti . . . . .	24
2.4. Rappresentazione della realtà . . . . .	27
2.5. L'economia non è un progetto . . . . .	27
2.6. Complicato e complesso . . . . .	29
2.7. Un'attenzione speciale verso le scienze cognitive . . . . .	31
2.8. Struttura dei modelli . . . . .	31
2.9. La struttura del libro . . . . .	33
<b>3 Uso della simulazione in economia</b>	<b>35</b>
<i>Magda Fontana</i>	
3.1. Premessa . . . . .	35
3.2. Modelli di simulazione, modelli matematici, modelli linguistici . . . . .	36

3.2.1. La simulazione in pratica: un tentativo di classificazione . . . . .	38
3.3. Trasmettere i risultati . . . . .	43
3.4. La comunicazione all'interno di una disciplina: la simulazione in economia . . . . .	44
3.5. Conclusioni . . . . .	52
<b>4 Le critiche e la diffusione della nuova metodologia</b>	<b>55</b>
<i>Pietro Terna</i>	
4.1. Una domanda preliminare . . . . .	55
4.2. La rappresentazione della realtà . . . . .	56
<b>5 Una risposta alle critiche: le metodologie per la definizione dei modelli di simulazione</b>	<b>59</b>
<i>Matteo Richiardi, Roberto Leombruni</i>	
5.1. Introduzione . . . . .	59
5.2. Le simulazioni sono teoria . . . . .	61
5.3. Le simulazioni sono matematica . . . . .	63
5.4. Le simulazioni conducono a risultati generali . . . . .	65
5.5. Le simulazioni sono stimabili . . . . .	67
5.6. Le simulazioni hanno bisogno di standard metodologici condivisi . . . . .	68
5.6.1. Collegamento con la letteratura . . . . .	70
5.6.2. Struttura del modello . . . . .	70
5.6.3. Analisi del modello . . . . .	70
5.6.4. Replicabilità . . . . .	71
5.7. Conclusioni . . . . .	72
<b>6 Gli agenti dall'informatica alle scienze cognitive e alle applicazioni</b>	<b>73</b>
<i>Marco Remondino</i>	
6.1. I confini della metodologia . . . . .	73
6.2. Caratteristiche fondamentali degli agenti . . . . .	75
6.3. Struttura di un sistema multi agente . . . . .	77
6.4. Azione e reazione . . . . .	79
6.5. Ragionamento negli agenti . . . . .	80
6.6. Soluzioni ibride . . . . .	80
6.7. Agenti BDI, scienze cognitive e logica modale . . . . .	82
6.8. I mondi possibili e la logica modale . . . . .	83
6.9. Applicazione pratica del paradigma BDI . . . . .	85
6.10. L'interazione tra gli agenti e le applicazioni . . . . .	85
6.10.1. Scienze sociali . . . . .	85
6.10.2. Scienze ingegneristiche . . . . .	86
6.10.3. Mondi virtuali . . . . .	86

<b>II</b>	<b>Costruzione degli agenti</b>	<b>87</b>
<b>7</b>	<b>Costruzione degli agenti: introduzione</b>	<b>89</b>
	<i>Pietro Terna</i>	
7.1.	Agenti semplici e complessi . . . . .	89
7.2.	Una classificazione . . . . .	90
7.2.1.	Caso a) agenti «senza mente» operanti in un ambiente non strutturato . . . . .	90
7.2.2.	Caso b) agenti «senza mente» operanti in un ambiente strutturato . . . . .	90
7.2.3.	Caso c) agenti «con mente» operanti in un ambiente non strutturato . . . . .	91
7.2.4.	Caso d) agenti «con mente» operanti in un ambiente strutturato . . . . .	92
7.3.	Proprietà emergenti . . . . .	92
<b>8</b>	<b>Processi cognitivi e studio delle proprietà emergenti nei modelli ad agenti</b>	<b>95</b>
	<i>Riccardo Boero, Marco Castellani, Flaminio Squazzoni</i>	
8.1.	Processi cognitivi ed emergenza nei modelli ad agenti . . . . .	95
8.2.	ABM emergentisti, ovvero lo studio delle proprietà emergenti di primo ordine . . . . .	97
8.3.	ABM immergentisti, ovvero lo studio delle proprietà emergenti di secondo ordine . . . . .	101
8.4.	Conclusioni . . . . .	108
<b>9</b>	<b>Apprendimento: reti neurali, algoritmi genetici, sistemi a classificatore</b>	<b>111</b>
	<i>Gianluigi Ferraris</i>	
9.1.	Introduzione . . . . .	111
9.2.	Autonomia decisionale e capacità degli agenti . . . . .	113
9.3.	Le reti neurali artificiali . . . . .	115
9.4.	Gli algoritmi genetici . . . . .	117
9.5.	I sistemi a classificatore . . . . .	119
9.6.	Paradigma «mentale» e paradigma «individuale» nell'applicazione dei metodi evolutivi . . . . .	121
9.6.1.	Paradigma «mentale» . . . . .	121
9.6.2.	Paradigma «individuale» . . . . .	123
9.7.	Struttura dei modelli: lo schema ERA . . . . .	124
9.8.	Generalità dei metodi . . . . .	124
9.9.	Potenziamento dei metodi . . . . .	125
9.9.1.	Alfabeti estesi ed operatori speciali . . . . .	125
9.9.2.	Normalizzazione dei valori di <i>fitness</i> . . . . .	126
9.9.3.	Cooperazione fra diversi algoritmi . . . . .	127
9.10.	Utilizzare algoritmi genetici, sistemi a classificatore e reti neurali artificiali nei modelli . . . . .	128

9.11. Conclusioni . . . . .	130
<b>10 Costruire agenti intelligenti utilizzando la teoria dell'evidenza</b>	<b>131</b>
<i>Guido Fioretti</i>	
10.1. Introduzione . . . . .	131
10.2. La teoria dell'evidenza . . . . .	132
10.3. Esempio: un attacco aereo . . . . .	139
<b>11 Tempo, casualità e sincronizzazione degli eventi nei modelli</b>	<b>145</b>
<i>Gianluigi Ferraris</i>	
11.1. Introduzione . . . . .	145
11.2. Tempo reale e tempo simulato . . . . .	146
11.3. Simulare il caso . . . . .	148
11.3.1. Controllare il «caso» per replicare i risultati . . . . .	149
11.3.2. Una proposta di metodo per gestire i numeri casuali . . . . .	150
11.4. Contemporaneità e sequenzialità: il parallelismo . . . . .	151
<b>12 La struttura delle comunicazioni tra agenti</b>	<b>155</b>
<i>Guido Fioretti</i>	
12.1. Introduzione . . . . .	155
12.2. La componente gigante . . . . .	155
12.3. Il mondo piccolo . . . . .	157
12.4. Le reti scalabili . . . . .	160
12.5. Comunità in rete . . . . .	165
<b>III Strumenti</b>	<b>169</b>
<b>13 Strumenti: introduzione</b>	<b>171</b>
<i>Pietro Terna</i>	
13.1. Gli strumenti . . . . .	171
13.2. Scelte di approfondimento . . . . .	172
13.3. Swarm, JAS e la programmazione a oggetti . . . . .	175
13.4. Caratteristiche fondanti di NetLogo . . . . .	176
13.5. Un confronto . . . . .	176
<b>14 Swarm</b>	<b>179</b>
<i>Riccardo Boero, Matteo Morini</i>	
14.1. Introduzione . . . . .	179
14.2. L'ambiente di simulazione . . . . .	181
14.2.1. L'osservatore . . . . .	183
14.2.2. Il modello . . . . .	184
14.3. Primi passi . . . . .	185
14.3.1. Un agente semplice in un mondo semplice (ma duro) . . . . .	186
14.3.2. Molti agenti in un mondo complicato . . . . .	194
14.4. Un esempio: Heatbugs . . . . .	198
14.4.1. Il mondo degli insetti . . . . .	198

14.4.2. Gli insetti . . . . .	199
14.4.3. Visualizzazione della simulazione . . . . .	199
14.5. Conclusioni . . . . .	202
<b>15 JAS</b>	<b>205</b>
<i>Michele Sonnessa</i>	
15.1. Introduzione . . . . .	205
15.2. Installazione . . . . .	206
15.3. Primi passi con JAS . . . . .	208
15.4. Il modello di esempio HeatBugs . . . . .	211
15.5. Gli agenti HeatBug . . . . .	214
15.6. L'observer . . . . .	216
15.7. Le statistiche . . . . .	219
15.8. La biblioteca di funzioni sulle reti . . . . .	220
<b>16 NetLogo</b>	<b>225</b>
<i>Michele Sonnessa</i>	
16.1. Introduzione . . . . .	225
16.2. L'installazione . . . . .	226
16.3. L'ambiente di sviluppo . . . . .	226
16.4. Il linguaggio di programmazione . . . . .	227
16.5. I primi passi . . . . .	228
16.6. Un modello di esempio . . . . .	231
16.7. Le statistiche . . . . .	235
16.8. Conclusione . . . . .	236
<b>IV Modelli</b>	<b>239</b>
<b>17 Un simulatore di borsa costruito con Swarm</b>	<b>241</b>
<i>Pietro Terna</i>	
17.1. I simulatori di borsa ad agenti, verso una scelta radicale . . .	241
17.2. Il modello SUM . . . . .	243
17.3. I risultati con soli agenti artificiali . . . . .	243
<b>18 Una simulazione neo-keynesiana ad agenti eterogenei</b>	<b>247</b>
<i>Massimo Salzano</i>	
18.1. Introduzione . . . . .	247
18.2. Motivazione e rapporto con i lavori esistenti . . . . .	249
18.2.1. Il caso di agenti rappresentativi . . . . .	250
18.2.2. Il caso di agenti eterogenei . . . . .	251
18.2.3. Le modificazioni di fase e l'approccio <i>top-down</i> . . . .	254
18.3. Il contesto di simulazione . . . . .	256
18.3.1. L'ipotesi di agenti rappresentativi . . . . .	260
18.3.2. Il caso di agenti eterogenei . . . . .	261
18.4. Il modello di simulazione . . . . .	262

18.5. Gli strumenti per analizzare gli effetti di politica nel caso di sistemi complessi incerti e basati su agenti eterogenei . . . .	264
18.6. Risultati della simulazione . . . . .	266
18.6.1. L'emergenza di caratteristiche macroeconomiche dall'eterogeneità degli agenti . . . . .	266
18.6.2. «Computer-Assisted Reasoning» e gli effetti delle politiche fiscali . . . . .	270
18.7. Risultati differenti ottenuti dai modelli tradizionali e loro motivazioni. . . . .	273
18.8. Conclusioni e possibili estensioni del modello . . . . .	274
<b>19 L'impresa come contesto tipico per la complessità</b>	<b>279</b>
<i>Pietro Terna</i>	
19.1. Ricostruire l'impresa in simulazione . . . . .	279
19.2. Un doppio formalismo . . . . .	281
19.3. Obiettivi teorici e processo di decisione . . . . .	282
<b>20 I livelli della simulazione per l'impresa</b>	<b>285</b>
<i>Michele Sonnessa</i>	
20.1. Introduzione . . . . .	285
20.2. I modelli analitici dei sistemi dinamici . . . . .	286
20.3. La simulazione dei sistemi dinamici . . . . .	286
20.3.1. Rappresentazione del tempo . . . . .	287
20.4. Le più diffuse tecniche di simulazione . . . . .	288
20.5. Simulazione di processo . . . . .	288
20.5.1. Le funzionalità tipiche . . . . .	290
20.5.2. Un esempio . . . . .	291
20.6. System dynamics . . . . .	294
20.6.1. Le variabili . . . . .	295
20.6.2. I ritardi . . . . .	296
20.6.3. I modelli di causa-effetto . . . . .	297
20.6.4. Un esempio . . . . .	299
20.7. Simulazione basata su agenti . . . . .	302
20.7.1. La programmazione ad oggetti . . . . .	302
20.7.2. Dall'OOP ai modelli ad agenti . . . . .	303
20.7.3. Il linguaggio UML . . . . .	303
20.7.4. Il paradigma modello-osservatore . . . . .	304
20.7.5. Un esempio . . . . .	305
20.8. Conclusioni . . . . .	310
<b>21 jES (java Enterprise Simulator) e jES Open Foundation</b>	<b>311</b>
<i>Pietro Terna</i>	
21.1. Introduzione . . . . .	311
21.2. Dizionario del modello e classificazione delle componenti; le cose da fare e chi le fa . . . . .	312

21.3. Generazione degli ordini: OderGenerator e OrderDistiller, con <i>WD</i> e <i>WDW</i> . . . . .	313
21.4. Descrizione delle unità, con <i>DW</i> . . . . .	314
21.5. Esempi senza e con sequenza temporale esplicita (con OderGenerator e con OrderDistiller) . . . . .	315
21.5.1. Uso di unità semplici o complesse e prove sulla flessibilità, con generazione a caso delle ricette produttive	315
21.5.2. Distillazione degli ordini, con le relative ricette, da un repertorio, secondo sequenze prestabilite . . . . .	319
21.5.3. Distillazione di ordini con jESOF . . . . .	322
21.5.4. Un secondo esempio con jESOF: le formiche di Langton	326
<b>V Applicazioni</b>	<b>329</b>
<b>22 Esperimenti con agenti umani in un contesto di simulazione</b>	<b>331</b>
<i>Pietro Terna</i>	
22.1. Dalla simulazione ad agenti agli esperimenti . . . . .	331
22.2. Un esempio, relativo a una borsa simulata . . . . .	332
22.3. Aspetti tecnici . . . . .	334
<b>23 Ottimizzazione della produzione (applicazioni nel ciclo tessile)</b>	<b>337</b>
<i>Matteo Morini</i>	
23.1. Introduzione . . . . .	337
23.2. Il problema della pianificazione . . . . .	338
23.3. La produzione nell'industria tessile: un approfondimento . . . . .	340
23.3.1. Attrezzaggio delle unità produttive . . . . .	341
23.3.2. Costi dovuti a consegne ritardate . . . . .	342
23.3.3. Interferenze nelle attività di attrezzaggio e sorveglianza . . . . .	343
23.4. Valutazione mediante simulazione . . . . .	344
23.4.1. Sperimentare soluzioni . . . . .	345
23.4.2. Chi inventa le pianificazioni? Il «Golem»! . . . . .	346
23.4.3. Emergono le pianificazioni migliori . . . . .	347
<b>24 Organizzazione di sistemi aziendali</b>	<b>349</b>
<i>Pietro Terna</i>	
24.1. Il caso di una azienda meccanica con produzione tradizionale	349
24.2. Il caso di una azienda dell'abbigliamento, organizzata in modo non convenzionale . . . . .	352
<b>25 Razionalizzazione di interventi con azione sul territorio</b>	<b>355</b>
<i>Pietro Terna</i>	
25.1. Descrizione di un sistema di intervento di pronto soccorso . . . . .	355
25.2. La simulazione . . . . .	356

<b>26 Simulazioni ad agenti e industrie ad alta intensità di capitale</b>	<b>361</b>
<i>Massimo Daniele Sapienza</i>	
26.1. Introduzione . . . . .	361
26.2. Il mercato elettrico come sistema complesso . . . . .	364
26.3. Industry Evolution Model (Iem) . . . . .	366
26.4. Electricity Market Complex Adaptive System (Emcas) . . . . .	367
26.5. Conclusioni . . . . .	370
<b>27 Una sintesi: dall'analisi what-if all'evoluzione dell'impresa</b>	<b>373</b>
<i>Gianluigi Ferraris</i>	
27.1. Simulazioni e conoscenza aziendale . . . . .	374
27.2. Analisi what if e generazione di strategie . . . . .	376
27.3. Utilizzare al meglio un processo . . . . .	377
27.4. Evolvere processi, aziende, interi distretti . . . . .	378
27.5. La realizzazione di un modello di distretto: un esercizio . . . . .	380
<b>28 Imprese e reti di imprese, modellistica evolutiva</b>	<b>383</b>
<i>Pietro Terna</i>	
28.1. La formazione di un ciclo economico dovuta alla interazione tra imprese . . . . .	383
28.2. Un modello di coevoluzione tra il sistema del lavoro e quello delle imprese . . . . .	385
<b>29 Banche e imprese</b>	<b>391</b>
<i>Domenico Delli Gatti, Mauro Gallegati, Gianfranco Giulioni</i>	
29.1. Introduzione . . . . .	391
29.2. Il modello . . . . .	392
29.3. Simulazioni . . . . .	394
29.3.1. Gli oggetti . . . . .	395
29.3.2. La dinamica . . . . .	398
29.4. Conclusioni . . . . .	400
<b>30 Conclusioni</b>	<b>403</b>
<i>Francesco Luna</i>	
30.1. Conclusioni . . . . .	403
<b>Riferimenti bibliografici</b>	<b>411</b>
<b>Indice analitico</b>	<b>429</b>
<b>Notizie sugli autori</b>	<b>433</b>

### 12.1. Introduzione

I modelli ad agenti interagenti fanno sì che le componenti microscopiche di un sistema – gli agenti – si incontrino formando delle strutture d'interazione che possono anche essere molto rilevanti per il comportamento macroscopico del sistema. Da un punto di vista matematico ciò corrisponde a un grafo stocastico i cui nodi sono gli agenti e i cui archi sono le comunicazioni tra essi. Di conseguenza, la conoscenza di alcune proprietà dei grafi stocastici può essere utile per progettare un modello ad agenti, immaginare alcuni suoi possibili risultati e comprendere quali caratteristiche dei comportamenti individuali influenzano maggiormente il risultato collettivo.

Le proprietà dei grafi stocastici esposte in questo capitolo sono state derivate in parte da simulazioni, in parte dall'osservazione di rari casi empirici nei quali la rete di relazioni tra le componenti di un sistema è ben nota. In entrambi i casi, le osservazioni empiriche o computazionali sono state successivamente integrate da formalizzazioni matematiche.

In generale, la parola «rete» sarà riservata alle strutture di relazioni osservate empiricamente, mentre la parola «grafo» sarà utilizzata in riferimento alla loro descrizione matematica. Per semplicità, ma anche perché in generale la disponibilità di informazioni empiriche riguardo alla direzione delle comunicazioni è molto rara, l'esposizione sarà limitata ai grafi non orientati.

### 12.2. La componente gigante

Si consideri un grafo di cui siano dati inizialmente  $n$  nodi. In sequenza, si prendano in considerazione tutte le possibili coppie di nodi e con pro-

babilità  $p$  le si colleghi con un arco non orientato. Il grafo stocastico così ottenuto è detto *grafo di Erdős-Renyi* [Bollobás, 1985].

Nel grafo di Erdős-Renyi il numero di archi mediamente è pari a  $pn(n-1)/2$ . Quindi all'aumentare di  $p$  si ottengono grafi i cui nodi, mediamente, hanno un numero più elevato di connessioni con gli altri nodi.

La caratteristica più interessante del grafo di Erdős-Renyi è che per  $p > 1/n$  quasi tutti i nodi fanno parte di un'unica componente connessa del grafo, detta *componente gigante*. La formazione della componente gigante non è un fenomeno graduale, ma avviene improvvisamente, non appena si supera la soglia critica. Per questo motivo si parla a questo proposito di *transizione di fase*, in analogia alle transizioni tra gli stati solido-liquido-gassoso.

Si esprima  $p$  come  $p = c/n$ , dove  $c \in \mathfrak{R}$ ,  $c > 0$ . Si noti che la presenza della transizione di fase è sempre più netta all'aumentare della dimensione del grafo.

- Se  $c < 1$  la dimensione della maggiore componente connessa cresce con  $\log n$  all'aumentare di  $n$ . Poiché  $\log n < n$ , all'aumentare della dimensione del grafo la dimensione relativa della maggiore componente connessa diminuisce.
- Se  $c = 1$  la dimensione della maggiore componente connessa cresce con  $n^{2/3}$  all'aumentare di  $n$ . Essendo  $\log n < n^{2/3} < n$ , all'aumentare della dimensione del grafo la dimensione relativa della maggiore componente connessa diminuisce, seppure più lentamente che nel caso precedente.
- Se  $c > 1$  la dimensione della maggiore componente connessa cresce con  $n$  all'aumentare di  $n$ . Inoltre, la dimensione delle altre componenti crescono con  $\log n$  all'aumentare di  $n$ . Quindi in questo caso la dimensione della maggiore componente connessa riesce a tenere il passo con la dimensione del grafo. Al contrario, la dimensione relativa delle altre componenti diminuisce all'aumentare di  $n$ .

È noto che per  $c > 1$ , cioè nel caso in cui la componente gigante esiste, la sua dimensione ( $d$ ) tende al seguente valore:

$$[12.1] \quad \lim_{n \rightarrow \infty} d = \alpha n$$

dove  $\alpha \in (0, 1)$  è la soluzione di:

$$\alpha + e^{-c\alpha} = 1$$

dove il coefficiente  $c$  è quello definito sopra.

Per  $n$  sufficientemente grande la 12.1 può essere utilizzata come approssimazione della dimensione della componente gigante.

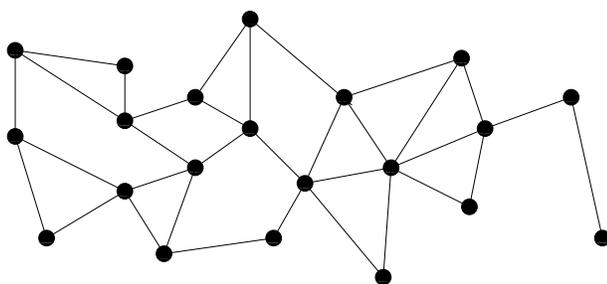


FIG. 12.1. Esempio di un grafo con relazioni esclusivamente locali.

Il grafo di Erdős-Renyi non è un grafo particolare dalle proprietà patologiche. Al contrario, l'improvvisa emersione di una componente gigante è una caratteristica comune a tutti i grafi stocastici. Dobbiamo quindi aspettarci che, al di sopra di una certa soglia di interazione tra esseri umani o tra agenti in un modello, quasi tutti siano più o meno direttamente connessi con quasi tutti gli altri.

### 12.3. Il mondo piccolo

L'espressione «mondo piccolo» si riferisce ad un esperimento condotto da Stanley Milgram allo scopo di valutare l'estensione delle reti di conoscenze nelle società umane [Milgram, 1967]. Ai partecipanti era consegnata una busta, indirizzata a uno sconosciuto a diverse migliaia di chilometri di distanza, con l'incarico di passarla a un conoscente. Ogni passaggio doveva essere documentato inserendo un'opportuna annotazione all'interno della busta; la procedura si sarebbe ripetuta finché la busta non fosse arrivata a destinazione. Solo la metà delle buste riuscirono arrivare, ma la cosa sorprendente fu che quelle che arrivarono a destinazione avevano fatto un numero limitato di passaggi, quasi sempre meno di sei.

Che il numero dei passaggi sia sei sicuramente dipende da fattori particolari, quali il fatto che sia l'origine sia la destinazione si trovavano nello stesso paese (gli USA), il fatto che la persona di origine e quella di destinazione appartenevano allo stesso gruppo etnico, ecc. Rimane però il fatto che le reti di conoscenze umane sono strutturate in modo tale che, se rappresentate su un grafo, nessun nodo è lontanissimo dall'altro. Ciò significa che con qualsiasi sconosciuto noi abbiamo una catena di conoscenze comuni che non ci è nota, ma che non è lunghissima. Da qui l'espressione «mondo piccolo».

La proprietà di «mondo piccolo» è a prima vista sorprendente. Infatti le nostre conoscenze sono quasi sempre locali, però un grafo corrispondente a conoscenze esclusivamente locali (fig. 12.1) non è in grado di spiegare la brevità delle catene di conoscenze.

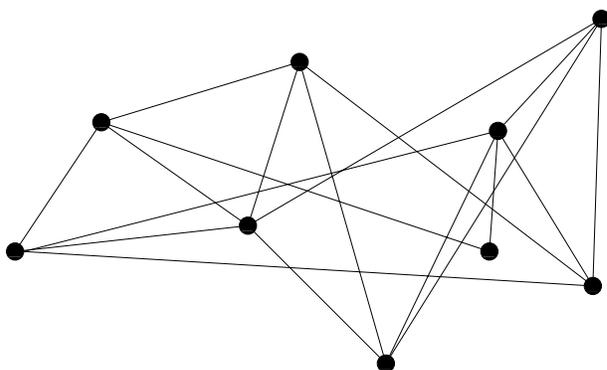


FIG. 12.2. Esempio di un grafo con relazioni casuali.

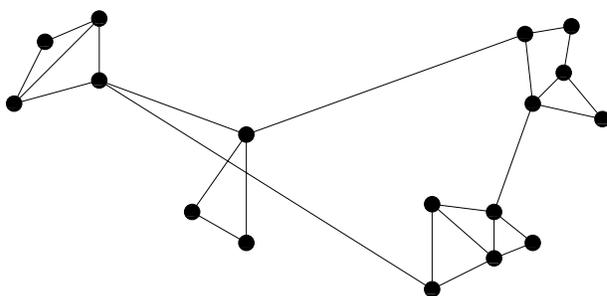


FIG. 12.3. Esempio di un grafo a topologia «mondo piccolo».

Un grafo i cui archi fossero nati in maniera del tutto casuale, come quello della fig. 12.2, sarebbe in grado di spiegare la brevità delle catene di conoscenze. Ma un grafo del genere si avrebbe solo se le nostre conoscenze fossero distribuite uniformemente su tutto il globo terrestre e sappiamo benissimo che non è così.

La fig. 12.3 illustra invece una spiegazione credibile del fenomeno del «mondo piccolo» [Watts e Strogatz, 1998]. Pur concedendo che quasi tutte le nostre relazioni siano locali, è sufficiente che all'interno del nostro giro di conoscenze ci sia almeno una persona che ha almeno un legame lontano per riuscire a trovare un cammino che colleghi qualsiasi nodo a qualsiasi altro con un numero di passi limitato.

La proprietà di «mondo piccolo» nasce quindi dalla contemporanea presenza di:

1. agglomerati di nodi con molte relazioni locali tra di loro;
2. relazioni sparse a lunga distanza.

Cerchiamo ora di caratterizzare quantitativamente la proprietà di «mondo piccolo». Prendiamo in considerazione un grafo  $G = \{N, A\}$ , dove  $N$  è l'insieme dei nodi e  $A$  è l'insieme degli archi. Sia  $n$  il numero di nodi in  $G$ .

Per misurare la proprietà 1 facciamo uso del *coefficiente di agglomerazione*. Per  $\forall i$ , sia  $G_i \subseteq G$  l'insieme dei nodi collegati direttamente con un arco al nodo  $i$ . Sia  $h_i$  il numero di archi presenti in  $G_i$ .

Sia  $k_i$  il numero di nodi presenti in  $G_i$ . Il numero di archi che sarebbero presenti in  $G_i$  se ogni nodo di  $G_i$  fosse collegato a tutti gli altri, è  $k_i(k_i - 1)/2$ . Definiamo *coefficiente di agglomerazione (clustering coefficient)* del nodo  $i$  la seguente quantità:

$$[12.2] \quad C_i = \begin{cases} \frac{h_i}{k_i(k_i-1)/2} & \text{se } k_i \geq 2 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Definiamo poi il coefficiente di agglomerazione del grafo  $G$  come la media dei coefficienti di agglomerazione dei suoi nodi:

$$[12.3] \quad C(G) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

Per misurare la proprietà 2 definiamo invece la *lunghezza del cammino caratteristico* di  $G$ . Per ogni coppia di nodi  $(i, j) \in G$ , sia  $d_{ij}$  la lunghezza del percorso minimo tra  $i$  e  $j$  misurata dal numero di archi di cui esso si compone. La lunghezza del cammino caratteristico è:

$$[12.4] \quad L(G) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}$$

dove la seconda sommatoria si intende estendersi solamente a  $j \neq i$ .

Il coefficiente di agglomerazione 12.3 e la lunghezza del cammino caratteristico 12.4 ci permettono di distinguere i grafi con struttura «mondo piccolo» dai grafi con connessioni esclusivamente locali, da un lato, e dai grafi con connessioni casuali, dall'altro. Infatti, queste tre classi di grafi possono essere distinte secondo lo schema che segue.

- I grafi con connessioni esclusivamente locali sono caratterizzati da grande  $C(G)$  e grande  $L(G)$ .
- I grafi con struttura «mondo piccolo» sono caratterizzati da grande  $C(G)$  e piccolo  $L(G)$ .
- I grafi con connessioni casuali sono caratterizzati da piccolo  $C(G)$  e piccolo  $L(G)$ .

Ad esempio, utilizzando il coefficiente di correlazione e la lunghezza del cammino caratteristico, si è potuto stabilire che le seguenti reti di relazioni hanno struttura «mondo piccolo»:

- La rete delle collaborazioni tra attori, definite come presenza di diversi attori nello stesso film (*Internet Movie Database*);
- La rete elettrica della costa occidentale degli Stati Uniti, dove i nodi sono le centrali elettriche e gli archi sono le linee di trasmissione dell'elettricità;
- Il sistema nervoso del verme *C elegans*, costituito da circa un centinaio di neuroni;
- Il *World Wide Web*, mappato come grafo i cui nodi sono i siti e gli archi sono gli *hyperlinks*.

È evidente che la proprietà di «mondo piccolo» è troppo comune per essere dovuta ad un unico meccanismo di formazione. Essenzialmente, per molti diversi motivi e in reti diversissime, può accadere che la maggior parte delle connessioni siano locali, ma che esista anche qualche rara connessione a lunga distanza.

#### 12.4. Le reti scalabili

Si consideri un grafo  $G(N, A)$  i cui nodi siano indicati da un indice  $i = 1, 2, \dots, n$ . Definiamo la *connettività del nodo*  $k_i$  come il numero di archi collegati ad  $i$ . Chiamiamo *connettività*  $k$  un generico valore assunto dalle  $k_i$ . Sia  $n(k)$  il numero di nodi che hanno connettività  $k$ . Quindi, la *distribuzione della connettività* ha in ascissa  $k$  e in ordinata  $n(k)$ . La fig. 12.4 ne chiarisce il significato, illustrando un esempio.

In generale, nelle reti che troviamo empiricamente i nodi da cui si dipartono molti archi sono relativamente pochi. Perciò la distribuzione della connettività è quasi sempre decrescente con  $k$ , come nell'esempio illustrato in fig. 12.4.

Pur essendo la quasi totalità delle distribuzioni della connettività trovate empiricamente decrescenti con  $k$ , queste distribuzioni possono essere anche molto diverse tra loro. In particolare, la pendenza della distribuzione è molto importante per caratterizzare la struttura del grafo. Minore la pendenza, maggiore il numero di nodi ad alta connettività.

In particolare, le due distribuzioni della connettività più comuni sono:

1. La legge esponenziale:

$$[12.5] \quad n(k) = e^{-\beta k}$$

dove  $\beta \in \mathbb{R}, \beta > 0$ ;

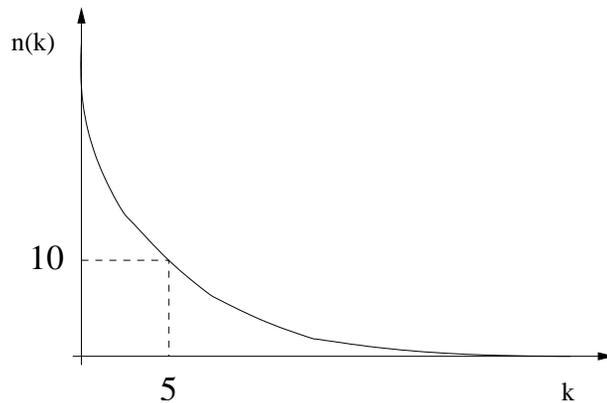


FIG. 12.4. Una distribuzione della connettività. Un generico punto di questa distribuzione significa, ad esempio, che nel grafo ci sono 10 nodi a connettività 5.

## 2. La legge di potenza:

$$[12.6] \quad n(k) = k^{-\gamma}$$

dove  $\gamma \in \mathbb{R}, \gamma > 0$ .

Differenziare tra la legge esponenziale e la legge di potenza (*power law*) è molto importante, perché ci permette di distinguere le reti in cui non ci sono nodi con un numero di archi molto grande (legge esponenziale) da quelle in cui questi nodi esistono, e svolgono un ruolo importante nella diffusione delle informazioni (legge di potenza). Ad esempio, una rete informatica o una rete di relazioni sociali la cui connettività sia distribuita con una legge di potenza propaga virus più facilmente di una rete la cui connettività sia distribuita con una legge esponenziale.

Per distinguere empiricamente il caso 12.5 dal caso 12.6 si usa tracciare la distribuzione della connettività operando, sia sull'ascissa sia sull'ordinata, una trasformazione logaritmica. Infatti, applicando la trasformazione logaritmica alla 12.5 otteniamo:

$$\ln[n(k)] = -\beta e^{\ln(k)}$$

che essendo esponenziale in  $\ln(k)$  è sempre inferiore, e per  $k$  elevato molto inferiore, alla funzione lineare in  $\ln(k)$  che troviamo applicando la trasformazione logaritmica alla 12.6:

$$\ln[n(k)] = -\gamma \ln(k)$$

La fig. 12.5 illustra la differenza tra la legge esponenziale e la legge di potenza sul piano  $\ln(k) - \ln[n(k)]$  ponendo  $\beta = \gamma = 1$ . Si vede chiaramente che la legge di potenza tende a zero molto più lentamente della legge esponenziale.

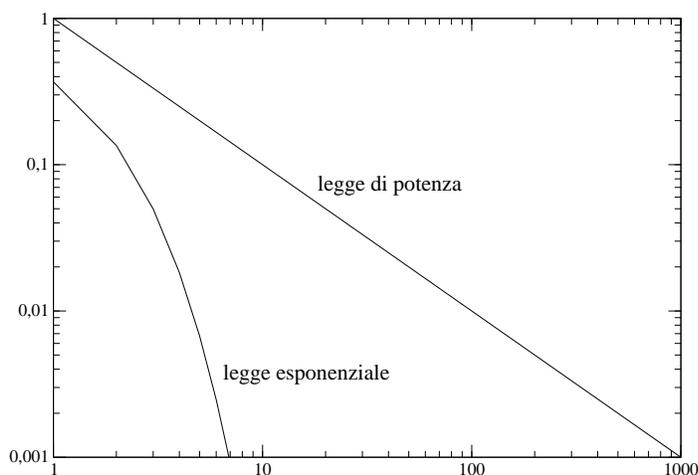


FIG. 12.5. Un confronto tra la legge esponenziale 12.5 e la legge di potenza 12.6 per  $\beta = \gamma = 1$ .

Le reti la cui distribuzione della connettività segue una legge di potenza vengono anche dette *reti scalabili* (*scale-free networks*). Il motivo è semplicemente che per variazioni di scala di  $\ln(k)$  la variazione di  $\ln[n(k)]$  è costante.

Le reti scalabili godono della proprietà che agglomerando alcuni suoi nodi scelti casualmente si ottiene una rete che è ancora scalabile. La proprietà di scalabilità può quindi essere vista come la possibilità di «zoomare» una rete mantenendone inalterate le caratteristiche di connettività.

Le reti a distribuzione esponenziale della connettività sono molto comuni, dalla rete autostradale alla rete ferroviaria a tutte quelle situazioni dove non esistono nodi che coagulano intorno a sé la maggior parte del traffico. Inoltre, qualsiasi rete generata collegando casualmente un insieme di nodi – ad esempio, la rete di Erdős-Renyi che abbiamo visto visto nel par. 12.2. – ha una distribuzione della connettività distribuita esponenzialmente.

Ma anche gli esempi di reti scalabili sono moltissimi. Quello che segue è un elenco molto parziale [Barabási, 2003].

- Il *World Wide Web* con i siti come nodi e i link come archi, una rete che abbiamo già visto avere anche una struttura del tipo «mondo piccolo».
- Il grafo delle collaborazioni scientifiche, dove i nodi sono gli scienziati e dove un arco esiste se due scienziati hanno fatto almeno una pubblicazione insieme.

- Il grafo dei rapporti sessuali occasionali mensili (si noti che per calcolare la distribuzione della connettività non è necessario sapere a quali nodi è connesso ciascun nodo, informazione in questo caso non disponibile, ma solo il numero di archi che si dipartono da ogni nodo).
- Il grafo del trasporto aereo, dove i nodi sono gli aeroporti e gli archi indicano l'esistenza di almeno un collegamento aereo tra due aeroporti.
- Il grafo delle interazioni tra le proteine generate dal DNA, dove le proteine sono i nodi e le reazioni chimiche gli archi.

L'elenco potrebbe continuare e suggerire che anche la proprietà di scalabilità sia molto diffusa. In realtà occorre tener presente che quest'impressione è in parte dovuta alle modalità di misurazione.

Infatti nelle analisi empiriche una rete è detta «scalabile» se anche solo lungo 2-3 ordini di grandezza la distribuzione della connettività segue una legge di potenza. Spesso, al di là di quell'intervallo la distribuzione crolla bruscamente a valori molto bassi, oppure prosegue con un decadimento esponenziale. Questo significa che molte reti che sono classificate come scalabili lo sono solo all'interno di un intervallo ben delimitato, oppure hanno in realtà una distribuzione della connettività esponenziale con un coefficiente  $\beta$  molto piccolo.

Questa considerazione però non cambia il dato di fatto suggerito dalle analisi empiriche, vale a dire che un gran numero di reti hanno un notevole numero di nodi con grado di connettività molto elevato. Quindi, analogamente alle reti del tipo «mondo piccolo», anche le reti scalabili sono in grado di diffondere informazioni molto velocemente. Il caso della diffusione dei virus ne è un esempio, e non a caso tra le reti riportate sopra compaiono la rete dei rapporti sessuali occasionali e il *World Wide Web*.

In linea di principio l'insieme delle reti scalabili è contenuto nell'insieme delle reti che godono della proprietà di «mondo piccolo». Si possono cioè concepire delle reti che godono della proprietà «mondo piccolo» ma che non sono scalabili, mentre tutte le reti scalabili devono godere della proprietà di «mondo piccolo».

Infatti una rete i cui nodi abbiano tutti all'incirca lo stesso numero di archi non è scalabile, ma se quasi tutti gli archi collegano nodi vicini con alcune eccezioni per pochi collegamenti a lunga distanza, questa rete gode della proprietà di «mondo piccolo». D'altro canto, in una rete scalabile esistono molti nodi che hanno un grande numero di archi e, al limite, almeno un nodo che è connesso a tutti gli altri. Quindi una rete scalabile non può non godere della proprietà di «mondo piccolo».

Nella pratica dell'analisi empirica delle reti le cose sono un pò diverse. Infatti, poiché una rete è classificata come scalabile anche se la sua distribuzione della connettività segue una legge di potenza in un intervallo di soli 2-3 ordini di grandezza, se la rete non ha nodi con connettività superiore

all'estremo di quell'intervallo e se le connessioni sono tutte locali, allora una rete classificata come scalabile non gode della proprietà di «mondo piccolo». È però vero che le reti di tipo «mondo piccolo», ma non scalabili, oppure scalabili ma non «mondo piccolo», sono molto poche. La quasi totalità delle reti che godono di una di queste due proprietà, gode anche dell'altra.

Esistono molti meccanismi che possono generare una rete scalabile. Il più semplice è il *collegamento preferenziale* (*preferential attachment*) suggerito da Barabási e Albert [1999].

Sia dato un grafo che al tempo  $t_o$  dispone di  $n_o$  nodi. Ad ogni istante di tempo successivo sia aggiunto al grafo un altro nodo, connesso ad uno dei nodi preesistenti. Quindi al tempo  $t > t_o$  risulteranno aggiunti al grafo  $n = t$  nodi. Se la probabilità che al tempo  $t + 1$  il nodo  $n + 1$ -esimo che viene aggiunto al grafo si colleghi al precedente nodo  $i$  assume la seguente forma:

$$[12.7] \quad p_i(t + 1, n + 1) = \frac{k_i(t, n)}{\sum_{j=n_o+1}^n k_j(t, n)}$$

allora la rete risultante è scalabile.

La regola di crescita 12.7 dice semplicemente che se un nodo ha molti archi, ne riceverà ancora di più. Ad esempio, un sito verso il quale molti altri siti hanno un link, probabilmente ne attrarrà ancora di più. Un ristorante che ha un buon numero di clienti tende ad attrarne degli altri, e così via.

Si dimostra che se una rete cresce seguendo la regola 12.7, allora la sua distribuzione della connettività segue una legge di potenza con  $\gamma = 3$ . In generale le reti scalabili scoperte in natura hanno però un esponente inferiore, spesso all'interno dell'intervallo  $[2, 2, 5]$ .

In effetti, l'algoritmo di crescita della connettività per collegamento preferenziale esprime una condizione sufficiente, ma non necessaria, per generare una rete scalabile: in alcuni casi empirici si è potuto appurare che la legge di potenza della distribuzione della connettività derivava da meccanismi più complessi.

Si tenga anche presente che nella maggior parte dei casi la 12.7 è comunque valida solo finché  $n$  e  $t$  si mantengono al di sotto di un certo livello. Ad esempio, il numero di rapporti sessuali occasionali mensili non può andare oltre certi limiti fisiologici, il numero di collegamenti aerei offerti da un aeroporto raggiunge un limite oltre il quale si preferisce costruire un altro aeroporto e così via. Ciò concorre a spiegare il fatto che in generale la distribuzione della connettività segua una legge di potenza solamente all'interno di un intervallo limitato.

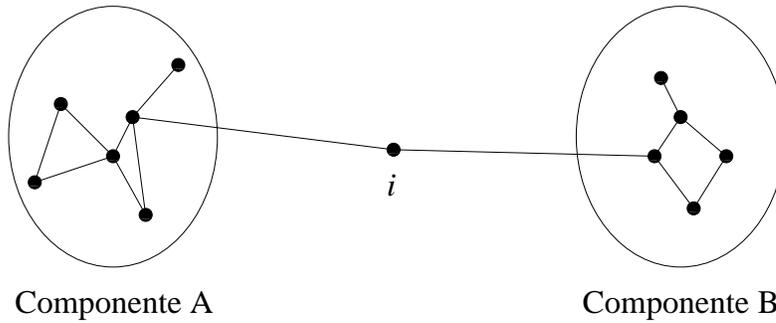


FIG. 12.6. Il nodo  $i$ , pur avendo connettività  $k_i = 2$ , è tale che la sua rimozione spezzerebbe il grafo nelle due componenti A e B.

### 12.5. Comunità in rete

In molte applicazioni può essere utile individuare, in una rete, dei sottinsiemi di nodi maggiormente connessi tra loro. Ad esempio, in un'analisi delle comunicazioni per posta elettronica tra i dipendenti di una grande impresa può essere interessante capire quali gruppi di persone comunicano maggiormente tra loro, e verificare se queste «comunità» coincidono o meno con i reparti e i flussi di informazioni previsti dall'organigramma. Un modello ad agenti potrebbe voler riprodurre la formazione di queste comunità, ad esempio per studiare in che misura la loro struttura dipende dalle caratteristiche degli individui che le compongono.

Esistono e sono continuamente sviluppati molti algoritmi per l'individuazione di comunità all'interno di una rete. In questa sede non ci occupiamo di questi algoritmi, la cui esposizione occuperebbe troppo spazio, ma della teoria disponibile per valutare *ex ante* la possibilità di individuare comunità in diversi tipi di reti.

Per individuare i gruppi di nodi più strettamente connessi tra loro occorre individuare quei nodi tali che, se uno di loro venisse tolto, il grafo si spezzerebbe in due o più componenti isolate. Indubbiamente questo è il caso dei nodi ad alta connettività, ma alle volte anche dei nodi a bassa connettività possono godere di questa proprietà. La fig. 12.6 ci mostra un esempio di un nodo a bassissima connettività la cui rimozione spezzerebbe un grafo in due componenti distinte.

Prendiamo in considerazione un grafo connesso composto da  $n$  nodi. Allo scopo di individuare i nodi che tengono insieme il grafo, definiamo in questo modo la *infracentralità* (*betweenness centrality*) o *carico* (*load*) sul nodo  $i$  [Barthélemy, 1998]:

$$[12.8] \quad g_i = \frac{2}{(n-1)(n-2)} \sum_{s \neq i \neq t} \frac{\sigma_{sit}}{\sigma_{st}}$$

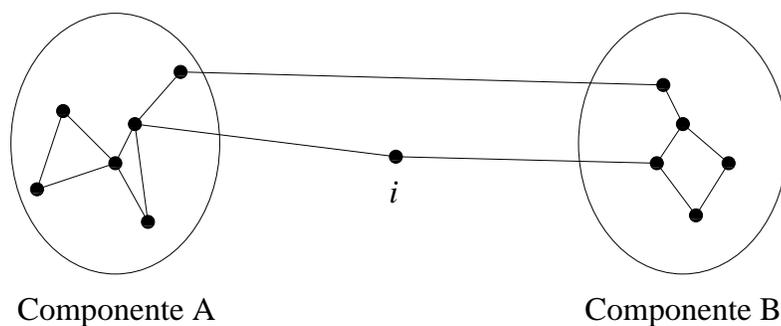


FIG. 12.7. Aggiungendo un solo arco al grafo della figura 12.6, l'infracentralità del nodo  $i$  diminuisce.

dove  $\sigma_{st}$  è il numero di cammini minimi tra  $s$  e  $t$  e  $\sigma_{sit}$  è il numero di cammini minimi tra  $s$  e  $t$  che passano per  $i$ . La *betweenness centrality* definita nella 12.8 è tale che  $g_i \in [0, 1]$ .

Nel caso mostrato in fig. 12.6, l'individuazione delle due comunità A e B è immediata. Ciò avviene perché i nodi all'interno di A e B sono molto connessi tra loro. Quindi l'infracentralità è in qualche modo legata alla connettività, anche se questo legame non può essere riferito al singolo nodo ma deve piuttosto essere inteso in senso statistico.

Se invece il grafo è tale che il nodo  $i$  viene cortocircuitato da altri cammini minimi la separazione delle due regioni A e B è meno ovvia. La fig. 12.7 illustra la situazione: aggiungendo un solo arco al grafo della fig. 12.6, l'infracentralità del nodo  $i$  diminuisce. Inoltre, la sua capacità di separare le due regioni A e B non dipende in modo semplice dal fatto che i nodi all'interno di A e B hanno un'alta connettività in quanto le loro connessioni non sono tutte interne alla loro regione. Tutto ciò è accaduto perché l'arco che è stato inserito ha creato dei cicli.

Indichiamo con  $g$  il generico valore dell'infracentralità e con  $k$  il generico valore della connettività. Cerchiamo una relazione tra la distribuzione della connettività e la distribuzione dell'infracentralità.

Come abbiamo visto nel par. 12.4., la connettività è in generale distribuita con legge esponenziale oppure con legge di potenza. Per quanto riguarda la distribuzione dell'infracentralità, si è trovato empiricamente che essa è ben approssimata da una legge di potenza:

$$[12.9] \quad n(g) \propto g^{-\delta}$$

dove  $\delta \in \mathfrak{R}$  e dove  $n(g)$  indica il numero di nodi che hanno infracentralità  $g$ .

Si noti che poiché la 12.9 non è una relazione di eguaglianza, ma una relazione di proporzionalità, non ci dice quanti nodi hanno un particolare

valore di infracentralità. Ad esempio, se  $\delta = 2$  la 12.9 implica che il numero di nodi ad infracentralità  $g = 0, 1$  è proporzionale a 100, il che si può scrivere  $n(0, 1) = 100 a$ , dove  $a$  è una costante ignota. Analogamente, possiamo dire che  $n(0, 2) = 25 a$ . Da queste due relazioni segue che  $n(0, 1)/n(0, 2) = 4$ , cioè che il numero di nodi che hanno infracentralità 0, 1 è 4 volte maggiore del numero di nodi che hanno infracentralità 0, 2.

La 12.9 è sufficientemente generale da descrivere la distribuzione di  $g$  in ogni rete, ma ogni tipo di rete è caratterizzato da un diverso valore di  $\delta$ . Nel caso delle reti scalabili si ha che  $\delta = \delta(\gamma)$ . In particolare, se la rete scalabile è stata ottenuta per collegamento preferenziale come specificato dalla 12.7, si ha che  $\delta = 2$ .

Per sapere con quanta facilità riusciremo ad individuare comunità semi-autonome all'interno di una rete con una particolare distribuzione della connettività, dobbiamo collegare la distribuzione dell'infracentralità  $g$  alla distribuzione della connettività  $k$ . Tentiamo con la seguente relazione, che vedremo in seguito essere convalidata dai dati empirici:

$$[12.10] \quad g \sim k^\eta$$

dove  $\eta \in \mathfrak{R}$ .

Si noti che la 12.10 è una relazione di similitudine. Essa non dice che  $\forall$  nodo  $i$  si ha che  $g_i$  è uguale a  $k_i^\eta$ , ma che la distribuzione di  $g$  è uguale alla distribuzione di  $k^\eta$ .

Se la 12.10 viene accettata, allora si dimostra che nel caso particolare delle reti scalabili il coefficiente  $\eta$  soddisfa la seguente relazione:

$$[12.11] \quad \eta = \frac{\gamma - 1}{\delta - 1}$$

dove  $\gamma$  è stato definito nella 12.6 e  $\delta$  nella 12.9.

In generale però il coefficiente  $\eta$  assume valori diversi in diversi tipi di reti. Ad ognuno di questi valori corrisponde una diversa distribuzione dell'infracentralità e di conseguenza una maggiore o minore difficoltà ad individuare delle comunità all'interno della rete. Si propongono in conclusione alcuni casi.

- Se il grafo è un albero, cioè non ha cicli, individuare delle comunità e separarle l'una dall'altra è particolarmente semplice. Si può dimostrare analiticamente che se il grafo è un albero, allora  $\eta = 2$ . La dimostrazione si basa sul fatto che tutti i cammini minimi che passano per un nodo di un albero sono unici e che il numero medio di cammini minimi che passano per un nodo è proporzionale a  $k(k - 1) \approx k^2$ .

In reti che non sono alberi i cammini minimi che passano per un nodo possono non essere unici, per cui nella 12.8 possono esistere termini  $\sigma_{sit}/\sigma_{st} < 1$ . Pertanto in ogni rete che non è un albero l'infracentralità è minore che negli alberi. Ne segue che in generale è:

$$\eta \leq 2$$

con  $\eta = 2$  se il grafo è un albero.

Nel caso particolare in cui l'albero è anche una rete scalabile si può utilizzare la 12.11, la quale nel caso specifico diventa  $\delta = (\gamma + 1)/2$ . Se inoltre si sa che questa rete scalabile è stata ottenuta per collegamento preferenziale (eq. 12.7) possiamo porre  $\gamma = 3$  e quindi otteniamo  $\delta = 2$ , in ottimo accordo con i dati sperimentali.

- Se il grafo è casuale, come ad esempio il grafo di Erdős-Renyi che abbiamo visto nel par. 12.2., il coefficiente di agglomerazione 12.3 è generalmente molto piccolo. Indicativamente, se  $C(G) < 1/n$  otteniamo ancora  $\eta \approx 2$ .

Questo caso è quindi molto simile al precedente. È improbabile che qualche nodo abbia connettività molto elevata ed il grafo è quasi del tutto privo di cicli. Pertanto anche in questo caso l'individuazione di comunità non pone difficoltà.

- In generale  $\eta < 2$  e quindi l'identificazione di comunità è resa difficile dalla presenza di cicli. Quindi la quantità  $(2 - \eta)$  fornisce un'indicazione della difficoltà di identificare comunità.

Se la rete è scalabile si può usare ancora la 12.11. Utilizzando la condizione  $\eta < 2$  otteniamo in questo caso:

$$\delta > \frac{\gamma + 1}{2}$$

dove  $\gamma$  può essere noto, ad es.  $\gamma = 3$  se la rete è stata costruita per collegamento preferenziale (12.7).

In conclusione, l'individuazione di comunità all'interno di una rete è un'operazione che comporta comunque un certo grado di arbitrarietà se nella rete esistono cicli. La verifica preventiva degli indicatori presentati in questo paragrafo può dare un'indicazione circa l'affidabilità del risultato fornito da un algoritmo che cerca di individuare sottoinsiemi di nodi maggiormente connessi tra loro piuttosto che al resto del grafo.

## Bibliografia

- ABERTH, O. [1980]. *Computable Analysis*. McGraw-Hill, New York.
- [2001]. *Computable Calculus*. Academic Press, London.
- AGAGLIATE, M. [2004]. *La simulazione ad agenti e lo studio dell'economia: la ricostruzione virtuale del mercato borsistico*. Tesi di laurea in linea a web. [econ.unito.it/terna/tesi/agagliate](http://econ.unito.it/terna/tesi/agagliate).
- AGIOMIRGIANAKIS, G.M. e MAVROMMATIS, Y.E. [1998]. *Economics and Mathematics: Recent Views on a Controversial Relationship*. In *International Journal of Social Economics*, vol. 25, pp. 1565-1571.
- AGRE, P.E. e CHAPMAN, D. [1987]. *Pengi: An Implementation of a Theory of Activity*. In *AAAI*, pp. 268-272.
- ALBA, E. e TROYA, J. [1999]. *A Survey of Parallel Distributed Genetic Algorithms*. In *Complexity*, vol. 4(4), pp. 31-52.
- ALKER JR., H. [1974]. *Computer Simulations: Inelegant Mathematics and Worse Social Science?*. In *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, vol. 5, pp. 139-155.
- ALLAS, T. e GEORGIADIS, N. [2001]. *Devising effective corporate and regulatory strategies*. In *McKinsey Quarterly*, vol. 2.
- ANDERSON, P.W., ARROW, K.J. e PINES, D., cur. [1988]. *The Economy as an Evolving Complex System*. SFI Studies in the Sciences of Complexity. Addison-Wesley, Redwood City, CA.
- ANDREONI, J. e MILLER, J. [1995]. *Auctions with adaptive artificial agents*. In *Games and Economic Behavior*, vol. 10, pp. 39-64.
- ANDREWS, C. e AXTELL, R. [2002]. *Agent Based Modeling of Industrial Ecosystems*. The Lake Arrowhead Conference - 2002.
- ARIFOVIC, J. [1995]. *Genetic Algorithms and Inflationary Economies*. In *Journal of Monetary Economics*, vol. 36(1), pp. 219-243.
- [1996]. *The Behavior of the Exchange Rate in the Genetic Algorithm and Experimental Economies*. In *Journal of Political Economy*, vol. 104(3), pp. 510-541.

- ARTHUR, B. [1991]. *On designing economic agents that behave like human agents: A behavioral approach to bounded rationality*. In *American Economic Review*, vol. 81, pp. 353-359.
- [1994]. *Inductive Reasoning and Bounded Rationality*. In *American Economic Review*, vol. 84, p. 406.
- [1999]. *Ragionamento induttivo e razionalità limitata*. In M. Lombardi, cur., *Evoluzione delle conoscenze e decisioni economiche*. Franco Angeli, pp. 95-105.
- ARTHUR, W.B., DURLAUF, S.N. e LANE, D.A., cur. [1997]. *The Economy as an Evolving Complex System II*. Addison-Wesley.
- AUYANG, S.Y. [1988]. *Foundations of Complex-System Theories in Economics, Evolutionary Biology, and Statistical Physics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- AXELROD, R. [1997a]. *Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences*. In R. Conte, R. Hegselmann e P. Terna, cur., *Simulating Social Phenomena, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 21-40.
- [1997b]. *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Cooperation*. Princeton University Press, Princeton.
- AXELROD, R., RIOLO, R.L. e COHEN, M.D. [1948]. *Beyond Geography: Cooperation with Persistent Links in the Absence of Clustered Neighborhoods*. In *Personality and Social Psychology Review*, vol. 6(4), pp. 341-346.
- AXTELL, R. [1999]. *The Emergence of Firms in a Population of Agents: Local Increasing Returns, Unstable Nash Equilibria, and Power Law Size Distributions*. Brookings Institute, Working Paper n. 3.
- [2000]. *Why Agents? On the Varied Motivations for Agent Computing in the Social Sciences*. In *Proceedings of the Workshop on Agent Simulation: Applications, Models and Tools*. Argonne National Laboratory, IL.
- [2001]. *Zipf Distribution of U.S. Firm Sizes*. *Science*, Settembre.
- [2005]. *The Complexity of Exchange*. In *Economic Journal*, vol. 115(504), pp. F193-F210.
- BADINO, C. [2004]. *Simulazione e sanità: il 118 rifatto nel computer*. Tesi di laurea in linea a [web.econ.unito.it/terna/tesi/badino](http://web.econ.unito.it/terna/tesi/badino).
- BAEKGAARD, H. [1995]. *Integrating micro and macro models: mutual benefits*. In M. McAleer, P. Binning, H. Bridgman e B. Williams, cur., *International Congress on Modelling and Simulation Proceedings*, vol. 4. Modelling and Simulation Society of Australia, Canberra, pp. 253-258.
- BALCH, T. e ARKIN, R.C. [1995]. *Motor schema-based formation control for multiagent robot teams*. In *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95)*. AAAI Press, Menlo Park, CA, pp. 10-16.
- BANKES, S. [2002]. *Tools and techniques for developing policies for complex and uncertain systems*. In *PNAS*, vol. 99, pp. 7263-7266. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.092081399](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.092081399).

- BANKES, S. e GILLOGLY, J. [1994]. *Exploratory Modeling: Search Through Spaces of Computational Experiments*. In *Proceedings of the Third Annual Conference on Evolutionary Programming*. [www.evologinglogic.com/Learn/absandpapers/explsearch.html](http://www.evologinglogic.com/Learn/absandpapers/explsearch.html).
- BANKES, S. e LEMPERT, R.J. [1996]. *Adaptive Strategies for Abating Climate Change: An Example of Policy Analysis for Complex Adaptive Systems*. In L.J. Fogel, P.J. Angeline e T. Back, cur., *Evolutionary Programming V: Proceedings of the Fifth Annual Conference on Evolutionary Programming*. MIT Press, Cambridge, MA, pp. 17-25.
- BANKS, J., CARSON, J.S., NELSON, B.L. e NICOL, D.M. [2000]. *Discrete-Event System Simulation, 3rd Edition*. Prentice Hall, Englewood Clis, NJ.
- BARABÁSI, A.L. [2003]. *Linked: How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*. Plume, New York.
- BARABÁSI, A.L. e ALBERT, R. [1999]. *Emergence of scaling in random networks*. In *Science*, vol. 286, pp. 509-512.
- BARANZINI, R. e TATTI, E. [2002]. *Léon Walras e il metodo matematico dell'economia pura: al di là della forma*. In *Economia Politica*, vol. 19(1), pp. 65-89.
- BARBERA, F. [2004]. *Meccanismi sociali. Elementi di sociologia analitica*. il Mulino, Bologna.
- BARRECA, C. [2002]. *Simulazioni ad agenti in JavaSwarm: applicazione ad un caso aziendale*. Tesi di laurea in linea a [web.econ.unito.it/terna/tesi/barreca.zip](http://web.econ.unito.it/terna/tesi/barreca.zip).
- BARTHÉLEMY, M. [1998]. *Betweenness centrality in large complex networks*. In *The European Physical Journal B*, vol. 38, pp. 163-168.
- BASEL COMMITTEE ON BANKING SUPERVISION [1998]. *International convergence of capital measurement and capital standards*. Bank for International Settlements.
- BENA, A. [2003]. *Modello della concorrenza reso realistico, con esplorazione dell'applicazione in Swarm o in JAS*. Tesi di laurea in linea a [web.econ.unito.it/terna/tesi/merlo\\_f.zip](http://web.econ.unito.it/terna/tesi/merlo_f.zip).
- BENSAID, N. e MATHIEU, P. [1997]. *A Hybrid and Hierarchical Multi-Agent Architecture Model*. In *Proceedings of the Second International Conference and Exhibition on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology, 21st-23rd April 1997, PAAM'97*. The Practical Application Company Ltd, London, pp. 145-155.
- BERTSCHE, D., CRAWFORD, C. e MACADAM, S. [1996]. *Is simulation better than experience?*. In *McKinsey Quarterly*, vol. 1, pp. 50-57.
- BERTUGLIA, C.S. e VAIO, F. [2003]. *Non linearità, caos, complessità. Le dinamiche dei sistemi naturali e sociali*. Bollati Boringhieri, Torino.
- BOELLA, G., DAMIANO, R. e LESMO, L. [2000]. *Cooperation and group utility*. In *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1757, pp. 319-333.
- BOERO, R. [2002]. *SWIEE a Swarm Web Interface for Experimental Economics*. In *Agent Based Methods in Economic and Finance: Simulations in Swarm*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and London, pp. 87-107.

- BOERO, R., CASTELLANI, M. e SQUAZZONI, F. [2004a]. *Cognitive Identity and Social Reflexivity of the Industrial District Firms. Going Beyond the Complexity Effect with Agent-Based Simulations*. In G. Lindemann, D. Moldt e M. Paolucci, cur., *Regulated Agent-Based Social Systems*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 48-69.
- [2004b]. *La sociologia figurazionale tradotta in un modello di simulazione su agenti*. In *Sistemi Intelligenti*, vol. XVI(1), pp. 7-27.
- BOERO, R. e CAVALLARO, F. [2005]. *Analisi di Rete, Funzioni Cognitivo-Decisionali e Complessità Sociale: Una Possibile Integrazione per lo Studio dei Sistemi Socio-Economici*. In *Sistemi Intelligenti*, vol. 17(1), pp. 11-24.
- BOHM, V. [1983]. *Quantity Rationing vs. IS-LM - A Synthesis*. Discussion Paper No. 252/83, Universität Mannheim.
- BOLLOBÁS, B. [1985]. *Random Graphs*. Academic Press, London.
- BONABEAU, E., DORIGO, M. e THERAULAZ, G. [1999]. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, New York.
- BONESSA, E. [2003]. *Simulazione di un'impresa reale utilizzando il modello jES: il caso Vir*. Tesi di laurea in linea a [web.econ.unito.it/terna/tesi/bonessa.zip](http://web.econ.unito.it/terna/tesi/bonessa.zip).
- BORRA, A. [2002]. *Generalizzazione del modello javaSwarm di simulazione di impresa per l'applicazione ad un caso concreto*. Tesi di laurea in linea a [web.econ.unito.it/terna/tesi/borra.zip](http://web.econ.unito.it/terna/tesi/borra.zip).
- BORSHCHEV, A. e FILIPPOV, A. [2004]. *From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools*. In linea a [www.xjtek.com/files/papers/fromsystemdynamics2004.pdf](http://www.xjtek.com/files/papers/fromsystemdynamics2004.pdf).
- BOY, G.A. [1991]. *Intelligent Assistant Systems*. Academic Press, San Diego, CA.
- BRATMAN, M.E. [1987]. *Intentions, Plans, and Practical Reason*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- BROOKS, R.A. [1986]. *Achieving artificial intelligence through building robots*. Cambridge, MA. AI-Memo 899, MIT AI-Lab.
- BRUSTOLONI, J.C. [1991]. *Autonomous Agents: Characterization and Requirements*. In *Technical Report CMU-CS*. Carnegie Mellon University, pp. 91-204.
- BRUUN, C. [1999]. *Agent-Based Keynesian Economics: Simulating a Monetary Production System Bottom-Up*. [www.socsci.auc.dk/~cbruun/abke.pdf](http://www.socsci.auc.dk/~cbruun/abke.pdf).
- [2002]. *Prospect for an Economics Framework for Swarm*. In F. Luna e A. Perrone, cur., *Agent-Based Methods in Economics and Finance: Simulations in Swarm*. Kluwer Academic, Dordrecht and London, pp. 3-35.
- BUNN, D.W. [2004]. *Structural and behavioral foundations of competitive electricity prices*. In D.W. Bunn, cur., *Modeling prices in competitive electricity markets*. Wiley & Sons, London.
- BUNN, D.W. e OLIVEIRA, F. [2000]. *An application of agent-based simulation to the new electricity trading arrangements of England and Wales*. In

- IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. Special issue on Evolutionary modeling of Economic Systems.
- BURT, R.S. [1992]. *Structural Holes - The Social Structure of Competition*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- BURTON, R. [2001]. *Afterword*. In A. Lomi e E.R. Larsen, cur., *Dynamics of Organizations - Computational Modeling and Organization Theories*. AAAI Press, MIT Press, Menlo Park, CA, Cambridge, MA.
- CAPPELLINI, A. [2003]. *Esperimenti su mercati finanziari con agenti naturali ed artificiali*. Tesi di laurea in linea a web.econ.unito.it/terna/tesi/cappellini.
- [2005]. *Avatar e simulazioni*. In *Sistemi intelligenti*, vol. 17(1), pp. 45-58.
- CARAFÀ, C. [2003]. *Analisi e confronto dei software di Simulazione di Reti di Petri*. Tesi di laurea, Università di Ancona.
- CASTELFRANCHI, C., CONTE, R. e PAOLUCCI, M. [1998]. *Normative Reputation and the Costs of Compliance*. In *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 1(3). [jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS/1/3/3.html](http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS/1/3/3.html).
- CHATTOE, E. [1998]. *Just how (Un)realistic are Evolutionary Algorithms as Representation of Social Processes*. In *Journal of Artificial Societies and Social Simulations*, vol. 1(3).
- CHIADÒ, S.T. [2005]. *Individualismo metodologico e simulazione: la nascita di un mercato hayekiano ad agenti*. Tesi di laurea in linea a web.econ.unito.it/terna/tesi/chiado.
- CHINAGLIA, M. [2004]. *Modelli di simulazione e mercati finanziari: la formazione di bolle e crash*. Tesi di laurea in linea a web.econ.unito.it/terna/tesi/chinaglia.
- CLEMENTS, D.H. e MEREDITH, J.S. [1992]. *Research on Logo: Effects and Efficacy*. Logo Foundation, New York.
- CLOWER, R. [1965]. *The Keynesian Counter-revolution: A Theoretical Appraisal*. In F. Hahn e F. Brechling, cur., *The Theory of Interest Rates*. Macmillan, London.
- COHEN, M.D., RIOLO, R.L. e AXELROD, R. [2001]. *The Role of Social Structure in the Maintenance of Cooperative Regimes*. In *Rationality and Society*, vol. 13, pp. 5-32.
- COHEN, P.R. e LEVESQUE, H.J. [1987]. *Intention = Choice + Commitment..* In AAAI. pp. 410-415.
- [1990]. *Intention is Choice with Commitment..* In *Artif. Intell.*, vol. 42(2-3), pp. 213-261.
- COLLIER, N., HOWE, T., NAJILIS, R., NORTH, M. e VOS, J.R. [2003a]. *Documentation Set for Repast*. In linea a [repast.sourceforge.net](http://repast.sourceforge.net).
- COLLIER, N., HOWE, T. e NORTH, M. [2003b]. *Onward and Upward: The Transition to Repast 2.0*. In *Proceedings of the First Annual North American Association for Computational Social and Organizational Science Conference, Electronic Proceedings, Pittsburgh, PA USA*. National Academy of Sciences of the USA, Washington, DC, USA. Vol. 99, suppl. 3.

- CONTE, R. [2000]. *The Necessity of Intelligent Agents in Social Simulation*. In G. Ballot e G. Weisbuch, cur., *Applications of Simulation to Social Sciences*. Hermes Science Publishing Ltd, Oxford, pp. 19-38.
- CONTE, R. e CASTELFRANCHI, C. [1995]. *Cognitive and Social Action*. University College London, London.
- [1996]. *Simulating Multi-Agent Interdependencies: A Two-Way Approach to the Micro-Macro Link*. In K.G. Troitzsch, U. Mueller, N. Gilbert e J. Doran, cur., *Social Science Microsimulation*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 394-415.
- CONTE, R., EDMONDS, B., MOSS, S. e SAWYER, R.K. [2001]. *Sociology and Social Theory in Agent-Based Social Simulation: A Symposium*. In *Computational and Mathematical Organization Theory*, vol. 7, pp. 183-205.
- CONTE, R. e PAOLUCCI, M. [2002]. *Reputation in Artificial Societies. Social Beliefs for Social Order*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and London.
- CONTE, R. e TERNA, P. [2000]. *Una discussione sulla simulazione in campo sociale: mente e società*. In *Sistemi Intelligenti*, vol. 2(XII), pp. 326-331.
- COUTAZ, J. [1990]. *Interfaces Homme Ordinateur: Conception et Réalisation*. Editions Bordas, Paris.
- CROSETTO, R. [2004]. *Simulazione ad agenti e sistemi complessi. Applicazione al caso BasicNet*. Tesi di laurea in linea a [web.econ.unito.it/terna/tesi/crosetto](http://web.econ.unito.it/terna/tesi/crosetto).
- DAMER, B. [1998]. *Avatars: Exploring and Building Virtual Worlds on the Internet*. Peachpit Press, Berkeley, CA.
- DANIEL, G. [2004]. *Random time in Agent-Based Market Models*. In linea a [www.cs.man.ac.uk/~danielg/download/publications/rochebrune2004.GillesDaniel-paper.pdf](http://www.cs.man.ac.uk/~danielg/download/publications/rochebrune2004.GillesDaniel-paper.pdf).
- DANIELS, M.G., FARMER, J.D., IORI, G. e SMITH, E. [2002]. *How storing supply and demand affects price diffusion*. Santa Fe working paper in linea a [www.santafe.edu/sfi/publications/Working-Papers/02-01-001.pdf](http://www.santafe.edu/sfi/publications/Working-Papers/02-01-001.pdf).
- DE LEYVA, E. e LEKANDER, P.A. [2003]. *Climate change for Europe's Utilities*. In *McKinsey Quarterly*, vol. 1, pp. 120-130.
- DE RUVO, A. [2005]. *Modello di simulazione ad agenti del mercato di borsa: realismo nel book*. Tesi di laurea in linea a [web.econ.unito.it/terna/tesi/de\\_ruvo](http://web.econ.unito.it/terna/tesi/de_ruvo).
- DE VANY, A. e LEE, C. [2001]. *Quality Signals in Information Cascades and the Distribution of Motion Picture Box Office Revenues*. In *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 25, pp. 593-614.
- DELLI GATTI, D., DI GUILMI, C., GALLEGATI, M. e GIULIONI, G. [2003]. *Industrial Dynamics and Business Fluctuations in an Agent Based Model*. In pubblicazione.

- DELLI GATTI, D., DIGUILMI, C., GAFFEO, E., GALLEGATI, M., GIULIONI, G. e PALESTRINI, A. [2005a]. *A new approach to business fluctuations: heterogeneous interacting agents, scaling laws and financial fragility*. In *Journal of Economic Behavior and Organization*, vol. in pubblicazione.
- DELLI GATTI, D., GAFFEO, E., GALLEGATI, M., GIULIONI, G., KIRMAN, A., PALESTRINI, A. e RUSSO, A. [2005b]. *Complex dynamics and empirical evidence*. In *Information Sciences*, vol. in pubblicazione.
- DELLI GATTI, D. e GALLEGATI, M. [2005]. *Eterogeneità degli agenti economici e interazione sociale: teorie e verifiche empiriche*. il Mulino, Bologna.
- DELLI GATTI, D., GALLEGATI, M., GIULIONI, G. e PALESTRINI, A. [1999]. *Financial Fragility, Patterns of Firms' Entry and Exit and Aggregate Dynamics*. In *Journal of Economic Behavior and Organization*, vol. 51(1), pp. 79-97.
- DESOTGIU, C. [2005]. *Simulazione delle organizzazioni tramite jES: il 118*. Tesi di laurea in linea a web. [econ.unito.it/terna/tesi/desotgiu](http://econ.unito.it/terna/tesi/desotgiu).
- DI LEVA, A. e GIOLITO, P. [1989]. *I sistemi informativi aziendali – Analisi e progetto*. Utet Libreria, Torino.
- DUBOIS, D. e PRADE, H. [1988]. *Possibility Theory*. Plenum Press, New York.
- DUFFY, J. [2001]. *Learning to Speculate: Experiments with Artificial and Real Agents*. In *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 25, pp. 295-319.
- EDMONDS, B. e MOSS, S. [2001]. *The Importance of Representing Cognitive Processes in Multi-Agent Models*. In G. Dorffner, H. Bishof e K. Horik, cur., *Artificial Neural Networks- ICANN' 2001*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 759-766.
- EMERSON, E.A., SADLER, T. e SRINIVASAN, J. [1998]. *Efficient Temporal Reasoning*. In *POPL*, pp. 166-178.
- EPSTEIN, J.M. [2000]. *Modelli computazionali fondati su agenti e scienza sociale generativa*. In *Sistemi Intelligenti*, vol. XII(2), pp. 177-221.
- EPSTEIN, J.M. e AXTELL, R. [1996]. *Growing Artificial Societies*. MIT Press, Cambridge, MA.
- ETZIONI, O. [1993]. *Intelligence without Robots: A Reply to Brooks*. In *AI Magazine*, vol. 14(4), pp. 7-13.
- FARMER, J.D., PATELLI, P. e ZOVKO, I.I. [2003]. *The Predictive Power of Zero Intelligence in Financial Markets*. Santa Fe working paper in linea a [www.santafe.edu/sfi/publications/Working-Papers/03-09-051.pdf](http://www.santafe.edu/sfi/publications/Working-Papers/03-09-051.pdf).
- [2005]. *The Predictive Power of Zero Intelligence in Financial Markets*. In *PNAS*, vol. 102(6), pp. 2254-2259.
- FERRARIS, G. [1999]. *GM e CW*. In linea a [www.swarm.org](http://www.swarm.org).
- [2001]. *GAMES: Algoritmi Genetici per l'Economia*. Torino. Quaderni del Dipartimento di Scienze Economiche e Finanziarie.
- FEYERABEND, P. [1975]. *Against Method*. Verso, London.
- FIORETTI, G. [2001]. *A Mathematical Theory of Evidence for G.L.S. Shackle*. In *Mind & Society*, vol. 2, pp. 77-98.

- [2004]. *Evidence Theory: A Mathematical Framework for Unpredictable Hypotheses*. In *Metroeconomica*, vol. 55, pp. 345-366.
- FOKKE, D. e FOLKERTS-LANDAU, I. [1982]. *Intertemporal Planning, Exchange and Macroeconomics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- FONTANA, M. [2005]. *Computer Simulations, Mathematics, and Economics*. In *International Review of Economics and Business*. Di prossima pubblicazione.
- FORNI, M. e LIPPI, M. [1997]. *Aggregation and the Microfoundations of Dynamic Macroeconomics*. Oxford University Press, New York, London.
- FORRESTER, J.W. [1961]. *Industrial Dynamics*. Productivity Press, Cambridge.
- FRANKLIN, S. [1995]. *Artificial Minds*. MIT Press, Cambridge, MA.
- FRANKLIN, S. e GRAESSER, A. [1996]. *Is it an agent, or just a program? A taxonomy for autonomous agents*. In *Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 21-35.
- GAFFEO, E., GALLEGATI, M., GIULIONI, G. e PALESTRINI, A. [2003a]. *Power Laws and Macroeconomic Fluctuations*. In *Physica A*, vol. 324, pp. 408-416.
- GAFFEO, E., GALLEGATI, M. e PALESTRINI, A. [2003b]. *On the Size Distribution of Firms: Additional Evidence from the G7 Countries*. In *Physica A*.
- GALLEGATI, M., ARDENI, P.G., BOITANI, A. e DELLI GATTI, D. [1999a]. *The New Keynesian Economics: A Survey*. In M. Messori, cur., *Financial Constraints and Market Failures*. Elgar, Cheltenham.
- GALLEGATI, M., DELLI GATTI, D. e MIGNACCA, D. [1999b]. *Agents Heterogeneity and Coordination Failure: An Experiment*. In M. Gallegati e A.P. Kirman, cur., *Beyond the Representative Agent*. Elgar, Cheltenham, pp. 165-182.
- GALLEGATI, M., GIULIONI, G. e KICHIJI, N. [2003]. *Complex Dynamics and Financial Fragility in an Agent-Based Mode*. In *Advances in Complex Systems*, vol. 6(3), pp. 267-282.
- GALLEGATI, M. e KIRMAN, A.P., cur. [1999]. *Beyond the Representative Agent*. Elgar, Cheltenham.
- GIANOGLIO, A. [2001]. *Cooperazione e altruismo con l'economia sperimentale, utilizzando Swarm ed il programma SWIEE*. Tesi di laurea in linea a web.econ.unito.it/terna/tesi/gianoglio.zip.
- GIBBONS, R. [2000]. *Why Organizations Are Such a Mess (and What an Economist Might Do About It)*. Il primo capitolo è in linea a web.mit.edu/rjgibbons/www.
- GILBERT, D., APARICIO, M., ATKINSON, B., BRADY, S., CICCARINO, J., GROSOFF, B., O'CONNOR, P., OSISEK, D., PRITKO, S., SPAGNA, R. e WILSON, L. [1995]. *Ibm intelligent agent strategy*. White Paper.
- GILBERT, N. [1996]. *Holism, Individualism and Emergent Properties. An Approach from the Perspective of Simulation*. In R. Hegslemann, U. Muel-ler e K.G. Troitzsch, cur., *Modelling and Simulation in the Social Sciences*

- from the Philosophy of Sciences Point of View*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and London, pp. 1-27.
- GILBERT, N. e BANKES, S. [2002]. *Platforms and Methods for Agent-based Modeling*. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. National Academy of Sciences of the USA, Washington, DC, USA, pp. 7197-7198. Vol. 99, suppl. 3.
- GILBERT, N. e TERNA, P. [2000]. *How To Build and Use Agent-Based Models in Social Science*. In *Mind & Society*, vol. I(1), pp. 57-72.
- GILBERT, N. e TROITZSCH, K.G. [1999]. *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press, Buckingham.
- [2005]. *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press, Buckingham. Seconda edizione, profondamente rivista.
- GILLETT, P.R. [2002]. *Conflict, Consistency and Consonance in Belief Functions: Coherence and Integrity of Belief Systems*. In R.P. Srivastava e T.J. Mock, cur., *Belief Functions in Business Decisions*. Physica-Verlag, Heidelberg.
- GINSBERG, M.L. [1989]. *Universal Planning: An (Almost) Universally Bad Idea..* In *AI Magazine*, vol. 10(4), pp. 40-44.
- GODE, D.K. e SUNDER, S. [1993]. *Allocative Efficiency of Markets with Zero-intelligence Traders: Markets as a Partial Substitute for Individual Rationality*. In *Journal of Political Economy*, vol. 101, pp. 119-137.
- GOLDBERG, D. [1989]. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley, Redwood City, CA.
- GOSLING, J., JOY, B., STEELE, G. e BRACHA, G. [2000]. *The Java Language Specification, Second Edition*. Addison Wesley, Redwood City, CA. Prima edizione: 1996.
- GOTTS, N.M., POLHILL, J.G. e LAW, A.N.R. [2003]. *Agent-Based Simulation in the Study of Social Dilemmas*. In *Artificial Intelligence Review*, vol. 19, pp. 3-92.
- GOURIEROUX, C. e MONFORT, A. [1997]. *Simulation-Based Econometric Methods*. Oup/Core Lecture Series. Oxford University Press, New York, Oxford.
- GREEN, R. [1996]. *Increasing competition in the British electricity spot market*. In *Journal of Industrial Economics*, vol. 44(2), pp. 201-216.
- GREENWALD, B.C. e STIGLITZ, J.E. [1993]. *Financial Market imperfections and Business Cycle*. In *Quarterly Journal of Economics*, vol. 108(1), pp. 77-114.
- GREFENSTETTE, J.J. [1991]. *Strategy acquisition with genetic algorithms*. In L.D. Davis, cur., *Handbook of Genetic Algorithms*. Von Nostrand Reinhold, Boston, pp. 186-201.
- GUERRA, F. [2004]. *Simulazioni ad agenti: jES ed il 118 virtuale*. Tesi di laurea in linea a [web.econ.unito.it/terna/tesi/guerra](http://web.econ.unito.it/terna/tesi/guerra).
- HAHN, F. [1991]. *The next Hundred Years*. In *Economic Journal*, vol. 101, pp. 47-50.
- HALL, R.E. [2005]. *Employment Fluctuations with Equilibrium Wage Stickiness*. In *American Economic Review*, vol. 95(1), pp. 50-65.

- HANSEN, L.P. e HECKMAN, J.J. [1996]. *The Empirical Foundations of Calibration*. In *Journal of Economic Perspectives*, vol. 10(1), pp. 87-104.
- HARRIS, M. e RAVIV, A. [2000]. *Organization Design*. CRSP Working Paper No. 499.
- HARRISON, G.W. e LIST, J.A. [2004]. *Field Experiments*. In *Journal of Economic Literature*, vol. 42(4), pp. 1009-1055.
- HAYEK, F. [1952]. *The Sensory Order*. University of Chicago Press, Chicago.
- [1967]. *Studies in philosophy, politics and economics*. University of Chicago Press, Chicago.
- HAYEK, F.A. [1937]. *Individualism and Economic Order*. Routledge e Kegan Paul, London e Henley. Cap. Economics and Knowledge. Ripreso in F.A. von Hayek, *Conoscenza, Mercato e Pianificazione*, il Mulino, Bologna, 1988, pp. 227-252.
- HEDSTRÖM, P. e SWEDBERG, R. [1998]. *Social Mechanisms. An Analytical Approach to Social Theory*. Cambridge University Press, Cambridge.
- HEMPEL, K.G. e OPPENHEIM, P. [1948]. *Studies in the Logic of Explanation*. In *Philosophy of science*, vol. 15, pp. 135-175.
- HENDRY, D.F. e KROLZIG, H.M. [2001]. *Automatic Econometric Model Selection*. Timberlake Consultants Press, London.
- [in pubblicazione]. *We Ran One Regression*. In *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*.
- HOLLAND, J. [1975]. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- [1998]. *Emergence from Chaos to Order*. Perseus Books, Cambridge, MA.
- HOLLAND, J.H. e GOLDBERG, D.E. [1988]. *Genetic algorithms and machine learning*. In *Machine Learning*, vol. 3, pp. 95-104.
- HOLMSTRÖM, B. [1999]. *The firm as a subeconomy*. In *The Journal of Law, Economics and Organization*, vol. 15(1), pp. 74-102.
- HOLZNER, S. e NORTON, P. [1992]. *Programmazione in C++*. Jackson, Milano.
- HORGAN, J. [1995]. *From Complexity to Perplexity*. In *Scientific American*, vol. 272(6), p. 104.
- HORSTMANN, C. e CORNELL, G. [2001]. *Java 2 (volume 1 e 2)*. Sun Microsystems Press.
- HÖLLDOBLER, B. e WILSON, E. [1997]. *Formiche - Storia di una esplorazione scientifica..* Adelphi, Milano. Ed. originale 1994, *Journey to the Ants - A Story of Scientific Exploration*.
- IZUMI, K. e UEDA, K. [2001]. *Phase Transition in a Foreign Exchange Market: Analysis Based on an Artificial Market Approach*. In *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 5, pp. 456-470.
- JARES, T.E. [2000]. *Numerical Modeling, Noise Traders, and the Swarm Simulation System*. In F. Luna e B. Stefansson, cur., *Economic Simulations in Swarm: Agent-Based Modelling and Object Oriented Programming*. Kluwer Academic, Dordrecht and London, pp. 181-202.

- JENNINGS, N.R. [1996]. *Special Issue on Tackling Complex Applications Using Multi-Agent Systems..* In *Int. J. Cooperative Inf. Syst.*, vol. 5(2-3), pp. 101-104.
- JOHNSON, P.E. [2002]. *Agent-Based Modeling: What I Learned From the Artificial Stock Market.* In *Social Science Computer Review*, vol. 20(2), pp. 174-186.
- KALAITZIDAKIS, P., STENGOS, T. e MAMUNEAS, T.P. [2003]. *Rankings of Academic Journals and Institutions in Economics.* In *Journal of the European Economic Association*, vol. 1(6), pp. 1346-1366.
- KAY, A.C. [1996]. *History of Programming Languages - II.* ACM Press, New York.
- KILPATRICK, H.J. [2001]. *Complexity, Spontaneous Order and Friedrich Hayek: Are Spontaneous Order and Complexity Essentially the Same Thing?.* In *Complexity*, vol. 6(4).
- KIRMAN, A. e VRIEND, N.J. [2001]. *Evolving Market Structure: An ACE Model of Price Dispersion and Loyalty.* In *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 25, pp. 459-202.
- KIRMAN, A.P. [1992]. *Whom or What Does the Representative Individual Represent.* In *Journal of Economic Perspectives*, vol. 6(2), pp. 117-136.
- KIRZNER, I. [1997]. *Entrepreneurial discovery and the competitive market process: an Austrian approach.* In *Journal of Economic Literature*, vol. 35(1), pp. 60-85.
- KLEIJNEN, J.P.C. [1998]. *Experimental design for sensitivity analysis, optimization, and validation of simulation models.* In J. Banks, cur., *Handbook of Simulation*, cap. 6. Wiley & Sons, New York, pp. 173-223.
- KLEVORICK, A.K., cur. [1983]. *Cowles Fiftieth Anniversary.* Cowles Foundation, New Haven, Connecticut.
- KOLLMAN, K., MILLER, J.H. e PAGE, S.E. [1997]. *Political Institutions and Sorting in a Tiebout Model.* In *American Economic Review*, vol. 87, pp. 977-992.
- KRUGMAN, P. [1994]. *Complex Landscapes in Economic Geography.* In *American Economic Review*, vol. 84(P&P), pp. 412-416.
- LAMIERI, M. [2002]. *Simulazione Agent Based in contesti d'impresa - Applicazione del modello Virtual Enterprise in JavaSwarm ad un'azienda reale.* Tesi di laurea in linea a [web.econ.unito.it/terna/tesi/lamieri.zip](http://web.econ.unito.it/terna/tesi/lamieri.zip).
- LANE, D.A. [1998]. *Is what is good for each good for all?.* In B. Arthur, S. Durlauf e D. Lane, cur., *Economy as a Complex, Evolving System II.* Addison-Wesley, Redwood City, CA.
- [2002]. *Complessità: modelli e inferenza.* In P.M. Biava, cur., *Complessità e biologia.* Bruno Mondadori Editore, Milano, pp. 13-42.
- LANGTON, C. [1989]. *Artificial Life.* Addison-Wesley, Redwood City, CA.
- LATTANZI, E. [2004]. *La simulazione.* In linea a [www.sti.uniurb.it/lattanzi/SCMOT/dispense/Simulazione.pdf](http://www.sti.uniurb.it/lattanzi/SCMOT/dispense/Simulazione.pdf).
- LEBARON, B. [2001]. *Empirical Regularities from Interacting Long and Short Memory Investors in an Agent-Based Stock Market.* In *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 5, pp. 442-455.

- LEGRENZI, P. [2002]. *Prima lezione di scienze cognitive*. Laterza, Roma-Bari.
- LEIJONHUFVUD, A. [1968]. *On Keynesian Economics and the Economics of Keynes: A Study in Monetary Theory*. Oxford University Press, New York, Oxford.
- LEMPERT, R.J. [2002]. *A new decision sciences for complex systems*. In PNAS, vol. 99, pp. 7309-7313. Colloquium Paper Platforms and Methodologies for Enhancing the Social Sciences through Agent-Based Simulation.
- LEOMBRUNI, R., RICHIARDI, M., SAAM, N. e SONNESSA, M. [2005]. *A Common Protocol for Agent-Based Social Simulation*. Mimeo.
- LEVY, R. e ROSENSCHEIN, J.S. [1992]. *A game theoretic approach to distributed artificial intelligence and the pursuit problem*. In *Decentralized Artificial Intelligence III*. Elsevier, Amsterdam, pp. 129-146.
- LIEBOWITZ, J. [1999]. *Building Organizational Intelligence: A Knowledge Management Primer*. CRC Press, Cleveland.
- LIN, F.R., TAN, G. e SHAW, M.J. [1996]. *Multi-Agent Enterprise Modelling*. University of Illinois at Urbana-Champaign Office of Research Working Paper #96-0134.
- LIU, T.C. [1960]. *Underidentification, Structural Estimation, and Forecasting*. In *Econometrica*, vol. 28, pp. 855-865.
- LOMI, A. e LARSEN, E.R. [2001]. *Dynamics of Organizations - Computational Modeling and Organization Theories*. AAAI Press, MIT Press, Menlo Park, CA, Cambridge, MA.
- LUX, T. [1998]. *The Socio-Economic Dynamics of Speculative Markets: Interactive Agents, Chaos, and the Fat Tails of the Return Distributions*. In *Journal of Economic Behavior and Organization*, vol. 33, pp. 143-165.
- LUX, T. e MARCHESI, M. [2000]. *Volatility Clustering in financial Markets: A Micro-Simulation of Interacting Agents*. In *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, vol. 3, pp. 675-702.
- MACAL, C.M., BOYD, G.A., CIRILLO, R.R., CONZELMANN, G., NORTH, M.J., THIMMAPURAM, P.R. e VESELKA, T.D. [2004]. *Modeling the restructured Illinois Electricity market as a complex adaptive system*. Paper presentato alla 24sima conferenza «Energy, Environment and Economics in a New Era», Washington D.C. 8-10 Luglio.
- MACY, M.W. e WILLER, R. [2002]. *From Factors to Actors: Computational Sociology and Agent-Based Modeling*. In *Annual Review of Sociology*, vol. 28, pp. 143-166.
- MAES, P. [1991]. *The Agent Network Architecture (ANA)*. In *SIGART Bulletin*, vol. 2(4), pp. 115-120.
- [1997]. *Agents that Reduce Work and Information Overload*. In J.M. Bradshaw, cur., *Software Agents*. AAAI Press, Menlo Park, CA.
- MARCH, J.G. [1998]. *Prendere decisioni*. il Mulino, Bologna.
- MARGARITA, S. [1992]. *Verso un «robot oeconomicus»: algoritmi genetici ed economia*. In *Sistemi Intelligenti*, vol. 3, pp. 421-429.
- MARKS, R.E. [1998]. *Evolved Perception and Behaviour in Oligopolies*. In *Economic Dynamics and Control*, vol. 22, pp. 1209-1233.

- MARNEY, J.P. e TARBERT, H.F.E. [2000]. *Why do simulation? toward a working epistemology for practitioners of the dark arts*. In *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 3(4). [jasss.soc.surrey.ac.uk/3/4/4.html](http://jasss.soc.surrey.ac.uk/3/4/4.html).
- MATARIC, M. [1995]. *Issues and approaches in the design of collective autonomous agents*. In *Robotics and Autonomous Systems* 16, pp. 321-331.
- MCCLOSKEY, D.N. [1998]. *L'economia come scienza storica*. In W. Parker, cur., *Economia e storia*. Laterza, Bari, pp. 79-87.
- MENCARELLI, B. [2004]. *Interazione tra agenti in un mercato borsistico virtuale: analisi del book di negoziazione*. Tesi di laurea in linea a web.econ.unito.it/terna/tesi/mencarelli.
- MERLO, F. [2003]. *L'impresa rifatta nel computer. Applicazione del modello jES al caso BasicNet*. Tesi di laurea in linea a web.econ.unito.it/terna/tesi/merlo\_f.zip.
- MERLONE, U. e TERNA, P. [2005]. *Population Symbiotic Evolution in a Model of Industrial Districts*. In pubblicazione.
- MILGRAM, S. [1967]. *The small world problem*. In *Psychology Today*, vol. 1, pp. 60-67.
- MINAR, N., BURKHART, R., LANGTON, C. e ASKENAZI, M. [1996]. *The Swarm Simulation System: A Toolkit for Building Multi-agent Simulations*. Santa Fe Working Paper. In linea a [www.santafe.edu/research/publications/wplist/1996](http://www.santafe.edu/research/publications/wplist/1996), lavoro 96-06-042.
- MINSKY, M. [1986]. *The Society of Mind*. Simon and Schuster, Riverside, NJ.
- MIROWSKY, P. e SOMEFUN, K. [1998]. *Markets as evolving computational entities*. In *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 8(4), pp. 329-356.
- MORINI, M. [2003]. *Penelope Project: Web-Based Textile Production Planning*. presentato alla SwarmFest 2003, University of Notre Dame, IN. [www.nd.edu/swarm03](http://www.nd.edu/swarm03).
- [2004a]. *Penelope Meets NEMOTE: Distributed Production Planning Optimization*. presentato alla SwarmFest 2004, University of Michigan, Ann Arbor, MI. [cscs.umich.edu/swarmfest04](http://cscs.umich.edu/swarmfest04).
- [2004b]. *Simulation in the Textile Industry: Production Planning Optimization*. In M. Baldoni, F. De Paoli, A. Martelli e A. Omicini, cur., *WOA 2004: dagli Oggetti agli Agenti. Sistemi Complessi ed Agenti Razionali*. Pitagora Editrice, Bologna, pp. 143-150.
- MOULIN, B. e CHAIB-DRAA, B. [1996]. *An Overview of Distributed Artificial Intelligence*. In G.M.P. O'Hare e N.R. Jennings, cur., *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. Wiley & Sons, pp. 3-55.
- MUELLBAUER, J. e PORTES, R. [1978]. *Macroeconomic Models with Quantity Rationing*. In *Economic Journal*, vol. 88(352), pp. 778-821.
- NELSON, R. e WINTER, S. [2002]. *Evolutionary Theorizing in Economics*. In *Journal of Economic Perspectives*, vol. 16(2), pp. 23-46.
- NEWBERY, D.M. [2000]. *Privatization, restructuring and regulation of network utilities*. MIT Press, Cambridge, MA.
- NG, Y.K. [1980]. *Macroeconomics with Non-Perfect Competition Economic*. In *Economic Journal*, vol. 90(359), pp. 598-610.

- NISHIMURA, K. [1998]. *Expectation Heterogeneity and Price Sensitivity*. In *European Economic Review*, vol. 42(3-5), pp. 619-629.
- NORMAN, D.A. [1994]. *How might people interact with agents*. In *Communications of the ACM*, vol. 7(37).
- NWANA, H.S. [1996]. *Software Agents: an Overview*. In *Knowledge Engineering Review*, vol. 11(3), pp. 1-40.
- OSTG [2001]. *SourceForge*. sourceforge.net.
- OSTROM, T. [1988]. *Computer simulation: the third symbol system*. In *Journal of Experimental Social Psychology*, vol. 24(5), pp. 381-392.
- PARISI, D. [2001]. *Simulazioni. La realtà rifatta nel computer*. Il Mulino, Bologna.
- PAVESIO, F. [2002]. *Cooperazione e altruismo: interazione tra esseri umani e agenti artificiali tramite Swarm e Swiee*. Tesi di laurea in linea a web. econ.unito.it/terna/tesi/pavesio.zip.
- PENROSE, R. [1989]. *The emperor's new mind*. Oxford University Press, New York, Oxford. Cap. Algorithms and Turing Machines.
- PERRONE, A. e FERRARIS, G. [2004]. *Intelligent Versus Random Beavers - an Agent-Based Approach in Facing the Busy Beaver Problem*. In *Metroeconomica*, vol. 55(2-3), pp. 332-344.
- POPE, A. [1711]. *An Essay on Criticism*. Lewis, London.
- PROVASI, G. [1998]. *Oltre il modello di razionalità limitata. Il contributo del cognitivismo*. In *Rassegna italiana di sociologia*, vol. XXXVI(2), pp. 251-278.
- PRYOR, F.L. [2000]. *Looking Backwards: Complexity Theory in 2028*. In D. Colander, cur., *The complexity vision and the teaching of economics*. Edward Elgar, Cheltenham, pp. 63-69.
- RADO, T. [1962]. *On non-computable functions*. In *Bell System Technical Journal*, vol. 41(3), pp. 877-884.
- RAO, A.S. e GEORGEFF, M.P. [1991]. *Modeling rational agents within a BDI-architecture*. In *Proceedings of the Second International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*. Morgan Kaufmann, San Francisco, pp. 473-484.
- [1995]. *BDI agents: From theory to practice*. In *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95)*. AAAI Press, Menlo Park, CA, pp. 312-319.
- REMONDINO, M. [2003]. *Agent Based Process Simulation and Metaphors Based Approach for Enterprise and Social Modeling*. In *ABS 4 Proceedings*. SCS European Publishing House, Dresden, pp. 93-97.
- RESNICK, M. [1997]. *Turtles, Termites, and Traffic Jams. Explorations in Massively Parallel Microworlds*. MIT Press, Cambridge, MA.
- RICH, E. e KNIGHT, K. [1992]. *Intelligenza artificiale*. McGraw-Hill Italia, Milano.
- RICHARDSON, K. [2003]. *On the Limits of Bottom-Up Computer Simulation: Towards a Nonlinear Modeling Culture*. presentato alla 36ma «Hawaiian International Conference on System Sciences», Waikoloa, Big Island of Hawaii.

- RUBY, A. [2005]. *An Introduction to Macroeconomics and Macroeconomic Analysis*. [www.digitaleconomist.com/intro\\_4020.html](http://www.digitaleconomist.com/intro_4020.html).
- RUSSEL, S.J. e NORVIG, P. [1995]. *Intelligenza artificiale: un approccio moderno*. Prentice-Hall, Englewood Clis, NJ.
- RUST, J. [1997]. *Using Randomization to Break the Curse of Dimensionality*. In *Econometrica*, vol. 65(3), pp. 487-516.
- RUSTEM, B. e VELUPILLAI, K. [1990]. *Rationality, Computability and Complexity*. In *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 14(2), pp. 419-432. Special Issue on Computer Science and Economics.
- SAHOTA, M.K. [1994]. *Reactive deliberation: An architecture for real-time intelligent control in dynamic environments*. In *Proceedings of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence*. pp. 1303-1308.
- SALMON, W.C. [1990]. *Four Decades of Scientific Explanation*. University of Minnesota Press, Minneapolis.
- SALZANO, M. [1993]. *Le variabili fiscali nei modelli Neo-Keynesiani*. Liguori Editore, Napoli. Ed. 1993 e 2001.
- SAMUELSON, L. [2005]. *Economic Theory and Experimental Economics*. In *Journal of Economic Literature*, vol. 43(1), pp. 65-107.
- SANJAY, J., OSHERSON, D., ROYER, J.S. e SHARMA, A. [1999]. *Systems That Learn*. MIT Press, Cambridge, MA.
- SARGENT, T. [1993]. *Bounded Rationality in Macroeconomics*. Clarendon Press, Oxford.
- SAWYER, R.K. [2003]. *Artificial Societies. Multi-Agent Systems and the Micro-Macro Link in Sociological Theory*. In *Sociological Methods and Research*, vol. 31(3), pp. 325-363.
- SHELLING, T. [1969]. *Models of Segregation*. In *American Economic Review*, vol. 59(2), pp. 488-493.
- [1973]. *Dynamic Models of Segregation*. In *Journal of Mathematical Sociology*, vol. 1, pp. 143-186.
- [1978]. *Micromotives and Macrobehavior*. Norton, New York.
- SCRIVEN, M. [1962]. *Explanations, Predictions, Laws*. In *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, vol. 3, pp. 170-230.
- SERENKO, A. e DETLOR, B. [2002]. *Agent Toolkits: A General Overview of the Market and an Assessment of Instructor Satisfaction with Utilizing Toolkits in the Classroom*. (Working Paper 455), McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada.
- SHAFER, G. [1976]. *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, Princeton.
- [1981]. *Constructive Probability*. In *Synthese*, vol. 48, pp. 1-60.
- [1990]. *Perspectives on the Theory and Practice of Belief Functions*. In *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 4, pp. 323-362.
- SHIMER, R. [2005]. *The Cyclical Behavior of Equilibrium Unemployment and Vacancies*. In *American Economic Review*, vol. 95(1), pp. 25-49.
- SHOHAM, Y. [1993]. *Agent-Oriented Programming*. In *Artificial Intelligence*, vol. 1(60), pp. 51-92.

- [1997]. *An Overview of Agent-oriented Programming*. In J.M. Bradshaw, cur., *Software Agents*. AAAI Press, Menlo Park, CA, pp. 271-290.
- SIMON, H.A. [1985]. *Causalità, razionalità, organizzazione*. il Mulino, Bologna.
- [1988]. *Le scienze dell'artificiale*. Il Mulino, Bologna. Ed. originale (1969, 1981, 1996), *The Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge, MA.
- SONNESSA, M. [2003]. *JAS Java Agent-based Simulation library*. In linea a [jaslibrary.sourceforge.net](http://jaslibrary.sourceforge.net).
- SPEAR, S. [1989]. *Learning Rational Expectations under Computability Constraints*. In *Econometrica*, vol. 57(4), pp. 889-910.
- SPECTOR, H.M. [2000]. *Building Linux Clusters*. O'Reilly, Sebastopol, CA.
- SQUAZZONI, F. e BOERO, R. [2005]. *Towards an Agent-Based Computational Sociology. Good Reasons to Strengthen a Cross-Fertilization between Sociology and Complexity*. In L.M. Stoneham, cur., *Advances in Sociology Research, Volume II*. Nova Science Publishers, New York, pp. 103-133.
- STAE LIN, C.P. [2000]. *jSIMPLEBUG: A Swarm Tutorial for Java*. [eco83.econ.unito.it/swarm/materiale/jtutorial](http://eco83.econ.unito.it/swarm/materiale/jtutorial).
- STANISLAW, H. [1986]. *Tests of computer simulation validity. What do they measure?*. In *Simulation and Games*, vol. 17, pp. 173-191.
- STEELS, L. [1995]. *The Artificial Life Roots of Artificial Intelligence*. In C.H. Langton, cur., *Artificial Life. An Overview*. MIT Press, Cambridge, MA, pp. 75-110.
- STERMAN, J. [2000]. *Business Dynamics. System Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill, New York.
- STEWART, I. [1994]. *La risposta definitiva*. In *Le Scienze*, vol. settembre. Il testo è disponibile in linea come trascrizione dell'edizione originale su *Scientific American*, July 1994, a [www.ims.res.in/~sitabhra/teaching/cmp03/ian\\_stewart.html](http://www.ims.res.in/~sitabhra/teaching/cmp03/ian_stewart.html).
- STRADER, T.J., LIN, F.R. e SHAW, M.J. [1998]. *Simulation of order fulfillment in divergent assembly supply chains*. In *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 1(2). [jasss.soc.surrey.ac.uk/1/2/5.html](http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/2/5.html).
- SUMPTER, D.J.T. e BROOMHEAD, D.S. [2000]. *Shape and Dynamics of Thermoregulating Honey Bee Clusters*. In *Journal of Theoretical Biology*, pp. 1-14.
- SUN, R. e NAVEH, I. [2004]. *Simulating Organizational Decision Making Using a Cognitively Realistic Agent Model*. In *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 7(3). [jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS/7/3/5.html](http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS/7/3/5.html).
- TERNA, P. [1998a]. *Creare mondi artificiali: una nota su Sugarscape e due commenti*. In *Sistemi Intelligenti*, vol. 3, pp. 489-496.
- [1998b]. *Simulation tools for social scientists: Building agent based models with swarm*. In *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 1(2). [jasss.soc.surrey.ac.uk/1/2/4.html](http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/2/4.html).

- [2000a]. *Economic Experiments with Swarm: a Neural Network Approach to the Self-Development of Consistency in Agents' Behavior*. In F. Luna e B. Stefansson, cur., *Economic Simulations in Swarm: Agent-Based Modelling and Object Oriented Programming*. Kluwer Academic, Dordrecht and London, pp. 73-103.
  - [2000b]. *Hayek e il connessionismo: modelli con agenti che apprendono*. In G. Clerico e S. Rizzello, cur., *Il pensiero di Friedrich von Hayek*, vol. 1. Utet, pp. 105-136.
  - [2000c]. *The 'Mind or No-Mind' Dilemma in Agents Behaving in a Market*. In G. Ballot e G. Weisbuch, cur., *Applications of Simulation to Social Sciences*. Hermes Science Publishing Ltd, Oxford, pp. 257-270.
  - [2000d]. *SUM: a Surprising (Un)realistic Market: Building a Simple Stock Market Structure with Swarm*. Presentato a CEF 2000, Barcelona, June 5-8, in linea a [web.econ.unito.it/terna/cef2000pterna/cefpterna.html](http://web.econ.unito.it/terna/cef2000pterna/cefpterna.html).
  - [2002a]. *Cognitive Agents Behaving in a Simple Stock Market Structure*. In F. Luna e A. Perrone, cur., *Agent-Based Methods in Economics and Finance: Simulations in Swarm*. Kluwer Academic, Dordrecht and London, pp. 188-227.
  - [2002b]. *Simulazione ad agenti in contesti di impresa*. In *Sistemi intelligenti*, vol. 14(1), pp. 33-51.
  - [2003]. *Creare mondi artificiali: una nota su Sugarscape e due commenti*. In *Sistemi Intelligenti*, vol. XVI(2), pp. 347-376.
- TERNA, P. e MARGARITA, S. [1988]. *Rassegna di strumenti informatici*. Giappichelli, Torino.
- TESFATSION, L. [2001a]. *Agent-Based Computational Economics: A Brief Guide to the Literature*. In J. Michie, cur., *Reader's Guide to the Social Sciences*, vol. 1. Fitzroy-Dearborn, London, UK.
- [2001b]. *Agent-Based Computational Economics: Growing Economies from the Bottom Up*. In *Artificial Life*, vol. 8(1), pp. 55-82.
  - [2001c]. *Special Issue on Agent-Based Computational Economics*. In *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 25(3-4).
  - [2001d]. *Special Issue on Agent-Based Computational Economics*. In *Computational Economics*, vol. 18(1).
- TOBIAS, R. e HOFMANN, C. [2003]. *Evaluation of Free Java-libraries for Social-scientific Agent Based Simulation*. In *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 7(1). University of Surrey.
- TODER, E., FAVREAU, M., O'HARE, J., ROGERS, D., SAMMARTINO, F., SMITH, K., SMETTERS, K. e RUST, J. [2000]. *Long Term Model Development for Social Security Policy Analysis - Final Report*. The Urban Institute, Washington, D. C. 20037.
- TROITZSCH, K. [1997]. *Social Science Simulation - Origins, Prospects, Purposes*. In R. Conte, R. Hegselmann e P. Terna, cur., *Simulating Social Phenomena, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 41-54.

- TULLOCK, G. e CAMPBELL, C.D. [1970]. *Computer Simulation of a Small Voting System*. In *Economic Journal*, vol. 80(317), pp. 97-104.
- VELUPILLAI, K. [2000]. *Computable Economics: The Arne Ryde Memorial Lectures (Arne Ryde Memorial Lectures)*. Oxford University Press, New York.
- VON BERTALANFFY, L. [1969]. *General System Theory, Foundations, Development, Applications*. George Braziller, New York.
- WAN, H.A., HUNTER, A. e DUNNE, P. [2002]. *Autonomous Agent Models of Stock Markets*. In *Artificial Intelligence Review*, vol. 17, pp. 87-128.
- WATTS, D.J. e STROGATZ, S.H. [1998]. *Collective dynamics of small-world networks*. In *Nature*, vol. 393, pp. 440-442.
- WEISBUCH, G., KIRMAN, A.P. e HERREINER, D. [2000]. *Market Organisation and Trading Relationships*. In *Economic Journal*, vol. 110, pp. 411-436.
- WHITE, J. [1996]. *A Common Agent Platform*. General Magic, Inc., Sunnyvale, CA.
- WIEDERHOLD, G. [1989]. *The Architecture of Future Information Systems*. Technical Report, Computer Science Department, Stanford University.
- WILLIAMSON, D., COOKE, P., JENKINS, W. e MORETON, K.M. [2003]. *Strategic Management and Business Analysis*. Butterworth-Heinemann, Boston.
- WOOLDRIDGE, M. [1995]. *Conceptualising and Developing Agents*. In *Proceedings of the UNICOM Seminar on Agent Software*. pp. 25-26.
- WOOLDRIDGE, M. e JENNINGS, N. [1995]. *Intelligent agents: Theory and practice*. In *Knowledge Engineering Review*, vol. 10(2), pp. 115-152.