

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

Facoltà di Economia

TESI DI LAUREA

Candidato:
Monica Chinaglia

ANNO ACCADEMICO 2003-2004

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

Facoltà di Economia

Corso di laurea in Economia e Commercio

TESI DI LAUREA

Modelli di simulazione e mercati finanziari:
la formazione di bolle e *crash*

Relatore:
Prof. Pietro Terna

Correlatore:
Prof. Sergio Margarita

Candidato:
Monica Chinaglia

ANNO ACCADEMICO 2003-2004

Indice

	<i>Pag.</i>
<i>Introduzione</i>	1
Capitolo 1 Sistemi complessi e simulazioni	
1.1 Introduzione.....	5
1.2 I sistemi complessi.....	6
1.2.1 I mercati finanziari come sistemi complessi.....	12
1.3 Le simulazioni.....	13
Capitolo 2 Modelli ad agenti e reti neurali artificiali	
2.1. Introduzione.....	17
2.2. Gli agenti artificiali.....	18
2.2.1. Agenti artificiali ed individualismo.....	20
2.3. Reti neurali artificiali RNA ed algoritmi genetici.....	20
2.3.1. Le reti neurali.....	21
2.3.2. Gli algoritmi genetici.....	23
2.4. Ambiti di applicazione.....	24
2.4.1. Razionalità limitata.....	25
2.4.2. Situazioni di mancanza di equilibrio.....	26
2.4.3. Apprendimento.....	28
2.4.4. Gap informativo.....	29
2.4.5. Decisioni di consumo ed investimento.....	30
2.4.6. Reti neurali, algoritmi genetici e mercati finanziari.....	31
Capitolo 3 La Borsa e un fenomeno particolare: le Bolle Speculative	
3.1 Introduzione.....	33
3.2 La Borsa.....	34
3.2.1 Il sistema telematico di contrattazione.....	34
3.2.2 Il <i>book</i>	35
3.2.3 Modalità e fasi di negoziazione.....	36
3.3 Le bolle speculative.....	39

3.3.1	Come si manifestano le bolle speculative.....	39
3.3.2	Cenni storici.....	40
3.3.3	Bolle speculative e teoria economica.....	43

Capitolo 4 L'uso di Modelli per lo studio dei mercati finanziari

4.1	Introduzione.....	47
4.2	L'analisi dei mercati finanziari.....	48
4.3	Simulazione: tecniche ed obiettivi.....	49
4.4	Il meccanismo di formazione dei prezzi: funzioni di domanda ed offerta.....	50
4.4.1	La presenza di differenti tipologie di investitori ed il mercato dei titoli.....	50
4.4.2	Il <i>Santa Fe Artificial Stock Market</i> ASM.....	53
4.5	Il meccanismo di formazione dei prezzi: il <i>Book</i>	55
4.5.1	Prezzi di mercato definiti continuamente.....	56
4.5.1.1	Con investitori <i>zero-intelligence</i>	56
4.5.1.2	Con investitori "razionali".....	58
4.5.1.3	Con diversi tipi di investitori: <i>Noisy, Fundamentalist, Chartist</i>	61
4.6	Un confronto.....	62

Capitolo 5 SUM – Surprising (Un)realistic Market model

5.1	Introduzione.....	65
5.2	Il funzionamento del modello.....	66
5.3	La struttura del modello.....	67
5.3.1	Lo schema ERA.....	67
5.3.2	Lo schema di SUM.....	68
5.4	<i>Model</i> ed <i>Observer</i>	69
5.5	Il <i>Book</i>	72
5.6	Gli agenti.....	74

Capitolo 6 Un'applicazione: la composizione del *Book* e bolle speculative

6.1	Introduzione.....	81
6.2	Le modifiche apportate al codice.....	82
6.2.1	La quantità di ordini al termine della fase di apertura.....	82

6.2.2	Differenza tra le quantità di ordini di acquisto e di vendita in ogni istante.....	83
6.2.3	Differenza tra i prezzi migliore e peggiore delle liste di ordini in ogni istante.....	85
6.2.4	Calcolo, istante per istante dello <i>spread</i>	86
6.3	Esperimenti.....	89
6.3.1	Analisi delle serie di prezzi prodotte modificando tipo di agenti e parametri.....	89
6.3.2	Analisi tic per tic della struttura del <i>Book</i>	102
6.4	Gli ordini senza limite di prezzo.....	110
6.5	I <i>Crash</i>	114
6.6	Prevedibilità delle bolle speculative.....	119
6.7	Modello e realtà.....	121
	<i>Conclusioni</i>	124
	<i>Appendice A Programmazione ad oggetti e Swarm</i>	126
	<i>Appendice B Ricerca su EconLit</i>	131
	<i>Bibliografia</i>	135

Introduzione

L'obiettivo del mio lavoro è di individuare nella dottrina recente l'evoluzione e l'applicazione di modelli di simulazione per la rappresentazione dei mercati finanziari e collocare il modello di simulazione di un mercato di Borsa, SUM (*Surprising Un(realistic) Market model*), all'interno di questa corrente di studi. L'analisi di vari modelli è sviluppata per trovare punti in comune e differenze tra strutture che perseguono gli stessi obiettivi e sviluppare un'applicazione, apportando le opportune modifiche al modello SUM, per analizzare il caso particolare dello sviluppo delle bolle speculative dal punto di vista della microstruttura del mercato, ossia come cambia il *book* di negoziazione nei periodi antecedente ed immediatamente successivo allo sviluppo di una bolla.

L'analisi di modelli di simulazione però necessita di un'introduzione sui concetti teorici ai quali si fa riferimento: il concetto di complessità, il metodo dei modelli fondati su agenti, in cosa consiste una simulazione e quali tecniche possono essere impiegate affinché il modello raggiunga gli obiettivi prefissati. Concetti e metodi sono però applicati ad un particolare sistema economico, il mercato finanziario caratterizzato da regole che ne definiscono il funzionamento, ma soprattutto da individui che vi operano e ne definiscono l'andamento.

Il mercato finanziario ed il sistema economico in generale si sviluppano grazie all'interrelazione delle sue componenti che ne conferiscono una certa dinamicità. Proprio questa caratteristica è alla base di una recente corrente di studi, che prende il nome di teoria della complessità, che cerca di analizzare sistemi come quello economico o quello sociale, in cui le caratteristiche a livello aggregato emergono dalla rete di relazioni che si sviluppano al suo interno. Per stabilire se un sistema è complesso occorre che questo possieda alcune proprietà fondamentali, prima fra tutte l'emergenza delle sue caratteristiche dall'azione ed interazione delle sue parti costituenti. Queste sono organizzate, all'interno del sistema, in reti di relazioni a corto raggio che realizzano a processi comportamentali non lineari. Gli agenti del sistema sono eterogenei e dotati della capacità di adattamento alle caratteristiche (in evoluzione) dell'ambiente e sono in grado di apprendere grazie a processi di azione per tentativi ed errori.

Simulazioni e modelli ad agenti rappresentano metodologie di analisi molto utili per studiare sistemi le cui caratteristiche corrispondono alla definizione di complessità. Attraverso la simulazione, infatti, si è in grado di riprodurre artificialmente un mondo reale e studiare l'effetto di diverse variabili sui risultati a livello aggregato. L'introduzione di agenti nel modello permette di inserire comportamenti eterogenei ed evolutivi all'interno dell'ambiente artificiale creato. In questo modo possono essere studiate caratteristiche considerate eccezionali o anomale nei sistemi reali, come situazioni di mancanza di equilibrio o di comportamenti degli individui non perfettamente razionali. Il mio lavoro si sviluppa quindi nell'analisi di alcuni modelli che utilizzano queste metodologie per studiare sistemi economici in generale, per poi focalizzare l'attenzione sulla loro applicazione ai mercati finanziari. In quest'ultimo settore di studi, la produzione, piuttosto vasta, si sviluppa tra modelli analitici di interpretazione dei prezzi, a modelli di simulazione. All'interno di questi vi sono modelli che introducono agenti omogenei o agenti *random* (le cui decisioni sul mercato sono casuali e quindi senza alcun processo di ricordo o apprendimento) o che introducono diverse popolazioni di investitori con differenti caratteristiche comportamentali. Il primo tipo di esperimenti è utilizzato principalmente per studiare la validità delle ipotesi formulate per quanto riguarda la struttura del mercato e l'attinenza dei dati prodotti a quelli osservabili nella realtà. Gli esperimenti con agenti eterogenei sono mirati alla comprensione delle dinamiche comportamentali che conducono a certi risultati a livello di sistema. Nel dettaglio, in un mercato finanziario si possono distinguere due tipologie di modelli in base alla struttura del mercato ipotizzata: da una parte i modelli in cui i prezzi raggiungono un equilibrio caratterizzato dall'incontro delle funzioni di domanda ed offerta, dall'altra modelli che ipotizzano la continua evoluzione e dinamicità del mercato, e quindi i prezzi sono definiti, di volta in volta, dalle azioni degli agenti che vi operano.

Il modello di simulazione SUM è stato creato riproducendo fedelmente il funzionamento del *book* di negoziazione della Borsa Italiana e inserendo la possibilità di far operare su questo mercato diverse tipologie di agenti. Il mio lavoro di ricerca consiste nella modifica di alcune parti di codice informatico del modello per offrire la possibilità di studiare la dinamica delle contrattazioni attraverso il *book* di negoziazione. In questo modo l'esecuzione di più esperimenti ha prodotto serie di dati da analizzare con l'obiettivo particolare di individuare una relazione tra alcune variabili e l'insorgenza di bolle e *crash* sul mercato finanziario simulato. L'andamento dei prezzi è quindi confrontato con la dinamica delle quantità di ordini registrati all'interno del *book* di negoziazione e con la differenza, istante per istante, tra la quantità di ordini di acquisto e di vendita. Allo stesso modo sono studiati i prezzi osservati sul mercato simulato e la differenza tra i migliori prezzi registrati nelle liste di acquisto e di vendita. Un'ultima variabile considerata è la differenza tra migliore e peggiore prezzo di ogni lista che fornisce una misura della densità degli ordini in attesa di una controparte. Per aumentare la veridicità del modello, nella riproduzione dei comportamenti di agenti reali sui mercati finanziari, ho introdotto, sempre con modifiche al codice informatico, la possibilità per gli agenti di introdurre

ordini senza limite di prezzo nella fase di contrattazione continua del mercato di Borsa simulato.

Il lavoro è quindi composto da una parte teorica iniziale su sistemi complessi e modelli agenti nei Capitoli 1 e 2, correlata da approfondimenti che ne evidenziano le possibilità applicative: la produzione di simulazioni nel Capitolo 1 e l'utilità dei modelli ad agenti per lo studio di sistemi economici nel Capitolo 2. Il Capitolo 3 è dedicato ad un'introduzione ai mercati finanziari e al fenomeno delle bolle speculative e nel Capitolo 4 ho svolto una ricerca sulla metodologia dei modelli applicata allo studio dei mercati finanziari. Il Capitolo 5 descrive nel dettaglio le caratteristiche strutturali del modello SUM necessarie per comprendere le modifiche apportate e gli esperimenti descritti all'interno del Capitolo 6.

Capitolo 1

Sistemi complessi e simulazioni

1.1 Introduzione

Il termine “Economia” può essere impiegato per identificare sia il sistema economico nel suo complesso, che la materia che si propone di studiarne le caratteristiche. Il sistema economico è principalmente un prodotto dell’uomo. Senza, infatti, l’azione di individui impegnati ad ottenere beni per soddisfare i propri bisogni, non esisterebbe alcun sistema economico. L’economia si fonda quindi sul trasferimento di risorse da parte di entità che agiscono ed interagiscono con questo fine. Inoltre i comportamenti degli agenti sono diversi tra loro ed inseriti in un ambiente (il sistema nel suo complesso) dotato di proprie caratteristiche ed una storia. Tuttavia il sistema è generato e si evolve grazie all’operatività di tutti gli agenti che allo stesso tempo sono condizionati, nelle loro decisioni, dalle particolari condizioni in cui questo si trova in un determinato istante. Tuttavia l’ambiente comprende una molteplicità di fattori (come istituzioni, mercati, informazione, regolamentazione) e relazioni reciproche, che suggeriscono uno studio del sistema economico utilizzando nuovi metodi. La teoria della complessità è un campo di ricerca di recente sviluppo che cerca di spiegare certi fenomeni che si manifestano nella realtà per i quali le teorie tradizionali non sono in grado di fornire spiegazioni complete: la mancanza di completezza è qui intesa nell’impossibilità di tradurre in una teoria (che prevede la definizione di ipotesi semplificatrici) tutte le caratteristiche osservabili nel mondo reale. Lo studio di un sistema complesso è in grado di superare tale restrizione in quanto orientato a comprendere come dagli elementi del sistema si producano i risultati osservabili a livello aggregato. Ciò che si ottiene non è una teoria traducibile con formule matematiche, né un’analisi sperimentale di ciò che avviene nella realtà, ma la spiegazione della dinamica che conduce a determinati fenomeni. Questo metodo può essere impiegato in tutte quelle discipline in cui la molteplicità di elementi, la non linearità delle relazioni tra questi, la necessità di sperimentare relazioni e confrontare i risultati con quelli osservati nel mondo reale, non permettono di ottenere una spiegazione esauriente delle caratteristiche del sistema.

Lo studio dell’economia è condotto principalmente in due grandi direzioni quella teorica e quella sperimentale. Caratteristica della teoria economica è quella di

cercare una spiegazione, il più formale possibile, dei risultati che sono osservabili a livello aggregato: questo è possibile solo isolando alcuni fattori, ipotizzarne le caratteristiche e trovare una relazione in grado di produrre il risultato desiderato. La tecnica di studio sperimentale sembra invece produrre risultati di natura differente: dal confronto tra dati sperimentali e dati reali si possono individuare e comprendere alcune caratteristiche del sistema, come il valore da attribuire a certi parametri o l'importanza di alcuni fattori rispetto ad altri o ancora riprodurre un processo reale. Tuttavia la particolarità del sistema economico, come sistema di comportamento umano, pone diversi limiti alla sperimentazione. Lo studioso, infatti, si può trovare nell'impossibilità di riprodurre in un esperimento situazioni con un elevato numero di partecipanti eterogenei o con tempi di sviluppo molto lunghi o ambienti caratterizzati da infiniti fattori ciascuno dei quali indispensabile e con una propria storia ed evoluzione. Per superare questi limiti si può vedere nella simulazione al computer una possibile soluzione in quanto offre la possibilità di creare ambienti e simularne storia ed evoluzione, introdurre diversi agenti ed avere a disposizione, a simulazione conclusa, un elevato numero di dati da confrontare con quelli reali.

In questo primo capitolo sono definiti i concetti di complessità e sistema complesso e spiegate le caratteristiche di un mercato finanziario che permettono di inquadralo in tale settore di studi. Segue una breve introduzione all'utilità delle simulazioni per tradurre tali concetti in strumenti utili alla rappresentazione di un certo tipo di fenomeni reali.

1.2 I sistemi complessi

In dottrina è piuttosto controverso il significato da attribuire al termine complessità. Come riportato in Rosser (1999) vi sono diverse definizioni spiegate da differenti autori: secondo una corrente di ricerca, un sistema dinamico è complesso se non tende ad un unico punto fisso, un ciclo limitato o un'esplosione; ma tale sistema deve anche prevedere una discontinuità nei comportamenti che possono essere rappresentati da equazioni differenziali non lineari, possibilmente con elementi stocastici. Una definizione "strutturale" attribuisce la complessità ad un sistema caratterizzato da complicate interrelazioni e strutture istituzionali. Nella versione computazionale, invece, un sistema è complesso nel momento in cui esistono notevoli difficoltà nel calcolo delle soluzioni di un problema di ottimizzazione o possiede caratteristiche anomale, come la razionalità limitata in un sistema economico. Altri studiosi individuano la complessità come una nuova prospettiva per studiare la natura umana e la sua capacità di relazione.

Il termine complessità non ha una definizione esplicita, ma si tratta di una proprietà del sistema che si intende rappresentare. Nel momento in cui, infatti, dall'osservazione di un sistema si individuano certe caratteristiche come ad esempio l'interrelazione degli elementi, la dinamica, la presenza di fenomeni anomali o la mancanza di un unico equilibrio, che rendono complicato un approccio secondo le teorie tradizionali, può essere utile interpretare tale sistema aggregato secondo la teoria dei sistemi complessi. Tale proprietà tuttavia non può essere definita a priori: non si può ipotizzare la natura del sistema che si intende rappresentare, ma è soltanto dallo studio della sua dinamica che si possono

individuare e studiare i risultati complessi a livello aggregato che emergono dall'interrelazione delle sue componenti.

Il concetto di complessità nasce dal campo di studi detto delle tre C (*Cybernetics, Catastrophe, Chaos*) che, sviluppatosi intorno agli anni Settanta, si occupava di individuare e studiare, all'interno dei sistemi, i fenomeni cosiddetti anomali. La teoria della cibernetica si occupava di sviluppare ambienti in cui, tramite sistemi di relazioni non lineari, si producevano risultati discontinui. Una Catastrofe è una particolare forma di discontinuità in un sistema dinamico che dipende e si sviluppa dal passaggio da un equilibrio del sistema ad un altro nel momento in cui cambia un determinato parametro. La teoria del caos si occupa invece di rilevare l'importanza di alcuni parametri iniziali nella nascita e nell'evoluzione di determinati fenomeni.

La complessità può quindi essere considerata come un metodo di studio differente, che non ha un'unica definizione, ma è possibile individuarne alcune caratteristiche (nella visione del Santa Fe Institute):

- Interazioni disperse: ciò che accade nel sistema è determinato dall'interazione tra agenti eterogenei che agiscono localmente in alcuni spazi gli uni con gli altri ed in parallelo; l'azione di ogni singolo agente dipende dalle azioni precedentemente intraprese da un limitato numero di altri agenti e dallo stato del sistema che questi creano collettivamente;
- Nessun controllo globale che possa suggerire opportunità o interazioni nell'economia: non esiste alcuna forma di controllo delle azioni che sono regolate solo dalle leggi della competizione e del coordinamento. Inoltre non esiste un agente che conosce tutte le possibilità che il mercato può offrire;
- Il sistema è caratterizzato da diversi livelli di organizzazione e relazione e ciascuno contribuisce alle caratteristiche a livello aggregato;
- Adattamento continuo ed apprendimento da parte di agenti che si evolvono;
- Evoluzione continua con nuovi mercati, tecnologie, comportamenti ed istituzioni che in tal modo creano nuovi ambienti in cui gli agenti possono interagire;
- Dinamica del sistema in situazioni in cui non esiste un unico equilibrio globale, ma nelle fasi di passaggio da un equilibrio all'altro o di instabilità senza nessuna forma di equilibrio.
- Agenti eterogenei: l'ipotesi dell'esistenza nel sistema di un unico agente perfettamente razionale (che massimizza l'utilità in funzione delle aspettative sull'andamento di variabili) è abbandonata. Un sistema complesso è popolato da un insieme di agenti eterogenei. Ogni agente è in grado di interpretare il sistema, in maniera indipendente e differente dagli altri individui, grazie ad un processo di apprendimento che si verifica tramite l'esperienza: da una serie di tentativi ed errori l'agente arriva a conoscere quali azioni siano più indicate per raggiungere i propri scopi.

La struttura di un sistema economico complesso non consiste nella presenza di un unico centro al quale affluiscono tutte le azioni, ma le azioni degli agenti si sviluppano su più livelli ciascuno dei quali deriva dall'interazione di più elementi.

Lo studio di un sistema complesso, inoltre, non consiste nell'individuazione di una situazione di equilibrio, ma su processi, emergenza e auto organizzazione. Uno dei punti principali è inoltre il tentativo di individuare il processo tramite il quale gli individui che agiscono nel sistema prendono le loro decisioni sulla base delle informazioni disponibili. Sono inserite, a tale scopo, diverse caratteristiche degli agenti come la capacità di sviluppare aspettative sulle azioni degli altri agenti e generare in questo modo comportamenti imitativi o di cooperazione. In questo modo anziché prevedere un tipo di informazione acquisita in modo automatico e stabilita esogeneamente, in un sistema complesso le conoscenze sono trasferite grazie ad un sistema di reti di comunicazione tra gli agenti. In un tale sistema si pone il problema di come introdurre un elemento fondamentale nella realtà: le istituzioni. Le istituzioni possono essere considerate in tre modi: le regole del sistema, le strutture in grado di modificare tali regole oppure i luoghi in cui gli agenti possono agire. In tutte le tre accezioni, comunque, le istituzioni sono un elemento in evoluzione e quindi suscettibili di cambiamenti in base alle caratteristiche del sistema e non possono essere introdotte come elemento assegnato esogeneamente ed indipendente dalla dinamica di questo.

Interazione, imprevedibilità, evoluzione e dinamica sono quindi le caratteristiche comuni di un sistema complesso, come sintetizzato da Hawking (2000), secondo il quale la complessità è

"una situazione in cui un crescente numero di variabili indipendenti interagiscono in modo indipendente ed imprevedibile".

Il crescente interesse maturato intorno a tale disciplina ha contribuito ad una maggiore conoscenza delle caratteristiche di un sistema complesso:

Emergenza

L'emergenza è uno degli elementi fondamentali del sistema complesso e molti lavori sono condotti per capire di più sulla sua natura e sulle condizioni che la causano. Fondamentale per capire tale concetto è la distinzione tra sistema complesso e sistema complicato. Ciò che distingue un sistema complesso da un sistema complicato è che i comportamenti ed andamenti emergono nel sistema complesso come risultato dell'insieme di relazioni tra gli elementi. Un sistema è complicato se può essere completamente descritto dall'insieme di tutti i suoi elementi. Al contrario un sistema è complesso se il sistema non può essere interamente capito analizzando le sue componenti: anche le interazioni tra queste ultime devono essere considerate. Spesso i sistemi complessi non possono essere completamente capiti perché le interazioni sono difficili da individuare. Ad esempio è possibile individuare quali siano le componenti di un mercato dei titoli, ma è difficile tradurre in termini di relazioni fenomeni come le bolle ed i *crash* e lo sviluppo di andamenti crescenti o decrescenti dei prezzi. L'emergenza è quindi l'esistenza di un andamento coerente che si sviluppa dall'interazione tra agenti. Nelle strutture emergenti, quindi, gli individui si organizzano in un sistema che è qualcosa di più che la somma delle sue parti. La presenza di interazioni permette che da semplici regole comportamentali emergano caratteristiche complesse.

Le relazioni sono a corto raggio

Tipicamente le relazioni tra gli elementi del sistema sono a breve raggio, quindi le informazioni sono trasmesse tra elementi vicini. La molteplicità di connessioni implica che le comunicazioni passano attraverso il sistema e sono modificate nel corso dello svolgimento delle attività. Il sistema può essere pensato, quindi come una rete di comunicazioni. Ma non tutti gli elementi del sistema sono in grado di avere contatti con tutte le altre parti: le relazioni, quindi, si sviluppano localmente. I comportamenti sono condizionati dalle scelte di altri agenti “vicini” ed anche l’evoluzione del sistema dipende da come delle microaree sono in grado di svilupparsi e di interagire con il sistema e con altre organizzazioni locali.

Le relazioni sono non lineari

Raramente si osservano semplici relazioni di causa ed effetto tra gli elementi. Un piccolo stimolo può generare un grande effetto oppure non avere nessuna conseguenza.

Le relazioni contengono cicli di ritorno

Una caratteristica che rende i sistemi complessi un fenomeno particolare è la presenza di comportamenti individuali in grado di adattarsi all’ambiente esterno tramite una serie di tentativi ed errori. Gli agenti possono agire individualmente o come collettività. L’azione individuale di un agente corrisponde alla definizione delle sue caratteristiche ed obiettivi che si traducono in una determinata azione nel sistema, che tuttavia è caratterizzata da una certa staticità. L’azione collettiva dell’agente si traduce invece nella capacità di questo di intraprendere azioni in base alle caratteristiche (in evoluzione) del sistema in cui opera. Inoltre la stabilità di un sistema non implica che ogni sua parte rimanga invariata. Gli stessi fenomeni si possono presentare in presenza di agenti con caratteristiche diverse. Nel Capitolo 6, infatti, si può osservare come fenomeni noti come bolle e *crash* si possano verificare in un mercato di titoli, sia in presenza di agenti omogenei, che in presenza di agenti eterogenei, alcuni dei quali dotati della capacità di apprendimento ed adattabilità alle caratteristiche del sistema in un determinato momento.

I sistemi complessi sono aperti

Questo significa che l’energia e le informazioni sono costantemente importate ed esportate oltre i limiti del sistema. Le caratteristiche di quest’ultimo sono quindi definite, di volta in volta, sulla base delle reazioni delle componenti a novità o cambiamenti dovuti a fattori esterni al sistema. Questo conferisce al sistema complesso le caratteristiche di imprevedibilità e dinamicità che, necessariamente, fanno sì che i sistemi complessi non siano mai in equilibrio.

Le parti non contengono il tutto

Gli elementi del sistema non possono conoscere tutto ciò che accade in esso, altrimenti le caratteristiche dello stesso sarebbero rappresentate in un unico agente. Siccome la complessità deriva dall’interazione di più agenti, in un sistema complesso non può esistere un unico agente in grado di controllarlo. Lo studio dei sistemi complessi richiede inoltre un diverso approccio ai fenomeni che si presentano. Molti fenomeni reali possono essere interpretati utilizzando una metodologia dall’alto in basso: le caratteristiche sono una diretta conseguenza del

susseguirsi di azioni predefinite. I sistemi emergenti dall'altro lato richiedono lo studio dal basso all'alto ovvero la definizione della dinamica delle loro parti che produce certi effetti. Il sistema quindi non può essere prodotto grazie all'azione di un controllo centrale, ma da una forma di organizzazione tra gli individui che si sviluppa dal basso.

I sistemi complessi hanno una storia

La storia di un sistema complesso ha particolare importanza in quanto ogni singolo evento può avere grandi conseguenze sul futuro, come anche le caratteristiche di un sistema in un certo istante sono dovute al susseguirsi di determinati eventi in passato.

I sistemi complessi sono annidati

Le componenti del sistema, solitamente indicate come agenti, sono anch'esse sistemi complessi adattivi (un'istituzione o un individuo sono l'insieme e l'interrelazione di altri fattori).

I limiti sono difficili da determinare

Risulta difficile stabilire esattamente quali siano tutti i fattori che formano un sistema complesso. La sua composizione dipende da ciò che l'osservatore intende rappresentare ed è influenzata da scelte soggettive.

Il concetto di complessità può essere esteso allo studio di fenomeni in varie discipline, come nella fisica, nella biologia e nella matematica, ma è nel campo delle scienze sociali che ha trovato una vasta applicazione. La teoria della complessità è quindi una teoria interdisciplinare e molti principi possono trovare applicazione nella spiegazione di diversi fenomeni. In particolare vorrei citare una corrente di ricerca che coinvolge un gruppo di studiosi in discipline fisiche (Econophysycs) che utilizzano le strutture osservate in alcuni processi che coinvolgono le particelle per la rappresentazione della dinamica dei mercati finanziari ed in particolare nel funzionamento delle contrattazioni tramite il *book* di negoziazione¹.

Un'importante distinzione all'interno di un sistema complesso è quella tra microstruttura e macrostruttura. La microstruttura del sistema è l'insieme di individui che vi agiscono e l'insieme di regole che ne definiscono l'interazione tra gli stessi e con l'ambiente esterno. Lo studio della microstruttura di un sistema consiste quindi nell'analisi dei vari elementi che lo compongono soprattutto per individuare la dinamica del sistema, ossia come i risultati a livello aggregato (la macrostruttura) siano stati ottenuti. Esiste una notevole differenza tra la metodologia di studio che utilizza il principio della complessità e la teoria economica generale.

Le ipotesi principali nella teoria economica dominante sono che gli individui prendono le loro decisioni individualmente, usando solo le informazioni ricevute dal mercato in un sistema caratterizzato da un unico equilibrio. Inoltre è ipotizzata la presenza di un unico agente rappresentativo, le cui caratteristiche sono quelle dell'individuo medio presente nella realtà. La principale ipotesi è quindi quella che le caratteristiche del sistema aggregato siano quelle dell'individuo medio che vi agisce. In questo modo si ignorano, nelle trattazioni teoriche, tutte le forme di

¹Un'analisi più approfondita dei modelli è proposta nel Capitolo 4.

comunicazione, di interazione e di coordinamento limitando al solo livello dei prezzi il fattore che induce l'individuo a tenere un certo comportamento. Ma il livello dei prezzi è pienamente rappresentativo solo in un sistema con informazione completa, ipotesi che può essere facilmente confutata dalla presenza nella realtà di diversi livelli di accesso all'informazione disponibile sul mercato. Diversi studi hanno inoltre dimostrato che esiste una discrepanza tra le caratteristiche degli individui e le caratteristiche del sistema aggregato. In molti casi, utilizzando agenti eterogenei si è in grado di creare un sistema che presenta caratteristiche complesse in linea con i dati reali osservati. Le caratteristiche del sistema non coincidono quindi con quelle di un unico agente rappresentativo che vi opera. I dati osservati a livello aggregato sono quindi il risultato dell'interazione tra gli agenti e non la conseguenza diretta delle caratteristiche ipotizzate per l'agente rappresentativo e quindi sono una conseguenza della microstruttura del sistema. Sotto questo punto di vista anche il concetto di equilibrio assume un nuovo significato: un sistema in equilibrio non deriva dall'equilibrio di ogni sua singola parte, ma da una forma di stabilità che deriva da particolari condizioni in cui si trovano le sue componenti.

Lo studio dell'economia secondo la teoria tradizionale consiste nel trovare le opportune semplificazioni per poter spiegare un determinato fenomeno in via analitica: la costruzione di una teoria consiste nell'individuare le caratteristiche degli elementi di un sistema che sono compatibili con il raggiungimento di un certo risultato. Ad esempio la teoria dell'equilibrio generale ricerca le quantità di beni ed il livello dei prezzi che corrispondono ad un certo andamento dei prezzi; la teoria dei giochi conduce alla determinazione delle strategie più appropriate per raggiungere una condizione di soddisfazione degli agenti che non li induce a modificare la loro condizione; la teoria delle aspettative razionali mira ad individuare le previsioni che sono in grado di anticipare gli avvenimenti che esse stesse hanno la capacità di creare. Quindi la formulazione di una teoria economica ha una caratteristica di staticità dovuta al particolare metodo di studio adottato: partendo da caratteristiche generali, si cercano di individuare gli elementi che ne consentono il verificarsi. L'economia nella prospettiva dei sistemi complessi, invece, è un sistema in cui i vari elementi agiscono e reagiscono agli eventi che essi stessi generano. Questi sistemi, quindi, sono caratterizzati da una dinamicità del sistema dovuta al susseguirsi di cambiamenti ed aggiustamenti: l'azione degli individui conferisce certe caratteristiche al sistema, che a sua volta influenza le reazioni degli agenti e così procedendo verso un susseguirsi di adattamenti, anche delle caratteristiche degli agenti le cui decisioni di movimento, acquisto, prezzi e previsioni cambiano in base all'evoluzione del sistema che essi stessi vanno creando. La teoria tradizionale, invece, non prevede questa possibilità di reazione al sistema, ma semplicemente il raggiungimento di una certa caratteristica, come può essere una situazione di equilibrio (o situazione di staticità). Le relazioni sopra descritte, che si manifestano in un sistema economico, sono quindi non lineari e difficilmente portano ad una situazione in cui la molteplicità dei fattori raggiunge una condizione stabile. La teoria della complessità permette quindi di analizzare le caratteristiche di sistemi al di fuori dell'equilibrio ed in continua evoluzione. Lo stesso discorso può essere condotto per lo studio dei mercati finanziari i quali presentano anomalie che difficilmente possono essere spiegate con l'ipotesi delle

aspettative razionali, come il verificarsi di bolle e *crash* o come l'alternarsi di periodi di forte volatilità dei prezzi.

1.2.1 I mercati finanziari come sistemi complessi

Un mercato dei titoli è un sistema in cui migliaia di agenti agiscono indipendentemente per acquistare o vendere quantità di titoli². Ma da queste azioni individuali emerge un sistema chiamato mercato finanziario. Gli andamenti di tale sistema non sono quindi definiti da un processo centrale: questi risultano dall'interazione tra gli agenti. Fenomeni come mercato al rialzo, al ribasso o bolle speculative, non sono il risultato di un'azione programmata, ma emergono dall'azione combinata di diversi individui. Analizzando le sole caratteristiche degli operatori in un mercato finanziario non è possibile prevedere come si producano le bolle speculative o come per un determinato periodo di tempo il mercato mantenga andamenti al rialzo o al ribasso. Gli eventi in tale sistema sono quindi determinati da come gli operatori sono in grado di interpretare le caratteristiche di un sistema in continua evoluzione. Ma i cambiamenti all'interno del sistema sono determinati dalle azioni degli agenti. Si osserva quindi una relazione reciproca tra ambiente ed agenti che si traduce nella dinamica del sistema e delle caratteristiche degli agenti nel tempo.

Un mercato finanziario è inoltre un sistema a diffusione mondiale, governato da regole precise di funzionamento, ma caratterizzato dall'influenza di diversi fattori esterni come i flussi di informazione, il susseguirsi di eventi in grado di modificare i comportamenti degli operatori del mercato, nonché il continuo ingresso ed uscita degli operatori sul mercato. Questo rende il mercato finanziario un sistema aperto ad imprevedibili influenze esterne. Inoltre ogni mercato finanziario ha una sua storia, caratterizzata da periodi di aumento o calo dei prezzi o da fenomeni come le bolle ed i *crash*. Soprattutto il verificarsi di bolle e *crash* come fenomeni anomali le cui cause sono ancora oggetto di diversi studi, può suggerire un approccio secondo i principi della complessità.

Un mercato finanziario inoltre è generato dall'operatività degli agenti in esso. Il prezzo dei titoli è definito continuamente dall'incontro di ordini di acquisto e di vendita. Per tale caratteristica quindi un mercato finanziario non è caratterizzato da un unico equilibrio, ma va inteso come un sistema dinamico in continuo cambiamento.

I mercati finanziari possiedono molte delle caratteristiche come l'emergenza, l'adattabilità e molteplicità degli agenti e la dinamica del sistema che sono le basi per identificare un sistema complesso. L'approccio di vari studiosi allo a questo tipo di sistema spesso si traduce nella creazione di modelli per rappresentare determinati fattori che sono considerati importanti per la spiegazione del suo

² Il numero di individui che operano in un sistema, se sufficientemente elevato, permette di ottenere risultati complessi a livello aggregato. In Yang et altri (2004) viene creato un modello di simulazione di un mercato finanziario in cui gli investitori sono dotati di una matrice d'azione. Questa matrice contiene le varie strategie da adottare in base alle informazioni che provengono dall'ambiente sottoforma di prezzi dei titoli. Questa matrice subisce un processo stocastico di modifica, che conferisce agli investitori di adattare le strategie all'ambiente esterno. Nel modello descritto gli autori ottengono risultati complessi solamente utilizzando l'interazione di un numero di agenti sufficientemente elevato.

funzionamento. Nel Capitolo 4 in particolare sono analizzati diversi modelli di rappresentazione dei mercati finanziari: da quelli prettamente analitici ai veri e propri modelli di simulazione nei quali possono interagire diverse tipologie di agenti, dotati di razionalità o irrazionali, in grado di adattarsi al sistema esterno, in un ambiente artificiale che a partire da regole di funzionamento tratte dal mondo reale, sviluppa caratteristiche ed andamenti in analogia con quanto si può effettivamente osservare.

1.3 Le simulazioni

Il termine simulazione è utilizzato ogni qualvolta i mezzi informatici sono impiegati come strumento complementare allo sviluppo di una teoria o alla descrizione e rappresentazione di alcuni processi.

Le possibili applicazioni delle simulazioni sono collegate ai diversi obiettivi di colui che le impiega (Axelrod, 2003): previsione, *performances*, apprendimento, intrattenimento, educazione, insegnamento e scoperta. La capacità di formulare previsioni tramite simulazioni può trovare applicazione nei mercati finanziari, in modo da produrre previsioni sui tassi o prezzi futuri, da dati raccolti in periodi antecedenti. Le simulazioni sono in grado di fornire, se accompagnate da tecniche informatiche come l'intelligenza artificiale, spiegazioni sull'evoluzione di comportamenti nelle percezioni umane, nella formulazione di decisioni o nelle interazioni sociali. Molte simulazioni sono inoltre utilizzate per riprodurre un determinato ambiente reale e verificare la capacità di agenti reali in certe situazioni, oppure per riprodurre ambienti immaginari e creare forme di intrattenimento. Le simulazioni possono essere utili per costruire sistemi nei quali modificare le ipotesi iniziali e fornire esempi pratici dei collegamenti esistenti tra le varie componenti di un sistema nelle applicazioni scolastiche.

Le simulazioni possono inoltre essere utili per dimostrare alcune teorie, come la teoria della complessità o per effettuare ricerche scientifiche come nel campo della fisica o delle scienze sociali. In questo caso la simulazione non è un semplice mezzo complementare allo sviluppo di un approccio analitico al problema, ma spesso rappresenta l'unico modo per spiegare certi fenomeni. La simulazione ha, come un modello analitico certe ipotesi iniziali, ma a differenza di questo non è costruita per validare una teoria. Un approccio analitico richiede la raccolta di dati reali e la formulazione di ipotesi e formule affinché si possa raggiungere una certa caratteristica del sistema. La particolarità dell'uso di simulazioni per studiare determinati fenomeni consiste nella capacità di produrre un sistema artificiale che, sulla base di caratteristiche e regole iniziali, è in grado di produrre insiemi di dati che in un secondo momento possono essere confrontati con dati reali. In questo senso l'autore identifica la simulazione come una terza via (oltre ai metodi induttivo e deduttivo) per condurre esperimenti scientifici. Una simulazione in questa accezione consiste nello specificare le regole di comportamento di entità individuali e delle relazioni tra queste, nel simulare una moltitudine di tali individui usando un modello con il computer e di verificare le conseguenze delle regole di comportamento individuali sui risultati ottenuti a livello di sistema, usando i dati prodotti dalla simulazione.

Quasi tutte le ricerche nel campo delle scienze sociali procedono costruendo rappresentazioni semplificate della realtà. Le tre tipologie di tali rappresentazioni

sono: quella verbale, la cui difficoltà è la rappresentazione dei collegamenti (cause ed effetti) di determinati eventi e la generalizzazione dei modelli; quella matematico statistica, che riproduce la realtà utilizzando modelli matematici, la cui difficoltà risiede nel dover utilizzare eccessive semplificazioni per il loro funzionamento; infine vi sono i modelli computazionali che permettono, rispetto alle tipologie precedenti, di rappresentare la realtà tramite processi non lineari grazie all'utilizzo di programmi per computer. Una simulazione al computer consiste nel far eseguire il programma utilizzando diverse variabili in *input* e confrontare i risultati con i dati reali, mentre ad esempio in un modello matematico occorre introdurre ulteriori ipotesi o costruire un nuovo procedimento per studiare nuove variabili.

Rispetto ad un modello matematico un modello di simulazione al computer permette di avere un linguaggio più espressivo e meno astratto ed uno strumento di calcolo molto potente in grado di rappresentare processi paralleli o caratterizzati dalla mancanza di una sequenza predefinita di eventi. I programmi formulati secondo i principi della programmazione sono modulari e quindi è possibile modificarne alcune caratteristiche iniziali senza dover creare un nuovo modello. In ultimo è possibile inserire nel modello l'eterogeneità di individui, diversi livelli di informazione, differenti capacità, semplicemente introducendo più varianti di una stessa fattispecie (in modo particolare se la tecnica di programmazione utilizzata è quella ad oggetti).

D'altra parte la costruzione di una simulazione richiede una conoscenza della situazione che si intende rappresentare, sia per fissare i fattori iniziali, sia per descrivere i risultati ottenuti. La descrizione e spiegazione dei risultati ottenuti è fondamentale in quanto spesso i linguaggi di programmazione sono differenti e la struttura del programma non è di immediata interpretazione ad un osservatore inesperto. Quindi i risultati della simulazione devono essere comprensibili, meglio se supportati da rappresentazioni grafiche, ma prima di tutto devono essere coerenti con quanto è possibile osservare nella realtà. Perché una simulazione non sia un semplice esercizio teorico, infatti, occorre che questa produca risultati in linea con quanto è possibile osservare nella realtà riguardo un preciso fenomeno che si intende rappresentare. Tuttavia la particolarità delle simulazioni nel campo delle scienze sociali rende controverso il significato da attribuire al concetto di validazione di una teoria. La validazione di una teoria consiste nella coerenza di questa con quanto osservato nella realtà. Ma le simulazioni di sistemi complessi hanno come obiettivo quello di rappresentare dei processi in grado di generare certi fenomeni a livello aggregato. In tal senso il modello è valido se è in grado di produrre un certo fenomeno reale, a partire da determinate caratteristiche iniziali, tramite una serie di comportamenti che possono essere osservati in realtà. Riveste quindi particolare importanza anche la descrizione e giustificazione delle ipotesi inserite nel modello e la specificazione dei limiti insiti nel modello e gli obiettivi che si intendono raggiungere.

La simulazione offre inoltre possibilità di analisi di caratteristiche del sistema difficilmente osservabili esclusivamente dai dati raccolti nel mondo reale: le simulazioni permettono di creare ambienti ipotetici ed in tali contesti studiare i singoli fattori che li compongono: è possibile confrontare due o più sistemi, determinare il valore ottimale di parametri, individuare i punti critici, individuare strategie di azione in certe condizioni o formulare previsioni riguardo le prestazioni del sistema nel futuro. Le cause che portano ad utilizzare una simulazione per la

spiegazione di un certo fenomeno possono derivare da diversi fattori: si possono effettuare valutazioni su sistemi a partire dalle stesse ipotesi iniziali, eseguire valutazioni di eventi o condizioni rare o rischiose, oppure permette stime non misurabili nei sistemi reali.

Inoltre esistono diversi linguaggi di programmazione e differenti tecniche di implementazione che dipendono anche da caratteristiche soggettive. Affinché quindi il modello possieda la caratteristica della usabilità, questo deve essere sviluppato con un linguaggio largamente diffuso e comprensibile (è questo uno dei fattori che ha contribuito alla diffusione della biblioteca di funzioni per le applicazioni economiche Swarm³).

Una simulazione può contenere vari livelli di astrazione o riproduzione di un sistema. In questo modo è possibile confrontare ambienti artificiali che differiscono per alcune ipotesi iniziali, in base al tipo di risultati che producono.

Un'importante distinzione può essere fatta tra simulazione e modelli di simulazione: eseguire una simulazione significa infatti riprodurre un certo processo, utilizzando metodologie evolute come possono essere le tecnologie informatiche. Costruire un modello di simulazione consiste invece nel formulare una vera e propria rappresentazione di un sistema, caratterizzato da componenti e relazioni tra queste. Tra le due definizioni estreme esistono tuttavia vari livelli di applicazione di un modello e di conseguenza differenti risultati. Al primo stadio si possono individuare i modelli che forniscono un'imitazione di ciò che avviene nella realtà: come detto sopra l'obiettivo è quello di identificare e studiare un processo che può essere un'applicazione di una teoria macroeconomica al variare di alcune condizioni iniziali. In questo caso l'applicazione di strumenti informatici è volta principalmente a sfruttare la maggiore velocità di calcolo e la maggiore chiarezza ottenuta con rappresentazioni grafiche. Ad uno stadio successivo si possono trovare modelli in grado di produrre risultati in accordo qualitativamente con le macro-strutture empiriche: rispetto alla tipologia precedente in questo caso si fonda la costruzione del modello sul tentativo di generare andamenti realmente osservati da certi fattori iniziali; un terzo livello è raggiunto quando il modello produce risultati in accordo con le macro strutture empiriche in modo quantitativo: in questo caso obiettivo fondamentale è riprodurre un processo in grado di generare dati confrontabili con quelli reali. All'ultimo stadio il modello è in grado di riprodurre le microstrutture reali: tramite il modello è possibile studiare relazioni ed effetti degli elementi del sistema in un ambiente artificiale. L'importanza dei risultati prodotti dal modello risiede nella possibilità del loro utilizzo per comprendere determinati fenomeni reali, modificandone la struttura, inserendo differenti tipologie, regole e caratteristiche degli agenti, in modo da ottenere risultati il più possibile in accordo con i dati reali che si vogliono interpretare.

L'obiettivo fondamentale di una simulazione non è quello di produrre previsioni esatte su ciò che potrà accadere, ma di comprendere come un certo evento si potrà verificare se saranno soddisfatte certe condizioni, soprattutto per quanto riguarda le caratteristiche degli elementi del sistema.

In tutti i sistemi complessi l'elemento fondamentale è senza dubbio l'agente, che può essere una particella fisica, una cellula o organismo, un individuo o qualsiasi

³ Un approfondimento dell'argomento si può trovare nell'Appendice A.

entità in grado di avere un ruolo attivo nella determinazione delle caratteristiche a livello aggregato. La simulazione è un utile strumento per la rappresentazione di questi sistemi, ma gli strumenti informatici devono essere accompagnati da una metodologia di rappresentazione degli agenti che si addica alle esigenze di analisi di un sistema complesso. Una soluzione possono essere i modelli fondati su agenti in grado di sviluppare comportamenti adattivi grazie all'applicazione di tecniche informatiche come gli algoritmi genetici e le reti neurali artificiali.

Capitolo 2

Modelli ad agenti e reti neurali artificiali

2.1 Introduzione

Lo studio di sistemi complessi, come quello economico, rivela la presenza di diversi limiti come la difficoltà di testare singoli fattori nel sistema reale causata dalla mancanza di indipendenza degli effetti di determinate variabili in tale sistema. L'ipotesi della presenza di un individuo perfettamente razionale e con illimitate capacità di calcolo mal si concilia con le caratteristiche degli agenti reali, come anche poco realistica è la creazione di un rappresentante che possiede tutte le caratteristiche comportamentali degli individui nel sistema oggetto di studio. Inoltre la dinamicità dei sistemi sociali, richiede un diverso approccio ai fenomeni: lo studio di come certe caratteristiche si producono nel sistema dall'interazione di diversi fattori.

I modelli fondati su agenti o *Agent Based Computational Models* (ABCM) offrono un metodo flessibile per lo studio dei comportamenti all'interno di un sistema economico. In un ABCM ogni agente e le altre parti costituenti il sistema economico o sociale, possono essere rappresentati con algoritmi e variabili che definiscono i comportamenti degli agenti artificiali e comprendono l'evoluzione del suo stato nel tempo. Questo metodo di studio si colloca tra i modelli analitici e le osservazioni empiriche. I modelli ad agenti possono essere quindi considerati una soluzione per lo studio delle scienze sociali poiché permettono di riprodurre l'interazione di agenti individuali. Un sistema ad agenti è in grado di generare, partendo da semplici regole, sistemi di comportamento complessi in accordo con quanto osservato nella realtà. La costruzione di un modello ad agenti che utilizzi le tecniche della simulazione, permette di studiare vari fenomeni partendo da regole che definiscono la struttura dell'ambiente in cui far interagire operatori e fissare determinati parametri. In questo modo, modificando solo alcune caratteristiche del modello è possibile separare gli elementi che costituiscono il sistema ed individuarne gli effetti sui risultati aggregati.

Vi possono essere diverse tipologie di modelli, in base al sistema che si intende riprodurre e al suo interno le variabili che si desidera osservare, ma tutti possiedono la caratteristica comune della ricerca di una rappresentazione della realtà orientata allo studio della dinamica e della varietà di elementi che caratterizzano il sistema. Con i modelli ad agenti, infatti, si può superare il

riduzionismo derivante dall'ipotizzare un unico agente perfettamente razionale e con illimitate capacità di calcolo e studiare situazioni economiche in cui gli agenti sono dotati di una forma di razionalità detta limitata perché condizionata da errori, sentimenti o incompleta conoscenza di tutte le informazioni disponibili sul mercato. Allo stesso modo è possibile introdurre differenze nelle procedure che definiscono i comportamenti degli agenti, prevedendo diverse tipologie o popolazioni di individui che si distinguono per i fattori che ne influenzano l'operatività sul mercato. In questo modo si abbandona l'ipotesi di un unico agente rappresentativo che possiede tutte le caratteristiche degli agenti reali e si può studiare come diverse caratteristiche comportamentali si manifestano attraverso le proprietà del mercato. La costruzione di un modello ad agenti implica la definizione di comportamenti che si vogliono riprodurre e la loro rappresentazione tramite procedure che definiscono la dinamica del sistema.

I modelli ad agenti sono spesso implementati utilizzando strumenti informatici, non solo per le potenzialità di calcolo e per la strutturazione dell'ambiente in cui gli agenti sono chiamati ad agire, ma anche per conferire alle loro decisioni una certa coerenza comportamentale. Quindi si possono trovare, come procedure decisionali, delle strutture informatiche, come algoritmi genetici o reti neurali artificiali, che producano o modifichino le regole comportamentali degli agenti, sulla base di un certo numero di informazioni dal mercato in loro possesso.

Nel seguente capitolo, dopo un'introduzione agli agenti artificiali ed una parte teorica dedicata a reti neurali ed algoritmi genetici, analizzo alcuni modelli che utilizzano agenti artificiali per spiegare situazioni economiche ed in particolare in presenza di fattori anomali rispetto alla teoria tradizionale come l'eterogeneità degli agenti, la razionalità limitata e l'assenza di un unico equilibrio. In questo modo si può comprendere come queste metodologie possono essere utilizzate per lo studio dei sistemi economici.

2.2 Gli agenti artificiali

Un agente artificiale può essere pensato (O'Sullivan e Haklay, 2000) come una componente software autonoma, le cui decisioni sono orientate al raggiungimento di un obiettivo. La sua autonomia dipende da com'è stato strutturato dal programmatore, ma si concreta nella possibilità di formulare proprie decisioni in modo indipendente in base agli obiettivi da raggiungere. In Gilbert e Terna (2000), è fornita la definizione di agente nella prospettiva dei sistemi ad agenti (*multi-agent systems* MAS), in cui il termine indica un processo, sviluppato al computer, che ha una certa autonomia (controlla le proprie azioni), un'abilità sociale (interagisce con altri agenti grazie ad un certo tipo di linguaggio), reattività (può percepire l'ambiente e reagire di conseguenza), pro-attività (è in grado di intraprendere azioni orientate al raggiungimento di un obiettivo). Nei modelli ad agenti computazionali si ha una popolazione eterogenea di agenti che interagiscono tra loro all'interno di un ambiente artificiale. Un agente in tali modelli è rappresentato da un oggetto, con proprie caratteristiche (variabili iniziali) e con propri metodi, che rappresentano le regole di comportamento. Per verificare l'attinenza alla realtà di un modello, occorre verificare prima di tutto che i comportamenti degli agenti siano qualitativamente simili ai comportamenti reali. Nel caso contrario occorre inserire ulteriori regole di comportamento attraverso le quali gli agenti artificiali

sono in grado di agire come gli agenti reali. In un modello ad agenti è possibile introdurre regole sia per comportamenti individuali, che per popolazioni. Eseguire il modello significa costruire una popolazione di agenti, farli interagire ed osservare cosa succede.

La struttura generale di una simulazione che utilizza la tecnica del modello ad agenti è rappresentata dallo pseudo-codice seguente:

```
Inizio
Inizializzazione degli agenti(regole di decisione)
Inizializzazione dell'ambiente (struttura)
For t=1 to T
    L'agente sceglie l'azione
    Interazioni sul mercato: prezzi, profitti, ecc...
    Diffusione delle informazioni
    Gli agenti possono aggiornare le proprie regole decisionali
Fine ciclo For
Generazione dei dati
Fine
```

La simulazione ad agenti inizia, quindi, con una fase di inizializzazione delle variabili che rappresentano le caratteristiche degli agenti e dell'ambiente che saranno utilizzate nel modello. Questa fase può essere interpretata come la definizione delle ipotesi riguardo i fattori del sistema che si ritengono più importanti e di conseguenza si intendono analizzare con il modello. Il termine inizializzazione sottintende la creazione di metodi che traducono comportamenti reali in procedure informatiche oppure la definizione del valore di parametri o variabili iniziali, che possono individuare certe caratteristiche (come può essere il grado di avversione al rischio di un investitore) nel caso degli agenti. Per quanto riguarda l'ambiente, con l'inizializzazione si può definire il numero di agenti che vi agiscono, ma soprattutto è possibile formulare le regole grazie alle quali gli agenti possono agire ed interagire con l'ambiente in modo da produrre risultati a livello aggregato.

Ogni azione intrapresa dagli agenti si traduce in una serie di dati che riguardano il sistema (o mercato) in quell'istante. Questi dati sono resi disponibili agli agenti in modo che questi possano adattare le proprie regole decisionali in base alle "nuove" caratteristiche del sistema. Questo adattamento è possibile perché previsto nelle regole definite per ogni agente.

Come si può notare dal semplice ma essenziale schema riportato sopra, il tempo scandisce l'evolversi della situazione e solo alla fine della simulazione sono prodotti i dati che potranno essere analizzati. Il tempo cui si fa riferimento è il cosiddetto tempo simulato, ossia il corrispettivo di un'unità di tempo reale. Grazie alla simulazione è possibile, infatti, riprodurre comportamenti o eventi che nella realtà si svolgono in tempi molto lunghi, con facilità e con una durata di esecuzione della simulazione molto ristretta. L'unità di tempo della simulazione può infatti essere un secondo, un'ora, una giornata o qualsiasi altra unità di tempo

reale, che nella simulazione corrisponde sempre ad un tic (o unità di avanzamento di base della simulazione).

Il confronto dei dati prodotti dalla simulazione con i dati reali può rivelare un'attinenza o meno del modello a ciò che si intendeva rappresentare: nel caso di fallimento basterà ripetere l'inizializzazione, formulando ipotesi più appropriate, e ripetere l'esperimento.

2.2.1 Agenti artificiali ed individualismo

Una critica ai modelli ad agenti consiste nella distinzione tra individualismo metodologico e collettivismo. Con il termine individualismo metodologico O'Sullivan e Haklay (2000) intendono che in questa tipologia di modelli gli agenti artificiali rappresentano individui ed il sistema sociale complesso emerge dalle azioni degli individui e non dipende da altri fattori. Lo studio di un sistema generato esclusivamente dall'interazione di diversi individui è necessariamente collegato ad una visione individualistica della realtà. In Epstein e Axtell (1996) sono definite con chiarezza le componenti ed il funzionamento di un modello ad agenti ed è facile da tale definizione comprendere l'affermazione della presenza di un certo individualismo metodologico. Secondo gli autori, infatti, un modello ad agenti è caratterizzato da tre elementi: gli agenti, l'ambiente e le regole. Gli agenti sono le persone della società artificiale; l'ambiente è un mezzo separato dagli agenti nel quale gli agenti operano e con il quale questi interagiscono. Le regole definiscono il modo in cui gli agenti agiscono in base ai cambiamenti dell'ambiente nel tempo. Quello che emerge da tale descrizione è la caratterizzazione del sistema esclusivamente dall'azione degli agenti che vi operano.

La critica a tale metodologia deriva dal fatto che nella realtà esistono diverse componenti del sistema che non dipendono esclusivamente dagli agenti, ma esistono altri fattori che ne definiscono le caratteristiche. La struttura sociale è infatti il frutto dell'operato di generazioni di popolazioni, di regole che ne definiscono le caratteristiche, della sua storia e cultura. In un modello che voglia fornire una rappresentazione della realtà devono inoltre essere presenti delle caratteristiche degli agenti che simulino la percezione di questi dell'ambiente esterno. Quindi, un modello ad agenti, sostengono O'Sullivan e Haklay (2000), essendo una rappresentazione limitata di un ambiente aperto, deve prevedere un'esplicita specificazione riguardo la struttura sociale ivi inclusa, soprattutto per quanto riguarda le istituzioni e le regole che definiscono l'interazione degli agenti con tale ambiente.

2.3 Reti neurali artificiali (RNA) ed algoritmi genetici

Le reti neurali artificiali e gli algoritmi genetici sono strutture informatiche spesso utilizzate nella creazione di modelli ad agenti. Seppure hanno origini e caratteristiche differenti, presentano degli elementi in comune (Margarita, 1992): entrambe devono la loro nascita all'osservazione di processi naturali come l'evoluzione per gli algoritmi genetici ed i neuroni (intesi come elementi funzionali di base del cervello) per le reti neurali; utilizzano processi di sviluppo paralleli: sono strumenti che consentono l'azione di più elementi allo stesso momento e quindi un avanzamento del sistema nel suo complesso. Tuttavia si può rilevare una differenza sostanziale dei due strumenti: tramite gli algoritmi genetici possono essere rappresentati processi

evolutivi degli individui che agiscono nel sistema e di conseguenza dell'ambiente in cui questi operano; l'applicazione delle reti neurali permette di riprodurre processi di apprendimento o di affinamento delle capacità decisionali di un individuo all'interno di un sistema dinamico. Le reti neurali artificiali sembrano quindi essere più adatte ad applicazioni che riguardano la rappresentazione di un processo decisionale dotato di una certa coerenza ed adattabilità all'ambiente esterno o alle capacità di formulare previsioni grazie all'elaborazione di un certo numero di dati, mentre gli algoritmi genetici sono più efficaci nella riproduzione di processi evolutivi a livello aggregato e nella generazione di strategie di azione in modo indipendente (tramite un procedimento di valutazione delle prestazioni nel sistema e di modifica delle strategie esistenti e non dalla scelta di una regola comportamentale tra un insieme di strategie predefinite).

L'evoluzione e l'apprendimento sono due forme di adattamento che agiscono in differenti scale temporali. L'evoluzione è in grado di catturare cambiamenti relativamente lenti dell'ambiente che possono coinvolgere diverse generazioni. L'apprendimento, invece, permette ad un individuo di adattarsi a cambiamenti dell'ambiente che sono imprevedibili a livello generazionale. Mentre quindi l'evoluzione coinvolge le caratteristiche dell'agente che sono trasmesse alle generazioni successive, l'apprendimento è un processo che vede il proprio sviluppo nel corso della vita di un individuo. In Nolfi (1999) sono illustrati i vantaggi della combinazione delle due tecniche di adattamento. In particolare, nella simulazione di un sistema complesso, si ottengono prestazioni degli agenti più efficienti in termini di sviluppo delle capacità ed adattamento all'ambiente esterno, dall'inserimento nelle caratteristiche genetiche degli agenti di una componente definita dai risultati di un processo di apprendimento. In tal modo le capacità decisionali e di adattamento degli agenti si affinano in tempi più veloci rispetto alla semplice trasmissione genetica e nello stesso tempo le capacità di apprendimento non si limitano al ciclo vitale di un individuo, ma si trasmettono alle generazioni successive. La possibilità di inserire in un modello delle tecniche di adattamento all'ambiente esterno rende particolarmente indicato l'uso di reti neurali artificiali ed algoritmi genetici nelle applicazioni economiche.

2.3.1 Le reti neurali

Una rete neurale artificiale è un modello matematico per i processi cognitivi, basato su un approccio connessionistico alla computazione. L'ispirazione originale per la tecnica fu l'esame delle reti bioelettriche del cervello, formate da neuroni e dalle loro sinapsi. In un modello a rete neurale, semplici nodi (o neuroni o unità) sono collegati insieme per formare una rete di nodi (enciclopedia multimediale Wikipedia).

Una funzione a rete neurale produce un vettore di *output* da un vettore di *input*, sulla base di un insieme di parametri (detti pesi). Una rete neurale di tipo *feedforward*⁴ è formata da tre strati di unità elementari di calcolo, di cui uno di *input*, uno intermedio o nascosto (o *hidden*) e da uno di *output*.

I nodi di *input* sono costituiti da valori numerici che formano il vettore di *input*. Ogni valore è moltiplicato con il relativo peso e sommato agli altri valori ottenuti

⁴Con tale termine si indicano reti in cui le informazioni non hanno effetto su azioni precedenti

dagli altri *input* e relativi pesi. A tale somma sarà applicata una trasformazione non lineare⁵ in modo da ottenere il valore del nodo dello strato intermedio. Tutti i valori di *input* vanno quindi a determinare il valore di più valori dei nodi nascosti, con lo stesso procedimento, ma modificando il valore assunto dai pesi, fino a raggiungimento del numero di nodi nascosti. Tale procedimento si ripete partendo dai nodi nascosti per determinare il valore dei nodi di *output*, utilizzando, naturalmente valori dei pesi differenti. Il funzionamento della rete neurale si può anche tradurre con la funzione:

$$y = f(Bf(Ax))$$

dove x è il vettore dei nodi di *input*, $f(Ax)$ è il vettore dei nodi nascosti e y è il vettore dei nodi di *output*.

Il metodo CT

Il metodo CT è stato creato per dotare le decisioni degli agenti di una certa coerenza interna ed in particolare per dotare gli agenti della capacità di valutare quale azione compiere per ottenere un risultato specifico e quali conseguenze derivano da una determinata azione. Questo è ottenuto modificando i pesi della rete neurale in modo che il valore degli *output* prodotti sia prossimo a quello di determinati *target* calcolati apportando alcune modifiche agli stessi *output* della rete neurale. Più dettagliatamente una rete neurale a tre strati (nodi di *input*, nodi nascosti, nodi di *output*) fornisce degli *output* che si possono suddividere in due tipi: 1) nodi di uscita relativi ad azioni da compiere; 2) nodi di uscita relativi agli effetti di tali azioni. Successivamente gli *output* del primo tipo vengono utilizzati per la fase di apprendimento che conduce alla definizione degli effetti delle azioni (in modo da sviluppare la capacità dell'agente di individuare gli effetti di certe azioni), mentre quelli del secondo tipo vengono utilizzati per formare i *target* per la definizione delle azioni da compiere (in modo da identificare le azioni più appropriate ad ottenere determinati effetti).

L'azione e l'apprendimento si svolgono in quattro fasi necessarie affinché vengano prodotti gli *output*, venga concluso il processo di valutazione degli errori, retropropagazione degli stessi e correzione dei pesi della RNA:

- 1) Produzione degli *output* della RNA che consistono in congetture sulle azioni da compiere e congetture sugli effetti di tali azioni;
- 2) Formazione dei *target*⁶ relativi alle congetture sugli effetti sulla base degli *output* della RNA riguardanti le congetture di azione;
- 3) Formazione dei *target* relativi alle congetture delle azioni da compiere, che si basano sulle stime degli effetti delle azioni prodotte dalla RNA;
- 4) *Backpropagation*: si effettua l'apprendimento, correggendo i pesi della rete (inizialmente sono valori casuali) per ottenere stime degli effetti in accordo con le conseguenze delle azioni congettrate e congetture di azione

⁵ La trasformazione non lineare consiste nell'applicazione al valore della funzione logistica

$$\frac{1}{1 + e^{-x}}$$

⁶ I *target* sono quei valori che la rete neurale deve imparare a riprodurre

più coerenti con le stime degli effetti. Si possono distinguere due tipi di apprendimento:

- quello di breve termine che avviene nella fase dell'azione in cui gli agenti modificano continuamente i pesi principalmente tra lo strato dei nodi nascosti allo strato degli *output*;
- apprendimento di lungo termine, *ex post*, in cui effettivamente si procede alla correzione di tutti i pesi, tramite la ripetizione di più cicli di apprendimento, per creare il desiderato processo decisionale.

In tale modo gli agenti sono in grado di sviluppare una coerenza decisionale interna. Affinché il processo decisionale sia in grado di rappresentare una realistica reazione a situazioni reali, occorre inserire degli elementi esterni ed in particolare prevedere che le azioni degli agenti tengano conto di Obiettivi Esterni (EO) per influenzare le stime degli effetti e di Proposte Esterne (EP) per influenzare le congetture relative alle azioni.

Le reti neurali artificiali offrono la possibilità di analizzare andamenti complessi con maggiore velocità e con un alto grado di accuratezza. Il processo di una rete neurale non rende necessarie le ipotesi sulla natura della distribuzione dei dati, giacché questi vengono prodotti nel corso degli esperimenti in maniera indipendente. Per questo motivo le variabili del modello non devono essere ponderate all'interno di una struttura analitica, ma sviluppano le relazioni internamente. Per lo studio di sistemi le cui variabili sviluppano andamenti dinamici, le reti neurali permettono di rappresentare relazioni non lineari tra le variabili e consentono esperimenti con dati incompleti o che contengono errori (i risultati di esperimenti a livello aggregato, dimostrano infatti una certa robustezza rispetto ad errori che possono coinvolgere le sue singole componenti). Rispetto a modelli econometrici, i modelli basati sulle reti neurali permettono di formulare previsioni anche per tempi più ristretti.

Per l'elevato numero di elementi che caratterizzano un sistema complesso, è praticamente impossibile formulare un modello analitico in grado di comprenderli tutti ed analizzarne gli effetti sui risultati aggregati perché questi sono il frutto di relazioni imprevedibili. Proprio lo studio di tali situazioni di indeterminatezza è uno degli obiettivi dell'impiego delle strutture informatiche in esame.

Tuttavia esistono anche delle possibili obiezioni sulla capacità delle reti neurali di spiegare effettivamente ciò che succede nella realtà. La complicata struttura sottostante rende il processo di apprendimento o previsione difficilmente interpretabile e verificabile: occorre confrontare i risultati prodotti dalle reti neurali con strutture di dati prodotte da modelli analitici largamente diffusi ed approvati per poterne dimostrare la validità. Le reti neurali hanno lunghi tempi di apprendimento (affinché la rete neurale concluda un processo di apprendimento in grado di generare previsioni valide occorre eseguire numerosi cicli di apprendimento), occorre quindi aumentare la velocità di tali processi di modo che lo sperimentatore possa condurre diverse simulazioni ed osservare più dati e confrontarli. La struttura delle reti neurali fornisce un potente strumento di previsione degli andamenti futuri, partendo da un certo numero di dati iniziali, che possono comprendere il valore di alcune variabili (che possono essere prezzi o tassi di interesse nel caso specifico di un sistema economico) nei periodi precedenti. In questo caso il rischio è che la rete neurale

produca degli andamenti fortemente prevedibili e che conducono ad un certo andamento inconsistente con un sistema reale. Occorre quindi agire sapientemente sulle variabili da utilizzare come *input* della rete neurale e prevedere delle forme di aggiustamento dei valori che conferiscano al processo un certo livello di indeterminazione in analogia con quello che accade nei sistemi reali.

2.3.2 Gli algoritmi genetici

Un algoritmo genetico è caratterizzato da cinque momenti fondamentali: generazione della popolazione iniziale, valutazione degli individui, riproduzione, applicazione degli operatori genetici, ripetizione del ciclo per un certo numero di generazioni. La popolazione iniziale consiste in un certo numero di individui che presentano determinate caratteristiche in base al problema che si intende rappresentare; il loro numero può variare nel susseguirsi delle generazioni o rimanere costante. La valutazione degli individui consiste nel definirne alcune caratteristiche in base alla loro capacità di adattamento all'ambiente circostante. La riproduzione degli individui consiste nella scelta dei genitori (definizione delle caratteristiche in termini di risultati che identificano i soggetti migliori) e nella riproduzione vera e propria (che consiste nella definizione delle unità che vengono sostituite da quelle di nuova generazione). Gli operatori genetici sono delle procedure informatiche che attuano il processo di generazione di nuovi individui: le tecniche maggiormente utilizzate sono il *crossover* (incrocio) e la mutazione. Mentre nell'incrocio le caratteristiche dei nuovi individui risultano dallo scambio di quelle di due genitori, nella mutazione un nuovo individuo viene creato partendo da un genitore e modificandone alcuni parametri. La ripetizione del ciclo per un certo numero di volte consente quindi la produzione di più generazioni di individui.

Un algoritmo genetico può essere utilizzato per rappresentare un processo comportamentale in evoluzione dell'agente. Una strategia d'azione è individuata da una serie di parametri rappresentati da un vettore che è formato da una serie di zero ed uno. Ogni nuova strategia si ottiene dall'unione di alcune parti di due diverse strategie. Queste ultime sono scelte in base alla loro capacità di produrre risultati migliori se utilizzate nell'ambiente del modello. In questo modo, quindi, le strategie di azione sono prodotte grazie ad un processo di selezione grazie al quale solo le strategie in grado di rispondere meglio alle trasformazioni dell'ambiente esterno sopravvivono e possono generare nuove regole di comportamento.

2.4 Ambiti di applicazione

I modelli ad agenti sono uno strumento di studio che si sta largamente diffondendo negli studi sociali, fisici, matematici, politici ed economici. Tuttavia di seguito riporto solo alcuni studi pubblicati che riguardano la loro applicazione per studiare certi fenomeni economici come la formulazione di decisioni di consumo ed investimento, il comportamento degli agenti in situazioni di diversi livelli di informazione e in sistemi caratterizzati dalla mancanza di un unico equilibrio.

Si può dedurre, quindi, che l'uso di agenti dotati di differenti caratteristiche permette di riprodurre sistemi dotati di una certa dinamicità, difficilmente rappresentabile imponendo la validazione di una teoria ex-ante.

I modelli ad agenti sono un importante strumento per lo studio di sistemi sociali complessi e possono essere talvolta l'unica soluzione per ottenere determinati risultati:

- Il modello ad agenti è solo uno strumento per presentare i risultati nella tradizionale simulazione nelle operazioni di ricerca, quando il modello matematico può essere formulato e interamente risolto;
- Il modello ad agenti è complementare alla teoria matematica, nel caso di modelli risolvibili matematicamente solo in parte. In tale caso il modello ad agenti, dopo avere validato una teoria formale, può essere uno strumento per verificare l'effetto dell'eliminazione di ipotesi troppo restrittive;
- Il modello ad agenti è l'unico mezzo per esplorare un processo sistematicamente nel caso in cui non sia possibile uno studio analitico del fenomeno.

Un modello ad agenti garantisce la possibilità di rappresentare situazioni sociali più fluide o turbolente nel caso in cui le caratteristiche degli agenti non sono note o definite, ma suscettibili a cambiamenti che possono includere la nascita o la morte degli agenti o l'adattamento dei loro comportamenti. Inoltre possono essere rappresentati individui dotati di razionalità limitata, che agiscono quindi con incompleta informazione o capacità limitate o possono essere modellati processi in condizioni di assenza di equilibrio.

2.4.1 Razionalità limitata

Un sistema economico è caratterizzato da vari fattori, ma il più importante è senza dubbio la presenza di individui che vi agiscono. Il problema è come considerare queste entità soprattutto per quanto riguarda la loro capacità di interagire ed influenzare le caratteristiche del sistema. La teoria economica ipotizza la presenza di un unico agente perfettamente razionale. Tale razionalità si traduce nella massimizzazione dell'utilità, con capacità di calcolo illimitate e con pieno accesso alle informazioni disponibili sul mercato: con queste caratteristiche l'agente è in grado di formulare aspettative razionali sull'andamento futuro delle variabili economiche e di conseguenza definire la propria operatività sul mercato. Tuttavia i sistemi economici reali dimostrano varie caratteristiche incompatibili con questa ipotesi: la presenza di aspettative razionali in economia si traduce in un sistema in grado di raggiungere un certo equilibrio, cosa che spesso non accade nella realtà. Osservando inoltre le serie dei prezzi reali si nota che questi sono caratterizzati da periodi di stabilità ai quali si alternano situazioni di forte volatilità o fenomeni come le bolle speculative, caratteristiche che non possono essere giustificate con aspettative formulate sulla base di prezzi che inglobano tutte le informazioni del mercato. Queste caratteristiche sono escluse dalle possibili conclusioni alle quali si può arrivare con la teoria economica tradizionale. La causa di questa incongruenza si può identificare nell'ipotesi di perfetta razionalità dell'unico agente rappresentativo. Infatti nei sistemi economici reali gli individui sono caratterizzati da un tipo di razionalità detta limitata. Anche in presenza di razionalità limitata l'elemento fondamentale rimane l'individuo. Con il termine razionalità limitata non si escludono le capacità dell'individuo di effettuare una scelta (egli continua a massimizzare i risultati che può ottenere), ma il fatto che questa è condizionata da una limitata capacità di calcolo o da altri fattori

rispetto al solo livello dei prezzi, come possono essere valutazioni soggettive oppure l'esistenza nel sistema agenti eterogenei, dotati quindi di differenti modi di interpretare ed utilizzare i dati che provengono dal mercato. La razionalità limitata si traduce, quindi in una capacità di scelta dell'individuo tra un numero di possibilità ristretto, ma tale scelta è frutto di un processo di adattamento ed apprendimento in base alle caratteristiche del sistema. Il processo di selezione dei comportamenti da adottare non segue uno schema predefinito ed assegnato in modo esogeno al sistema e quindi l'individuo effettua una scelta che non sempre è la migliore. In questo modo non tutti gli agenti agiscono sul mercato allo stesso modo, conferendo al sistema caratteristiche di imprevedibilità e quindi di instabilità.

Reti neurali artificiali ed algoritmi genetici offrono un utile strumento per rappresentare le caratteristiche di un agente dotato di razionalità limitata. Con l'ausilio di queste procedure, infatti, si possono inserire in un modello diverse tipologie di agenti, semplicemente modificandone alcuni parametri ed è possibile riprodurre processi di comunicazione tra agenti e tra agenti ed ambiente esterno, inserire delle componenti stocastiche alle procedure decisionali in modo da conferirne incertezza o ancora generare processi di apprendimento tramite tentativi ed errori.

Il concetto di razionalità limitata è relativo alle caratteristiche dell'individuo che può essere una persona, un'impresa, un'istituzione o qualsiasi altro agente in un sistema economico. Le applicazioni quindi di questo concetto si possono trovare in tutti quei settori in cui si vuole studiare il sistema in funzione dell'operatività degli agenti che lo generano: dall'economia politica, allo studio di sistemi macroeconomici, ai mercati finanziari. Per quanto riguarda i comportamenti degli agenti sui mercati finanziari, nel modello ASM (modello di simulazione di un mercato finanziario spiegato in dettaglio nel Capitolo 4) gli agenti (in questo caso investitori) prendono le loro decisioni di acquisto e di vendita in base ad un algoritmo genetico con il quale gli agenti interpretano in maniera differente le informazioni che provengono dal mercato. Nel modello SUM invece, allo stesso scopo, vengono utilizzate le reti neurali artificiali.

2.4.2 Situazioni di mancanza di equilibrio

Un sistema complesso è caratterizzato dall'emergenza e imprevedibilità delle situazioni. Da questa premessa quindi l'approccio alle caratteristiche del sistema non è sempre semplice e spesso ci si trova di fronte a situazioni non previste o meglio non spiegate, dalla teoria economica. Tra queste vi sono situazioni in cui il sistema non raggiunge un equilibrio, oppure è continuamente in evoluzione e sviluppa una molteplicità di equilibri. La teoria macroeconomica generale genera modelli sempre più complicati, in cui sono inseriti elementi per aumentare la completezza e veridicità dei risultati ottenuti. Il problema consiste comunque nella necessità di introdurre ipotesi semplificatrici per ottenere un modello dotato di coerenza e relativa semplicità. Nella teoria microeconomica, si è sviluppato un settore di ricerca che utilizza i principi e le tecniche della teoria dei giochi per spiegare situazioni in cui, le complicate relazioni tra gli elementi del sistema, non permettono di raggiungere un unico e stabile equilibrio.

Il sistema economico, in quanto sistema complesso, è dinamico e difficilmente caratterizzato da una situazione in cui tutte le sue parti sono in equilibrio. Appare

piuttosto caratterizzato da periodi di stabilità ai quali succedono fasi di incertezza e fluttuazioni dei prezzi. Queste caratteristiche sono provocate dalla molteplicità di agenti eterogenei che vi agiscono e dai numerosi fattori che ne condizionano le decisioni, ma soprattutto dal fatto che il sistema economico è in continua evoluzione. L'interrelazione tra agenti e sistema che definisce le caratteristiche aggregate con il passare del tempo e con l'evolvere delle situazioni, rende il concetto di equilibrio piuttosto inappropriato in questo contesto. Come detto sopra, i modelli ad agenti sono un utile strumento per la rappresentazione di situazioni come quella qui descritta.

Bullard e Duffy (1998) hanno sviluppato un modello ad agenti per simulare un sistema economico piuttosto semplice caratterizzato tuttavia da una molteplicità di equilibri. In questo ambiente gli agenti eterogenei sono suddivisi in due generazioni contraddistinte da un diverso livello di avversione al rischio. Le decisioni degli agenti sono guidate da una funzione di utilità e dalla capacità di formulare previsioni sull'andamento dei prezzi futuri. Le previsioni sono formulate applicando una regola diversa per ogni agente. Le regole possono essere modificate e possono evolversi da una serie di tentativi ed errori con l'introduzione di un algoritmo genetico. La capacità di apprendimento da parte degli agenti è introdotta, in questo caso, per eliminare l'ipotesi delle aspettative razionali degli individui e verificare come le caratteristiche del sistema siano differenti in presenza di agenti in grado di apprendere. Il mercato è formato da un bene e da una quantità di risorse monetarie costante. Il tempo è discreto. Nel modello ci sono N agenti suddivisi equamente in due generazioni. Gli agenti vivono per due periodi e possono risparmiare tra i periodi conservando la moneta corrente. Le decisioni sono formulate in base ad una funzione di utilità che prevede dei coefficienti di avversione al rischio relativi ad ogni generazione. Data la funzione di utilità è possibile determinare l'equilibrio stazionario del sistema, che corrisponde al punto in cui il livello dei prezzi è coerente con la massimizzazione dell'utilità da parte degli agenti.

L'equilibrio stazionario non è il solo tipo di equilibrio che è possibile individuare in un sistema economico reale: vi sono anche equilibri periodici o caotici. Un equilibrio periodico è composto da una serie di prezzi che soddisfano a due a due la condizione di equilibrio.

L'obiettivo del modello è di introdurre nella decisione di consumo una componente legata alla previsione del livello dei prezzi futuri. Questa è generata da un processo di apprendimento e non assegnata esogeneamente come capacità di formulare aspettative razionali.

L'algoritmo genetico è utilizzato, in questo caso, per rappresentare non solo la possibilità di trasmettere informazioni alle generazioni successive, ma anche per tradurre nella simulazione comportamenti reali imitativi o di apprendimento tra individui che operano nello stesso periodo. Le tecniche della riproduzione, *crossover*, mutazione ed elezione sono introdotte nel modello con questo scopo e permettono la generazione di nuovi individui a partire dalle caratteristiche di agenti esistenti e la modifica e sostituzione di regole di previsione inefficienti nel sistema in quel momento. La regola comportamentale alla base di questa selezione ed evoluzione delle regole, rimane comunque sempre la loro capacità di suggerire interventi sul mercato in grado di generare il maggior livello di utilità.

Gli autori hanno eseguito diversi esperimenti, osservando che la presenza di regole comportamentali adattive non garantisce il raggiungimento di un equilibrio stabile del sistema (in analogia con quanto è possibile osservare nella realtà). Piuttosto si osserva la capacità degli agenti di coordinazione nel raggiungimento di equilibri semplici e multipli. L'introduzione dell'apprendimento nel sistema è in grado di selezionare tra una molteplicità di situazioni quelle più coerenti con la realtà, ma allo stesso tempo non garantisce il raggiungimento di un unico equilibrio stazionario, né il fatto che nel tempo della simulazione si raggiunga una situazione di stabilità. Gli autori in particolare osservano un collegamento tra la capacità di coordinamento degli individui verso un equilibrio ed il valore del parametro che rappresenta l'avversione al rischio degli individui in età adulta: più il valore del parametro è elevato, meno facilmente il sistema è in grado di soddisfare la condizione di equilibrio.

La ricerca di una rappresentazione di un sistema complesso utilizzando la nozione di equilibrio appare, quindi, un'impresa piuttosto difficile. Le principali cause vanno ricercate nella molteplicità ed interrelazione dei comportamenti reali e da processi di imitazione o apprendimento, che caratterizzano gli agenti all'interno di sistemi sociali.

2.4.3 Apprendimento

Uno degli obiettivi principali nella costruzione di un modello ad agenti è quello di riprodurre comportamenti osservabili nella realtà. Gli agenti umani possiedono, infatti, molte caratteristiche che si discostano da quelle spesso ipotizzate in teoria. A fronte di un'illimitata capacità di calcolo e di un comportamento perfettamente razionale volto alla massimizzazione dell'utilità, si possono osservare comportamenti irrazionali o caratterizzati da razionalità limitata, dovuta alla mancata conoscenza di tutte le informazioni disponibili o a comportamenti influenzati da altri fattori completamente indipendenti dal raggiungimento di un massimo profitto. Inoltre gli agenti reali sono in grado di adattare le proprie scelte all'ambiente circostante. In una simulazione al computer, tale capacità può essere tradotta dotando gli agenti della possibilità di scelta tra un numero molto grande di strategie d'azione predefinite, oppure prevedendo una sorta di apprendimento in grado di adattare una strategia alle caratteristiche dell'ambiente esterno in evoluzione. In Arthur W.B. (1991) il processo di apprendimento consiste nell'utilizzare un *classifier system*, una semplice regola che individua le migliori strategie in ogni situazione secondo la logica causa ed effetto, assegnando una probabilità di scelta maggiore a quelle regole comportamentali che permettono di ottenere risultati migliori. Agendo quindi su determinati parametri che definiscono la capacità di interpretare le informazioni da parte degli agenti e la velocità di apprendimento, gli agenti sono dotati di una coerenza comportamentale. L'obiettivo nel condurre questo tipo di esperimenti è quindi quello di riprodurre comportamenti umani utilizzando agenti artificiali. Per questo motivo molti esperimenti condotti con agenti artificiali sono poi testati utilizzando l'ambiente artificiale così creato per far agire agenti reali e confrontare i risultati ottenuti per migliorare la veridicità del modello (Arthur W.B. 1991 e Duffy J. 2000), con nuove ipotesi o modificando il valore dei parametri esistenti.

Nello studio dei comportamenti sociali si incontra spesso il problema di come rappresentare il processo di trasmissione di certe caratteristiche comportamentali attraverso generazioni successive. In Bullard e Duffy (1998) è utilizzata la tecnica

degli algoritmi genetici per superare questo ostacolo, attraverso la produzione di un modello in cui gli agenti sono dotati di capacità di apprendimento nel corso della loro vita, ma anche la possibilità di trasmettere le nuove capacità alle generazioni successive. Il modello si sviluppa per un periodo di tempo che corrisponde ad un certo numero di generazioni. Le regole, inizialmente eterogenee per gli agenti presenti nel sistema, subiscono modifiche grazie ad un algoritmo genetico che seleziona le migliori e ne genera di più efficienti. Questa forma di apprendimento avviene nel corso delle generazioni, ma la particolarità del processo descritto dagli autori consiste nel fatto che le regole di generazioni successive sono formulate considerando i progressi ottenuti nelle generazioni precedenti.

Ogni individuo è identificato con una determinata regola che ne influenza le decisioni ma nel corso della propria vita può modificarne alcune caratteristiche. La nascita consiste nella creazione di un nuovo individuo attraverso il processo di riproduzione: sostituzione nel modello di un certo numero di agenti con altri generati dalla combinazione delle caratteristiche di due agenti. Il nuovo individuo è generato quindi dalla combinazione delle caratteristiche di due agenti già esistenti ed operanti nel modello, ed è rappresentato dalla regola che deriva da questa unione. Quest'ultima può essere modificata tramite un altro elemento dell'algoritmo genetico detto mutazione con la quale, mediante un processo stocastico, sono modificati i valori della stringa che rappresenta la regola in modo da ottenere nuove regole più efficienti rispetto a quelle utilizzate nelle generazioni precedenti. La scelta della regola da adottare passa anche attraverso un processo di selezione tra un certo numero di nuove o vecchie regole. Allo stadio successivo, l'agente passa ad una progressiva acquisizione di tecniche comportamentali più efficienti attraverso un processo di emulazione che coinvolge gli agenti nel corso della loro esistenza: ogni agente può comunicare con un altro presente nel modello e scegliere la regola tra le due che meglio si adatta alle caratteristiche del sistema in quel momento. Nella fattispecie le regole rappresentano la capacità degli agenti di prevedere l'andamento dei prezzi nei periodi successivi, utilizzando dati sui prezzi dei periodi precedenti, e fondare le proprie decisioni di consumo o investimento all'interno del sistema economico, sulla base di tali previsioni: con un processo di ottimizzazione delle risorse nel periodo di esistenza.

Questo modello di apprendimento ed imitazione è inserito in una struttura che prevede diversi scenari macroeconomici. In particolare gli autori dimostrano come da una popolazione di agenti eterogenei, in grado di evolversi ed apprendere, si sviluppano caratteristiche del sistema reale: il coordinamento degli agenti su livelli di bassa inflazione o lo sviluppo di periodi di auto condizionamento verso livelli di inflazione sempre più alti creando una forma di imitazione.

2.4.4 Gap informativo

Un possibile utilizzo dei modelli ad agenti è quello di sostituire all'approccio della teoria dei giochi alla spiegazione delle negoziazioni in presenza di informazione incompleta un modello che permetta di abbandonare la forte ipotesi della perfetta razionalità degli agenti, con un processo di apprendimento, basato su prove ed errori. Nel modello di Zott (1999) si può individuare il tentativo di spiegare l'inefficienza delle contrattazioni in presenza di informazione incompleta. In un sistema, si ha informazione completa quando tutti gli agenti sono in grado di ricevere ed interpretare i comportamenti degli altri agenti (in particolare conoscono

la funzione di utilità che ne determina le decisioni). Al contrario, gli agenti del modello sono solo in grado di osservare le azioni degli altri individui e tenere memoria delle proprie e degli effetti che queste causano sulla loro condizione. Il sistema è composto da un certo numero di datori e di fruitori di fondi alla ricerca di una controparte per la conclusione di un contratto, che soddisfa il loro desiderio di massimizzazione dell'utilità. Ogni agente ha un proprio set di regole che ne definiscono l'azione sulla base delle informazioni che riceve in *input* e ne definisce la validità grazie al valore di un parametro che ne indica la soddisfazione. L'esperimento si conclude nel momento in cui il sistema raggiunge un equilibrio in termini di conclusione di tutte le contrattazioni proposte. All'inizio dell'esperimento tutti gli agenti sono dotati di un proprio set di regole strutturate secondo lo schema di un *classifier system* (del tipo as-if, se si verificano determinate condizioni esiste una sola strategia d'azione da seguire), ma tutti gli agenti hanno lo stesso valore del parametro che ne identifica l'efficienza: questa condizione può essere paragonata ad una situazione di inesperienza degli agenti nel sistema. Nel corso dell'esperimento le regole possono essere modificate in base alla loro efficienza tramite un algoritmo genetico che prevede la possibilità dei procedimenti di riproduzione, mutazione e *crossover*.

La struttura sopra descritta è utilizzata per spiegare l'inefficienza degli scambi in presenza di informazione incompleta rispetto alla condizione di piena informazione, ma introducendo nel sistema degli agenti dotati di razionalità limitata. Infatti, gli agenti, grazie all'algoritmo genetico sono in grado di intraprendere un processo di apprendimento solo in conseguenza alla loro azione nel sistema che si concreta in tentativi che possono essere successi o possono portare a conseguenze negative. Questo procedimento si concilia con le caratteristiche comportamentali di agenti reali.

Le caratteristiche del sistema osservabili dall'esecuzione degli esperimenti sono una capacità degli agenti di raggiungere un livello di coordinamento molto inferiore in presenza di informazione privata che con completa informazione, in analogia con quanto prescritto dalla teoria dei giochi. Ma a differenza di quest'ultima le ragioni non sono legate alla qualità dell'informazione, ma alla difficoltà degli agenti di intraprendere un processo di apprendimento in presenza di informazione incompleta. Infatti, ciascun agente deve affrontare un lungo processo di tentativi ed errori prima di poter individuare la regola che gli permette di massimizzare la propria utilità. Di conseguenza, anche il sistema nel suo complesso non raggiunge in breve termine un equilibrio.

2.4.5 Decisioni di consumo e investimento

Nella teoria economica l'approccio standard nella costruzione di teorie comportamentali è quello di imporre degli assiomi alla funzione che definisce i comportamenti razionali degli agenti ed individuare delle teorie che soddisfano tali assiomi. Esempi di tale metodologia di studio sono la teoria del consumo, la teoria delle decisioni Bayesiana e la teoria dei giochi la cui ipotesi comune è una forma di massimizzazione implicita o esplicita. Tuttavia la definizione di comportamento razionale incontra diversi ostacoli quando si verificano fenomeni come equilibri multipli nel sistema. In Lensberg (1999) è introdotto un diverso approccio di studio delle decisioni di investimento, che sono definite non da regole fissate ex-ante, ma si trasformano in base alle modifiche dell'ambiente in cui gli agenti operano. Tale

evoluzione è possibile grazie alla programmazione genetica: un algoritmo genetico è un programma al computer in grado di generare da un certo set di regole iniziale, un sistema di regole comportamentali efficienti poiché in grado di produrre migliori risultati se applicate in un determinato sistema. Un algoritmo genetico testa la validità delle regole in un certo numero di situazioni possibili, dopodiché individua le regole che in tali situazioni producono risultati peggiori e le trasformano ricavando alcune caratteristiche da regole "migliori". In tal modo il sistema di regole comportamentali si modifica in base alle diverse caratteristiche dell'ambiente esterno, conferendo agli agenti una forma di razionalità.

Il modello di investimento proposto consiste in m agenti che operano in un numero di periodi illimitato. I beni presenti nel sistema economico sono due: impresa o lavoro: la scelta dell'acquisto di un'industria caratterizza l'agente imprenditore, mentre la seconda scelta definisce un lavoratore. Ogni agente offre un'unità di lavoro per periodo e preferisce una quantità maggiore di beni. All'inizio è presente nel sistema economico un certo numero di imprese che impiegano una determinata forza lavoro, e con questa sono in grado di produrre dei beni applicando due tipi di attività: una più rischiosa ed un'altra più sicura in termini di capacità produttiva. Il sistema economico è quindi formato da un certo numero di imprese che producono una quantità di beni e da una funzione di offerta di lavoro. Il numero di imprese si può modificare grazie ad un meccanismo di bancarotta (nel caso in cui la produzione dell'impresa sia pari a 0) con il quale l'imprenditore si trasforma in lavoratore. Nel sistema una funzione definisce la probabilità di successo per le imprese non disponibile alle stesse (nel sistema esiste quindi un rischio sistematico) ed è presente un set di informazioni disponibile per le decisioni di investimento (informazione simmetrica).

Il modello utilizza tale struttura per far interagire agenti le cui regole comportamentali si evolvono grazie ad un algoritmo genetico e dimostra che in questo modo è possibile ottenere un sistema di comportamenti razionali, pur evitando di ipotizzare la massimizzazione dell'utilità da parte degli agenti, in questo caso inapplicabile perché gli operatori non conoscono la funzione di probabilità di successo. Gli algoritmi genetici possono quindi essere utilizzati per studiare situazioni di incertezza: la teoria di investimento ne è un esempio, ma anche molti problemi nel campo della teoria dei giochi come ad esempio il caso di un sistema in cui esiste più di un equilibrio di Nash.

2.4.6 Reti neurali, algoritmi genetici e mercati finanziari

Anche lo studio dei mercati finanziari è un campo in cui le tecniche sopra descritte possono trovare vasta applicazione. Si può tuttavia individuare una distinzione tra le due tecniche informatiche. Le caratteristiche degli algoritmi genetici rendono più naturale la loro applicazione per la riproduzione dei comportamenti degli agenti: la loro capacità di adattamento, trasmissione delle caratteristiche attraverso le generazioni e reazioni all'ambiente esterno sono fondamentali per la simulazione di un sistema in evoluzione nel suo complesso. La loro applicazione sembra quindi più indicata per studiare le caratteristiche sociali del sistema. Le reti neurali artificiali, invece, sono maggiormente utilizzate come strumenti in grado di fornire previsioni su elementi più tecnici che riguardano il sistema: le strategie che gli agenti sviluppano tramite un processo di apprendimento o la capacità degli agenti di formulare previsioni o ancora più nello

specifico come strumento alternativo a modelli analitici o econometrici per formulare processi previsionali dell'andamento dei prezzi futuri di titoli, indici o beni.

Negli ultimi anni si è manifestato un crescente interesse per lo studio della prevedibilità dell'andamento dei prezzi sui mercati finanziari, soprattutto per quanto riguarda la produzione di modelli utilizzando differenti tecniche. Uno degli approcci che hanno tentato di aumentare l'abilità nella prevedibilità dei mercati finanziari è l'utilizzo delle RNA in grado di produrre delle previsioni di breve termine sull'andamento dei prezzi, senza la necessità di alcun modello econometrico di calcolo per rappresentare le serie di prezzi. In Fernandez et altri (2000) una rete neurale è utilizzata per simulare una strategia di investimento cosiddetta *technical trading rule*, e confrontare le serie di prezzi prodotte dall'esperimento con dati reali, ma soprattutto per verificare la maggiore validità del modello nel rappresentare la realtà, piuttosto che l'utilizzo di strategie passive *buy and hold*. Le serie di prezzi prodotte dal modello possiedono caratteristiche reali come periodi di tendenza al rialzo ai quali si susseguono periodi di relativa costanza o di riduzione. In tale ambiente si sottolinea la maggiore efficienza di strategie di scambio basate sulle previsioni fornite dalla rete neurale artificiale rispetto alla strategia *buy and hold* nelle fasi decrescenti e di stabilità, mentre maggiori profitti sono ottenuti con l'altra strategia nelle fasi di aumento dei prezzi.

L'obiettivo quindi dell'introduzione delle tecniche informatiche, in questo caso, è quello di riprodurre comportamenti adattivi e individuare le migliori strategie sulla base di processi di previsione degli andamenti futuri del mercato sulla base delle informazioni a disposizione. Un'analisi più approfondita dell'applicazione dei modelli ad agenti e delle tecniche informatiche sopra descritte, nel caso particolare di un mercato di Borsa, è sviluppata nel capitolo 4. Il capitolo seguente fornisce un'introduzione alle caratteristiche dei mercati finanziari ed in questo contesto come si possono manifestare le bolle speculative.

Capitolo 3

La Borsa ed un fenomeno particolare: le bolle speculative

3.1 Introduzione

Lo sviluppo di un modello di simulazione il cui scopo sia quello di riprodurre l'operatività degli agenti in un mercato finanziario rende necessaria la conoscenza di quali siano le caratteristiche fondamentali del sistema che si intende riprodurre.

Il sistema finanziario è l'insieme organizzato di mercati, intermediari e strumenti finanziari. Rappresenta la struttura attraverso cui, in un'economia moderna, si svolge l'attività finanziaria, cioè la produzione e l'offerta di servizi finanziari. In particolare i mercati finanziari sono mercati specializzati nella negoziazione di strumenti finanziari. Il funzionamento del sistema avviene in un contesto di regole e controlli.

La principale funzione di un sistema finanziario è quella di raccogliere fondi e renderli disponibili per investimenti nel settore produttivo dell'economia di un paese. Più precisamente l'attività di un mercato finanziario è definita dal trasferimento di risorse finanziarie. Il trasferimento di risorse è un concetto che riguarda l'intero sistema economico ed è la caratteristica che sposta l'attenzione da quelle che sono le componenti "fisiche" di un mercato finanziario al suo funzionamento. L'attività su un mercato finanziario è possibile solo grazie alla presenza di individui che vi operano: datori di fondi, prenditori di fondi ed intermediari, e delle regole che ne limitano il comportamento. Le regole sono per definizione delle accezioni particolari che devono essere soddisfatte. Sono quindi dotate di un certo rigore e staticità: la modifica di una regola può avere pesanti ripercussioni su un sistema largamente diffuso e che coinvolge milioni di individui (si pensi anche al complicato iter procedurale al quale deve sottostare una legge per essere modificata). Al contrario i comportamenti degli individui che operano nei limiti di quelle stesse regole possono essere differenti e condizionati da vari livelli di razionalità o interpretazione del mercato.

A rendere evidente la contrapposizione delle due caratteristiche di un sistema finanziario, il capitolo che segue è strutturato in due parti: la prima fornisce un'introduzione sulle caratteristiche della Borsa Italiana ed in particolare come il sistema di contrattazione sia organizzato al suo interno, con la descrizione delle varie fasi e delle regole che ne permettono il funzionamento; la seconda parte è invece dedicata ad una breve introduzione al fenomeno delle bolle speculative sui mercati

finanziari (come si sono manifestate nella storia e quali sono le componenti fondamentali del fenomeno).

3.2 La Borsa

La Borsa è un mercato organizzato sul quale si negoziano strumenti finanziari (azioni, obbligazioni, Titoli di Stato, strumenti derivati, titoli rappresentativi di merci, valute) ad un prezzo che nasce dall'incontro tra domanda ed offerta.

La principale funzione della Borsa consiste nel garantire un'efficiente allocazione delle risorse finanziarie dai datori di fondi (i risparmiatori) ai prenditori di fondi (società emittenti e Stato), concentrando gli scambi entro limiti spazio-temporali ristretti. In effetti la Borsa costituisce il luogo in cui si incrociano la domanda e l'offerta di capitale, attraverso la negoziazione in titoli.

La Borsa garantisce la negoziabilità degli strumenti finanziari, grazie alla trasparenza nelle modalità di formazione dei prezzi, alla rapidità delle transazioni e alla garanzia contro il rischio di insolvenza della controparte. Inoltre la presenza di operatori disposti a concludere in ogni momento transazioni di compravendita sui singoli strumenti finanziari, permette la liquidità del mercato.

L'andamento della Borsa è strettamente connesso allo sviluppo dell'economia del Paese di appartenenza: una crescita del mercato di Borsa rispecchia il rafforzamento delle imprese in esso quotate e quindi uno sviluppo economico; la presenza di un mercato al ribasso indica una crisi, di singoli settori o dell'intero sistema economico. Tuttavia diversi fattori influenzano l'andamento dei prezzi su un mercato borsistico. I prezzi infatti, riflettono un insieme di informazioni disponibili in un determinato istante ed un insieme di aspettative su andamenti futuri che influenzano le decisioni degli investitori. In un determinato istante, quindi può succedere che i prezzi non siano esattamente un indice dell'andamento dell'economia di un paese, bensì il riflesso delle scelte comportamentali degli investitori, che talvolta assumono andamenti irrazionali che si traducono nell'insorgenza di bolle speculative ed i successivi *crash*.

3.2.1 Il sistema telematico di contrattazione

Tradizionalmente la contrattazione di borsa era una contrattazione "alle grida": gli operatori autorizzati ammessi nel recinto della borsa valori presentavano gli ordini di domanda ed offerta attraverso un complesso linguaggio di segni. Ogni transazione, per essere valida, doveva comunque essere registrata per iscritto (Borsa Italiana S.p.A.).

Oggi questi mercati fisici sono stati in gran parte sostituiti dai mercati telematici, caratterizzati da un circuito elettronico sul quale viaggiano tutte le informazioni necessarie ad effettuare lo scambio e che consente di eseguire e concludere le contrattazioni in tempo reale. In Italia, presso la Borsa Italiana S.p.A., il sistema telematico di contrattazione è stato istituito il 25 novembre 1991, solo per alcuni strumenti finanziari ed è stato esteso, nel 1996 a tutti gli strumenti finanziari quotati. Grazie a tale sistema tutti gli operatori possono accedere sul mercato alle stesse condizioni e dispongono, in tempo reale, di tutte le informazioni necessarie all'operatività. Il sistema telematico assolve alle seguenti funzioni:

1. diffusione tra gli operatori delle proposte di negoziazione, conclusione automatica dei contratti e diffusione delle informazioni sui contratti conclusi;
2. diffusione al pubblico degli investitori di informazioni sull'andamento del mercato;
3. informazioni alla CONSOB sulle proposte immesse e sui contratti conclusi;
4. elaborazione ed archiviazione dei dati relativi ai contratti conclusi;
5. riscontro e rettifica dei dati inerenti ai contratti conclusi ed invio degli stessi al sistema di compensazione e liquidazione.

Il sistema telematico di negoziazione è composto da quattro architetture informatiche, ciascuna dedicata a diversi segmenti del mercato di Borsa, costituite da un'unità centrale, una rete di trasmissione dati e da terminali, che realizzano il collegamento tra tutti gli operatori del mercato.

3.2.2 Il *book*

Il sistema telematico visualizza le proposte di negoziazione di ogni strumento finanziario all'interno di un *book* che compare sui terminali degli operatori autorizzati alla negoziazione e che consiste in una sequenza di pagine video (una per ogni strumento negoziato). Le proposte immesse nel *book*, sono separate tra proposte di acquisto e vendita e sono ordinate in base al prezzo (decrecente se in acquisto e crescente se in vendita) e, a parità di prezzo, in base all'orario di immissione della proposta.

Il *book* riporta, per tutte le proposte di acquisto e di vendita, l'indicazione degli operatori proponenti, il codice dello strumento da trattare, le modalità di esecuzione delle proposte: quantità, tempo e condizioni di prezzo. Il *book* viene aggiornato automaticamente durante l'immissione, la modifica o la cancellazione delle proposte. Se una proposta già inserita subisce una modifica (aumento di quantità o variazione di prezzo), perde la priorità temporale acquisita.

Le proposte possono essere immesse nel *book* con diverse modalità d'esecuzione in base alle condizioni di prezzo, quantità e tempo. Si possono quindi distinguere le modalità di esecuzione rispetto al prezzo:

- *proposte con limite di prezzo*: si tratta di proposte correlate ad un prezzo limite che costituisce il prezzo massimo di acquisto o il prezzo minimo di vendita;
- *proposte senza limite di prezzo*: sono eseguibili al miglior prezzo offerto da una controparte; sono dette proposte al prezzo di apertura, se inserite nella fase di pre-apertura, e proposte al prezzo di mercato, se inserite durante la negoziazione continua. Rispetto alle proposte con limite di prezzo hanno maggiore probabilità di essere eseguite. Le proposte senza limite di prezzo verranno immediatamente eseguite se troveranno una controparte con stessa quantità, oppure verranno eseguite in parte al miglior prezzo e per la quantità rimanente inserite nel *book* come proposte con limite di prezzo pari a quello della parte della proposta già conclusa;
- *“esponi al raggiungimento del prezzo specificato”*: la proposta viene visualizzata solo quando si raggiunge il prezzo indicato;

- “*esegui comunque*” (“ordine al meglio”): i contratti si concludono automaticamente ai prezzi delle proposte di segno contrario più convenienti.

Modalità di esecuzione rispetto alla quantità:

- “*esegui o cancella*”: la proposta è eseguita per la quantità disponibile e l’eventuale parte rimanente viene cancellata;
- “*esegui quantità minima specificata*”: la proposta è eseguita, anche parzialmente per la quantità minima specificata; se tale quantità non è disponibile sul mercato, la proposta viene cancellata;
- “*tutto o niente*”: la proposta viene eseguita per l’intera quantità al prezzo indicato o viene cancellata automaticamente.

Modalità di esecuzione rispetto al tempo:

- “*valida fino alla cancellazione*”: la quantità ineseguita di una proposta rimane nel *book* fino al termine della seduta, quando viene cancellata;
- “*valida fino alla data specificata*”;
- “*valida fino all’orario specificato*”;
- “*valida solo in asta di chiusura*”;

Le proposte di acquisto e di vendita tra loro compatibili per prezzo e quantità sono automaticamente abbinata dal sistema telematico e concluse (*matching automatico*). Una proposta con limite di prezzo (*limit orders*) in acquisto è abbinata con una o più proposte di vendita aventi prezzo inferiore o uguale a quello della proposta immessa, mentre una proposta in vendita viene abbinata con una o più proposte con prezzo maggiore o uguale. Una proposta senza limite di prezzo (*market orders*) è abbinata con una o più proposte aventi prezzo uguale al miglior prezzo relativo all’operazione opposta esistente al momento dell’immissione. L’immissione di proposte senza limite di prezzo può essere effettuata solo in presenza di almeno una proposta di negoziazione di segno contrario con limite di prezzo. Il prezzo di conclusione del contratto è pari a quello della proposta con priorità temporale superiore.

3.2.3 Modalità e fasi di negoziazione

Le negoziazioni si possono svolgere secondo le modalità di asta e di negoziazione continua. Il sistema di negoziazione adottato nei mercati borsistici italiani si suddivide in tre fasi:

Asta di apertura

L’asta di apertura consiste in un mercato a chiamata elettronico. In un primo momento le proposte di negoziazione si accumulano ed interagiscono. In un secondo momento segue la determinazione di un unico prezzo (prezzo teorico d’apertura) a cui sono concluse tutte le proposte compatibili. L’asta di apertura è a sua volta suddivisa nelle fasi:

1. “*pre-asta*”: in questa fase viene determinato e aggiornato in tempo reale il prezzo teorico di apertura di ogni titolo; gli operatori autorizzati possono immettere proposte di negoziazione e modificare o cancellare proposte immesse precedentemente; le proposte possono essere immesse con limite di

prezzo, o senza limite di prezzo (queste ultime assumono dinamicamente il prezzo al quale avrebbero maggiori probabilità di essere eseguite). La durata della fase di pre-apertura può essere prolungata dall'organo di controllo, per l'intero mercato o per singoli strumenti, in corrispondenza di particolari condizioni del mercato;

2. “*validazione*”: il sistema telematico verifica la validità del prezzo teorico di apertura determinato al termine della fase precedente; se il prezzo è valido, viene assunto come prezzo di apertura per la conclusione dei contratti; se un prezzo di apertura di un titolo non supera la fase di validazione, si prolunga la fase di pre-asta per un intervallo di tempo stabilito dalla Borsa Italiana S.p.A.. Se non si riesce a determinare il prezzo teorico di apertura, al termine della fase di validazione si attiva la negoziazione continua per le sole proposte intere, mentre le spezzature sono automaticamente cancellate o trasferite alla fase di pre-asta della seduta successiva, a seconda della modalità di esecuzione della proposta. A differenza delle fasi di pre-apertura, apertura e negoziazione continua, in questa fase non è possibile immettere, modificare, o cancellare le proposte di negoziazione;

3. “*apertura*”: tutti gli ordini di acquisto e vendita presenti al termine della fase di pre-asta di apertura, che risultano tra loro abbinabili e che hanno superato la fase di validazione sono eseguiti al prezzo di apertura. Le proposte in acquisto con prezzi uguali o superiori al prezzo di apertura sono abbinata con le proposte in vendita con prezzi uguali o inferiori al prezzo di apertura, secondo le priorità di prezzo e di tempo delle proposte e fino ad esaurimento delle quantità disponibili. Tutte le altre proposte, le cui condizioni non consentono la conclusione dei contratti, passano automaticamente alla fase di negoziazione continua, come proposte con limite di prezzo secondo le seguenti modalità: le proposte con limite di prezzo, passano alla negoziazione continua con il prezzo e la priorità temporale della proposta originaria, mentre quelle al prezzo di apertura passano alla fase successiva con il prezzo di apertura e la priorità della proposta originaria. Le spezzature che si originano nel MTA sono cancellate o trasferite alla fase di pre-apertura della seduta successiva, a seconda della modalità di esecuzione indicata.

Negoziazione continua

Durante la negoziazione continua la conclusione dei contratti avviene, per le quantità disponibili, mediante abbinamento automatico delle proposte di segno contrario presenti nel mercato ed ordinate secondo criteri di priorità che mirano a concludere le singole contrattazioni alle condizioni (di prezzo) più favorevoli. Se durante la contrattazione continua di uno strumento finanziario il prezzo del contratto in corso di conclusione supera uno dei limiti di variazione dei prezzi stabiliti dalla Borsa Italiana S.p.A.⁷ (Regolamento dei Mercati organizzati e gestiti dalla Borsa Italiana S.p.A., Art. 4.1.14), la negoziazione continua dello strumento

⁷ I limiti di variazione dei prezzi sono mirati ad assicurare l'ordinato svolgimento delle contrattazioni e ad evitare il verificarsi di eccessivi sbalzi nelle quotazioni. Tali limiti si riferiscono:

- Alla massima variazione del prezzo dei contratti rispetto al prezzo di controllo: +/-10%;
- Alla massima variazione di prezzo fra due contratti consecutivi: +/- 5%

Il superamento di tali limiti dà luogo alla sospensione delle contrattazioni del titolo per 5 minuti, ma può anche essere protratta ripetutamente fino al termine della situazione nel *book* che genera la sospensione.

finanziario viene sospesa per un intervallo di tempo, durante il quale gli ordini non possono essere modificati, per poi riprendere la fase di contrattazione continua.

Asta di chiusura

Consiste in una modalità di negoziazione che prevede l'immissione, la modifica e la cancellazione di proposte di negoziazione in un determinato intervallo di tempo (pre-asta), al fine della conclusione dei contratti in un unico momento futuro (chiusura) e ad un unico prezzo (prezzo di chiusura). Come l'asta di apertura, anche l'asta di chiusura è suddivisa in tre fasi:

1. *"pre-asta"*: in questa fase viene determinato e aggiornato in tempo reale il prezzo teorico d'asta di ogni titolo; gli operatori autorizzati possono immettere proposte di negoziazione e modificare o cancellare proposte immesse precedentemente; le proposte possono essere immesse con limite di prezzo, o senza limite di prezzo (queste ultime assumono dinamicamente il prezzo al quale avrebbero maggiori probabilità di essere eseguite);
2. *"validazione"*: il sistema telematico verifica la validità del prezzo teorico d'asta di chiusura determinato al termine della fase precedente; se il prezzo è valido, viene assunto come prezzo d'asta per la conclusione dei contratti. Qualora non sia stato possibile determinare il prezzo teorico d'asta o se questo non sia stato validato, le proposte di negoziazione recanti la modalità "valida sino alla data specificata" sono trasferite automaticamente alla fase di pre-asta di apertura del giorno successivo;
3. *"chiusura"*: tutti gli ordini di acquisto e vendita presenti al termine della fase di pre-asta, che risultano tra loro abbinabili e che hanno superato la fase di validazione, sono eseguiti al prezzo di chiusura. Le proposte in acquisto con prezzi uguali o superiori al prezzo di chiusura sono abbinate con le proposte in vendita con prezzi uguali o inferiori al prezzo di chiusura, secondo le priorità di prezzo e di tempo delle proposte e fino ad esaurimento delle quantità disponibili. Al termine dell'asta di chiusura le proposte ineseuite in tutto o in parte, se immesse con modalità "valida sino a data specificata" sono automaticamente trasferite alla fase di pre-asta di apertura del giorno successivo.

Durante le fasi di pre-asta, viene calcolato e aggiornato in tempo reale, a titolo informativo, il prezzo teorico d'asta secondo le seguenti regole (Art.4.1.7, Regolamento dei Mercati organizzati e gestiti dalla Borsa Italiana S.p.A.):

- il prezzo teorico d'asta è il prezzo al quale è negoziabile il maggiore quantitativo di strumenti finanziari.

Per poter individuare il prezzo che riesce a soddisfare, per ogni titolo, la maggiore quantità negoziabile, occorre:

- calcolare, per ogni prezzo individuato dalle proposte a prezzo limitato, la quantità complessiva in acquisto e in vendita;
- calcolare la quantità negoziabile in corrispondenza di ognuno di tali prezzi (la minore tra le quantità di acquisto e di vendita);
- rilevare la quantità maggiore fra tutte.

Nel caso in cui la stessa quantità sia negoziabile a due prezzi:

- il prezzo teorico d'asta è quello che produce il minor quantitativo non negoziabile relativamente alle proposte in acquisto o in vendita, aventi prezzi uguali o migliori rispetto al prezzo considerato.

Questa regola consente di individuare quel prezzo che, oltre a consentire la negoziazione della maggior quantità possibile, produce il minor sbilancio tra acquisti e vendite (minore differenza tra quantità in acquisto e in vendita).

Qualora rispetto a più prezzi risulti uguale anche il quantitativo di strumenti non negoziati:

- il prezzo teorico d'asta è pari a quello che risulta più prossimo a quello di controllo (nel caso vi siano solo proposte senza limite di prezzo, il prezzo di apertura è pari a quello di controllo).

Qualora due prezzi risultino equidistanti dal prezzo di controllo:

- il prezzo teorico d'asta è pari al maggiore fra i due prezzi equidistanti.

Durante le fasi di “validazione” il sistema effettua, per ogni valore mobiliare, una verifica del prezzo teorico d'asta. In particolare il prezzo determinato si ritiene valido se non si discosta di più del 10% dal prezzo di riferimento (per l'asta di apertura) o del prezzo di controllo (per l'asta di chiusura). Lo scopo della validazione è dunque quello di verificare l'esistenza di una certa continuità con l'andamento delle quotazioni del giorno precedente (nella fase di validazione dell'asta di apertura) o con le quotazioni della giornata (nella validazione in asta di chiusura).

3.3 Le bolle speculative

Le bolle speculative nei mercati, non solo finanziari, sono caratterizzate da una fase di forte aumento dei prezzi senza che i fondamentali economico-finanziari sottostanti abbiano avuto un tale miglioramento. Successivamente si assiste, in genere, ad una brusca correzione al ribasso che può nei casi sfavorevoli riportare i prezzi al valore di partenza, se non addirittura su valori inferiori. Gli esempi nella storia sono moltissimi: la mania dei tulipani in Olanda nel XVII secolo, il crack borsistico del 1929, l'uscita della lira dal sistema monetario nel 1992, il crollo dei mercati azionari asiatici nel 1998. I testi a disposizione sulle manie speculative degli ultimi secoli sono ormai molto numerosi a conferma che il fenomeno è oggetto di attenzione da parte degli studiosi e degli investitori. Capire quali siano i fattori comuni che caratterizzano le bolle speculative è importante per cercare di capirne le cause legate alle caratteristiche dei mercati finanziari e quindi come i prezzi siano influenzati su questi mercati.

3.3.1 Come si manifestano le bolle speculative

Le bolle speculative, nella maggior parte dei casi, iniziano per un valido motivo economico che fa sì che i prezzi aumentino in modo graduale. Infatti il valore di un'azione non è mai allineato con il suo valore fondamentale (che corrisponde al valore attuale dei dividendi attesi), ma subisce delle fasi di sopravvalutazione o sottovalutazione. Queste fasi sono dovute a comportamenti razionali degli investitori: un investitore è disposto a pagare un prezzo alto per un titolo se si aspetta che il suo prezzo subisca ancora un rialzo in futuro, oppure è disposto a tenere un titolo che si sta svalutando in attesa di un futuro rialzo. Queste caratteristiche sono pienamente giustificate dalla teoria economica grazie

all'introduzione delle aspettative. Con il passare del tempo, si aggiunge una componente speculativa basata sul fatto che gli investitori acquistano esclusivamente basandosi sull'aspettativa che il prezzo aumenterà, senza preoccuparsi di quali siano i fondamentali economici. In questo caso l'andamento dei prezzi non riflette la situazione economica, ma è condizionata da comportamenti irrazionali: è sufficiente che il prezzo di un titolo nel periodo precedente abbia assunto un andamento crescente per far aumentare ulteriormente le sue quotazioni. Nella fase dell'euforia, spesso gli intermediari facilitano l'accesso al credito rendendo possibili speculazioni per importi superiori al capitale a disposizione. Così facendo si utilizza la leva finanziaria, che amplifica l'effetto delle oscillazioni dei prezzi sul capitale investito: quando i corsi sono favorevoli si guadagna molto, quando i prezzi calano le perdite sono consistenti. Ad un determinato istante, gli operatori percepiscono che la situazione è insostenibile e che i prezzi non potranno continuare a crescere all'infinito con questa forza: il cambiamento di direzione è spesso molto intenso anche se prima di assistere al crollo si verificano un po' di rimbalzi (tecnici) al rialzo, dovuti a coloro che entrano all'ultimo momento oppure agenti che intervengono per mediare le posizioni al ribasso oppure perché credono che si tratti solo di una fase di assestamento nella tendenza al rialzo. Ma a questo punto le ragioni economiche che hanno fatto iniziare il ciclo non esistono più ed è difficile capire quando si verificherà il punto di svolta in quanto i prezzi nei mercati sono generati dalla combinazione di motivazioni economiche e di comportamenti irrazionali. Questo comporta delle oscillazioni dei prezzi nel lungo periodo che possono risultare inspiegabili per chi effettua le valutazioni della congruità dei prezzi dei titoli basandosi sui modelli economico-finanziari classici. Una volta che la discesa dei prezzi è iniziata questa può concludersi solo con la chiusura del mercato (soluzione irrealistica in un mercato finanziario perfettamente integrato come quello mondiale), con l'intervento di organismi istituzionali (la Banca centrale, il Fondo Monetario) oppure quando i prezzi sono diminuiti talmente tanto, che sono tornati ad essere convenienti dal punto di vista economico, ponendo i presupposti per una eventuale crescita. La terza ipotesi si verifica nella maggior parte dei casi.

Ci sono due tipi di speculatori che partecipano alla crescita di una bolla. Da una parte ci sono gli investitori che, per qualche ragione, pensano che i prezzi raggiungeranno alti livelli nei periodi successivi per poi rimanere tali successivamente. Ma la presenza di questo tipo di investitori non è sufficiente a generare il fenomeno di forte crescita dei prezzi. Infatti a fronte di una domanda di titoli a prezzi sempre più alti, è necessario che vi sia un'offerta agli stessi livelli. Questa deriva da un secondo gruppo di investitori che mettono in pratica frequenti proposte di acquisto e vendita in modo da raggiungere immediati guadagni. Gli stessi investitori sono poi disposti ad acquistare i titoli a prezzi più alti, generando, in questo modo, un fenomeno indipendente di sviluppo della bolla. Il comportamento degli investitori a questo punto non segue più un indirizzo dettato dalla razionalità, ma semplicemente dalla ricerca del profitto e dall'imitazione del comportamento di altri investitori.

3.3.2 Cenni storici

Le bolle speculative hanno condizionato la storia di vari paesi in molti periodi storici, manifestando l'importanza dell'andamento dei mercati finanziari sulla storia

e l'economia di un paese. L'andamento dei prezzi sui mercati finanziari condiziona infatti le decisioni di investimento da parte delle imprese in quanto definiscono il prezzo al quale queste possono emettere azioni e di conseguenza intraprendere attività espansive. Inoltre il livello dei prezzi influenza anche le decisioni di consumo e risparmio. I mercati finanziari costituiscono un sistema che si diffonde a livello mondiale; di conseguenza un fenomeno che si manifesta in un certo paese ha necessariamente ripercussioni sul resto del mercato mondiale. Molti dei fenomeni storici più famosi, sono ambientati, se non all'origine di periodi in cui l'economia manifesta congiunture sfavorevoli. Tra questi si possono citare l'Ottobre nero del 1929, quando il mercato azionario statunitense scese del 23% in due giorni, da molti studiosi indicato come uno dei fattori della Grande depressione oppure il declino dell'indice azionario Nikkey dopo l'ascesa iniziale dovuta probabilmente ad una bolla speculativa, che è una delle cause della recessione giapponese dei primi anni Novanta.

La mania dei tulipani in Olanda

Uno degli episodi più famosi di bolla speculativa è la cosiddetta mania dei tulipani che si sviluppò in Olanda tra il 1634 ed il 1637. Nonostante i tulipani fossero stati importati in Olanda prima del 1600, fu di particolare importanza per il fenomeno la ricerca di una conferma sociale e la ricerca scientifica (in questo caso nel campo della botanica). Il fenomeno infatti è iniziato per la ricerca di specie sempre più rare da esibire a conferma di una certa posizione sociale. A questo scopo iniziarono a sorgere diversi innesti e specie differenti, alcune delle quali composte da pochi esemplari per i quali le classi più agiate erano disposte a pagare prezzi sempre più alti. Dopo questa prima fase, nel 1634, il prezzo dei bulbi dei tulipani più rari iniziò a salire per il semplice fatto che ci si aspettava un loro futuro aumento (in poco tempo il prezzo di un particolare tipo di bulbo, affetto da un virus che non ne causava la morte ma una varietà cromatica dei petali, aveva raggiunto il valore di una casa). A partire dal 1637 anche il prezzo dei bulbi più comuni iniziò a salire. Tutti gli investitori erano convinti del facile guadagno che si poteva ottenere acquistando tulipani ed ogni avvertimento riguardo l'irrazionalità del livello dei prezzi era inutile. Nel febbraio del 1637 però i prezzi raggiunsero livelli insostenibili e crollarono determinando un periodo di crisi economica su tutto il paese.

Il fenomeno fu comunque possibile per la presenza di un fiorente mercato finanziario nel quale furono inseriti degli strumenti finanziari, simili alle opzioni odierne che contribuirono alla diffusione dei comportamenti speculativi. Anche le condizioni economiche del paese erano favorevoli: una moneta forte, una nuova economia con nuove possibilità dalle conquiste coloniali e quindi un paese in crescita e prospero. A questo si aggiunse anche un sistema di accesso al credito piuttosto efficiente in grado di garantire i mezzi per le operazioni finanziarie. Il fenomeno delle bolle ha quindi una componente legata ai comportamenti degli investitori, ma è fortemente condizionata dalle caratteristiche del sistema in cui questi agiscono.

Il caso della MMM in Russia

Un altro esempio di bolla speculativa è quella che coinvolge i titoli di una sola industria o società. Nella storia sono molti gli esempi di società i cui titoli sono stati oggetto di forte rialzi, pur non presentando sufficienti giustificazioni

economiche. Un esempio possono essere la South Sea Company, fondata in Inghilterra nel 1720 con lo scopo di pagare i debiti di guerra del Governo inglese, con un interesse piuttosto alto e con la promessa di monopolio di commercio su nuovi mercati sorgenti dalle conquiste coloniali. Le aspettative di guadagno erano piuttosto promettenti ed in poco tempo il prezzo dei titoli salì a livelli di molto superiori al loro valore iniziale. Nello stesso periodo furono create diverse società dalle attività piuttosto stravaganti, ma per le quali era sufficiente l'aspettativa di un forte sviluppo o promesse allettanti per generare lo stesso fenomeno.

Più di recente, nel 1994, un sedicente finanziere russo ha costituito una società chiamata MMM ed ha iniziato a venderne le azioni, promettendo un tasso di rendimento del 3000% all'anno. La società ebbe un immediato successo raggiungendo in breve tempo 10 milioni di azionisti che possedevano azioni con un valore di mercato in forte crescita. Ma le azioni possedute in realtà non avevano alcun valore intrinseco in quanto la società non aveva alcuna attività operativa. In un primo tempo i rendimenti promessi vennero pagati utilizzando il capitale portato dai nuovi investitori, ma nel momento in cui la società non fu più in grado di mantenere le promesse, l'intero sistema economico, già gravato da una recessione entrò in crisi, come anche il sistema politico, per il mancato sostegno del Governo agli azionisti coinvolti.

L'America negli anni Venti

Intorno al 1920 si sviluppò la mania dell'acquisto di terreni e tenute in Florida. Favoriti dal particolare clima di euforia bancaria, molte industrie e privati ottennero prestiti a tassi molto bassi e con capitale iniziale esiguo. In poco tempo il costo delle terre della Florida raggiunse livelli levati e fu oggetto di un'intensa attività speculativa. A concludere il boom fu interrotto in modo prematuro da un uragano che distrusse buona parte delle proprietà e del territorio, ponendo fine alle aspettative di crescita ed interrompendo immediatamente la crescita dei prezzi. La Florida fu comunque presto dimenticata di fronte alla crisi che coinvolse i mercati americani tra il 1926 ed il 1929. La crisi borsistica del 1929 in America fu causata dalla particolare euforia per tutto ciò che riguardava il *business*. Elevati profitti delle imprese ed un clima politico favorevole all'attività imprenditoriale, contribuirono al boom economico che ebbe come principale conseguenza la sopravvalutazione dei corsi azionari. L'euforia si concluse nell'Ottobre del 1929 quando, nel corso di pochi giorni molti titoli azionari ebbero un forte crollo.

Le nuove tecnologie

La ricerca di profitti sempre più alti (alla base dell'attività speculativa) ha poco a che vedere con i comportamenti razionali, per definizione condizionati dalla valutazione delle situazioni con i relativi rischi e vantaggi. La memoria dei grandi crash storici sembra quindi avere breve durata. A dimostrazione di ciò si possono citare i grandi boom che hanno coinvolto tutte le attività innovative negli ultimi decenni. Un esempio può essere il forte aumento di valore di tutte quelle società il cui nome o attività richiamavano il concetto di tecnologia negli anni Sessanta oppure il boom di alcune società che fondavano la loro attività sulla diffusione di Internet come un nuovo modo di pensare al commercio negli anni Novanta.

Una caratteristica comune quindi dello sviluppo delle bolle speculative è senza dubbio l'obiettivo di ottenere profitti sempre più alti. Questo porta l'individuo al

centro della discussione soprattutto come componente fondamentale della società ed autore di fenomeni come l'imitazione e l'alimentazione di aspettative ottimistiche alla base dei fenomeni oggetto del presente capitolo.

3.3.3 Bolle speculative e teoria economica

La teoria standard neoclassica preclude l'esistenza delle bolle. Tutti gli agenti in tali modelli sono ipotizzati razionali e l'ipotesi di un mercato efficiente implica l'assenza di bolle. La realtà dimostra invece che fenomeni come le bolle ed i *crash* esistono. La presenza di agenti con razionalità limitata sui mercati reali viene superata con l'ipotesi dell'esistenza di un numero sufficientemente alto di agenti arbitraggisti con buona informazione sul mercato in grado di contrastare gli effetti della razionalità limitata.

Al contrario Abreu e Brunnermeier (2003) hanno prodotto un modello che dimostra la persistenza delle bolle, nonostante la presenza di agenti arbitraggisti perfettamente razionali con piena informazione ed accesso al finanziamento. Le ragioni che portano all'annullamento dell'ipotesi sono legate alla presenza sul mercato di agenti abitudinari e la mancanza di coordinamento degli agenti arbitraggisti nel valutare l'istante in cui i prezzi iniziano la caduta. Il modello analitico proposto cerca di riprodurre le caratteristiche dei prezzi, attraverso formule. L'attenzione si concentra nell'individuare il momento in cui la bolla cessa di esistere legato ai comportamenti degli investitori sul mercato. Nel modello sono previsti due tipi di investitori: gli arbitraggisti e gli agenti *behavioural*. Se per quanto riguarda gli agenti arbitraggisti sono dettagliatamente definite le caratteristiche comportamentali, l'altro tipo di agenti sembra introdotto per giustificare in qualche modo l'insorgenza della bolla e per creare una controparte per le strategie di investimento degli arbitraggisti nel corso del suo sviluppo. Infatti il momento in cui si verifica la bolla è considerato un fenomeno esogeno che si verifica nel momento in cui, per opera degli agenti del secondo tipo, il valore del titolo si discosta dal suo valore fondamentale. Gli agenti arbitraggisti sono in grado di percepire questo cambiamento solo un certo numero di istanti più tardi e non sanno se gli altri investitori sono già arrivati alla stessa conclusione. Questa mancanza di coordinazione conferisce una discontinuità nell'andamento dei prezzi e può conferire al modello una componente di incertezza riguardo la durata della bolla.

Dal momento in cui i prezzi si discostano dal valore fondamentale, la bolla si sviluppa solo quando un numero sufficientemente alto di agenti arbitraggisti ne acquisiscono la consapevolezza. Tale mancanza di sincronia comporta anche differenti valutazioni degli agenti riguardo il momento di abbandonare il mercato. Grazie all'introduzione di una componente stocastica, quindi, il modello è in grado di generare endogeneamente il *crash*. In presenza infatti di perfetto coordinamento di comportamento degli agenti arbitraggisti, la bolla si potrebbe sviluppare all'infinito o dovrebbe essere interrotta in maniera esogena. Gli autori individuano quindi nella mancanza di coordinazione un elemento importante per tradurre i comportamenti eterogenei osservati sui mercati reali.

Il modello analitico proposto può spiegare una particolare caratteristica del fenomeno delle bolle, ma l'ipotesi secondo la quale queste si generano risulta a mio parere piuttosto restrittiva. Seppure nel modello vengano introdotti

comportamenti differenti, tutti sono caratterizzati dalla stessa metodologia comportamentali, dallo stesso accesso al credito ed alle informazioni provenienti dal mercato. L'eterogeneità è introdotta nel modello utilizzando una scala temporale d'azione differente per gli investitori. I risultati ottenuti sono coerenti con i dati osservabili in realtà, ma forniscono scarse indicazioni sulle cause dell'andamento dei prezzi legate alle caratteristiche degli elementi che li determinano.

Sempre restando nel settore dei modelli analitici sono diversi gli esempi di studi che cercano di ricondurre il fenomeno delle bolle ed i conseguenti *crash* al raggiungimento di un punto critico del sistema. La teoria dei punti critici presenta diverse analogie con la spiegazione dei fenomeni fisici e si traduce nel sostenere che si verifica un cambiamento di tendenza dell'andamento dei prezzi nel momento in cui un certo andamento ha raggiunto il livello massimo in termini di sostenibilità in conformità con le caratteristiche delle componenti del sistema. In questo modo è possibile tradurre con formule l'andamento dei prezzi nel sistema ed ottenere una sorta di prevedibilità dell'istante in cui questo raggiunge il punto critico.

Un elemento sul quale molti studiosi concordano è che fenomeni come le bolle ed i *crash* hanno una forte matrice emozionale e quindi sono strettamente collegati alla componente sociale del sistema finanziario: gli individui.

Alcuni studiosi individuano la condizione in cui si verifica una bolla o un *crash* o comunque una situazione di forte variazione dei prezzi come il raggiungimento di un'uniformità comportamentale degli agenti nel sistema, al contrario di altre teorie che classificano questi fenomeni come "anomali" e quindi dominati dal caos in contrapposizione a periodi di stabilità⁸.

Nel suo modello Kaizoji (2000) cerca di spiegare quali siano le caratteristiche degli individui che operano su un mercato finanziario che possono determinare un particolare andamento dei prezzi. L'approccio utilizzato è quello del modello ad agenti. Nel modello ci sono N investitori, ciascuno identificato con un indice. Ogni investitore può essere sia acquirente che venditore nel corso della simulazione. I cambiamenti di prezzo sono soggetti alle leggi di mercato: il prezzo sale se si verifica un eccesso di domanda e scende nel caso contrario. In un altro modo si può dire che il prezzo sale quando ci sono troppi acquirenti per il titolo. In tale prospettiva, si possono collegare le decisioni di investimento degli agenti sulla base di ciò che questi sono in grado di prevedere sul comportamento degli altri individui sul mercato. Nel modello la decisione dell'agente è anche condizionata dalle caratteristiche dell'ambiente: con ambiente si intende un valore numerico ottenuto dal surplus di valore acquisito da un titolo rispetto al fondamentale sottostante a cui è sottratto il valore del tasso di interesse di mercato che rappresenta l'investimento alternativo al titolo scambiato sul mercato. Se l'ambiente ha valore positivo, allora l'investitore è propenso ad acquistare. Tuttavia la scelta dell'investitore si ottiene utilizzando una formula matematica che esegue una somma ponderata tra il valore dell'ambiente ed il valore che viene attribuito alla scelta effettuata da un altro investitore che ha operato sul mercato. I volumi

⁸ Un'analisi più dettagliata di alcuni modelli di questo tipo è fornita alla fine del Capitolo 6 nella parte dedicata alla discussione sulla prevedibilità delle bolle speculative.

oggetto di scambio dipendono quindi dall'attitudine degli investitori ed il prezzo di mercato del titolo viene definito da un *market maker* sulla base delle proposte di acquisto e di vendita.

Con questo modello l'autore sperimenta diversi scenari possibili. L'equilibrio del mercato si manifesta quando il numero di acquirenti corrisponde al numero di venditori dello stesso titolo. Al di là di questa condizione vi sono comunque delle fasi di transizione che permettono meglio di osservare ed individuare la dinamica del mercato. L'autore cerca di rappresentare le decisioni di scelta degli investitori con una formula analitica, i cui parametri possono subire modifiche nel trascorrere di un tempo discreto. In questo modo individua i valori dei parametri in grado di rappresentare situazioni di forte crescita o calo dei prezzi. Sulla base dei dati raccolti nel periodo del *boom* dei mercati giapponesi tra il 1987 e 1992, l'autore dimostra l'attinenza del modello creato sia per quanto riguarda l'andamento dei prezzi, che la teoria comportamentale degli agenti che operano sul mercato.

I modelli sopra descritti si occupano quindi dello studio di una particolare caratteristica osservabile sui mercati finanziari: l'insorgenza di bolle e *crash*. Attraverso diversi approcci i modelli cercano di dare una spiegazione a questi fenomeni in base all'azione degli agenti al loro interno. Lo scopo di queste analisi è quello di produrre modelli che si discostano dalle metodologie della teoria economica per gli strumenti e i concetti utilizzati. In questa prospettiva, nel capitolo che segue sono segnalati ed analizzati una serie di modelli individuati nella dottrina recente che cercano di rappresentare l'attività ed i fenomeni che si manifestano sui mercati finanziari.

Capitolo 4

L'uso di modelli per lo studio dei mercati finanziari: un'analisi critica di alcuni studi pubblicati

4.1 Introduzione

I mercati finanziari si prestano a svariati approcci per quanto riguarda lo studio dei fenomeni e la loro interpretazione. Questo è dovuto all'intrinseca complessità dei vari eventi che si possono generare, essendo una conseguenza dell'interazione tra diversi fattori in un sistema di regole. L'operatività sui mercati finanziari è infatti influenzata da vari livelli e tipologie di informazione degli investitori, che possono agire sul mercato entro determinate regole e tenendo conto di certi fattori esterni. Inoltre sul mercato agiscono differenti tipologie di investitori, che essendo individui hanno proprie caratteristiche comportamentali che ne condizionano le decisioni sul mercato. Tutto questo rende lo studio dei mercati finanziari difficilmente riconducibile a schemi di analisi prestabiliti, generando diversi settori di ricerca in base all'approccio ed alle finalità che questa si propone.

In particolare sono numerosi i modelli di analisi dell'andamento dei prezzi, che tentano di ricondurre dati realmente osservati ad una forma funzionale che tenga conto alla relazione con diversi fattori. Tali modelli, tuttavia, rappresentano un tentativo di spiegazione ex-post dell'effetto di vari parametri sull'andamento dei prezzi per individuarne la prevedibilità o per studiare l'effetto di certe situazioni sui mercati finanziari.

Accanto a tali modelli analitici, negli ultimi decenni sta guadagnando spazio lo studio di sistemi complessi tramite la simulazione con il computer. L'obiettivo principale della simulazione è quello di riprodurre la realtà osservata, ed in particolare ottenere una rappresentazione dinamica dei vari comportamenti che generano determinati risultati. In particolare una simulazione consiste nella creazione di un modello che, utilizzando nuovi campi di indagine come la presenza di agenti che agiscono ed interagiscono sul mercato, ed adeguate strutture informatiche, siano in grado di ricreare il sistema reale in cui tali agenti sono chiamati ad operare. Tali simulazioni quindi non si limitano ad una rappresentazione funzionale partendo dalla quale verificare l'effetto di certe variabili sui risultati, ma alla creazione di una struttura alla quale aggiungere elementi per raggiungere un modello in grado di riprodurre diverse caratteristiche del sistema.

Si possono suddividere alcuni di tali modelli in base agli obiettivi che si pongono ed effettuare tra questi un confronto o individuare un'evoluzione in lavori successivi. Inoltre si può condurre un confronto tra modelli con obiettivi differenti in modo da ricavare pregi e difetti nella rappresentazione della realtà. Si può operare un'ulteriore distinzione tra modelli che cercano di riprodurre l'andamento dei prezzi ipotizzando l'esistenza di un equilibrio derivante dall'intersezione delle curve di domanda ed offerta, ed altri che focalizzano gli obiettivi sulla continuità dei mercati finanziari e sul meccanismo di formazione dei prezzi tramite il *book* di negoziazione.

Individuati alcuni dei modelli più importanti nei due campi di ricerca, vorrei proporre una breve spiegazione di ciascun modello ed un confronto in modo da individuare le tecniche di simulazione utilizzate, la struttura del modello e l'effetto dell'imposizione di determinate ipotesi sui risultati ottenuti dagli autori.

4.2 L'analisi dei mercati finanziari

In questo paragrafo indicherò solo alcuni lavori di analisi dei prezzi sui mercati finanziari, con l'obiettivo di introdurre un particolare settore di studi che ha alla base l'individuazione degli effetti sui prezzi di particolari fattori legati alla struttura dei mercati finanziari la cui attività è svolta attraverso il *book* di negoziazione.

In Challet e Stinchcombe (2001) gli autori propongono un modello analitico di funzionamento del *book* di quattro titoli nel NASDAQ. Le variabili del modello sono per quanto riguarda la composizione degli ordini: tipo di offerta; prezzo p_k ; quantità da scambiare m_k espressa in multiplo della porzione singola (*tick*). Ogni ordine immesso nel *book* è anonimo, ma ha un numero d'ordine, dopo un certo intervallo di tempo di permanenza nel *book* viene cancellato o può essere cancellato in ogni istante da chi lo ha immesso. Avviene una transazione quando due ordini di segno opposto hanno lo stesso prezzo. Nel lavoro viene svolta un'analisi dell'impatto di mercato (*market impact*) di un ordine molto grande. L'impatto virtuale è causato dai cambi di prezzo dovuti all'immissione di un ordine molto grande, mentre l'impatto reale è dovuto all'immissione di molti ordini dello stesso tipo in successione. Tramite la costruzione di grafici dinamici di quantità di offerte di acquisto, di vendita e di proposte combinate, gli autori evidenziano come la quantità di ordini cancellati o scaduti sia una componente importante del mercato, come anche la distanza delle offerte dai migliori prezzi di acquisto o di vendita.

Nella stessa direzione si può citare Plerou et altri (2002) in cui viene analizzato l'effetto sui prezzi di cambiamenti nella domanda (*market impact function*) dei titoli dovuti alla differenza tra numero di ordini di acquisto e di vendita ed al numero di ordini combinati. Lo scopo nella costruzione di tali modelli è individuare le componenti fondamentali che influenzano i prezzi sui mercati finanziari, sulla base di dati realmente osservati, per stabilire una relazione da esprimere in termini analitici. Il tentativo di ottenere una rappresentazione analitica dei fenomeni induce però all'introduzione di ipotesi piuttosto restrittive al modello, che in tal modo non è in grado di rappresentare fedelmente i fenomeni reali. Tuttavia si può constatare come l'interesse per vari fattori come le quantità di ordini scambiate o presenti nel *book* di negoziazione e le differenze tra i prezzi di tali offerte stiano suscitando interesse nelle ricerche sui mercati finanziari, cercando di stabilire la struttura di domanda ed offerta sul mercato, ma prescindendo dall'analisi funzionale finalizzata

al raggiungimento di un equilibrio dei prezzi derivante dall'incontro delle curve che le rappresentano.

4.3 Simulazione: tecniche ed obiettivi

Un diverso approccio è utilizzato per la creazione di modelli di simulazione dei mercati finanziari, anche se si può individuare una certa affinità per quanto riguarda il settore di interesse sopra indicato.

Con l'obiettivo comune di riprodurre fenomeni reali, anche i modelli di simulazione possono distinguersi in base agli obiettivi che si pongono e di conseguenza alle ipotesi introdotte ed alle tecniche utilizzate per la creazione del sistema complesso. Si possono distinguere i modelli in base alla struttura del mercato che intendono creare: se questa si fonda sul raggiungimento di un equilibrio oppure è incentrata sulla riproduzione della dinamica della formazione dei prezzi. Oppure si può distinguere tra modelli in base alle tipologie di agenti presenti sul mercato: se gli agenti sono rappresentati dalle stesse regole di comportamento (modello con agenti omogenei) o se sono previste differenti tipologie (modello con agenti eterogenei) e se questi agenti sono dotati di una certa razionalità (regola di comportamento) oppure se le loro azioni sono frutto di un processo di scelta casuale (agenti *zero-intelligence*). Si possono raggruppare nella classe delle simulazioni ad agenti artificiali "irrazionali" tutti quei modelli che utilizzano, per gli esperimenti, agenti *zero-intelligence* che agiscono casualmente, senza processi di ricordo o apprendimento. Come illustrato in Gode e Sunder (1993) non è necessario avere singoli agenti perfettamente razionali, per ottenere comportamenti aggregati complessi come quelli reali. Infatti agenti artificiali privi di intelligenza sono in grado di generare un sistema aggregato che presenta caratteristiche di comportamento razionale, confermando una certa indipendenza tra comportamenti individuali e proprietà del sistema complesso che questi generano.

La teoria economica standard è costruita sulle ipotesi di individui perfettamente razionali che massimizzano l'utilità. Tale ipotesi appare piuttosto restrittiva in quanto ciascun individuo, nella realtà, si differenzia per le aspettative, avversione al rischio, preferenze di consumo ed altri aspetti. Tali aspetti individuali ed istintivi, che rendono difficile lo studio del mercato, possono essere evitati conducendo esperimenti con operatori che seguono le stesse regole di comportamento per verificare quali fra le tendenze del mercato siano attribuibili all'intelligenza degli agenti umani e quali no.

Il metodo scelto da Gode e Sunder consiste nel generare un sistema nel quale gli agenti reali sono sostituiti da agenti artificiali *zero-intelligence* e vengono fatti interagire sul mercato. I risultati prodotti vengono poi confrontati con quelli ottenuti da esperimenti in laboratorio in cui gli operatori sono invece persone reali. Inoltre vengono condotti esperimenti con regole di mercato o senza regole del mercato per individuare, nell'andamento dei prezzi, quale sia l'effetto della regolamentazione. Il modello proposto non riguarda il funzionamento di un mercato finanziario, ma è utile per comprendere che tramite le simulazioni fondate sugli agenti artificiali è possibile isolare e studiare gli effetti di determinate ipotesi sulle variabili del mercato, che nella realtà difficilmente potrebbero essere testate. I risultati ottenuti dagli autori indicano che il fattore principale nel determinare la

convergenza dei prezzi con quello di equilibrio (calcolato dall'intersezione delle funzioni di domanda ed offerta) è la regolamentazione del mercato e che non è necessario ipotizzare la massimizzazione dei profitti individuali, per ottenere risultati razionali a livello aggregato.

Ritornando allo studio dei mercati finanziari la distinzione principale dei modelli è quella incentrata sulla struttura del mercato ed in particolare sul meccanismo di formazione dei prezzi. Nei paragrafi successivi saranno indicate le due tipologie di modelli con una distinzione all'interno di ognuna in base al tipo ed alla varietà di agenti utilizzati nella simulazione.

4.4 Il meccanismo di formazione dei prezzi: funzioni di domanda ed offerta

Una prima tipologia di modelli di mercato di Borsa fondati su agenti ha come ipotesi principale, per la costruzione del sistema di scambi, il raggiungimento di un equilibrio sui mercati finanziari. Sotto tale ipotesi, quindi, le azioni degli agenti sono incorporate nel calcolo del valore della funzione di domanda aggregata dei titoli. L'offerta dei titoli è spesso una quantità esogena al modello ed il prezzo di mercato è calcolato dall'intersezione delle due curve. In quest'ottica l'obiettivo dei modelli è quello di introdurre varie tipologie di agenti in modo da riprodurre comportamenti complessi e di studiarne l'effetto sull'andamento dei prezzi. Nel paragrafo seguente verranno analizzati il modello LLS (Levi et altri, 1995) in cui gli investitori sono dotati di una certa razionalità e si studia l'influenza di popolazioni diverse di investitori sulle serie di prezzi prodotte ed il Santa Fe Artificial Stock Market (ASM) che è stato uno dei primi modelli di simulazione ad agenti di mercati finanziari e che sfrutta le tecniche della programmazione ad oggetti e la piattaforma di funzioni Swarm per l'esecuzione della simulazione⁹.

4.4.1 La presenza di differenti tipologie di investitori ed il mercato dei titoli

La presenza di investitori con strategie di prezzo è una caratteristica importante nel modello LLS proposto da Levy e altri (1995). Il modello oggetto di studio presenta diverse popolazioni di investitori, che si differenziano per la lunghezza della "memoria" di prezzo utilizzata per formulare la decisione di quantità. Il modello microscopico si basa infatti sull'investitore individuale. Gli investitori interagiscono tramite l'acquisto e la vendita di titoli.

Nel modello sono scambiati due tipi di titoli: un'azione ed un titolo di Stato. Il titolo di Stato è assunto senza rischio e produce un tasso di interesse fisso alla fine di ogni periodo di tempo t . Il guadagno del titolo è invece dovuto a due componenti:

- *Capital gain(loss)*: il prezzo del titolo è determinato collettivamente da tutti gli investitori con la legge di domanda ed offerta: se un investitore possiede un titolo, ogni cambiamento del prezzo determina un cambiamento della sua ricchezza.
- *Dividendo*: il rendimento del titolo in ogni istante dipende dai prezzi del titolo e dal dividendo:

⁹ Oggetto di approfondimento in Appendice A.

$$H_t = \frac{P_t - P_{t-1} + D_t}{P_{t-1}}$$

La ricchezza degli investitori si modifica in ogni periodo in quanto è determinata dal valore dei titoli calcolato in base al prezzo di mercato calcolato in ogni periodo.

Ogni investitore è caratterizzato da una funzione di utilità con la quale formula le decisioni di investimento ed è per ipotesi perfettamente razionale (vuole massimizzare il valore atteso della propria funzione di utilità). Per ipotesi la funzione di utilità è la stessa per tutti gli investitori.

La formazione del prezzo viene definita di periodo in periodo dalla costruzione della domanda aggregata di titoli e dall'offerta (il numero di titoli è un parametro fissato all'inizio della simulazione).

La simulazione consiste nell'analisi dei risultati prodotti da tre esperimenti, ottenuti variando il numero di popolazioni presenti nel modello (da 1 a 3) che differiscono per il numero di osservazioni di rendimenti precedenti su cui formulare le decisioni di acquisto o vendita. Con una sola popolazione gli autori osservano la presenza di bolle e *crash*, ma piuttosto regolari e prevedibili; con due popolazioni si osserva la presenza di una popolazione dominante che influenza l'andamento dei prezzi; con tre popolazioni di investitori la dinamica del sistema diviene complessa ed imprevedibile, caratteristica dei mercati finanziari reali. Il modello sviluppato mira ad ottenere una spiegazione della dinamica caratteristica di un mercato finanziario legata non all'efficienza del mercato e quindi dall'influenza di nuove informazioni sui prezzi, ma dalla presenza di diverse tipologie di investitori, le cui decisioni di investimento influenzano l'andamento dei prezzi.

L'ipotesi di mercato efficiente in cui i prezzi riflettono tutte le informazioni disponibili che riguardano il valore di ogni titolo sul mercato finanziario è alla base di diversi studi analitici. I risultati prodotti in termini di serie dei prezzi però spesso si discostano dai dati reali osservati, soprattutto per quanto riguarda la volatilità e di conseguenza sull'insorgenza di bolle o *crash*. Tale effetto viene spesso affrontato introducendo agenti irrazionali nelle simulazioni che conferiscono una certa irregolarità nelle serie dei prezzi. Nel modello sviluppato da Gonçalves (2003) utilizzando la piattaforma NetLogo, viene dimostrato come serie realistiche di prezzi possano essere prodotte utilizzando agenti razionali e con accesso a tutte le informazioni, ma contraddistinti da un diverso metodo di valutazione delle informazioni per la formazione delle aspettative di prezzo. Tale modello si contrappone a quello sopra descritto per l'introduzione di agenti eterogenei, ciascuno con proprie caratteristiche, anziché nell'appartenenza degli investitori a diverse popolazioni. Anche in questo caso il prezzo viene definito in ogni periodo utilizzando una forma di domanda aggregata, ma legata alle opinioni degli investitori sull'andamento futuro del mercato sulla base delle informazioni disponibili.

Le informazioni provengono sia dal mercato che da altri agenti e contribuiscono alla decisione di acquisto o vendita e sono ponderate da un parametro che indica il livello di condizionamento dell'agente a tali suggestioni.

Tali informazioni nel modello sono rappresentate da un numero casuale con distribuzione normale:

$$I(t) \sim N(0,1)$$

Il valore qualitativo $Q(t)$ di tali informazioni può essere positivo (informazioni buone) o negativo:

$$I(t) > 0 \rightarrow Q(t) = 1$$

$$I(t) < 0 \rightarrow Q(t) = -1$$

Gli agenti sono per ipotesi eterogenei ed hanno razionalità limitata, inoltre subiscono l'influenza delle opinioni di altri agenti. Tali agenti sono rappresentati in uno spazio bidimensionale ed ognuno ha contatti con i quattro agenti più vicini. L'opinione che l'agente si crea dell'informazione dipende dalla propensione dell'investitore ad essere influenzato dalle opinioni di altri agenti (K_i) e dalla propensione ad essere influenzato da informazioni esterne (nsi), dalla somma dei valori che indicano le opinioni degli altri agenti ($NS_i(t)$) e da un termine casuale che conferisce eterogeneità agli agenti ($ei(t)$) e viene calcolata con la formula:

$$S_i(t) = \text{sign}(K_i * NS_i(t) + nsi * Q(t) + ei(t))$$

Il logaritmo del prezzo è formato dalla somma del prezzo precedente con la somma delle propensioni all'investimento degli agenti, che viene divisa per il numero di investitori presenti sul mercato.

Il modello prevede inoltre un meccanismo di aggiustamento del parametro che indica la propensione al contagio dell'agente, in base alla correlazione tra informazione ed andamento del prezzo di mercato, introducendo una sorta di apprendimento degli agenti nella formulazione delle opinioni.

Interessanti conclusioni si possono ricavare dalla rappresentazione grafica nella quale accanto alla serie dei prezzi prodotta dalla simulazione, si trova uno spazio bidimensionale in cui gli agenti sono raffigurati da cellule il cui colore dipende dalla loro decisione di acquisto o di vendita di titoli. Quando una maggioranza di investitori hanno la stessa opinione, si nota una inversione di tendenza nell'andamento dei prezzi. Le bolle ed i *crash* compaiono quindi in periodi in cui le opinioni sul mercato hanno uno stato organizzato. Se una nuova informazione va nella direzione opposta si ha un periodo di transizione nella quale gli investitori assumono uno stato di disorganizzazione in cui i prezzi si mantengono sugli stessi livelli, ma che può concludersi con l'insorgenza di una bolla od un *crash* in una nuova fase di omogeneità delle opinioni.

Una conferma a tale ipotesi riguardo la ricerca delle possibili cause di una bolla o di un *crash*, si può avere dal lavoro presentato da Johansen et altri (1998). Anche se l'articolo è maggiormente incentrato sull'analisi della struttura del *book* di negoziazione in riferimento all'insorgenza di bolle e *crash*, anche in questo caso una delle cause di un mutamento improvviso dei prezzi è il modello comportamentale degli agenti: questi sono organizzati in "reti" ed ogni agente agisce in accordo ad un certo numero di agenti a lui vicini. Un andamento anomalo dei prezzi è dovuto ad una fase in cui gli agenti assumono la stessa decisione in una sorta di stato organizzato, contrapposto ad uno stato di disorganizzazione associata a prezzi costanti. Una variazione dei prezzi sottoforma di bolla o *crash* si

verifica quindi quando più agenti hanno la stessa opinione ed inseriscono una grande quantità di ordini dello stesso tipo sul mercato, causando uno sbilanciamento nel *book* di negoziazione che può essere fermato solo con una forte variazione dei prezzi.

Un'altra critica al modello LLS, questa volta legata alla struttura del mercato si trova in Shatner et altri (2000) e discute l'ipotesi di formazione del prezzo dall'incontro di domanda ed offerta rappresentate da equazioni, che trascura il meccanismo di formazione dei prezzi di mercati reali tramite il *book* di negoziazione e l'importanza della cadenza degli scambi, la correlazione tra la frequenza di scambio in diversi modelli. Nel modello sopra descritto infatti il prezzo viene definito in più istanti in successione, ma in modo discreto ed aggregato, in contrapposizione con la continuità dei mercati dei titoli reali.

4.4.2 Il Santa Fe Artificial Stock Market - ASM

ASM è stato uno dei primi modelli di simulazione ad agenti dei mercati finanziari, sviluppato da diversi ricercatori tra i quali R.G. Palmer, W.Brian Arthur, John H. Holland, Blake LeBaron e Paul Taylor (1996). Il Santa Fe artificial stock market è un modello ad agenti nel quale agenti eterogenei collocano i loro titoli tra un titolo rischioso che paga dividendi stocastici e un titolo privo di rischio. Gli agenti formulano le loro aspettative adattivamente, basandosi sulle performances passate del mercato, che sono endogene al mercato. Quello che emerge è una serie di abitudini degli agenti che evolvono con il tempo. Quando gli agenti sono attivamente chiamati ad esplorare l'ambito del modello, il mercato si auto-organizza in una struttura più complessa, prezzi e volumi hanno andamenti statistici più simili alla realtà, operatori specializzati compaiono nella popolazione e il mercato sperimenta bolle speculative.

La struttura del mercato

La struttura base del modello prevede l'interazione di N agenti, di diversi tipi, con un mercato centrale, anziché un'azione diretta tra agenti stessi. Nel mercato c'è un unico titolo, con prezzo $p(t)$ per ogni istante t (il tempo è discreto e viene quindi scandito da istanti successivi ad intervalli unitari). Il titolo paga un dividendo $d(t+1)$ per unità di titolo alla fine del periodo t. La serie che rappresenta i valori dei dividendi in ogni istante è definita da un processo stocastico indipendente dalle decisioni degli agenti e dall'andamento del mercato. Sul mercato è presente un altro titolo, privo di rischio, che paga un interesse fisso r per ogni periodo. In questo contesto gli agenti sono chiamati a decidere quanti soldi investire nel titolo rischioso (sul mercato è presente un numero fisso di azioni (se qualcuno compra deve esserci una controparte che vende), e quanti lasciarne in banca (che equivale ad investire nel titolo privo di rischio). In ogni istante quindi gli agenti hanno un certo numero di titoli ed un ammontare di soldi in banca che definiscono la sua ricchezza all'istante t:

$$w_i(t) = M_i(t) + h_i(t) \cdot p(t)$$

La ricchezza dell'agente, nell'istante successivo, si modifica in base al nuovo prezzo del titolo ed al dividendo da questo pagato e l'ammontare di soldi lasciati in banca matura gli interessi (definiti con un tasso fisso).

Il processo di scambio dei titoli è amministrato da uno *specialist* il cui compito è quello di fissare il prezzo del titolo dell'istante successivo sulla base delle offerte di vendita e di acquisto da parte degli investitori. In questo modo quindi alla fine di ogni istante lo *specialist* fissa un prezzo di mercato del titolo che dipende dalle quantità di ordini scambiati che definiscono la domanda e l'offerta di titoli sul mercato. Il prezzo si modifica se esiste uno squilibrio tra quantità di ordini domandate e offerte.

Un'altra caratteristica del mercato è la presenza di informazioni dal mercato che possono essere utilizzate dagli investitori per definire le loro azioni: questa consiste in una stringa in cui vengono collocati dei valori numerici, tra i quali anche informazioni relative a prezzo, dividendo, numero totale di acquisti e di vendite in ciascuno degli istanti precedenti.

La struttura degli agenti

Gli agenti del modello devono decidere quanto della loro ricchezza investire in titoli e quanto lasciare in banca: se il numero di titoli che desiderano è diverso da quello dell'istante precedente, immettono un ordine di acquisto o di vendita sul mercato.

Nel modello sono presenti diversi tipi di agenti, *technical*, *fundamental* e *rational*, ciascuno con proprie regole di comportamento. Le decisioni sono formulate utilizzando una struttura informatica, un algoritmo genetico, con la quale le regole di comportamento vengono modificate in base all'ottenimento di risultati migliori, mentre le regole inefficienti vengono cancellate dalla lista che in questo modo conferisce all'agente una sorta di razionalità nel formulare le proprie decisioni. Nel modello è inoltre presente una tipologia di agenti detti *forecasting* che fondano le loro decisioni di investimento sulla base delle previsioni per quanto riguarda prezzi e dividendi formulate utilizzando determinati parametri nella sequenza di regole. Le previsioni sono condizionate dalla quantità di informazioni a disposizione dell'agente che ne definiscono l'attendibilità, sottoforma di un valore numerico (la varianza) e di conseguenza il rischio. Le regole che permettono all'investitore di formulare previsioni si modificano tramite un *classifier system*.

Ogni agente formula le proprie decisioni massimizzando l'utilità attesa, condizionata dal raggiungimento di un certo livello di ricchezza nell'istante successivo. Ma la quantità di titoli domandata o offerta sul mercato viene ridotta da un fattore ottenuto moltiplicando un parametro che definisce l'avversione al rischio dell'investitore con la varianza del prezzo del titolo.

Il modello ASM quindi pone particolare attenzione all'introduzione di comportamenti il più possibile realistici tra gli operatori di un mercato di titoli artificiale, inserendo anche la possibilità di evoluzione delle regole decisionali tramite strutture informatiche. Inoltre utilizza una libreria di funzioni come Swarm che permette di sviluppare al meglio le caratteristiche di una simulazione ad agenti. Tuttavia il modello, pur producendo serie di prezzi che presentano caratteristiche in accordo con dati osservati sui mercati finanziari reali, introduce un'ipotesi sul meccanismo di formazione dei prezzi che prevede il raggiungimento di un equilibrio sul mercato dei titoli che si traduce nella definizione di un prezzo di mercato calcolata dall'incontro della domanda e dell'offerta di titoli. La caratteristica dei mercati finanziari reali, al contrario è quella di avere serie di prezzi

definiti dalle azioni di acquisto o di vendita di titoli degli operatori sul mercato, in modo continuo, e non per istanti di tempo successivi.

4.5 Il meccanismo di formazione dei prezzi: il *Book*

Osservando le date di pubblicazione dei vari lavori si può notare come l'ambito di ricerca si stia spostando, negli ultimi anni, dal tentativo di riprodurre l'andamento dei prezzi sui mercati finanziari tramite modelli, all'interesse per la comprensione della microstruttura dei mercati finanziari reali. Una componente di particolare importanza in tali mercati è la struttura ed il funzionamento del *book* di negoziazione. Tramite infatti l'analisi dei dati relativi a prezzi e quantità, che possono essere ricavati dal *book*, si può individuare la dinamica della formazione dei prezzi studiando le relazioni tra quantità e prezzi offerti nelle negoziazioni e la relazione con i prezzi di mercato dei titoli osservati.

4.5.1 Prezzi di mercato definiti continuamente

L'analisi del *book* ed il tentativo di individuare un modello di funzionamento può avere diversi obiettivi tra i quali verificare come un modello possa produrre risultati in linea con l'andamento di dati osservati sui mercati reali in relazione al meccanismo di formazione dei prezzi. Questo meccanismo è alla base di recenti modelli di simulazione dei mercati finanziari tra i quali quello sviluppato da Maslov (2000) che propone un semplice modello di mercato con numero di agenti indefinito, ordini limitati e ordini senza limite di prezzo e decisioni di prezzo degli investitori che si fondano su una trasformazione lineare del prezzo di mercato definito transazione dopo transazione; Maslov e Mills (2001) sviluppano un'analisi dell'andamento dei prezzi in mercati finanziari reali in funzione della composizione del *book* proponendo direzioni di ricerca per il miglioramento del modello sopra citato; Slanina (2001) svolge un'analisi partendo dalla struttura del modello proposto da Maslov ricercando una forma analitica di relazione tra composizione degli ordini ed andamento dei prezzi; Daniels et al. (2002) introducono il meccanismo di formazione dei prezzi tramite il *book*, utilizzando un procedimento di inserimento degli ordini casuale, prescindendo quindi dalla presenza di investitori; Farmer et al. (2003) sviluppano un modello con prezzi continui, agenti *zero-intelligence* e dimostrano come caratteristiche come lo *spread* e la volatilità si possano spiegare partendo dalla struttura del mercato; in Matassini e Franci (2001a, 2001b) sono presenti agenti "razionali" che interagiscono nel mercato tramite il *book* di negoziazione e i prezzi di mercato sono definiti transazione dopo transazione; Shatner et al. (2000) introducono un sistema di stati degli investitori in grado di ricreare la discontinuità dell'operatività degli agenti in un mercato finanziario reale; Terna (2001) ha sviluppato un modello di simulazione di mercati finanziari in cui i prezzi si evolvono continuamente, con una molteplicità di agenti che interagiscono sul mercato, alcuni dei quali sono "intelligenti" cioè utilizzano la tecnica delle reti neurali artificiali per produrre decisioni di investimento. Quest'ultimo modello sarà oggetto di analisi e di un approfondimento sulla struttura del *book* nel momento dell'insorgenza di bolle e *crash* nel mercato simulato nei capitoli 5 e 6.

Nelle pagine che seguono verranno analizzati tali modelli per segnalarne caratteristiche comuni, punti di forza o di debolezza di ciascun modello, alla luce

dei principi della simulazione ad agenti e degli obiettivi che questa si pone nel tentativo di fornire uno strumento di comprensione dei fenomeni reali.

4.5.1.1 Con investitori “zero-intelligence”

La teoria economica necessita di ipotesi semplificatrici per la formulazione di modelli. Una delle ipotesi più importanti è la presenza di un agente dotato di perfetta razionalità. Recentemente si è però sviluppata una corrente di studi che cerca di spiegare i fenomeni economici come conseguenza della struttura del mercato e non delle caratteristiche degli agenti. Alla luce di tali obiettivi sono stati sviluppati diversi modelli che utilizzano agenti privi di intelligenza, le cui azioni sono quindi determinate da un processo casuale.

Un semplice modello che riproduce il funzionamento di un mercato finanziario è quello sviluppato in Maslov (2000). L'attenzione viene focalizzata sull'importanza delle regole di scambio nella definizione dell'andamento dei prezzi di mercato ed il modo in cui domanda ed offerta determinano il prezzo in un mercato aperto.

In un mercato aperto ci possono essere due tipi di ordini: gli ordini limitati o *limit orders* e gli ordini senza limite di prezzo o *market orders*. Un ordine limitato di vendita (acquisto) è un'istruzione di vendita (acquisto) un numero specifico di titoli se il suo prezzo supera (diminuisce fino a) un determinato livello, che è conosciuto come il prezzo di esecuzione di un ordine limitato. Nei moderni mercati di Borsa inoltre vi sono gli ordini senza limite di prezzo, i quali vengono immediatamente abbinati con il miglior ordine con limite di prezzo di segno opposto. Gli investitori del modello possono quindi inserire *market orders* o ordini di acquisto o vendita limitati. La quantità di titoli che possono essere scambiati è un'unità per transazione.

Il modello utilizza quindi un meccanismo di formazione dei prezzi realistico, fondato sul *book* degli ordini. Le fluttuazioni dei prezzi non sono dovute ad una funzione dell'impatto del mercato predefinita, ma sono il risultato di cambiamenti nelle quantità di ordini nel *book*.

Diversamente da altri modelli, non viene fissato il numero di investitori, cosicché ogni ordine è immesso da un nuovo investitore che può essere compratore o venditore con uguale probabilità. La regola di esecuzione dell'ordine consiste nel combinare un ordine senza limite di prezzo con il migliore ordine limitato di segno opposto, oppure nella combinazione di due ordini limitati di segno opposto. Nel momento della combinazione, gli ordini vengono cancellati dal *book*. Questa transazione definisce il nuovo prezzo di mercato. La decisione del prezzo dell'offerta viene presa dall'investitore sommando o sottraendo (a seconda del tipo d'ordine) al prezzo di mercato precedente una componente stocastica:

$$p = p(t) \pm \Delta$$

. Sul valore che viene sommato al prezzo di mercato nella definizione del prezzo l'autore formula diverse ipotesi generando in tal modo diversi modelli. Se è un numero casuale, il modello non tiene conto di varie caratteristiche degli investitori. L'autore propone una soluzione nel collegare il valore assunto dalla variabile all'impazienza dell'investitore: a valori di delta più elevati la proposta di prezzo si discosta maggiormente dal prezzo di mercato attuale, rivelando una

disponibilità dell'investitore ad aspettare, l'impazienza sarebbe invece rivelata da valori di delta più bassi.

Un'altra componente del modello poco realistica è la permanenza degli ordini nel *book* fino a quando vengono combinati con altre proposte, viene dunque proposta una variante al modello che consiste nell'inserire un termine di scadenza dell'ordine. Questa variante non riduce l'accumularsi di offerte in attesa, ma introduce una componente più realistica nel modello.

Dalle conclusioni esposte dallo stesso Maslov il modello produce risultati qualitativamente in linea con i dati reali, mentre necessita di ulteriori ampliamenti per risultati confrontabili quantitativamente. In un lavoro successivo (Maslov, Mills, 2001) viene condotta un'analisi di dati reali concernenti l'andamento dei prezzi su diversi mercati finanziari e la composizione del *book* in ogni istante. Tale analisi ha come obiettivo quello di individuare una connessione tra la differenza di quantità di ordini limitati, rispetto al numero di ordini complessivo, per stabilire se dalla misura di tale differenza è possibile prevedere l'andamento dei prezzi futuri. I risultati ottenuti rivelano come una grande differenza tra il numero di ordini al prezzo di vendita più alto ed il numero di ordini al prezzo di acquisto più basso, conduce a cambiamenti di prezzo in accordo con le leggi di domanda ed offerta. Ma tale cambiamento dura solo pochi minuti. Come rilevano gli autori, il cambiamento medio dei prezzi dipende linearmente dalla differenza dei volumi tra il più alto prezzo offerto ed il minore prezzo domandato.

Partendo dallo stesso modello (Maslov, 2000), Slanina (2001) sviluppa un'analisi dell'influenza di ordini a prezzo limitato od ordini senza limite di prezzo sull'andamento dei prezzi di mercato. Introducendo le ipotesi di continuità della lista degli ordini ed una variazione costante del prezzo proposto rispetto al prezzo di mercato, viene fornito un modello analitico di approssimazione del modello di Maslov, evidenziando come i cambiamenti del prezzo di mercato siano collegati principalmente all'inserimento di ordini senza limite di prezzo che, essendo combinati immediatamente maggiormente contribuiscono ad aumentare la liquidità del mercato.

Si può quindi osservare come le ricerche siano indirizzate sempre più ad una maggiore comprensione dei fenomeni reali, in questo caso l'andamento dei prezzi in un mercato finanziario, cercando di dedurre le cause dalla struttura del mercato stesso. Da segnalare è il metodo con il quale vengono condotti tali studi utilizzando la complementarità di analisi di dati reali e sviluppo del modello. Il modello infatti viene creato in modo da rappresentare la realtà imponendo determinate ipotesi. Tuttavia tali ipotesi permettono di focalizzare l'attenzione sulle cause di determinati eventi reali, il cui studio a sua volta suggerisce modifiche da apportare al modello affinché raggiunga una maggiore attinenza alla realtà.

Un elemento importante di questi modelli è lo studio della dinamica della formazione dei prezzi in base alla struttura del mercato, prescindendo dalle capacità razionali e di apprendimento degli investitori. Con tale caratteristica sono anche i modelli proposti da Daniels et altri (2002) e da Farmer et altri (2003) entrambi sviluppano un'analisi del meccanismo di funzionamento del *book* e l'impatto sui prezzi dei titoli dell'immissione degli ordini (*market impact*) nonché la dimostrazione che il modello produce risultati in accordo con le caratteristiche dei

mercati reali per quanto riguarda: lo *bid-ask spread*, ed anomalie nell'andamento dei prezzi.

Molti mercati finanziari moderni operano continuamente. Tale operatività viene risolta nel modello di Daniels et altri (2002) con la presenza di due tipi di ordini: *market orders* che sono degli ordini di acquisto o di vendita a qualunque prezzo; i *limit orders*, di acquisto (*bids*) o di vendita (*offer* o *asks*). I *limit orders* spesso non trovano immediatamente una controparte cosicché vengono inseriti nel *book* degli ordini limitati (*limit order book*). La differenza tra le migliori offerte di vendita (la minore) e di acquisto (la maggiore), viene detto *spread*. I *market order* vengono immediatamente associati con uno o più *limit order* di segno opposto, quindi lo scambio non è necessariamente di uno a uno. Un'alta densità di ordini limitati si traduce in un'alta liquidità per i *market orders*, ovvero diminuisce la variazione media dei prezzi quando è piazzato un *market order*. Gli autori ipotizzano una distribuzione poissoniana dell'arrivo degli ordini di vendita e di acquisto, la cui disposizione e cadenza temporale è casuale. Gli ordini hanno uguale probabilità di essere di acquisto o di vendita e hanno la stessa dimensione. Gli ordini possono inoltre essere cancellati o scadere. Nell'articolo viene mostrato come la necessità di archiviare offerta e domanda induce modifiche nella struttura dei prezzi. Il modello permette di studiare la diffusione dei prezzi e spiega la risposta dei prezzi di fronte a piccole fluttuazioni di domanda ed offerta di titoli, individuando una forma funzionale dell'impatto di mercato. Il modello mostra come le principali caratteristiche del mercato, come lo *spread*, la liquidità, e la volatilità, emergono naturalmente dalle proprietà dei flussi di ordini.

Nel modello proposto da Farmer et altri (2003) vi sono ordini limitati (*limit orders*) e ordini senza limite di prezzo (*market orders*) che vengono inseriti casualmente e, con uguale probabilità, possono essere di acquisto o di vendita. Gli ordini limitati, se non trovano una controparte, vengono inseriti nel *book* di negoziazione, in ordine di prezzo, catalogati per tipo di offerta. I *market order* vengono invece abbinati con uno o più *limit orders* di segno opposto, al miglior prezzo disponibile. L'obiettivo degli esperimenti è quello di testare il modello con dati reali, per individuare concomitanze per quanto riguarda lo *spread*, il tasso di diffusione dei prezzi e l'impatto medio di mercato. Lo *spread* è una componente importante per la definizione dei costi di transazione, il tasso di diffusione per la definizione della volatilità dei prezzi e quindi del rischio, l'impatto di mercato in quanto rileva l'importanza degli investitori istituzionali sui mercati finanziari. Il modello fornisce spiegazioni analitiche del meccanismo statistico di formazione dei prezzi, indipendentemente dalla presenza di decisioni di investimento degli investitori. I risultati dimostrano come, da un modello così semplificato, si possano ottenere e spiegare sistemi complessi, come i mercati finanziari, imponendo esclusivamente ipotesi sulla struttura del mercato.

4.5.1.2 Con investitori "razionali"

Molti modelli economici e finanziari dei mercati dei titoli discutono l'equilibrio di mercato. In accordo con la teoria dei mercati efficienti, il prezzo di equilibrio riflette tutte le informazioni disponibili e tutte le preferenze degli investitori. Ma la nozione di equilibrio statico implica che cambiamenti del prezzo di equilibrio siano dovuti solo a cambiamenti delle informazioni. Siccome le informazioni hanno un andamento di *random-walk*, anche i prezzi dovrebbero seguire tale andamento. Ma i

dati reali dimostrano come l'andamento dei prezzi sia differente. Utilizzando modelli ad agenti è possibile dimostrare come inserendo un procedimento di decisione del prezzo degli ordini, è impossibile definire un equilibrio statico, nonostante l'ipotesi di assenza di nuove informazioni sul mercato (Levy et altri, 1995).

A differenza dei modelli precedenti in Matassini e Franci (2001a, 2001b) il tentativo di riprodurre il funzionamento di un mercato di titoli reale, viene associato alla presenza di agenti che interagiscono con tale struttura tramite la definizione del prezzo offerto. In Matassini e Franci (2001a, 2001b) è sviluppato un modello di mercato dei titoli in cui, come in Maslov, il prezzo di mercato viene aggiornato transazione dopo transazione. Questa tecnica rappresenta un ulteriore passo nelle simulazioni di mercati finanziari, verso una maggiore veridicità degli esperimenti condotti, rispetto ad altri modelli di mercato in cui il prezzo è definito dall'incontro di domanda ed offerta o dall'intervento di un *market maker*. Tuttavia, rispetto a Maslov, il modello che verrà analizzato di seguito risulta più completo, nella prospettiva di raggiungere una maggiore veridicità dei risultati, in quanto inserisce una strategia di prezzo degli investitori.

Le ipotesi principali del modello sono la presenza di un unico tipo di investitori, il cui obiettivo è la massimizzazione dei profitti limitando le perdite. Si può parlare in questo caso di investitori razionali, che fondano le loro decisioni su determinate regole di comportamento. Ogni investitore infatti decide quale prezzo proporre in base ad una media ponderata fra tre prezzi:

- p_1 che è il prezzo consigliato dagli amici;
- p_2 è il prezzo determinato in base alle informazioni dei media, è una informazione globale interna al modello, calcolata in base all'ultimo prezzo, il numero di investitori ed il numero di ordini di acquisto e di vendita nel *book* con il seguente procedimento:

$$p_2 = p_u \cdot (1 + r_{\max}) \text{ if } b_u > B, p_2 = p_2 \text{ if } \frac{1}{B} < b_u < B, p_2 = p_u \cdot (1 - g_{\max})$$

se $b_u < \frac{1}{B}$, con

b_u definito dal rapporto tra numero di ordini di acquisto e numero di ordini di vendita nel *book*,

p_u ultimo prezzo di mercato,

g_{\max} massimo guadagno aspettato;

- p_3 è il prezzo atteso, calcolato in base all'ultimo prezzo ed al trend (media di un certo numero di prezzi precedenti).

Il prezzo dell'offerta p è ottenuto come media ponderata dei tre prezzi precedenti.

$$p = \frac{p_1}{\alpha_1} + \frac{p_2}{\alpha_2} + \frac{p_3}{\alpha_3}$$

Per ogni investitore sono previsti un ammontare iniziale di soldi, una predisposizione ad investire una parte, un numero di titoli posseduti, una lista di "amici" con cui scambiare informazioni, soldi investiti, disponibilità liquide, guadagni attesi, massima perdita, prezzo di acquisto, limite di perdita, *threshold* ovvero tempo dopo il quale l'investitore può cambiare l'ordine.

Il modello proposto prevede la presenza di un certo numero di investitori N ed un numero di azioni di un unico titolo M .

All'inizio della simulazione si ha un'offerta pubblica iniziale (*Initial Public Offer*, IPO) da parte di una banca centrale per non iniziare l'esperimento con un *book* vuoto (in SUM tale obiettivo è raggiunto inserendo un momento di pre-asta in cui giungono nel *book* offerte di vendita e di acquisto che vengono semplicemente archiviate nel *book*, per poi essere abbinate nella fase di contrattazione continua). Durante tale fase gli investitori sono incoraggiati ad inserire proposte di acquisto all'unico prezzo offerto.

Terminata la fase di offerta pubblica la simulazione procede nei seguenti passi:

- selezione casuale di un investitore
- controllo del parametro che definisce la propensione all'investimento, controllo della presenza di ordini in pendenza, nel caso negativo viene espresso un ordine, in caso affermativo, invece, si verifica se è scaduto il tempo di modifica e si apportano i cambiamenti necessari. Tra i cambiamenti è prevista la possibilità di modificare l'ordine a prezzo limitato in ordine senza limite di prezzo.
- Controllo del *book*: se l'ordine trova una controparte (il miglior prezzo d'acquisto è uguale al maggiore prezzo di vendita) viene definito il prezzo di mercato, vengono cancellati dal *book* gli ordini di acquisto e di vendita se completamente abbinati.

Quando un agente vuole scambiare, viene creato un nuovo record nel *book*. Tutti gli ordini sono registrati in base al tipo di offerta (acquisto o vendita) ed in base al momento di immissione dell'ordine. Una transazione ha luogo quando l'offerta più economica in vendita si combina con l'offerta più alta in vendita, quindi in base al principio della transazione più favorevole all'investitore. Il prezzo di tale transazione è il prezzo di mercato del titolo in quel particolare momento (tic).

L'obiettivo della simulazione è quello di dimostrare come il modello possa fornire una rappresentazione di avvenimenti reali e fornirne la spiegazione tramite i valori assunti da determinate variabili. Il modello sviluppato da Matassini e Franci ha in comune con SUM il fatto di una dinamica di formazione del prezzo di mercato, tramite la registrazione di ordini di acquisto e di vendita nel *book*. Possibili difetti, tuttavia, si possono riscontrare nelle ipotesi di presenza di un solo titolo, e nell'unica tipologia di agente-investitore, gli stessi autori evidenziano inoltre le difficoltà nel calcolo della ricchezza di ogni investitore dovute alla valutazione dei titoli in presenza di un prezzo di mercato dinamico. La presenza di un solo titolo infatti trascura la molteplicità di scelte possibili in un mercato finanziario reale e la correlazione tra i prezzi di titoli differenti. La presenza di una sola tipologia di agente riduce la complessità del mercato finanziario con un'eccessiva

semplificazione. Tuttavia il modello pone particolare attenzione al procedimento di registrazione e combinazione degli ordini e alle azioni degli agenti. Tali agenti formulano previsioni di prezzo, massimizzano i guadagni e cercano di limitare le perdite tramite la definizione di determinati parametri e calcoli tradotti in funzioni di comportamento, vi è inoltre una particolare componente di dialogo tra operatori e tra operatori e mercato che contribuisce alla formazione del prezzo di offerta e alla definizione di strategie di comportamento. Per queste ragioni il modello si discosta da altre applicazioni che utilizzano agenti irrazionali, senza quindi interconnessione tra agenti e tra agenti e mercato, distogliendo l'attenzione dai risultati ottenuti nel sistema, in base alla regolamentazione, ed evidenziando la dinamica della formazione dei prezzi e la relazione tra negoziazioni e prezzi.

4.5.1.3 Con diversi tipi di investitori: *Noisy, Fundamentalist e Chartist*

La presenza in un modello di differenti tipi di investitori è una caratteristica importante per il raggiungimento di una maggiore veridicità nella rappresentazione di mercati reali. I modelli analizzati finora utilizzano una sola tipologia di investitori, o utilizzano investitori irrazionali per focalizzare l'attenzione sulle componenti strutturali del sistema. Tuttavia, la presenza di diversi tipi di comportamenti è un elemento che conferisce ai mercati finanziari andamenti dotati di un certo livello di complessità e l'inserimento in un modello di simulazione dei mercati finanziari, appare un passo obbligato per la sua maggiore completezza. In questa direzione si possono citare il modello sopra descritto ASM, il modello che sarà oggetto di un'approfondita analisi nel capitolo 5, SUM ed un ulteriore modello che descriverò nel seguente paragrafo (Shatner et altri, 2000). Tale lavoro si presenta come una critica al modello LLS descritto sopra, per quanto riguarda l'analisi della cadenza temporale degli scambi e la loro frequenza, mentre riprende la suddivisione degli investitori in tre tipologie differenti da fare interagire sul mercato finanziario simulato. Inoltre, viene introdotto un differente meccanismo di formazione del prezzo, non più legato all'incontro tra domanda ed offerta, ma alla conclusione di una transazione.

Shatner et altri hanno sviluppato un modello asincrono nel tempo continuo in cui il mercato ha un determinato periodo di funzionamento, con un proprio orologio, mentre gli agenti non sono continuamente operativi, ma possiedono tre differenti stadi di azione a seconda dei quali si definisce la loro operatività ed intervento sul mercato.

Gli agenti possiedono un predeterminato ammontare di disponibilità liquide ed un ammontare di titoli posseduti, non possono indebitarsi e non possono avere più di un ordine inserito sul mercato in ogni istante. Come accennato sopra, l'agente non è continuamente operativo, ma "dorme" per gran parte del tempo. L'investitore termina la fase di inattività sulla base di proprie regole di comportamento: ad esempio dopo un determinato intervallo di tempo di inattività o in reazione a specifici eventi di mercato (*news* o cambiamenti di prezzo). Una volta attivato, l'investitore decide quale operazione effettuare sul mercato o se rimanere inoperativo. I tre stadi possibili dell'investitore sono:

- *"Dormant Stack"*: Lo stato predefinito dell'agente è l'inattività. L'investitore ha proprie regole che definiscono le condizioni di "risveglio": dopo K periodi di tempo o quando succede qualcosa sul mercato (*news* o

variazioni di prezzo al di sopra di una certa percentuale; le *news* sono rappresentate da una variabile intera definita nell'intervallo da -5 a +5 e l'investitore può decidere di svegliarsi quando le informazioni raggiungono un certo livello);

- “*Decision Stack*”: è lo stadio successivo al precedente e dura un determinato lasso di tempo nel quale l'investitore “studia” il mercato. Dopo tale intervallo l'agente può decidere, sempre sulla base di regole proprie, se inserire un nuovo ordine, cancellare o modificare l'ordine esistente, oppure cambiare le proprie regole di comportamento;
- “*Transferred Order Stack*”: se l'investitore ha deciso di inserire un nuovo ordine questo viene registrato nell'apposita lista.

Una volta che un ordine passa per l'ultima fase, viene inserito nella lista degli ordini di acquisto o in quella degli ordini di vendita in ordine di prezzo. Se il prezzo minimo nelle proposte di vendita è minore del prezzo massimo delle proposte in acquisto, ha luogo una transazione ed il prezzo di mercato coincide con il prezzo dell'offerta con precedenza temporale. Se gli ordini hanno diverse dimensioni la quantità abbinata è quella più piccola, mentre la rimanente quantità rimane inserita nella lista degli ordini.

Nel modello proposto vi sono solo offerte di acquisto o di vendita limitate.

Una caratteristica importante del modello è la possibilità di utilizzare un numero di investitori elevati, ciascuno dei quali può essere dotato di una propria funzione di decisione. Gli autori comunque definiscono tre tipologie di investitori, le cui differenze influenzano la determinazione delle azioni nella fase decisionale:

- “*Random Trader*”: inserisce ordini di acquisto o vendita con un prezzo definito sommando al prezzo di mercato una quantità casuale; anche la quantità da ordinare è fondata su una parametrizzazione casuale;
- “*Fundamentalist Trader*”: decide in accordo con il prezzo fondamentale, che segue un andamento di *random walk*;
- “*Chartist Trader*”: fonda la propria decisione in base al confronto tra il prezzo di mercato attuale ed un prezzo previsto ottenuto con una trasformazione lineare degli ultimi N prezzi di mercato che ricorda.

Tale modello appare piuttosto completo per quanto riguarda il tentativo di creare la complessità del sistema dei mercati finanziari. Gli autori pongono particolare enfasi sulla possibilità di inserire nel modello svariati tipi di agenti in modo da riprodurre caratteristiche comportamentali reali, semplicemente definendo nuove funzioni di decisione in grado di rappresentare anche profili psicologici piuttosto complessi.

4.6 Un confronto

L'analisi di diversi modelli è stata svolta per individuare, tra i lavori recentemente pubblicati, la direzione di ricerca, in modo da poter collocare il modello di simulazione di un mercato di Borsa sviluppato da Terna (2001), denominato SUM (*Surprising (Un)realistic Market model*). Per introdurre tale modello vorrei descrivere alcune caratteristiche comuni con modelli di simulazione sopra

segnalati ed altri fattori che li rendono differenti, rimandando al capitolo seguente, la descrizione dettagliata della struttura.

Il modello SUM è un modello di simulazione di Borsa in cui il prezzo di mercato è definito continuamente dall'incontro di due ordini sul mercato compatibili. Si può quindi inserire tra i modelli che hanno come obiettivo lo studio della microstruttura del mercato finanziario rappresentata dal *book* di registrazione degli ordini limitati. Questo consente di riprodurre la struttura complessa dei mercati finanziari, prescindendo l'ipotesi del raggiungimento di un equilibrio di mercato. In tale struttura sono chiamati ad agire diverse tipologie di agenti ciascuna delle quali simula un certo modello comportamentale di investitore. Particolarmente interessanti sono gli agenti che imitano il mercato (*market imitating agent*), le cui decisioni di investimento sono legate all'andamento dei prezzi nei periodi precedenti (come i *Chartist Traders* in Shatner et altri) ed alla previsione di prezzo formulata dal *Forecasting agent* e gli agenti che imitano il comportamento di altri agenti (*locally imitating agent*) che presenta un comportamento simile a quello degli agenti nel modello su NetLogo. Il modello SUM prevede inoltre una nuova tipologia di agenti (*bPCT agents*) che sono dotati di una capacità di apprendimento che conferisce alle decisioni di acquisto o vendita una certa coerenza. L'apprendimento non viene creato tramite una forma funzionale, ma utilizzando la struttura informatica delle reti neurali artificiali. Alla rete neurale alla è applicato il metodo CT che, sulla base di determinati dati in *input*, genera la decisione di acquisto o vendita e di quale quantità. Dalle caratteristiche del modello si può dedurre quindi che l'obiettivo principale è la raffigurazione di un mercato di titoli, cercando di riprodurre il più possibile le caratteristiche reali per quanto riguarda il funzionamento e la complessità dei comportamenti, in modo da comprenderne l'effetto sulla dinamica dei prezzi.

Capitolo 5

SUM – Surprising (Un)realistic Market model

5.1 Introduzione

In questo capitolo è introdotto il modello di simulazione di un mercato di Borsa SUM (*Surprising (Un)realistic Market model*). Con l'ausilio di strumenti informatici, si cerca di riprodurre il funzionamento di un mercato di titoli reale. Il campo di ricerca in cui si colloca tale progetto è quello delle simulazioni ad agenti coadiuvate dall'utilizzo di processi di apprendimento, sviluppati secondo la metodologia delle reti neurali artificiali, che permettono di inserire nel modello una componente di notevole interesse per quanto riguarda l'autonomia della simulazione nel riprodurre un sistema di negoziazione reale. Il modello è stato costruito in modo tale da poter sfruttare la biblioteca di funzioni Swarm (Appendice A) e per la scrittura del codice è stato scelto un linguaggio di programmazione ad oggetti Objective C, le cui proprietà meglio si adattano all'implementazione di modelli fondati su agenti. Il modello analizzato in questo capitolo è stato già oggetto di citazioni e di una breve descrizione nel capitolo precedente, tuttavia, è necessaria un'analisi più approfondita in quanto è alla base del lavoro di approfondimento dei risultati prodotti in presenza di fenomeni come bolle e *crash*.

5.2 Il funzionamento del modello

Il modello SUM, sviluppato da Terna (2001) ed oggetto di successive modifiche da parte dell'autore stesso ed oggetto di diverse tesi di ricerca, è basato su una struttura informatica che riproduce fedelmente le regole del *book* computerizzato di un mercato di titoli reale. Gli agenti, di differenti tipi, mandano al *book* i loro ordini di acquisto o di vendita con i relativi limiti di prezzo. Il modello esegue immediatamente gli ordini se trova una controparte, altrimenti memorizza separatamente gli ordini di acquisto e di vendita, in ordine di prezzo (decrescente se di acquisto o crescente se di vendita), ed a parità di prezzo in ordine temporale di inserimento dell'ordine, per combinarli con ordini futuri. Gli ordini possono solo essere unitari, ma ogni agente può immettere più ordini allo stesso prezzo. Il *book* è cancellato all'inizio di ogni giornata, ma grazie alla presenza di una fase di apertura, è possibile avere, all'inizio della fase di contrattazione continua, degli ordini di acquisto e di vendita in modo che il modello non inizi con andamenti

anomali dei prezzi di mercato. Durante la fase di apertura gli ordini non vengono combinati, anche se compatibili, ma vengono semplicemente archiviati nelle rispettive liste di ordini limitati. Tali ordini sono inseriti dagli agenti, sulla base delle proprie caratteristiche rappresentate dal metodo `act0`, che vengono interpellati ad uno ad uno, con un ordine casuale, indipendentemente dal tipo. Al termine della fase di apertura, la cui durata è di un solo tic, si passa alla fase di contrattazione continua, che dura un numero di tic pari al numero totale di agenti. In tale fase gli agenti vengono invitati, con un processo di selezione casuale nella lista degli agenti, ad introdurre la loro proposta. Se l'ordine di acquisto o di vendita trova una controparte la transazione viene eseguita ed il prezzo dello scambio che è il prezzo della proposta con maggiore priorità temporale, definisce il prezzo di mercato del titolo. Gli ordini vengono combinati seguendo due semplici regole:

- Se viene immessa una proposta con limite di prezzo in acquisto, questa viene abbinata con una proposta di vendita avente prezzo inferiore o uguale a quello della proposta immessa;
- Se viene immessa una proposta con limite di prezzo in vendita, questa viene immediatamente abbinata con una proposta di acquisto con prezzo maggiore o uguale a quello della proposta immessa.

Con l'obiettivo che ogni transazione deve essere la più favorevole possibile all'investitore, l'abbinamento delle proposte avviene secondo i suddetti criteri, ma individuando nella lista degli ordini di segno opposto, la migliore compatibile con il prezzo proposto.

Il modello quindi produce serie di prezzi che si evolvono continuamente, eliminando l'artificio del *market maker* utilizzato in altri modelli di simulazione. Il prezzo al quale viene eseguita una transazione viene infatti registrato in un'apposita lista e viene visualizzato durante la simulazione in un apposito prospetto grafico (in Swarm) per il quale l'utente, tramite l'Observer può definire la frequenza di visualizzazione.

Una caratteristica importante del modello è la presenza di diversi tipi di investitori: dagli agenti che agiscono inserendo ordini in maniera casuale (*random agent*), ad agenti che agiscono in base alle previsioni formulate da un altro agente (*ANNForecastApp agent*), tramite una rete neurale artificiale, ad agenti che imitano l'andamento del mercato (*Market Imitative agent*) o il comportamento di altri agenti (*Locally Imitating agent*), per concludere con gli agenti cognitivi (agenti BP_CT) che formulano le proposte sulla base degli *output* prodotti da una rete neurale, avendo come *input* prezzi precedenti o prezzi precedenti e prezzi previsti dal *forecasting agent*. Il numero ed il tipo di agenti da introdurre nella simulazione possono essere modificati dall'utente tramite l'interfaccia dell'Observer. Il modello prevede lo scambio di un solo titolo.

Come si può notare da tale descrizione, l'attenzione nella costruzione del modello di simulazione è focalizzata sul processo di formazione del prezzo tramite il *book* di negoziazione e sulla presenza di diversi tipi di investitori in modo da riprodurre la molteplicità di comportamenti osservabile sui mercati reali. La presenza di un solo titolo tuttavia può essere un'ipotesi troppo restrittiva per l'analisi dei comportamenti su mercati reali, per la correlazione tra prezzi di differenti titoli che indiscutibilmente può influenzare l'insorgenza di fenomeni

come bolle e *crash*. Un altro elemento importante sui mercati reali e non incluso nel modello, è la presenza di ordini senza limite di prezzo (*Market order*). Ho quindi inserito la possibilità di introdurre tali ordini da parte degli agenti ed ho analizzato l'effetto sul mercato simulato. L'introduzione di un ordine di questo tipo comporta l'immediata combinazione con il miglior ordine di segno opposto registrato nel *book* di negoziazione, dopo aver controllato che la lista non sia vuota. L'oggetto dell'approfondimento è individuare possibili relazioni tra quantità di ordini, prezzi e misura dello *spread* nel momento in cui si verificano bolle speculative. Questo si ottiene dall'analisi della microstruttura del *book* di un titolo istante per istante, tralasciando le ragioni più generali dell'insorgenza di bolle o *crash* legate alla molteplicità di titoli sul mercato.

5.3 La struttura del modello

Caratteristica principale del modello è di consentire l'interazione di agenti in un ambiente creato sulla base di determinate regole. Occorre quindi spiegare come tale interazione sia possibile ed in particolare quale tipo di collegamento esiste tra l'ambiente ed i singoli operatori.

5.3.1 Lo schema ERA

Uno schema della struttura utilizzato e molto utile per la costruzione di modelli fondati su agenti è l'*Environment-Rules-Agents (ERA)* introdotto da Terna (1998). L'idea di fondo consiste nella suddivisione del modello ad agenti in quattro strati. Il primo strato rappresenta l'ambiente in cui gli elementi interagiscono ovvero il contesto all'interno del quale sono definiti ed organizzati gli agenti, si ha la gestione del tempo della simulazione e si definiscono le regole di interazione tra gli agenti tramite metodi. Il secondo strato è formato dagli agenti che possono essere una o più fattispecie di classi comportamentali più generali. I comportamenti degli agenti sono determinati da oggetti esterni (che compongono il terzo strato del modello), chiamati *Rule Masters* (o gestori di regole) che possono essere interpretate come rappresentazioni astratte dell'intelligenza degli agenti. Tali modalità di comportamento possono essere rappresentate da RNA, *classifier systems*, o algoritmi genetici. I *Rule Masters* ottengono le informazioni necessarie per applicare le regole dagli agenti stessi o da altri agenti che raccolgono le informazioni. Gli agenti possono raccogliere i loro dati in particolari oggetti (*Data Warehouse*) e possono interagire tra loro o con l'ambiente esterno tramite un oggetto specializzato (l'interfaccia). Gli agenti possono inoltre evolvere e modificare le proprie regole comportamentali, tramite un altro oggetto (nel quarto ed ultimo strato) il *RuleMaker* o generatore di regole che viene richiamato dal *Rule Master* per modificare la linea di azione dell'agente.

Il vantaggio di tale schema è la possibilità di inserire modifiche nelle caratteristiche comportamentali degli agenti, o nella struttura dell'ambiente, senza dover modificare l'intero modello, ma semplicemente adattando oggetti e metodi ai nuovi obiettivi, secondo i principi della programmazione ad oggetti.

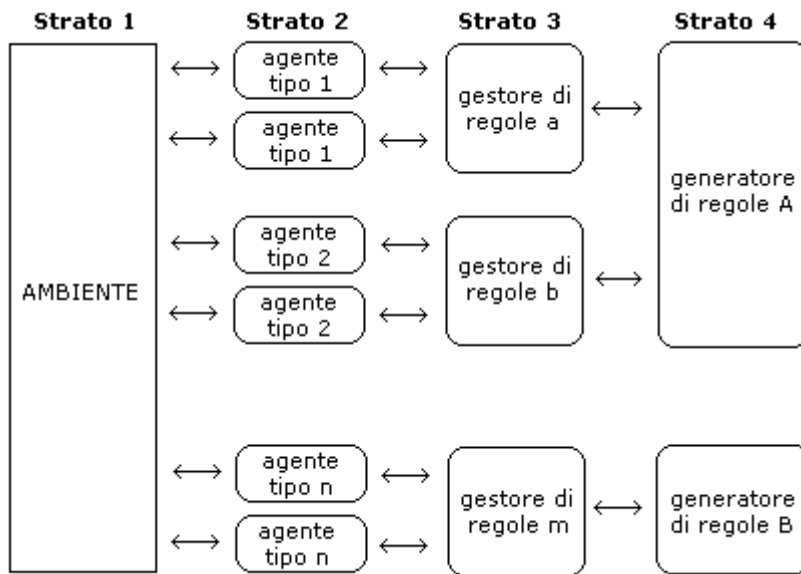


Figura 5.1. Lo schema ERA.

Tale schema generale trova una sua applicazione ed ampliamento nel modello SUM.

5.3.2 Lo schema di SUM

Lo schema di SUM discende direttamente dallo schema ERA, naturalmente modificato in quanto aumenta la complessità del modello in termini di numero, di tipologie di agenti e di relazioni tra gli elementi del modello. Anche nella struttura di SUM, tuttavia, si può osservare la centralità dell'ambiente, in questo caso rappresentato dal *book* di negoziazione tramite il quale gli agenti intervengono e modificano l'andamento del mercato. Si può inoltre osservare che anche la struttura che conferisce tipologie comportamentali agli agenti è formata da un generatore di regole e da un gestore delle stesse. La figura 5.2 riporta uno schema di tale struttura.

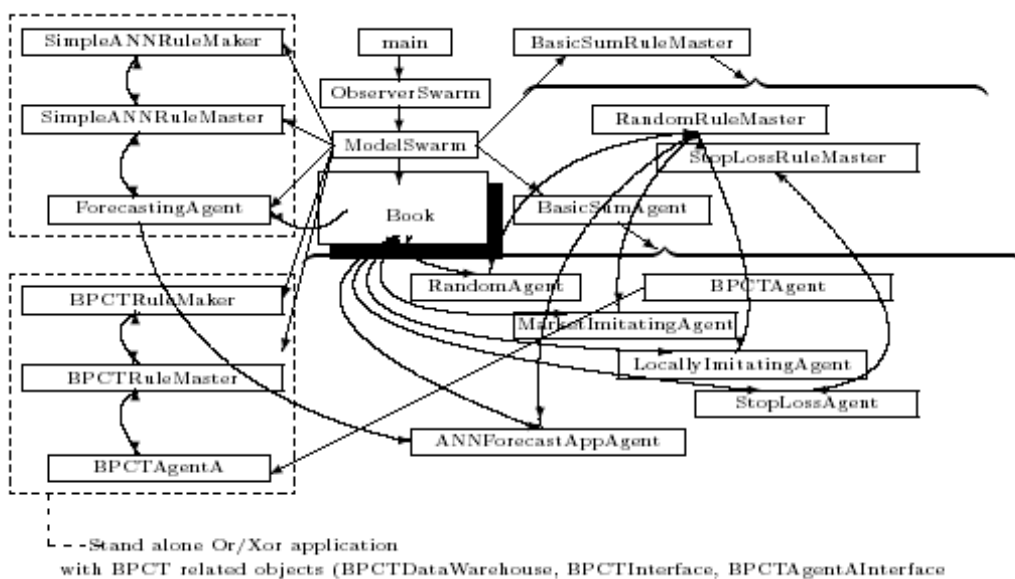


Figura 5.2. Lo schema di SUM (dal file Schema.pdf disponibile con la versione sum-0.66).

Come si può osservare nello schema sopra riportato, vi sono nel modello diversi tipi di agenti, ciascuno dei quali interagisce con il *book* di negoziazione (che rappresenta l'ambiente nello schema ERA). Tale azione è però definita da un generatore di regole e da un amministratore delle stesse. I generatori di regole sono due ed in particolare esistono per quelle tipologie di agenti, come gli agenti BPCT e l'agente ANNForecastAPP in grado di immagazzinare dati dall'ambiente e trasformarli in informazioni utili all'operatività dell'agente sul mercato. Per l'operatività degli altri agenti esistono invece diversi tipi di gestori di regole, il cui compito è quello di definire quale regola comportamentale seguire nel corso dell'intervento di ogni agente sul mercato. Le due tipologie di agenti sopra menzionate hanno due propri gestori di regole, seguendo interamente lo schema ERA, mentre gli altri agenti fanno riferimento ad un unico RuleMaster (il RandomRuleMaster) che definisce la quantità ed il prezzo dell'ordine da immettere sul mercato, dopo aver verificato la coerenza di alcuni parametri relativi ai prezzi di mercato della giornata precedente. Tali valori vengono poi modificati in base alle caratteristiche proprie di ciascun agente: rimangono invariati per l'agente *random* o subiscono modifiche per quanto riguarda la natura dell'ordine (in acquisto o in vendita) per gli agenti imitativi e per gli agenti ANNForecastApp. Nello schema tali collegamenti funzionali, che riguardano la dinamica del mercato, sono rappresentati da linee curve. Le linee rette, invece, riguardano i collegamenti strutturali tra i vari oggetti: il *Model* contiene le istruzioni utili per la costruzione degli oggetti relativi al *Book*, agli agenti BPCT, all'agente Forecasting, all'agente BasicSumAgent e BasicSumRuleMaster. Il BasicSumAgent a sua volta definisce le caratteristiche comuni di tutti gli agenti, mentre le differenze da tale standard sono sviluppate nei file relativi a ciascun agente. Il file BasicSumRuleMaster definisce alcuni parametri che verranno poi utilizzati dagli altri gestori di regole.

Si può quindi notare come lo schema ERA sia un riferimento per la costruzione del modello SUM, ma anche come in quest'ultimo siano presenti altre caratteristiche necessarie a riprodurre l'operatività di più agenti in un sistema complicato come quello di un mercato telematico di contrattazione. Inoltre nella struttura del modello SUM vi sono tre elementi aggiuntivi: il *Model*, l'*Observer* ed il *Main*, che sono indispensabili per il funzionamento del modello all'interno della piattaforma di funzioni Swarm¹⁰.

5.4 *Model* ed *Observer*

Come richiesto dal protocollo di programmazione Swarm, anche nel codice di SUM si possono trovare i file *ModelSwarm* ed *ObserverSwarm*.

Nel file *ObserverSwarm.h* ho la dichiarazione delle variabili e dei metodi che servono per la visualizzazione del prospetto e la chiamata alle librerie necessarie per lo sviluppo di tabelle di dati e visualizzazione di grafici. In *ObserverSwarm.m* tali variabili e metodi vengono inizializzati e si consente il dialogo con il *book* e gli agenti che permette di ottenere i dati per la rappresentazione grafica e la memorizzazione delle serie di dati. In questo file si hanno due parametri molto importanti: `displayFrequency` e `stopAtEpochNumber`. Il primo parametro stabilisce la frequenza alla quale i dati vengono visualizzati nei grafici e salvati su

¹⁰ Un'introduzione alle caratteristiche di Swarm si può trovare in Appendice A.

file: nel caso in cui tale variabile assuma un valore pari al numero di agenti la visualizzazione sarà di un dato per ogni giornata di contrattazione (la giornata simulata dura infatti un numero di tic pari al numero di agenti), mentre se tale variabile assume valore 1 i dati vengono visualizzati dopo ogni operazione sul mercato telematico di contrattazione. Con il primo tipo di modalità si possono condurre esperimenti ed analizzare gli effetti del valore di determinati parametri sulla serie di prezzi prodotta, mentre il secondo tipo di visualizzazione permette di studiare nel dettaglio il comportamento di ogni agente sul mercato dopo ogni operazione ed analizzare la microstruttura del *book* di negoziazione. Il parametro `stopAtEpochNumber` indica il numero di giornate di contrattazione che vengono simulate.

Nell'Observer inoltre vengono inizializzati dei parametri che permettono di visualizzare le rappresentazioni grafiche desiderate tra le quali quelle relative alla serie dei prezzi, alle quantità di ordini presenti nel *book* e le differenze di quantità e prezzi relative alle liste di ordini limitati, nonché la possibilità di inserire una sonda ed osservare il comportamento di un agente sul mercato simulato. Più tecnicamente in questo file ad una fase iniziale di creazione ed assegnazione degli oggetti, per ciascuno viene creata la relativa *probe* che permette di ottenere caselle di testo all'interno di una finestra tramite la quale l'utente può interagire con il modello e modificare il valore delle variabili. Dopodiché nel metodo `-buildObjects` vengono creati i grafici utilizzando metodi predefiniti di Swarm e vengono prodotte le righe di codice necessarie affinché l'Observer dialoghi con il Model, gli agenti ed il *Book* per l'avanzamento dei grafici. Come si può notare quindi la funzione dell'Observer è quella di creare un'interfaccia grafica che permette all'utente di osservare i risultati della simulazione nel corso del suo svolgimento ed eventualmente di modificare parametri per studiare relazioni tra parametri e risultato delle simulazioni.

Nel ModelSwarm invece viene creata la struttura informatica che permette di eseguire la simulazione ad agenti: vengono infatti creati gli agenti ed i metodi necessari all'interazione degli stessi con l'ambiente. Anche il Model produce una finestra tramite la quale l'utente può interagire con la simulazione modificandone alcuni parametri strutturali come ad esempio il numero di agenti per ogni tipologia da fare interagire nella simulazione oppure caratteristiche degli agenti come il `maxLossRate`. Nella prima parte del codice che caratterizza il Model (tradotta nel file `ModelSwarm.h`) si ha la creazione dell'oggetto Observer ed il richiamo dei suoi metodi, la dichiarazione delle variabili e degli oggetti necessari alla creazione dell'ambiente e degli agenti che saranno gli elementi fondamentali della simulazione. In `ModelSwarm.m` le variabili e gli oggetti vengono inizializzati, ma alcuni di questi potranno essere modificati dall'utente grazie alla creazione di una finestra di dialogo in Swarm. Particolarmente importanti sono i metodi `-buildObjects`, `-buildActions` e `-activateIn: swarmContext`. Il primo metodo permette la creazione delle caratterizzazioni dei vari tipi di agenti, la creazione dei *rule master*, la creazione delle liste di agenti e, molto importante, la creazione dell'ambiente della simulazione: il *book* di negoziazione. Creati gli oggetti, il metodo `-buildAction` permette di collocare tali strumenti nella simulazione e farli interagire. Infatti le righe di codice determinano la dinamica del sistema. Queste sono suddivise in tre gruppi di azioni:

- il primo gruppo consiste in un insieme di istruzioni che permette l'inizializzazione delle variabili all'inizio di ogni giornata: l'istruzione

```
[modelActions1 createActionTo: self message:
M(increaseCurrentDayNumber)];
```

incrementa il giorno della simulazione (che termina quando il numero di giorni è quello stabilito dall'utente);

l'istruzione

```
[modelActions1 createActionTo: theBook message:
M(setClean)];
```

ripulisce il book all'inizio di ogni giornata di contrattazione; proseguendo, l'istruzione:

```
[modelActions1 createActionTo: listShuffler message:
M(shuffleWholeList:) : agentList];
```

mescola la lista degli agenti per conferire una sorta di casualità nel susseguirsi delle azioni degli agenti stessi; l'istruzione successiva

```
[modelActions1 createActionForEach: agentList
message: M(act0)];
```

chiama ad agire ogni agente della lista tramite il metodo `act0` definito per ogni tipologia di agente. Tale metodo definisce l'operatività dell'agente nella fase di apertura del mercato.

- Il secondo gruppo di azioni (`modelActions2`) chiama ad agire, uno alla volta, tutti gli agenti della lista, richiamando per ognuno il metodo `act1` che ne determina l'operatività nella fase di contrattazione continua:

```
[modelActions2 createActionTo: theCurrentAgent
message: M(act1)];
```

Ogni volta che un agente interviene nel mercato tramite la definizione di un'operazione nel *book*, la simulazione procede al passaggio al tic successivo (il numero di tic per ogni giornata di contrattazione è pari al numero totale di agenti che vi intervengono).

- Il terzo gruppo di azioni calcola il prezzo medio di contrattazione e richiama il metodo `act2` per ogni agente della lista, simulando la fase di chiusura delle contrattazioni.

Tramite il gruppo di istruzioni seguente il Model crea lo *Schedule* della simulazione e ne conferisce la scansione temporale: nel primo tic si ha la fase di apertura con la possibilità di agire di tutti gli agenti; nei tic successivi operano tutti gli agenti nella fase di contrattazione continua, fino all'ultimo tic in cui l'intera lista di agenti viene interpellata per stabilire i valori delle variabili in una sorta di fase di chiusura della giornata di contrattazione in cui viene definito il valore di alcune variabili, come il prezzo medio della giornata, che saranno poi utilizzate da alcuni tipi di agenti (come l'agente Forecasting o gli agenti BP-CT).

```
modelSchedule = [Schedule createBegin: self];
[modelSchedule setRepeatInterval: agentNumber];
modelSchedule = [modelSchedule createEnd];
[modelSchedule at: 0 createAction: modelActions1];
```

```
for (i=0;i<agentNumber;i++)
[modelSchedule at: i createAction: modelActions2];
[modelSchedule at: agentNumber-1 createAction:
modelActions3];
```

Il Model e l'Observer costituiscono quindi gli elementi fondamentali di ogni simulazione che utilizzi la piattaforma Swarm in quanto consentono la creazione dell'ambiente, degli agenti che vi interagiscono e la suddivisione del modello in una parte strutturale ed in una interfaccia che permetta di modificare alcuni parametri per mirare la simulazione ad obiettivi specifici.

Ho parlato più volte, dell'ambiente della simulazione identificato con il *book* di negoziazione. Tramite l'operatività nel *book* infatti gli agenti sono in grado di modificare l'andamento del mercato che risulta, istante per istante, dalla definizione del prezzo di negoziazione.

5.5 Il Book

Il *book* di negoziazione in SUM consiste in una struttura informatica che riproduce il funzionamento del *book* reale di negoziazione della Borsa Italiana S.p.a.. Utilizzando quindi righe di codice vengono riprodotte le regole di funzionamento ed i limiti all'inserimento di ordini propri del sistema di negoziazione reale. Più tecnicamente tale struttura è implementata nei *file* *book.h* e *book.m* in cui vengono creati metodi ed oggetti relativi alle liste di ordini e per la registrazione o combinazione degli stessi. La necessità di adattare il codice scritto in ObjC con la biblioteca di funzioni Swarm fa sì che ogni file del modello debba essere presente con due estensioni: il file con estensione *.h* deve contenere la dichiarazione delle variabili, degli oggetti e dei metodi che verranno poi utilizzati nel file con estensione *.m*. In questo paragrafo verrà descritto il codice del file *book.m* segnalando le parti che permettono di creare il sistema di negoziazione.

Il file inizia con il richiamo dei file *book.h* e *BasicSumAgent.h* necessari affinché il *book* possa utilizzare variabili, oggetti e metodi e possa utilizzare metodi dichiarati nel file che crea le caratteristiche comuni di tutti gli agenti. Segue poi la creazione di alcuni metodi (che iniziano con la parola *set-*) che permettono al *book* di dialogare con il *ModelSwarm* in modo da inizializzare in tale ambiente delle variabili necessarie allo sviluppo delle azioni relative alla contrattazione: tale dialogo avviene con il richiamo dei metodi durante la simulazione da parte del *Model*. Tale dialogo permette inoltre al *book* di inviare dei valori al *Model* o all'*Observer* tramite i metodi dichiarati alla fine del file (tali metodi iniziano con *get-*). Più in particolare il *book* riceve i valori relativi al codice dell'agente che in quel momento sta operando sul mercato, il numero totale di agenti, la quantità massima di ordini che può trasmettere ogni agente quando viene chiamato ad agire e la lunghezza dei vettori che contengono prezzi medi e le azioni di un singolo agente. Il *book* al contrario produce i dati relativi al prezzo al quale viene eseguito l'ordine (che è il prezzo di mercato del titoli quell'istante), il prezzo medio fino a quell'istante, il numero di ordini di acquisto e di vendita presenti nel *book*. A tali dati prodotti ho poi aggiunto quelli relativi alla differenza tra le quantità di ordini, alla differenza tra miglior prezzo di acquisto e miglior prezzo di vendita proposto, alla quantità di ordini in ogni lista al termine della fase di apertura e alla differenza tra migliore e peggiore prezzo presenti in ogni lista di ordini limitati.

Nel codice si può poi trovare il metodo `createEnd` in cui vengono inizializzate le variabili e create le matrici relative alle liste di ordini, ai prezzi medi ed alle azioni di ogni agente sul mercato. I metodi vengono poi suddivisi in base a quale momento della giornata di contrattazione vengono richiamati dal Model: al termine della giornata di contrattazione viene calcolato il prezzo medio della giornata (metodo `setMeanPrice`) ed all'inizio della giornata vengono svuotate le variabili che contengono i valori della giornata precedente in modo da avere una pulitura del *book* di negoziazione (metodo `setClean`). Per quanto riguarda invece la vera e propria attività degli agenti sul mercato questa si può concretizzare con l'inserimento di un ordine nella fase di apertura (nel qual caso viene richiamato dall'agente attivo il metodo `setOrderBeforeOpeningFromAgent`) o nella fase di contrattazione continua (il metodo utilizzato è `setOrderFromAgent`). Il prezzo di mercato al termine di ogni tic viene poi fornito dal *book* con il metodo `getPrice` ed utilizzato dall'Observer per la visualizzazione ed il salvataggio dei dati.

Merita un approfondimento il modo in cui è stata riprodotta con il codice la possibilità di agire sul mercato simulato. Nel momento in cui un agente è chiamato ad agire, questo formula, secondo le proprie caratteristiche comportamentali, la decisione sulla quantità ed il prezzo del titolo da scambiare sul mercato. Se l'agente agisce nella fase di apertura tale ordine viene semplicemente registrato nella relativa lista del *book*, in ordine di prezzo. Se invece si è nella fase di contrattazione continua si verifica la natura dell'ordine e si confronta il prezzo proposto con quelli registrati nella lista di segno opposto; se si trova un ordine compatibile si esegue lo scambio e la cancellazione dell'ordine di segno opposto dalla lista, altrimenti l'ordine inserito viene registrato nella lista relativa, sempre rispettando la regola di ordinamento dei prezzi. Il *book* è quindi aggiornato in ogni istante, come anche il prezzo di mercato del titolo. Una rappresentazione grafica del funzionamento del *book* di negoziazione si può vedere nella Figura 5.3 in cui vengono riportate le due liste di ordini e le operazioni che possono essere effettuate. Come si può osservare il miglior ordine di acquisto ha un prezzo inferiore al migliore ordine di vendita. Un nuovo ordine è combinato con il primo elemento della lista di segno opposto se compatibile o inserito nella posizione giusta in base al prezzo proposto. Nella figura sono inoltre previsti gli ordini senza limite di prezzo che vengono combinati con il miglior ordine registrato nella lista di segno opposto. L'introduzione di tali ordini nel modello comporta un'ulteriore verifica della natura dell'ordine al momento del suo inserimento sul mercato e la sola combinazione (una descrizione delle modifiche verrà fornita nel Capitolo 6).

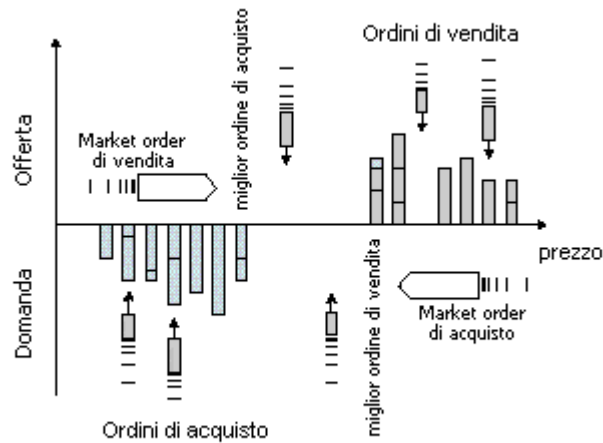


Figura 5.2. Una rappresentazione grafica della struttura del *book* (Immagine riprodotta ed adattata da Farmer et altri (2003)).

In questo modo il modello è quindi in grado di riprodurre il funzionamento del *book* reale di negoziazione nel quale possono agire investitori artificiali con caratteristiche comportamentali differenti che sono descritti nel paragrafo seguente.

5.6 Gli agenti

Mentre la riproduzione del *book* permette di ottenere un modello in cui si tiene conto delle regole di funzionamento di un sistema di negoziazione reale, la possibilità di fare interagire sul mercato diverse tipologie di agenti consente di studiare le componenti più soggettive che influenzano l'andamento dei prezzi legate alla natura umana degli investitori reali. Le varie tipologie di agenti inserite nel modello focalizzano una tipologia comportamentale realmente osservata e la traducono in regole che influenzano le decisioni di acquisto o di vendita e delle quantità degli investitori artificiali.

Agente *random*

Gli agenti *random* detti anche agenti *zero-intelligence* sono la tipologia più semplice di investitori: le decisioni non sono influenzate da nessun tipo di apprendimento o ricordo. La scelta se acquistare o vendere una certa quantità di titoli è il frutto di una scelta prettamente casuale. Tale tipo di agenti in una simulazione di un mercato di Borsa permette di ottenere un elevato numero di investitori che, pur essendo privi di qualsiasi forma di razionalità, producono serie di prezzi che rivelano caratteristiche proprie di un sistema complesso reale.

Nel modello di simulazione SUM l'operatività di tali agenti sul mercato è possibile grazie alla creazione dei file `RandomAgent.h`, `RandomAgent.m`, `RandomRuleMaster.h` e `RandomRuleMaster.m`. Nelle righe di codice viene sviluppato un modello comportamentale con il quale l'agente formula le proprie scelte di prezzo e quantità utilizzando parametri casuali (nel file `RandomRuleMaster.m`), ma che permette l'azione sul mercato simulato sia nella fase di apertura sia nella fase di contrattazione continua, creando un dialogo con il

book di negoziazione (nel file `RandomAgent.m`). L'agente conosce l'ultimo prezzo di contrattazione e la sua decisione di prezzo è calcolata moltiplicando tale prezzo per un coefficiente compreso tra $(\text{minCorrectingCoeff} + \text{asymmetricRange})$ e $(\text{maxCorrectingCoeff} + \text{asymmetricRange})$. Decide inoltre se acquistare o vendere con probabilità pari a 0.5.

L'uso di agenti zero-intelligence è utile sia per aumentare il numero di operatori sul mercato senza appesantire troppo la simulazione, sia per verificare l'effetto sull'andamento dei prezzi prodotti, di determinate variabili che riguardano le ipotesi sulla struttura del modello. Una simulazione con soli agenti *random* permette, infatti, di osservare come i prezzi si modificano aumentando il numero di titoli che possono essere scambiati in ogni istante, oppure aumentando il numero di agenti sul mercato o ancora introducendo la possibilità che gli ordini inseriti siano senza limite di prezzo. Si può quindi considerare l'esperimento con soli agenti *random* un'esperimento-base a partire dal quale si possono introdurre ed esaminare altre ipotesi sulle variabili strutturali del mercato o sulla tipologia di agenti che in esso operano.

Agenti Imitativi

Sui mercati finanziari reali si possono osservare comportamenti imitativi degli agenti per quanto riguarda le azioni da intraprendere che possono essere legati ad azioni di altri individui o all'osservazione dell'andamento dei prezzi sul mercato.

MarketImitating

Nel caso degli agenti *MarketImitating* l'informazione di riferimento riguarda i prezzi medi osservati sul mercato nei due giorni precedenti a quello attuale di negoziazione. La loro operatività sul mercato è garantita dalla presenza dei file `MarketImitatinAgent.h` e `MarketImitatinAgent.m` che contengono le istruzioni necessarie ad instaurare un dialogo con il *book* di negoziazione nel momento in cui uno di tali agenti è chiamato ad agire. La decisione riguardo alla natura dell'ordine è presa dall'agente in base alla tendenza dei prezzi osservata dal periodo t-2 al periodo t-1 (contenuta nei metodi `act0` e `act1`): l'agente decide di vendere se l'andamento dei prezzi è decrescente o di acquistare nel caso contrario. Tuttavia la decisione contiene una componente di indecisione rappresentata dal parametro `p=asymmetricBuySellProb` che viene moltiplicato al valore che rappresenta la decisione dell'agente.

Il comportamento imitativo di tali agenti, legato all'andamento dei prezzi medi osservati precedentemente sul mercato, conferisce una tendenza al permanere di situazioni di omogeneità di decisioni nelle fasi di crescita o riduzione dei prezzi, aumentando quindi l'insorgenza di bolle e *crash* e la loro entità rispetto all'esperimento base.

LocallyImitating

Come per gli agenti del tipo precedente il modello comportamentale simulato è quello di imitazione di un determinato fattore del mercato. In questo caso però il riferimento sono le decisioni precedentemente prese sul mercato da un certo numero di agenti (`n=localHistoryLenght`): se le azioni intraprese sono in prevalenza di acquisto il prezzo dell'ordine è pari all'ultimo prezzo di mercato (che corrisponde a `currentPrice`) moltiplicato per il parametro

buySellSwitch=asymmetricBuySellProb, altrimenti il fattore di moltiplicazione sarà buySellSwitch=1-asymmetricBuySellProb. La quantità di unità da scambiare sarà un numero casuale tra 1 e maxOrderQuantity.

Anche in questo caso aumenta l'insorgenza di bolle e *crash*, di minore intensità rispetto agli agenti che imitano l'andamento del mercato, ma aumenta la variabilità dei prezzi e diminuisce di conseguenza la prevedibilità del mercato.

Agente StopLoss

Gli *StopLossAgent* sono agenti che decidono di acquistare o vendere per fermare una possibile perdita se il prezzo corrente confrontato con il prezzo medio del giorno t -stopLossInterval è decrescente o crescente ad una tasso maggiore o uguale al parametro maxLossRate. La decisione di *stop loss* viene temporalmente dopo quella di comperare sotto il *floor price* e quindi può annullarla. Gli *StopLossAgent* possono agire in due modalità possibili:

- senza memoria del passato (checkingIfShortOrLong=0) ovvero non conta la posizione speculativa dell'agente: la decisione di acquisto o vendita di una quantità di titoli compresa tra 1 e maxOrderQuantity viene presa se il prezzo corrente, cioè l'ultimo executedPrice, (nel giorno t) è maggiore o uguale al prezzo medio di t -stopLossInterval* (1+maxLossRate) e minore o uguale al prezzo medio di t -stopLossInterval* (1-maxLossRate);
- con memoria del passato (checkingIfShortOrLong=1) e quindi conta la posizione speculativa dell'agente "ieri". Se il prezzo corrente è maggiore o uguale al prezzo medio di t -stopLossInterval* (1+maxLossRate) e minore o uguale al prezzo medio di t -stopLossInterval* (1-maxLossRate), l'agente compera se è *short* (shareQuantity<0) oppure vende se è *long* (shareQuantity>0) ed opera su una quantità compresa tra 1 e maxOrderQuantity, indipendentemente da shareQuantity.

L'effetto sulle serie di prezzi di questo tipo di agenti è quello di ridurre l'entità di bolle e crash, ma di aumentarne la prevedibilità.

Agente Forecasting

Tale agente formula le previsioni di prezzo utilizzando una rete neurale che ha come *input* degli indici di variazione dei prezzi dei giorni precedenti (il numero è legato ad un parametro - dataWindowLenght - modificabile dalla finestra del Model di Swarm) rispetto all'ultima media giornaliera. Il numero di nodi nascosti è calcolato dividendo per 2 il numero di nodi di *input*. La rete neurale produce come *output* un indice formato dal rapporto tra il prezzo stimato per il giorno $t + n$ ed il prezzo medio del giorno t . Le previsioni di prezzo sono formulate utilizzando dapprima pesi casuali, poi sostituiti da altri valori tramite un processo di apprendimento della RNA che conduce a valori di ponderazione che permettono di ottenere *output* della rete neurale prossimi ad altri valori (attesi) detti *target*. Questo agente non opera sul mercato, ma fornisce delle previsioni di prezzo che saranno utilizzate per la decisione riguardo la natura dell'ordine da parte degli agenti *ANNForecastingApp* e degli agenti BP-CT. La funzione di tale agente

all'interno della simulazione può quindi essere quella di rappresentare società reali di servizi agli investitori che forniscono informazioni ottenute dall'analisi tecnica di serie di prezzi osservate sul mercato.

Agente *ANNForecastApp*

Questi agenti (implementati nei file *ANNForecastAppAgents.h* e *ANNForecastAppAgents.m*) formulano la decisione di acquisto o vendita sulla base dell'indice di previsione fornito dal *ForecastingAgent* per il giorno futuro (quindi calcolata nel giorno corrente come rapporto tra prezzo previsto e prezzo medio corrente). Se l'indice di previsione risulta maggiore di $1+aNNInactivityRange$ la decisione è di acquisto, se invece l'indice è minore di $1-aNNInactivityRange$ è di vendita. Tale decisione è tradotta nel definire il prezzo dell'ordine moltiplicando il prezzo corrente di mercato rispettivamente per $buySellSwitch=asymmetricBuySellProb$ oppure per $buySellSwitch=1-asymmetricBuySellProb$. Opera inoltre una funzione *checkToAvoidNonsense* che controlla che l'andamento del prezzo corrente non abbia scavalcato la previsione. Questi agenti operano ogni giorno, ma con probabilità di agire $aNNForecastAppAgentActDailyProb$. La quantità è anche in questo caso un numero casuale compreso tra 1 e *maxOrderQuantity*. Un elevato numero di questo tipo di agenti aumenta la prevedibilità del mercato.

Agenti BP-CT

Gli agenti del tipo BP-CT sono agenti le cui decisioni sono il prodotto di una rete neurale artificiale (RNA), alla quale viene applicato il metodo di apprendimento detto CT (*Cross Target*) che introduce un modello di comportamento che si può definire cognitivo in quanto conferisce una capacità di agire in base alle congetture sulle azioni da compiere e le relative conseguenze. Nel modello di simulazione di un mercato di Borsa SUM, sono presenti due tipologie di agenti BP-CT che differiscono per numero e tipologia dei nodi di *input* e degli *output* prodotti. Tra i nodi di *output*, per entrambe le tipologie di agenti, si ha la decisione di acquisto o vendita (*bs*). Tale decisione è rappresentata da un numero reale compreso tra $+maxOrderQuantity$ e $-maxOrderQuantity$; se $bs>0$ l'agente acquista, altrimenti vende; se $bs=0$ l'agente non opera; la quantità è definita dal valore assoluto di *bs* (approssimato al valore intero più grande).

L'effetto degli obiettivi esterni consiste nella sostituzione delle congetture prodotte dalla rete neurale, con un altro valore ottenuto aggiungendo un parametro d (definito da *agentAEO_EPDelta* e *agentBEO_EPDelta* rispettivamente per l'agente A e per l'agente di tipo B che possono essere modificate nella *probe* del *Model*) agli effetti previsti dalla rete neurale, che sarà poi oggetto dell'applicazione del metodo CT per l'apprendimento e la produzione degli *output* definitivi.

L'apprendimento di lungo termine avviene ogni giorno in un insieme di dati mobile degli ultimi 10 giorni. Il numero di ripetizioni del ciclo è definito dal parametro *epochNumberInEachBPCTTrainingCycle* (modificabile dalla finestra del *Model*).

Tipo A

Gli agenti BPCTA hanno 7 nodi di *input* dei quali cinque sono costituiti dai prezzi medi dal giorno t-5 al giorno t-1, uno rappresenta la liquidità dell'agente e l'ultimo la quantità di azioni nel giorno precedente al giorno attuale (t). Nello strato intermedio si hanno 5 nodi nascosti e nell'ultimo strato 3 *output*: dal lato degli effetti la rete neurale produce gli *output* relativi alla quantità di azioni ed alla liquidità, dal lato delle azioni la decisione di acquisto o di vendita.

La rete neurale artificiale produce quindi le congetture riguardanti gli effetti dell'azione e la congettura sull'azione di acquisto o vendita. A questo punto vengono calcolati i target relativi all'azione ed i target relativi agli effetti dell'azione che saranno utilizzati per il processo di apprendimento e di determinazione dell'azione da compiere.

Gli *output* relativi alle congetture degli effetti, prodotti dalla rete neurale, vengono sostituiti da altri valori per la determinazione dell'azione da compiere, nel caso in cui le decisioni siano influenzate da obiettivi esterni (EO); si possono quindi distinguere quattro sottotipi di agenti:

EO_EP =0 non hanno obiettivi esterni;

EO_EP =1 l'obiettivo esterno è quello di accrescere la liquidità;

EO_EP =2 l'obiettivo esterno è quello di accrescere la quantità di azioni;

EO_EP =3 l'obiettivo è quello di accrescere sia la quantità di azioni che la liquidità.

Gli EO dei due effetti sono determinati sommando al valore dell'effetto del giorno precedente un ammontare fisso pari a delta (modificabile nella finestra del ModelSwarm); il delta è espresso in unità di azioni e se è applicato alla liquidità è moltiplicato per `bPCTMeanOperatingPrice`.

I target degli effetti sono determinati sulla base delle seguenti regole:

- target liquidità = liquidità del giorno precedente + variazione di liquidità dovuta alla decisione di acquisto/vendita (*output* azione della RNA)

- target quantità di azioni = quantità di azioni del giorno precedente + la variazione di azioni dovuta alla decisione di acquisto/vendita

Per la determinazione del target dell'azione vengono operate le seguenti correzioni (in unità di azioni):

- correzione liquidità = (guess di liquidità* – valore vero) / prezzo medio cui si è operato

*il guess di liquidità può essere sostituito dall'EO

- correzione quantità = guess di quantità* di titoli – valore vero

*il guess di quantità può essere sostituito da un EO

Se quindi la correzione di liquidità ha un valore positivo l'azione sarà la vendita di azioni, in quanto la liquidità desiderata è superiore a quella effettiva dell'agente, di acquisto nel caso contrario. Il numero di azioni oggetto della decisione è l'approssimazione al numero intero più grande del valore ottenuto dalla

trasformazione. Se la correzione di quantità è positiva la decisione sarà di acquisto perché il numero di titoli desiderato è maggiore del numero di titoli posseduti dall'agente. Il valore del target per l'azione deriva dalla correzione che risulta maggiore in termini di valore assoluto.

Tipo B

Gli agenti BP-CT del tipo B hanno 8 nodi di *input* tra i quali, come nel tipo A, i prezzi medi dei cinque giorni precedenti, la liquidità dell'agente ed il numero di titoli del giorno precedente, ma a differenza del tipo A, l'ottavo *input* è costituito dalla previsione di prezzo formulata dall'agente *forecasting* ad inizio giornata (per il tempo $t+n-1$). Ci sono 6 nodi nascosti ed aumenta a 5 il numero di nodi di *output* dei quali quattro dal lato degli effetti (liquidità, quantità di azioni, ricchezza sul prezzo di chiusura, ricchezza sul prezzo previsto dall'agente *forecasting* per il giorno corrente) ed uno dal lato delle azioni (acquisto o vendita). Come per la tipologia precedente è prevista la possibilità di inserire degli obiettivi esterni alla rete neurale e la relativa distinzione tra quattro sottotipi di agenti, in grado di influenzare le decisioni finali, sostituendo il valore delle congetture sugli effetti prodotte della RNA. In questo caso però gli obiettivi esterni che possono essere inseriti sono legati alla ricchezza dell'agente calcolata sulla base della quantità di azioni e della liquidità utilizzando il prezzo di chiusura oppure il prezzo previsto dall'agente *forecasting*.

I sottotipi di agente B possono essere:

EO_EP =0: non sono presenti obiettivi esterni;

EO_EP =1: l'obiettivo è accrescere la ricchezza calcolata sul prezzo di chiusura;

EO_EP =2: l'obiettivo è accrescere la ricchezza sul prezzo previsto;

EO_EP =3: l'obiettivo è accrescere entrambe le misure della ricchezza.

Gli agenti del tipo B rappresentano un'evoluzione rispetto a quelli del tipo A, non solo per l'introduzione tra gli *input* del prezzo previsto dall'agente *forecasting* per il giorno in corso, ma anche per la procedura di calcolo degli EO: gli EO dei due effetti ricchezza sono, infatti, calcolati applicando un delta fisso al valore dell'effetto nel giorno stesso (*guess* determinato dall'*output*); il delta è espresso in unità di ricchezza in quanto gli obiettivi esterni sono appunto definiti in tali termini.

I target degli effetti sono determinati sulla base delle seguenti regole:

- target liquidità = liquidità del giorno precedente + variazione di liquidità dovuta alla decisione di acquisto/vendita (*output* azione della RNA)

- target quantità di azioni = quantità di azioni del giorno precedente + la variazione di azioni dovuta alla decisione di acquisto/vendita

- target ricchezza valutata al prezzo di chiusura = liquidità + (quantità di azioni * ultimo prezzo della giornata)

- target ricchezza valutata al prezzo previsto = liquidità + (quantità di azioni * prezzo di chiusura al momento della previsione * indice della previsione)

Il target dell'azione viene calcolato sommando, all'*output* della RNA relativo all'azione, la maggiore correzione (in valore assoluto) tra le seguenti:

- correzione liquidità = (*guess* di liquidità – valore vero) / prezzo medio cui si è operato

- correzione quantità = *guess* di quantità di titoli – valore vero;

- correzione ricchezza_prezzochiusura = (*guess* di ricchezza calcolata sul prezzo di chiusura* – valore vero) / (prezzo di chiusura – prezzo medio cui si è operato)

* *guess* di ricchezza sul prezzo di chiusura può essere sostituito da un EO

- correzione ricchezza_prezzoprevisto = (*guess* di ricchezza su prezzo previsto* – valore vero) / (prezzo previsto – prezzo medio cui si è operato)

* *guess* di ricchezza sul prezzo previsto può essere sostituito da un EO

Come visto sopra, nel paragrafo relativo al metodo CT, dopo la determinazione dei target relativi ad azioni ed effetti, si passa alla correzione dei pesi della rete neurale (inizialmente sono valori casuali), per ottenere degli *output* degli effetti in accordo con le conseguenze dell'azione e un'azione in accordo con gli effetti che si vogliono ottenere. Dopo tale processo la RNA produce la decisione definitiva di acquisto o vendita.

La spiegazione della struttura del modello e di come ogni elemento sia inserito e sia in grado di interagire, è importante per la migliore comprensione del capitoli che seguono, in cui verranno utilizzate le varie tipologie di agenti, verranno introdotte alcune modifiche strutturali e cambiati i parametri in modo da aumentare la veridicità del modello e condurre esperimenti per capire come in tale sistema si formano fenomeni particolari come le bolle ed i *crash*.

Capitolo 6

Un'applicazione: composizione del *book* e bolle speculative

6.1 Introduzione

La versione del programma utilizzata per effettuare gli esperimenti è Sum-0.66 scritta con il linguaggio di programmazione Objective C, alla quale sono state apportate diverse modifiche (assegnazione di determinati parametri per gli esperimenti ed introduzione di grafici relativi ai dati del *book*). In tal modo ho ottenuto un modello che riproduce diverse caratteristiche proprie di un mercato di titoli reale: dalla successione delle fasi di negoziazione (apertura, contrattazione continua) che rappresenta una caratteristica puramente strutturale del mercato di Borsa, per sua natura definita da regole statiche, alla presenza di comportamenti individuali differenti, che identifica la componente “irrazionale” ed imprevedibile del mercato, ottenendo un complesso di dati su *file* da analizzare in seguito. Ho poi introdotto nel modello la possibilità di inserire ordini senza limite di prezzo, aumentando in tal modo la capacità della simulazione di riprodurre l’operatività sui mercati reali.

Nel paragrafo che segue saranno descritte le modifiche apportate al codice in modo da inizializzare il programma per gli esperimenti, con la definizione della possibile rilevanza di ogni variabile sui risultati. Dopodiché saranno definiti gli obiettivi degli esperimenti e le ipotesi che dovranno essere verificate ed infine saranno presentati i risultati ottenuti.

6.2 Le modifiche apportate al codice

Le modifiche apportate al codice iniziale di SUM consistono nell'introduzione di metodi e parametri nei *file* relativi al *book*, al Model e all'Observer per la visualizzazione ed il salvataggio dei dati e per l'introduzione di ordini senza limite di prezzo e nella dichiarazione di valori a determinati parametri visualizzati nelle finestre relative al Model e all'Observer all'inizio della simulazione per quanto riguarda il numero ed il tipo di agenti ed alcuni parametri a questi relativi. Di seguito sono spiegate le modifiche del primo tipo, mentre le successive saranno descritte durante l'illustrazione degli esperimenti.

6.2.1 La quantità di ordini al termine della fase di apertura

L'introduzione di ordini nella fase di apertura è regolata da un parametro modificabile all'inizio di ogni simulazione: `agentProbToActBeforeOpening`. Tale parametro influisce quindi sulla possibilità che un ordine sia inserito prima della fase di contrattazione continua nel momento in cui all'agente viene chiesto di inserire un ordine. Bisogna inoltre evidenziare come il valore di tale parametro debba essere piuttosto ridotto, poiché se un agente inserisce ordini nella fase di apertura non potrà più operare in sede di contrattazione continua. La variabile così assegnata verrà utilizzata da tutti i tipi di agenti perché variabile globale del modello.

Per avere a disposizione i dati relativi alla quantità di ordini in acquisto ed in vendita al termine della fase di apertura ho ricercato all'interno del *file* `Book.m` la parte di codice relativa all'immissione di un ordine prima dell'apertura del mercato (all'interno del metodo `setOrderBeforeOpeningFromAgent`). Ho notato come l'introduzione di un ordine in tale fase comporta l'incremento di due variabili: `sellOrderNumber` se l'ordine è di vendita (prezzo <0) `buyOrderNumber` se l'ordine è di acquisto (prezzo >0). Tali variabili vengono cancellate all'inizio di ogni giornata di contrattazione tramite il metodo `setClean`. Per salvare quindi la quantità di ordini in acquisto e in vendita al termine della fase di apertura ho creato due variabili `sellOrderNumberBeforeOpening` e `buyOrderNumberBeforeOpening`, che vengono assegnate ogni volta che viene inserito un ordine all'interno del *book* prima della fase di contrattazione continua. L'assegnazione avviene all'interno del metodo sopra citato in modo tale che non vengano modificate durante le operazioni di contrattazione continua. Per rendere disponibili tali dati per una rappresentazione grafica e per il loro salvataggio su *file*, che avviene con opportune modifiche nell'Observer, ho introdotto nel codice due metodi:

```
- (float) getSellOrderNumberBeforeOpening
{
    return (float) sellOrderNumberBeforeOpening;
}

- (float) getBuyOrderNumberBeforeOpening
{
    return (float) buyOrderNumberBeforeOpening;
}.
```

La seconda fase dell'implementazione consiste dunque nell'apportare le opportune modifiche all'interno del codice dei *file* `ObserverSwarm.h` ed `ObserverSwarm.m`. Nel *file* con estensione `.h` introduco la variabile che dovrà contenere un valore (1/0), che potrà essere modificato dalla finestra dell'Observer durante l'esecuzione, per la visualizzazione dei valori sul grafico relativo al *book*. A tal fine ho creato un oggetto ed una *probe* che verrà inserita nella finestra dell'Observer. Essendo le quantità di ordini dopo la fase di apertura non altro che una rappresentazione della composizione del *book* ad inizio di ogni giornata, nel caso in cui tali valori vogliano essere visualizzati dall'utente, questi formeranno due serie di valori nel grafico del *book*, nel quale sono riportate, istante per istante, le quantità di ordini di acquisto e di vendita. Per rendere possibile l'ampliamento del grafico già esistente nel modello, ho inserito le seguenti righe di codice, con le quali i dati vengono forniti direttamente dal *book* tramite i due metodi appositamente creati:

```
if (showBuySellOrderNumberBeforeOpening==1)
{
[bookGraph createSequence: "Sell orders before opening"
withFeedFrom: theBook andSelector:
M(getSellOrderNumberBeforeOpening)];
[bookGraph createSequence: "Buy orders before opening"
withFeedFrom: theBook andSelector:
M(getBuyOrderNumberBeforeOpening)];
}.
```

Per quanto riguarda la disponibilità di tali dati dopo la simulazione, questi vengono salvati su un apposito *file*, come tutte le altre serie di dati del grafico relativo al *book*, se la variabile `saveBookData` è uguale a 1, tramite l'istruzione:

```
if (saveBookData==1) [bookGraph setFileOutput: (BOOL) 1];
```

Le modifiche apportate permettono quindi di avere due nuove serie di prezzi nel grafico relativo al *book* che appaiono come due spezzate che assumono valori costanti per la durata di ogni giornata di contrattazione. Inoltre al termine della simulazione tali dati vengono salvati in due *file* di testo:

```
sellOrdersBeforeOpening e buyOrdersBeforeOpening.
```

I dati così ottenuti possono essere utili per individuare lo scostamento delle quantità di ordini da quelle iniziali, ma anche per evidenziare il "peso" della fase iniziale di apertura sulla quantità totale di ordini raggiunta durante la contrattazione continua.

6.2.2 Differenza tra le quantità di ordini di acquisto e di vendita in ogni istante

La differenza tra le quantità di ordini di acquisto e di vendita in ogni istante è una grandezza importante per lo studio dell'insorgenza di bolle speculative. Gli ordini che non trovano una controparte al momento della loro emissione, infatti, vengono inseriti nelle apposite liste del *book* degli ordini limitati, in attesa di trovare una proposta compatibile. La differenza nella lunghezza di tali liste fornisce una misura dello sbilanciamento nelle quantità di ordini presenti nel *book*, che influisce nella definizione dei prezzi delle proposte. Secondo le leggi di mercato, infatti un

eccesso di domanda crea un aumento dei prezzi ed un eccesso di offerta, al contrario, una loro contrazione.

Le modifiche apportate al codice per ottenere tali quantità, si concentrano nei file `Book.h`, `Book.m`, `ObserverSwarm.h` e `ObserverSwarm.m`. In `Book.h` viene dichiarato il metodo necessario per rendere le quantità disponibili per la visualizzazione grafica, mentre la creazione di tale metodo viene inserita in `Book.m` l'istruzione:

```
- (float) getBuySellQuantitySpread
{
    return sellOrderNumber-buyOrderNumber;
}.
```

Come si può notare, anche in questo caso, vengono utilizzate le variabili che registrano, ogni volta che un ordine è salvato nel *book*, il numero di ordini di acquisto e di vendita. Tale metodo sarà richiamato nel codice di `ObserverSwarm.m` al momento della creazione del relativo grafico.

In `ObserverSwarm.h` vengono dichiarate le seguenti nuove variabili:

```
showBuySellQuantitySpreadGraph
saveBuySellQuantitySpreadData
```

di tipo intero che vengono assegnate all'interno del codice dell'Observer, ma i cui valori possono essere modificati all'inizio della simulazione nella finestra delle variabili dell'Observer. Viene inoltre dichiarata la variabile

```
id <EZGraph> buysellQuantityGraph
```

il cui tipo è quello predefinito in `Swarm` per i grafici.

In `ObserverSwarm.m` vengono creati gli oggetti e le probe relative alle due variabili per la loro visualizzazione nella finestra Observer durante la simulazione. Viene inoltre costruito il grafico relativo alla differenza tra il numero di ordini in acquisto ed in vendita in ogni istante:

```
//Buy Sell Quantity Spread graph
if (showBuySellQuantitySpreadGraph==1)
{
    buysellQuantityGraph = [EZGraph createBegin: self];
    SET_WINDOW_GEOMETRY_RECORD_NAME (buysellQuantityGraph);

    if(saveBuySellQuantitySpreadData==1) [buysellQuantityGraph
setFileOutput: (BOOL) 1]; // to send the data also to a
file
    [buysellQuantityGraph setTitle: "Current quantity
spread of buy and sell orders"];
    [buysellQuantityGraph setAxisLabelsX: "Ticks x days."
Y: "Quantity Spread"];
    buysellQuantityGraph = [buysellQuantityGraph
createEnd];
    [buysellQuantityGraph createSequence: "Current quantity
spread of buy and sell orders" withFeedFrom: theBook
andSelector: M(getBuySellQuantitySpread)];
}
```

Ho poi aggiunto una parte di codice necessaria all'avanzamento del grafico nel tempo all'interno del metodo `buildActions`:

```

if (showBuySellQuantitySpreadGraph==1)
[displayActions createActionTo: buySellQuantityGraph
message: M(step)];

```

Con tali modifiche ho creato quindi un nuovo grafico da visualizzare durante la simulazione, con la possibilità di avere a disposizione i dati al termine, nel *file* `current quantity spread of buy and sell orders`.

6.2.3 Differenza tra i prezzi migliore e peggiore delle liste di ordini in ogni istante

A differenza delle due modifiche precedenti, nei successivi due paragrafi l'attenzione viene spostata alle differenze tra prezzi: la prima riguarda la differenza tra migliore e peggiore prezzo registrati nelle liste degli ordini di acquisto e di vendita, mentre la seconda, oggetto del paragrafo successivo, riguarderà lo *spread* tra miglior offerta di vendita e migliore offerta di acquisto.

La differenza tra la migliore e la peggiore offerta fornisce un'indicazione sulla possibile durata della permanenza degli ordini all'interno del *book*. Se infatti la combinazione di ordini di segno opposto avviene estraendo dalle liste le migliori proposte, la presenza di un'elevata differenza tra la migliore e la peggiore offerta può essere un segnale di una lunga permanenza degli ultimi ordini nella lista, creando un elevato numero di ordini ineseguiti a fine giornata.

Le modifiche apportate al codice, come in precedenza, coinvolgono i *file* `Book.h`, `Book.m`, `ObserverSwarm.h` e `ObserverSwarm.m`.

In `Book.h` vengono dichiarati due metodi che saranno poi richiamati dall'Observer per la costruzione del grafico, mentre nel *file* `Book.m` i due metodi vengono assegnati come segue:

```

- (float) getBuyFirstLastSpread
{
return [buyOrderStorehouse R: 0 C: 0]-[buyOrderStorehouse
R: buyOrderNumber-1 C: 0];
}
- (float) getSellFirstLastSpread
{
return [sellOrderStorehouse R: sellOrderNumber-1 C: 0]-
[sellOrderStorehouse R: 0 C: 0];
}

```

Mentre per le quantità nel codice vengono utilizzate delle variabili che vengono incrementate ogni volta che un ordine viene memorizzato nella rispettiva lista, la registrazione dei prezzi, segue un procedimento più complesso. Il modello SUM infatti tenta di riprodurre il funzionamento di un mercato di titoli reale ricreando la struttura del *book* reale di negoziazione. Secondo quindi regole reali gli ordini che non trovano una controparte immediata vengono registrati in due differenti liste, in ordine crescente per quanto riguarda le proposte di vendita e decrescente per gli ordini di acquisto. Nel codice del modello tali liste sono rappresentate dalle matrici `buyOrderStorehouse` e `sellOrderStorehouse` ed è da queste che saranno estratti i prezzi ritenuti rilevanti. In questo caso, nei metodi sopra citati viene considerata la differenza tra primo ed ultimo elemento della lista, ovvero tra il miglior prezzo offerto ed il peggiore. In realtà la differenza tra il primo ed ultimo elemento nella lista degli ordini di vendita corrisponde alla differenza

rispettivamente tra il prezzo più basso ed il prezzo più alto, ma essendo numeri negativi, la differenza produce un valore positivo che può essere così confrontato con quello prodotto per gli ordini di acquisto.

In `ObseverSwarm.h` vengono dichiarate le variabili di tipo intero:

```
showBuySellFirstLastSpreadGraph
saveBuySellFirstLastSpreadData
```

necessarie per contenere il valore (1 o 0) necessario per comunicare all'Observer l'indicazione di visualizzazione grafica o salvataggio eventuali dei dati raccolti. Inoltre viene definita la variabile di tipo grafico `buysellFirstLastGraph`.

In `ObseverSwarm.m`, vengono inserite le righe di codice relative alla creazione degli oggetti, delle probe, del grafico che riporta le due differenze calcolate istante per istante e dell'incremento dell'istante temporale, con una procedura analoga a quanto detto per la differenza della quantità di ordini descritta nel paragrafo precedente¹¹.

Anche in questo caso si ha la possibilità di salvataggio dei dati su *file* (`buy order list` e `sell order list`).

6.2.4 Calcolo, istante per istante, dello *spread*

La differenza tra il miglior denaro ed il miglior lettera (*spread*) è un parametro indispensabile per la comprensione dell'andamento del mercato dei titoli ed alla base di diversi studi (fra i quali Daniels, Famer, Iori, Smith 2002 e Farmer, Patelli, Zovko 2003) che individuano in tale quantità un parametro di confronto tra risultati prodotti dal modello e dati reali.

```
11 obj->showBuySellFirstLastSpreadGraph = 1;
obj->saveBuySellFirstLastSpreadData = 1;

[probeMap addProbe: [probeLibrary getProbeForVariable:
    "showBuySellFirstLastSpreadGraph" inClass: [self class]]];
[probeMap addProbe: [probeLibrary getProbeForVariable:
    "saveBuySellFirstLastSpreadData" inClass: [self class]]];
enel metodo buildObjects
// The difference between first and last order of buy and sell lists graph
if (showBuySellFirstLastSpreadGraph==1)
{
    buysellFirstLastGraph = [EZGraph createBegin: self];
    SET_WINDOW_GEOMETRY_RECORD_NAME (buysellFirstLastGraph); //to allow "Save"
    if (saveBuySellFirstLastSpreadData==1) [buysellFirstLastGraph setFileOutput:
        (BOOL) 1]; // to send the data also to a file
    [buysellFirstLastGraph setTitle: "first-last difference prices of buy and
        sell order lists"];
    [buysellFirstLastGraph setAxisLabelsX: "Ticks x days." Y: "Sell and Buy
        differences"];
    buysellFirstLastGraph = [buysellFirstLastGraph createEnd];
    [buysellFirstLastGraph createSequence: "Sell order list" withFeedFrom:
        theBook andSelector: M(getSellFirstLastSpread)];
    [buysellFirstLastGraph createSequence: "Buy order list" withFeedFrom:
        theBook andSelector: M(getBuyFirstLastSpread)];
}

if (showBuySellFirstLastSpreadGraph==1)
    [displayActions createActionTo: buysellFirstLastGraph message: M(step)];
```

Le modifiche al codice del modello di simulazione sono analoghe alle precedenti e coinvolgono i *file* relativi al *Book* ed all'*Observer*, con la creazione del metodo `getSpread` ed il suo richiamo nelle righe di codice dedicate alla creazione del rispettivo grafico `spreadGraph` e l'eventuale salvataggio dei dati nel *file* `Current spread`¹²

6.2.5 Ordini senza limite di prezzo

Gli ordini senza limite di prezzo o *market order* sono una componente importante sui mercati reali in quanto permettono di aumentare la liquidità, essendo combinati con il miglior ordine di segno opposto al momento dell'introduzione. La sola limitazione consiste nella presenza nel *book* di negoziazione di almeno un ordine limitato di segno opposto nel momento di inserimento dell'ordine senza limite di prezzo.

Le modifiche apportate al codice di SUM coinvolgono i *file* relativi al `ModelSwarm` ed al *Book*. In particolare ho introdotto una *probe* nella finestra del `Model` per poter assegnare ad una variabile il valore relativo alla probabilità che un ordine inserito sia senza limite di prezzo. Tale variabile sarà poi utilizzata dal *book* nel momento della ricezione dell'ordine dall'agente nella fase di contrattazione continua. Prima di operare sul *book* si confronta un numero casuale con la variabile relativa alla probabilità di avere un ordine di mercato; se l'ordine risulta essere con limite di prezzo si procede alla sua combinazione con un ordine compatibile registrato nel *book* o nella sua registrazione nell'apposita lista; in caso contrario si verifica il segno della variabile `prezzo` per stabilire se l'ordine è di acquisto o di vendita, si verifica che la lista degli ordini di segno opposto non sia vuota ed in caso affermativo si combina immediatamente l'ordine con il migliore di segno opposto.

```

12 metodo getSpread in book.m:
- (float) getSpread
{
  return [sellOrderStorehouse R: 0 C: 0]-[buyOrderStorehouse R: 0 C: 0];
}
creazione oggetti, probe e grafico in ObserverSwarm.m:
obj->showSpreadGraph          = 1;
obj->saveSpreadData           = 1;

[probeMap addProbe: [probeLibrary getProbeForVariable:
                    "showSpreadGraph"                inClass: [self class]]];
[probeMap addProbe: [probeLibrary getProbeForVariable:
                    "saveSpreadData"                  inClass: [self class]]];

//Buy Sell Spread graph
if (showSpreadGraph==1)
{
  spreadGraph = [EZGraph createBegin: self];
  SET_WINDOW_GEOMETRY_RECORD_NAME (spreadGraph); // to allow "Save"

  if (saveSpreadData==1) [spreadGraph setFileOutput: (BOOL) 1];
  [spreadGraph setTitle: "Current spread"];
  [spreadGraph setAxisLabelsX: "Ticks x days." Y: "spread"];
  spreadGraph = [spreadGraph createEnd];
  [spreadGraph createSequence: "Current spread" withFeedFrom: theBook
                           andSelector: M(getSpread)];
}

if (showSpreadGraph==1)
  [displayActions createActionTo: spreadGraph message: M(step)];

```

In `ModelSwarm.h` viene dichiarata la variabile relativa alla probabilità di avere un ordine senza limite di prezzo. In `ModelSwarm.m` tale variabile viene inizializzata con la creazione dell'oggetto:

```
obj-> probMarketOrder = 0.05;
```

ma potrà essere modificata prima di eseguire la simulazione nella finestra del Model grazie all'introduzione dell'apposita casella per l'assegnazione:

```
[probeMap addProbe: [probeLibrary
getProbeForVariable: "probMarketOrder"
inClass: [self class]]];
```

Sempre nel `ModelSwarm` è stata inserita un'istruzione che richiama un metodo nel *book* in modo da avere anche in tale ambiente il valore della variabile relativa alla probabilità che sarà necessaria per stabilire se l'ordine inserito è a prezzo limitato o senza limite di prezzo; tale istruzione è la seguente:

```
- setProbMarketOrder: (float) mo
{
    probMarketOrder=mo;
    return self;}

```

Sempre nel *file* `Book.m` ho inserito un'opzione all'interno del metodo `setOrderFromAgent` che permette di verificare se l'ordine inserito è un ordine con limite di prezzo oppure no. Questa verifica è ottenuta confrontando il valore del parametro `probMarketOrder` con un valore generato casualmente. Se quest'ultimo è maggiore ho un ordine con limite di prezzo e le azioni si svolgono normalmente, altrimenti si ha un ordine di mercato che richiede un adattamento del procedimento di gestione degli ordini: l'ordine inserito viene subito combinato con la migliore offerta di segno contrario (se non esistono offerte di segno contrario manda un messaggio di errore all'agente) senza che sia necessaria la fase di registrazione dell'ordine nel *book*.

```
- setOrderFromAgent: (int) n atPrice: (float) p
{...
    if (probMarketOrder <(float) [uniformDblRand
        getDoubleWithMin: 0.0 withMax: 1.0])
    { ordine con limite di prezzo: combinazione o registrazione nel book
    else
        { ordine senza limite di prezzo: combinazione con il miglior ordine di
        segno opposto, senza registrazione nel book13
```

13

```
if (probMarketOrder <(float) [uniformDblRand getDoubleWithMin: 0.0 withMax:
1.0])
{
    //the agent is selling at min price '-price'
    if(price<0)
        {if (buyOrderNumber>0 )
            {executedPrice=[buyOrderStorehouse R: 0 C: 0];
            currentMeanPrice+=executedPrice;
            count++;
            message(agentArrayIndex, number, -executedPrice);
            message(agentArrayIndex, (int) [buyOrderStorehouse R: 0 C: 1],
                executedPrice);
            buyOrderNumber--;
            [buyOrderStorehouse shiftRowsDown: buyOrderNumber];
            if(printing==1) [buyOrderStorehouse printNRows: buyOrderNumber];
```


Il prezzo al quale viene inserito l'ordine viene utilizzato esclusivamente per individuarne il segno (ordine di acquisto o di vendita) ed il prezzo al quale avviene la transazione è quello dell'ordine limitato di segno opposto.

6.3 Esperimenti

Nel primo ciclo di esperimenti ho condotto un'analisi generale dell'influenza di vari parametri e delle diverse tipologie di agenti sull'andamento dei prezzi osservabili a livello aggregato. L'obiettivo di individuare eventuali effetti sui prezzi e sulle variabili studiate, in un lasso di tempo che può essere considerato di lungo termine, ha imposto di allungare la durata del tempo simulato (il numero di unità di tempo reale si vuole riprodurre con la simulazione) a discapito della copertura puntuale per quanto riguarda i dati raccolti. Tuttavia studiare come cambiano i prezzi in presenza di certi valori dei parametri del modello è importante per la riproduzione realistica del sistema e per la validità della successiva analisi puntuale dei dati. Il tipo di esperimento cambia in questo caso: il tempo simulato si riduce da un numero di circa 2000 giornate di contrattazione a circa 90 giornate, mentre la raccolta dei dati diventa più precisa: anziché raccogliere un solo dato alla fine di ogni giornata di contrattazione, il modello permette di avere il livello del prezzo (che è quello al quale viene concluso l'ultimo scambio) dopo ogni azione di un agente sul mercato finanziario simulato.

6.3.1 Analisi delle serie di prezzi prodotte modificando tipo di agenti e parametri

L'esperimento alla base di successive modifiche consiste in una simulazione del mercato dei titoli in cui è prevista la negoziazione di un solo titolo che viene scambiato da 300 agenti del tipo *random* e i parametri inizializzati come si può

```

    }
    else
    { message(agentArrayIndex, number, 0.0);
      if (printing==1)
        printf("The book received a market order from agent #%3d but
              the order list has not orders \n", number);
    }
  }
  // the agent is buying at max price 'price'
  if (price>0)
  {if (sellOrderNumber>0)
    {executedPrice=[sellOrderStorehouse R: 0 C: 0];
     currentMeanPrice+=executedPrice;
     count++;
     message(agentArrayIndex, number, executedPrice);
     message(agentArrayIndex, (int) [sellOrderStorehouse R: 0 C: 1],
             -executedPrice);

     sellOrderNumber--;
     [sellOrderStorehouse shiftRowsDown: sellOrderNumber];
     if (printing==1) [sellOrderStorehouse printNRows: sellOrderNumber];
    }
  }
  else
  { message(agentArrayIndex, number, 0.0);
    if (printing==1)
      printf("The book received a market order from agent #%3d but
            the order list has not orders \n", number);
  }
}
}

```

vedere nella figura seguente che riporta la finestra del Model e dell'Observer come sono stati impostati prima di eseguire l'esperimento.

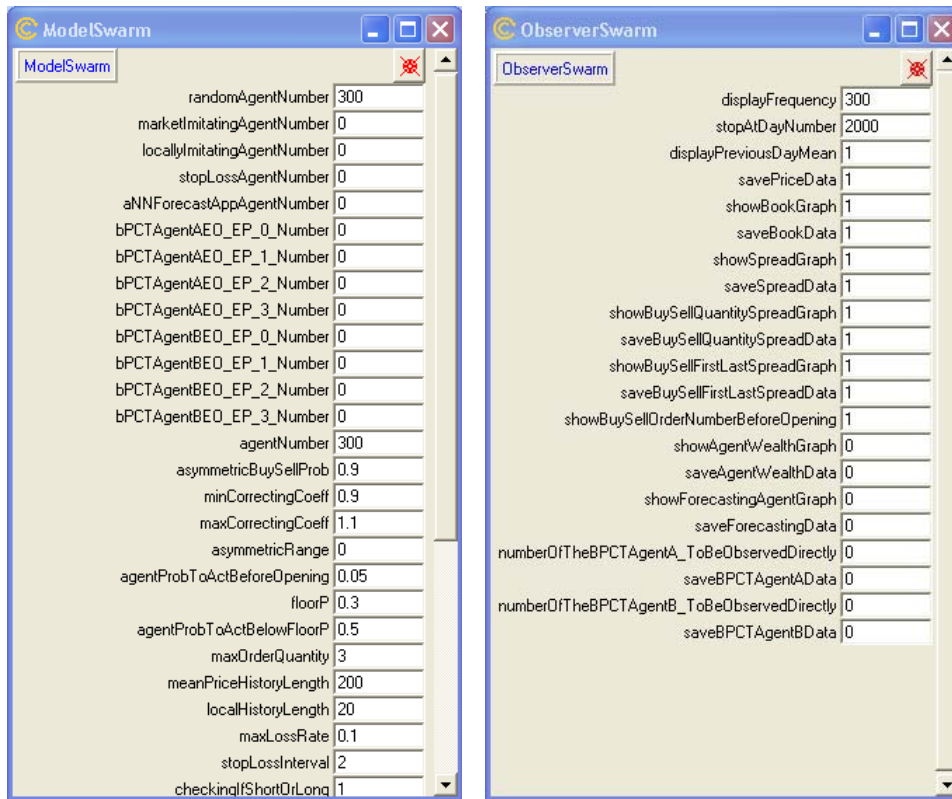


Figura 6.1. Model ed Observer dell'esperimento "base".

Come si può osservare nella finestra del Model è presente una sola tipologia di agenti ed i parametri rilevanti ai fini dell'analisi sono:

`agentProbToActBeforeOpening=0.05`

`maxOrderQuantity=3`

mentre nella finestra dell'Observer si può subito osservare come le variabili il cui valore è 1 siano quelle che permettono di visualizzare i dati relativi al prezzo corrente del titolo ed alle quantità di ordini presenti nel *book* che verranno poi analizzati.

Tale esperimento è stato prodotto impostando la visualizzazione dei dati dopo ogni giornata di contrattazione che ha una durata equivalente a tanti tic quanti sono gli agenti operanti sul mercato (`displayFrequency=n` con n =numero totale degli agenti). Questa è una caratteristica costante di tutti gli esperimenti del primo gruppo eseguiti. Inoltre l'orizzonte temporale considerato simula la contrattazione in 2000 giornate (nella finestra dell'Observer `stopAtDayNumber=2000`).

L'asta di apertura

Il primo parametro modificato è `agentProbToActBeforeOpening` il cui valore definisce la probabilità che un agente invii la propria proposta solo nella fase di apertura (in tale evenienza infatti tale agente non potrà più inserire ordini durante la fase di contrattazione continua). In particolare vengono studiate le serie

di prezzi prodotte dalla simulazione con i valori del parametro pari a 0.05, 0.01, 0.1 raffigurate in Figura 6.1.

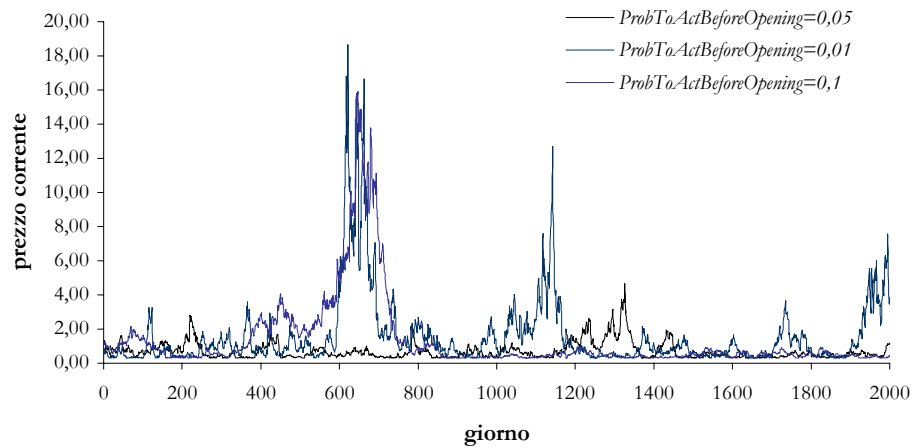


Figura6.1. Serie dei prezzi ottenute modificando il parametro che indica la probabilità che l'agente agisca nella fase di apertura.

Per valori del parametro più elevati si può notare che l'andamento dei prezzi si mantiene in genere su livelli più costanti, riducendo l'insorgenza di fenomeni rilevanti di veloce aumento o riduzione dei prezzi (bolle e *crash*). Un valore basso del parametro indica una bassa probabilità che l'agente decida di inserire un ordine nella fase di apertura. Questo significa che all'inizio di ogni giornata di contrattazione si avranno pochi ordini nel *book* con i quali iniziare la fase di contrattazione continua. Il prezzo definito dalla combinazione di un ordine con una controparte registrata nel *book* subisce più sbalzi in quanto gli ordini registrati essendo pochi sono meno omogenei per quanto riguarda il prezzo.

Quantità massima di ordini che ogni agente può inserire ogni volta che è chiamato ad agire sul mercato.

Con valori della variabile `maxOrderQuantity` più elevati si consente ad ogni agente di inserire più ordini unitari allo stesso prezzo nel momento in cui gli viene richiesto di agire. Questo consente una maggiore contrattazione sul mercato, ma provoca allo stesso tempo una maggiore variabilità dei prezzi. In Figura 6.2 viene riprodotta tale situazione con valori del parametro pari a 3, 6 e 10.

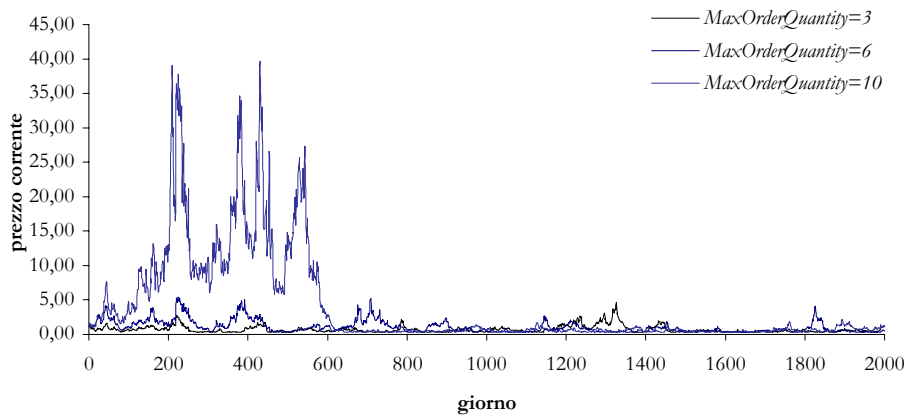


Figura 6.2. Serie dei prezzi ottenute modificando il numero massimo di ordini che un agente può inserire ogni volta che è chiamato ad agire.

Agenti eterogenei

Sempre partendo dall'esperimento base sono state inserite altre tipologie di agenti:

```
marketImitatingAgentNumber=15
locallyImitatingAgentNumber=15
stopLossAgentNumber=15
```

Inserendo nella simulazione tali tipi di agenti le cui decisioni di operare sono collegate all'andamento dei prezzi sul mercato, alle decisioni prese da altri agenti ed alle previsioni formulate dal *ForecastingAgent*, si nota come i prezzi assumano valori più elevati nell'insorgenza dei fenomeni anomali di bolle speculative: valore del prezzo massimo raggiunto pari a 900 rispetto a valori massimi fino a 20 degli esperimenti precedenti (Figura 6.3).

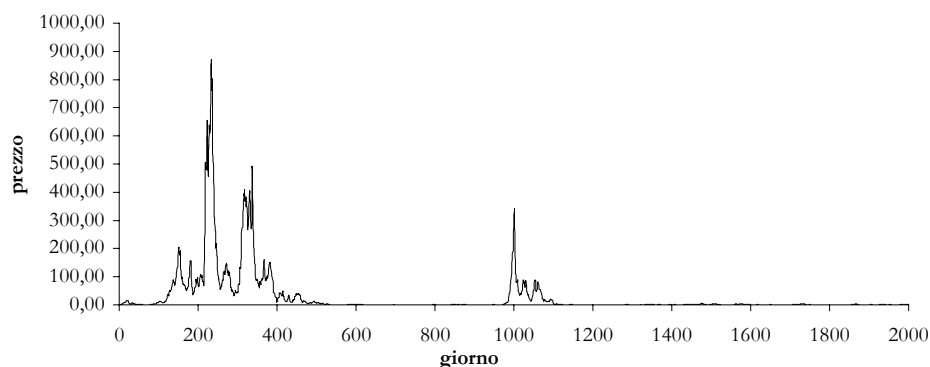


Figura 6.3. Serie dei prezzi ottenuta introducendo agenti le cui decisioni di prezzo sono formulate in modo da imitare l'andamento dei prezzi sul mercato o le azioni intraprese da altri agenti o per limitare le perdite sulla base del prezzo futuro previsto dall'agente *forecasting*.

Ho poi eseguito una simulazione inserendo 15 agenti del tipo *ANNForecastAppAgents* che formulano la decisione di acquisto o vendita sulla base

del prezzo previsto dall'agente *Forecasting* per il giorno corrente. La peculiarità consiste nel fatto che la previsione di prezzo viene formulata dall'agente *Forecasting*, ogni giorno, sulla base dei prezzi medi dei giorni precedenti, per un istante futuro, utilizzando una rete neurale artificiale.

In Figura 6.4 viene riportata la serie di prezzi prodotta da tale simulazione e confrontata con la serie di prezzi prodotta dall'esperimento con soli agenti *random*.

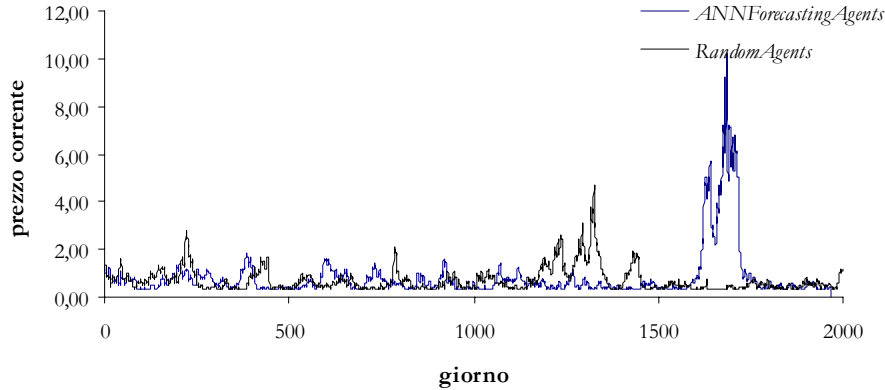


Figura 6.4 Serie dei prezzi prodotta dall'esperimento con ANNForecastAppAgents

Il confronto rivela una minore variabilità dei prezzi, soprattutto nella fase finale della simulazione in cui si affina la capacità di previsione del prezzo (dovuta all'apprendimento nella rete neurale) ed una maggiore rilevanza della bolla prodotta, dovuta alla regola comportamentale intrinseca agli agenti di acquisto di azioni se il prezzo previsto è superiore a quello effettivo sul mercato.

Per concludere gli esperimenti una tabella in cui vengono riportati il numero di bolle e *crash* relativi alle serie di prezzi prodotte, la media, il valore massimo e la deviazione standard.

	Agenti					maxOrderQuantity			ProbToActBeforeOpening		
	random	Imitating	ANNForecastApp	BPCTa	BPCTb	3	6	10	0.01	0.05	0.1
Num bolle	7	1	1	3	5	7	6	3	1	7	1
Num crash	4	1	1	1	5	4	5	1	2	4	2
Pzo max	4.66	869	10.24	11.54	3.17	4.66	5.43	39.6	18.6	4.66	15.9
Pzo medio	0.70	28.1	0.82	1.10	0.78	0.70	1.07	3.94	1.58	0.70	1.33
Dev. St.	0.49	83.8	1.09	1.54	0.51	0.49	0.90	6.83	2.11	0.49	2.23

Il procedimento di calcolo del numero di bolle e *crash* consiste nella suddivisione del lasso di tempo della simulazione in intervalli. Per ogni intervallo viene calcolato il prezzo medio. Vengono poi confrontati i prezzi medi di intervalli successivi. Se il prezzo dell'intervallo in esame è minore del prezzo medio dell'intervallo successivo, si ha un andamento crescente dei prezzi in tale intervallo. Si considera una bolla il fenomeno in cui si ha un'inversione di tendenza dei prezzi (da decrescente a crescente) e tale andamento viene mantenuto anche nei tre

intervalli successivi. Inoltre si ha una bolla solo se l'ultimo prezzo medio è maggiore di un valore calcolato come percentuale del prezzo massimo raggiunto nell'intero lasso di tempo della simulazione. Con procedimento analogo vengono contati i *crash* con la sola differenza che l'inversione di tendenza è da crescente a decrescente¹⁴.

Come si può notare dalla tabella introducenti altri tipi di agenti si ha un numero inferiore di bolle e *crash*, accompagnato da un aumento dei valori relativi al prezzo

¹⁴ La procedura realizzata in VBA è la seguente e viene applicata ai dati relativi ai prezzi prodotti dalle diverse simulazioni:

```

Sub FrequenzaBolle()
    Dim i, j, k As Integer
    Dim numero, m, n As Double
    Dim media As Double
    Dim contatoreBolla As Integer
    Dim contatoreCrash As Integer
    Dim dati(2000, 1) As Double
    Dim datiintervalli(2000, 1) As Double
    Dim inclinazione(2000, 1) As Double
    Dim numerointervalli As Integer

    Sheets("BPCT").Select
    numerointervalli = 100
    numero = 1900 / numerointervalli

    For k = 1 To 11
        contatoreBolla = 0
        contatoreCrash = 0

        For i = 1 To 1900
            dati(i, 1) = Sheets("Dati").Cells(i, k + 1)
        Next i
        For i = 1 To numerointervalli - 1
            media = 0
            For j = i * numero To (i + 1) * numero
                media = media + dati(j, 1)
            Next j
            media = media / numero
            datiintervalli(i, 1) = media
        Next i
        For i = 1 To numerointervalli
            If datiintervalli(i, 1) < datiintervalli(i + 1, 1) Then
                inclinazione(i, 1) = 1
            Else
                inclinazione(i, 1) = -1
            End If
        Next i

        For i = 1 To numerointervalli

            If inclinazione(i, 1) = -1 And inclinazione(i + 1, 1) = 1
                And inclinazione(i + 2, 1) = 1
                And inclinazione(i + 3, 1) = 1
                And datiintervalli(i + 3, 1) > Sheets("Dati").Cells(12, 11 +
                k) / 10 Then
                    contatoreBolla = contatoreBolla + 1
            End If
            If inclinazione(i, 1) = 1 And inclinazione(i + 1, 1) = -1
                And inclinazione(i + 2, 1) = -1
                And inclinazione(i + 3, 1) = -1
                And datiintervalli(i, 1) > Sheets("Dati").Cells(12, 11 + k) / 10
                Then
                    contatoreCrash = contatoreCrash + 1
            End If
        Next i
    Next k
End Sub

```

medio, al prezzo massimo ed alla deviazione standard, rispetto all'esperimento base con soli agenti *random*. Ogni tipologia di agenti ha proprie caratteristiche d'azione, che conferiscono una certa omogeneità di comportamento che traspare dalle serie di prezzi. L'effetto di questa omogeneità si traduce in un aumento dei prezzi e in fenomeni anomali di maggiore entità. Anche aumentando il numero di titoli che ogni agente può scambiare nel momento in cui è chiamato ad agire determina livelli di prezzi più elevati al momento di sviluppo dei fenomeni, proporzionalmente con il valore del parametro: più elevato è il numero di titoli che possono essere scambiati e minore è il numero di bolle e *crash*, ma maggiori sono le loro dimensioni e visibilità. Al contrario aumentando il numero di agenti che opera nella sola fase di apertura, i prezzi si mantengono su livelli inferiori ed aumenta il numero di bolle in quanto si ha una minore contrattazione nella fase continua e di conseguenza meno possibilità di sviluppo dei fenomeni anomali.

In ultimo sono stati condotti degli esperimenti per evidenziare l'influenza di agenti cognitivi sulle serie dei prezzi. L'introduzione di tali agenti nella simulazione conferisce una maggiore complessità alla gamma di comportamenti presenti sul mercato. Infatti le decisioni di tali agenti non vengono prodotte tramite l'applicazione di regole definite di comportamento, ma sono il frutto di un processo di apprendimento, tramite il quale gli agenti formulano la decisione di acquistare o vendere il titolo in base alla valutazione di determinati fattori. In Figura 6.5a vengono riportate le serie di prezzi prodotte da tre esperimenti base in cui vengono fatti interagire solo agenti *random*, agenti BP-CT del tipo A ed agenti BP-CT del tipo B.

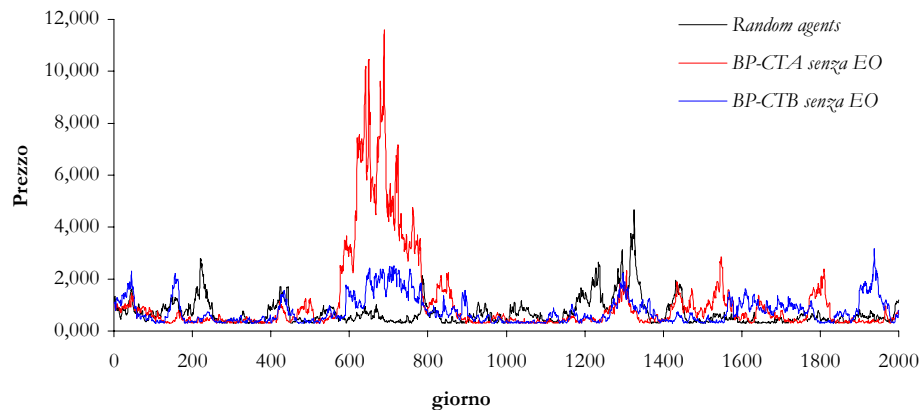


Figura 6.5a – Serie dei prezzi prodotte da *random agents*, *BP-CTA Agents*, *BP-CTB Agents*.

Rispetto all'esperimento base, l'introduzione di agenti BP-CT del tipo A ha come conseguenza una minore frequenza nell'insorgenza di bolle che assumono una durata ed una dimensione maggiori. Questo può indicare che gli agenti di questo tipo sono in grado di 'sfruttare' dei momenti favorevoli del mercato in modo da ottenere una maggiore ricchezza. Le congetture sugli effetti della RNA e la determinazione dei target per il metodo CT, vertono sulla quantità di azioni e sulla liquidità. Tali misure anche se indirettamente, sono collegate ad un possibile effetto dell'azione che verrà compiuta sulla ricchezza: l'effetto liquidità indica come varia la disponibilità liquida in seguito ad una determinata azione e di

conseguenza la porzione più riconoscibile della ricchezza, mentre la quantità di azioni possedute può sempre essere tradotta in termini di ricchezza se moltiplicata per il prezzo corrente. Gli agenti BP-CT del tipo B producono bolle, rispetto all'esperimento base ma di minore entità. Sembra quindi che l'introduzione di più fattori da considerare per formulare la decisione di acquisto o vendita tra i nodi di *input* della RNA conferisce un atteggiamento più 'prudente' da parte degli agenti nelle situazioni di forte variazione dei prezzi.

Nella Tabella 1 sono riportate la media e la deviazione standard delle serie dei prezzi sopra rappresentate. Si può osservare che i prezzi si mantengono su livelli medi più elevati rispetto ai soli agenti *random*, anche se in misura minore per gli agenti del tipo B; anche la variabilità aumenta introducendo gli agenti cognitivi, comportando quindi una maggiore instabilità dei prezzi ed una maggiore probabilità di variazione improvvisa dell'andamento. L'effetto dell'introduzione di agenti cognitivi sul mercato è quindi quello di amplificare le tendenze del mercato, aumentando la rilevanza dei fenomeni, anche se più contenuta per gli agenti del tipo B.

	<i>Random agents</i>	<i>BP-CTA</i>	<i>BP-CTB</i>
<i>Media</i>	0,697	1,098	0,779
<i>Deviazione standard</i>	0,492	1,543	0,509

Tabella 6.1. Prezzi medi sull'intero intervallo e deviazione standard.

Merita un approfondimento l'influenza di obiettivi esterni sulle decisioni degli agenti cognitivi e quindi sull'andamento dei prezzi. Le due tipologie di agenti BP-CT differiscono per il tipo di obiettivo e per questo vengono analizzate separatamente: mentre per gli agenti di tipo A tali obiettivi sono orientati all'aumento della liquidità o della quantità di azioni posseduta, che possono essere ricondotti ad una variazione della ricchezza dell'agente, per gli agenti del tipo B gli obiettivi esterni vertono direttamente sull'aumento della ricchezza, calcolata al prezzo di chiusura o sul prezzo previsto dall'agente *forecasting*.

In Figura 6.5b vengono riportate le serie di prezzi prodotte utilizzando, di volta in volta, quindici agenti per ognuna delle tipologie previste di BP-CTA .

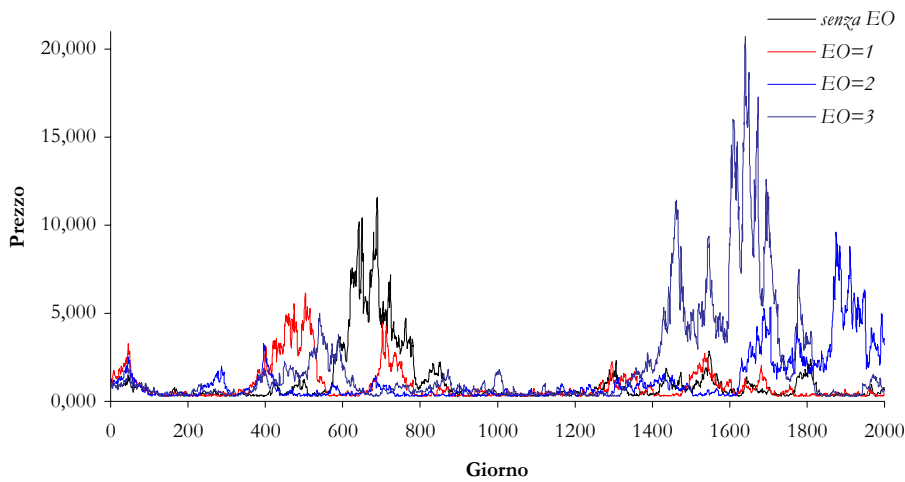


Figura 6.5b. Serie di prezzi con agenti BP-CT A senza obiettivi esterni o con obiettivi esterni.

Si può interpretare la presenza degli obiettivi esterni come possibili reazioni a determinati avvenimenti sul mercato: la possibilità che i prezzi possano essere in una fase di ribasso può indurre i risparmiatori a vendere azioni (EO=1) oppure la possibilità di un futuro rialzo può indurre ad acquistare un maggior numero di azioni per aumentarne la quantità (EO=2). L'introduzione di agenti con EO=1 corrisponde all'introduzione sul mercato di un certo numero di agenti ribassisti, che avrà come conseguenza livelli di prezzo più bassi, ed al contrario gli agenti con EO=2 avrà come conseguenza prezzi che si mantengono su livelli più elevati.

I prezzi generati dall'esperimento con EO=1 sono mediamente più bassi rispetto alle altre situazioni. L'obiettivo di accrescere la liquidità si traduce in azioni degli agenti di vendita o di acquisto di una minore quantità di azioni. In presenza di una maggiore quantità di ordini di vendita, secondo le leggi del mercato, i prezzi si mantengono su livelli più bassi, come si può anche osservare dall'esperimento. Gli agenti BP-CT di questo tipo, quindi, hanno un comportamento che qualitativamente è in accordo con le proprietà dei mercati reali. A livelli di prezzo più bassi è associata una minore variabilità, come indicato dalla deviazione standard della serie dei prezzi (Tabella 2), rispetto al caso senza EO. L'effetto dell'obiettivo esterno è quello di una serie di prezzi che si mantiene su livelli più bassi e più stabili, quindi con una minore insorgenza di bolle di grossa entità.

	BP- CTA_EO=0	BP- CTA_EO=1	BP- CTA_EO=2	BP- CTA_EO=3
Media	1,098	0,900	1,150	1,016
Deviazione standard	1,543	0,944	1,364	2,948

Tabella 6.2. Prezzo medio e deviazione standard con agenti BP-CTA.

La serie di prezzi prodotta con EO=2 ha una media superiore a EO=0 ed EO=1, ma la deviazione standard si mantiene su livelli inferiori al caso senza obiettivi esterni: l'introduzione di EO ha come effetto la riduzione della variabilità dei prezzi, rispetto ai comportamenti prodotti in assenza.

La combinazione dei due obiettivi esterni, invece ha l'effetto di una riduzione del prezzo medio ed un aumento della variabilità dei prezzi. Questo è dovuto al processo decisionale scelto nel quale, per la costruzione del target viene preferita la correzione che risulta maggiore in termini assoluti: tale decisione non è legata ad una scelta comportamentale omogenea, ma conferisce una certa instabilità nelle azioni intraprese dagli agenti. Tuttavia la deviazione standard fornisce un'indicazione di una maggiore variabilità dei prezzi rispetto al valore medio dovuta alla presenza di una fase di forte e perdurante crescita dei prezzi, accompagnata però, nel complesso, da prezzi su livelli piuttosto costanti (diminuisce il fenomeno delle bolle in termini di frequenza, mentre aumenta in termini di rilevanza).

Come detto sopra gli agenti del tipo B si differenziano per la tipologia e metodo di calcolo degli *output* e per i differenti obiettivi esterni che vanno ad influire sulla determinazione dei target relativi agli effetti delle azioni sulla ricchezza. In particolare la ricchezza dell'agente viene calcolata in base alla liquidità ed al numero di azioni che vengono valutate, in termini monetari, utilizzando due prezzi differenti.

L'introduzione di obiettivi esterni incentrati sull'aumento di ricchezza mira ad aumentare l'importanza del prezzo nel definire l'azione da compiere. Infatti inserendo come obiettivo esterno l'aumento della ricchezza calcolata al prezzo di chiusura ($EO=1$), l'operazione desiderata sarà acquisto se il prezzo di chiusura è maggiore del prezzo medio cui si è operato (il che indica una tendenza all'aumento dei prezzi durante la giornata di contrattazione); il valore dell'obiettivo esterno va a sostituire (con un valore più alto) il valore congetturato di ricchezza dalla rete neurale aumentando quindi la quantità di azioni relative all'operazione che verrà scelta. Lo stesso vale per l'obiettivo di accrescere la ricchezza calcolata sul prezzo previsto dall'agente *forecasting*, ma la decisione sarà di acquisto se il prezzo previsto è superiore al prezzo medio: per il futuro ci si aspetta un aumento dei prezzi e quindi un aumento del valore dei titoli posseduti.

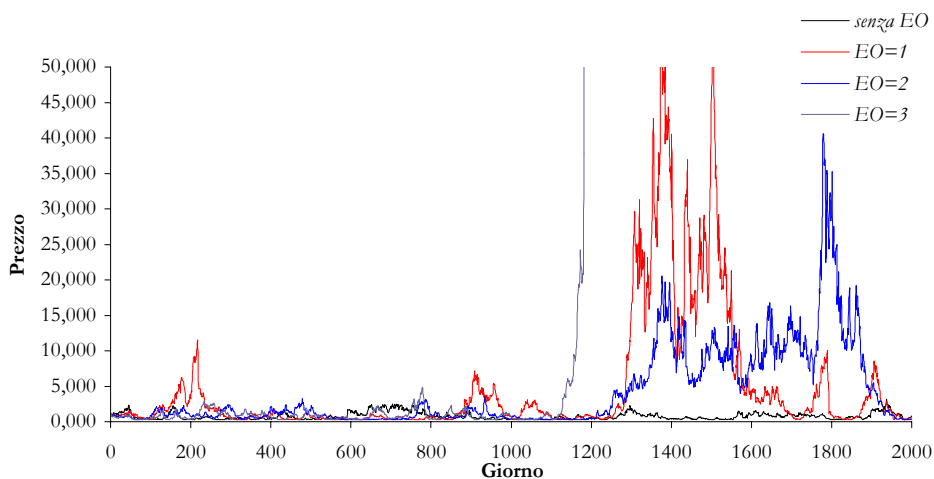


Figura 6.5c. serie dei prezzi prodotte con agenti BP-CTB.

L'effetto sulle serie dei prezzi dell'introduzione di obiettivi esterni che mirano ad aumentare la ricchezza risulta essere un aumento dell'entità dei fenomeni, a

fronte di periodi di relativa costanza degli andamenti. Ciò conferisce agli agenti la capacità di mantenere comportamenti omogenei sul mercato, ma anche di amplificare eccessivamente la tendenza al persistere di una forte crescita dei prezzi.

In Figura 6.5c si nota come in una prima fase della simulazione i prezzi si mantengano su livelli piuttosto bassi con la nascita di bolle di scarsa rilevanza, mentre dal momento in cui si forma una bolla, questa perdura a lungo raggiungendo livelli di prezzo molto elevati (con EO=3). Con agenti con EO=1 si nota che le bolle aumentano di valore, mentre con EO=2 ne aumenta la durata; la combinazione dei due obiettivi esterni ha come effetto la nascita di un forte aumento dei prezzi che non termina prima della fine della simulazione. Inoltre come si può leggere nella Tabella 3 i prezzi, con obiettivi esterni, assumono valori medi più elevati, ed un'elevata deviazione standard anche in questo caso però dovuta agli alti prezzi raggiunti durante le bolle e non ad un aumento di frequenza delle bolle stesse.

	BP- CTB_EO=0	BP- CTB_EO=1	BP- CTB_EO=2	BP- CTB_EO=3
<i>Media</i>	0,779	4,798	4,115	15276,057
<i>Da 0 a 1000</i>	0,835	1,372	0,965	0,894
<i>Da 1000 a 2000</i>	0,723	8,217	7,257	30520
<i>Deviazione standard</i>	0,509	9,193	5,815	41770,11
<i>Da 0 a 1000</i>	0,572	1,635	0,626	0,649
<i>Da 1000 a 2000</i>	0,431	11,952	6,886	54973

Tabella 6.3. Media e deviazione standard delle serie di prezzi con agenti BP-CTB

Per concludere la Tabella 4 fornisce uno schema riassuntivo per tutte le tipologie di agenti, evidenziando il numero di bolle e *crash* che si manifestano per tutta la durata della simulazione.

	<i>random</i>	BP-CTA				BP-CTB			
		EO=0	EO=1	EO=2	EO=3	EO=0	EO=1	EO=2	EO=3
<i>Numero di bolle</i>	14	3	3	6	4	11	2	5	3
<i>Numero di crash</i>	11	3	6	5	5	15	2	5	1
<i>Prezzo medio</i>	0,697	1,098	0,9	1,115	1,016	0,779	4,798	4,11	15276
<i>Prezzo massimo</i>	4,663	11,543	6,161	9,608	20,689	3,170	67,496	40,5	325921

Tabella 6.4. Numero di bolle e di *crash* nell'intervallo della simulazione per i tipi di agenti esaminati.

Il numero di bolle e *crash* per gli agenti *random* è superiore a quello degli agenti cognitivi di tipo A. Questo fenomeno si può interpretare come una tendenza alla presenza di bolle di maggiore entità per gli agenti cognitivi, confermata anche da un prezzo medio ed un prezzo massimo maggiori. Per gli agenti di tipo B si osserva invece una minore frequenza di bolle, ma una maggiore frequenza di *crash*,

che insieme ad un prezzo massimo più basso fanno pensare ad una riduzione dell'entità delle bolle.

L'introduzione di obiettivi esterni del tipo 1 comporta, per gli agenti di tipo A, la stessa frequenza delle bolle ed un aumento di *crash*, che conferma l'ipotesi di tendenza ad una riduzione dei prezzi introducendo comportamenti degli agenti che si pongono come obiettivo l'aumento della liquidità. L'obiettivo 2, invece aumenta la frequenza sia delle bolle sia dei *crash*, causando quindi una minore entità di tali fenomeni rispetto al caso senza obiettivi esterni, ma ad un aumento dei prezzi come indicato dal prezzo medio. La combinazione dei due obiettivi comporta una riduzione sia delle bolle (ma minore che in 2) che dei *crash* (minore che in 1). L'effetto è una riduzione nella frequenza dei fenomeni accompagnato da un incremento della loro dimensione.

Per gli agenti di tipo B invece gli obiettivi esterni comportano una riduzione della frequenza con cui avvengono sia le bolle che i *crash*, indicando una tendenza a fenomeni più visibili. Un discorso a parte per gli agenti del tipo BEO=3 in cui si ha un prezzo massimo raggiunto estremamente elevato dovuto alla combinazione tra la riduzione della frequenza delle bolle, rispetto all'esperimento senza obiettivi esterni, ed alla riduzione del numero di *crash* che conducono ad una maggiore entità dei fenomeni, in questo caso di crescita dei prezzi perché il numero delle bolle è maggiore del numero di *crash*.

L'introduzione di agenti cognitivi sul mercato ha quindi la caratteristica di una maggiore coerenza nel comportamento degli agenti rispetto all'andamento del mercato. Infatti la presenza di fenomeni più evidenti può essere interpretata come il tentativo degli investitori di sfruttare le occasioni favorevoli del mercato.

Nodi nascosti

Gli esperimenti in esame consistono nel modificare la struttura della RNA sottostante il processo decisionale degli agenti, in particolare analizzando le serie di prezzi prodotte incrementando il numero di nodi intermedi. L'introduzione di un diverso numero di nodi intermedi (o *hidden*) nella RNA modifica infatti le serie di prezzi prodotte (rappresentate nelle figure 6.5d e 6.5e) , rivelando l'effettiva importanza di ogni ipotesi nella costruzione della rete neurale stessa. In particolare l'effetto osservato con l'introduzione di agenti cognitivi di una maggiore visibilità dei fenomeni viene ridimensionato da un numero maggiore di nodi nascosti.

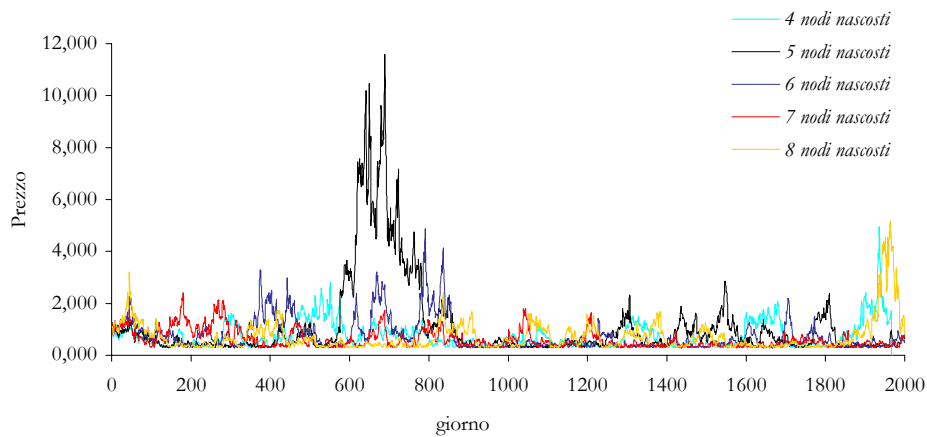


Figura 6.5d. Serie dei prezzi prodotte da agenti BP-CTA con 4, 5, 6, 7 e 8 nodi nascosti.

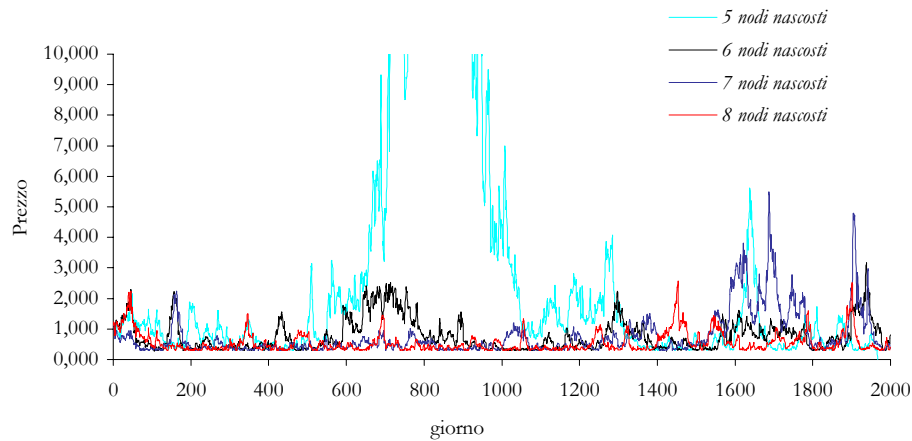


Figura 6.5e. Serie dei prezzi prodotte da agenti BP-CTB con 5, 6, 7 e 8 nodi nascosti.

Dalle figure si nota che i fenomeni di forte variazione dei prezzi (come possono essere le bolle ed i *crash*) si riducono in ampiezza, all'aumentare del numero di nodi nascosti inseriti. Come detto precedentemente, l'effetto dell'azione di agenti cognitivi nel mercato simulato, si concreta con l'aumento dell'entità dei fenomeni per quanto riguarda non tanto il raggiungimento di picchi elevati, quanto per l'ampiezza o durata del periodo in cui tali fenomeni si sviluppano. Si può osservare quindi, una riduzione dell'ampiezza dei fenomeni proporzionale all'aumento del numero dei nodi nascosti. L'effetto quindi, sia per gli agenti di tipo A che quelli di tipo B è una riduzione della personalità degli agenti, nel senso di una minore evidenza dell'omogeneità comportamentale caratteristica degli agenti cognitivi. In questo modo si ottengono serie di prezzi che riflettono un atteggiamento degli agenti più prudente e meno orientato allo sfruttamento di andamenti favorevoli del mercato. Tali caratteristiche si possono anche dedurre dai dati che riguardano il numero di bolle e *crash* prodotte dalle diverse simulazioni riportati in Tabella 5.

	BP-CTA					BP-CTB			
	4	5	6	7	8	5	6	7	8
Numero hidden	4	5	6	7	8	5	6	7	8
Numero di bolle	6	4	3	7	7	5	6	9	7
Numero di crash	8	9	8	6	7	7	7	6	6
Prezzo medio	0.743	1.114	0.765	0.605	0.672	4.665	0.779	0.762	0.554
Prezzo massimo	4.946	11.54	4.871	2.396	4.380	157	3.170	5.453	2.571
Dev. standard	0.499	1.56	0.604	0.349	0.470	12.89	0.513	0.695	0.322

Tabella 6.5. Tabella riassuntiva della media e deviazione standard delle serie di prezzi, modificando il numero di nodi nascosti della rete neurale sottostante la decisione di acquisto o vendita degli agenti BP-CT del tipo A e B e frequenza delle bolle e dei *crash* in relazione al numero di nodi nascosti.

Il numero di bolle e *crash* viene calcolato in base al protrarsi dell'andamento in un numero fisso di intervalli. In tal modo se l'andamento crescente continua nel tempo, il numero di bolle risulta inferiore (con un numero ridotto di nodi nascosti) rispetto a serie di prezzi in cui i fenomeni rilevanti si risolvono in periodi più ristretti (in questo caso con un numero di nodi nascosti elevato). Inoltre aumentando il numero di nodi nascosti le serie di prezzi si mantengono su livelli medi più bassi, confermando la tendenza ad una minore rilevanza dei fenomeni, accompagnata da un aumento della loro frequenza. L'introduzione di un maggior numero di elementi di 'valutazione' intermedi nel processo decisionale influisce quindi sull'omogeneità comportamentale degli agenti sul mercato.

Questo primo tipo di esperimenti è stato condotto in modo da avere una visione generale sulle caratteristiche applicative del modello con particolare riferimento all'effetto dell'azione degli agenti e del valore di determinati parametri sulle serie di prezzi prodotte nell'intero lasso di tempo simulato. Si può notare come combinando diversi fattori si possano riprodurre situazioni reali per studiare i comportamenti degli agenti, oppure utilizzare l'esperimento base per individuare l'importanza dei fattori strutturali del mercato (identificati dal valore dei parametri) sull'andamento dei prezzi generati. Nei paragrafi successivi, invece, il tipo di esperimento e gli obiettivi saranno differenti e l'analisi sarà rivolta a comprendere la microstruttura del mercato finanziario in un determinato istante.

6.3.2 Analisi tic per tic della struttura del Book

Oggetto di questo paragrafo è quello di individuare delle possibili cause dell'insorgenza di bolle speculative legate al meccanismo di negoziazione tramite il *book*. Per questo sono state effettuate simulazioni, che a differenza delle precedenti, hanno un meccanismo di visualizzazione e salvataggio dei dati ad ogni tic, ovvero dopo ogni operazione che viene eseguita sul mercato telematico. Sono state individuate delle quantità ritenute importanti e sono stati raccolti i relativi dati, in modo da poter confrontare come si comporta il sistema in presenza di situazioni differenti: di aumento, riduzione dei prezzi o in una fase di cambiamento di tendenza.

Le ipotesi che dovranno essere verificate sono le seguenti:

Ipotesi 1 La quantità di ordini di acquisto o di vendita presenti nelle rispettive liste del *book* sono legate a modifiche successive dei prezzi.

Ipotesi 2 La differenza tra le quantità di ordini può fornire anticipazioni sull'insorgenza di bolle speculative.

Ipotesi 3 Le bolle speculative nascono quando la differenza tra la migliore offerta di acquisto e la migliore offerta di vendita è più elevata.

Ipotesi 4 La differenza tra primo ed ultimo prezzo di ogni lista di ordini e quindi la sua concentrazione su certi livelli di prezzo è una causa di una repentina variazione dei prezzi.

Ipotesi 5 La quantità di ordini al termine della fase di apertura fornisce indicazioni sulla probabilità di insorgenza di bolle speculative.

L'obiettivo degli esperimenti condotti sarà quindi quello di individuare una sorta di prevedibilità dei fenomeni sulla base di dati relativi al prezzo corrente ed alla struttura del *book* di negoziazione in tale istante e nei periodi precedenti ed in quelli immediatamente successivi.

Interazione nel mercato di agenti random

In un primo momento verranno analizzati i dati prodotti dalla simulazione che prevede l'interazione sul mercato di soli agenti *random*, saranno poi introdotte altre tipologie di agenti in modo da ottenere una simulazione che riproduca serie di prezzi il più possibile realistiche e verranno confrontati i risultati.

Dall'esecuzione dell'esperimento, nel quale i dati vengono visualizzati e salvati ogni tic (nella rispettiva *probe* dell'Observer `displayFrequency=1`), quindi ogni volta che un agente è chiamato ad agire sul mercato, sono stati rilevati i dati necessari ad un'analisi puntuale dei prezzi e delle quantità di ordini per tutta la durata della simulazione. In particolare l'esperimento copre un orizzonte temporale pari a circa 70 giornate di contrattazione (nella rispettiva *probe* dell'Observer `stopAtDayNumber=70`). L'analisi dei risultati inizia con l'osservazione dell'andamento dei prezzi nell'intero lasso di tempo simulato (Figura 6.6a), per individuare l'esatto momento di insorgenza di una bolla. A questo punto viene focalizzato tale istante ed individuato un intervallo di tic (circa 200) che corrispondono all'intervallo antecedente ed al primo intervallo di forte crescita dei prezzi. Nell'esperimento condotto tale intervallo è tra il tic 9140 al tic 9340 ovvero a cavallo tra la 30ma e la 31ma giornata di contrattazione simulata (Figura 6.6b).

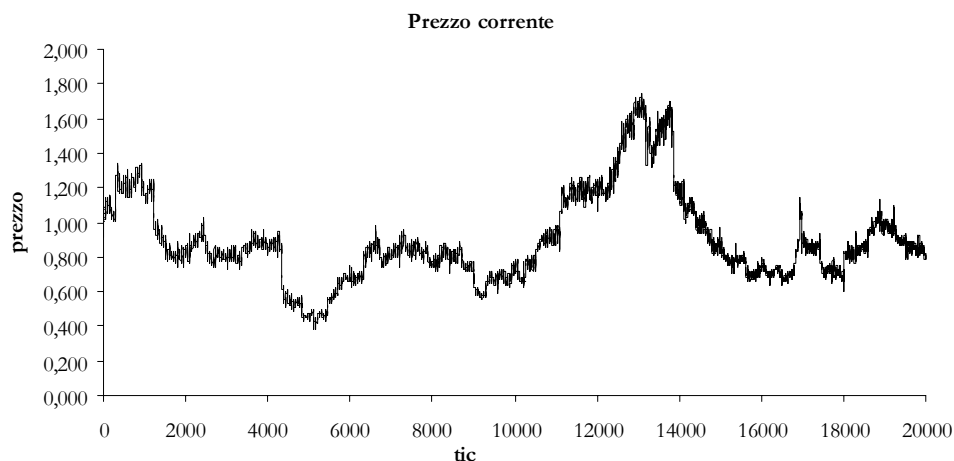


Figura 6.6a. Serie dei prezzi relativa all'intera simulazione.

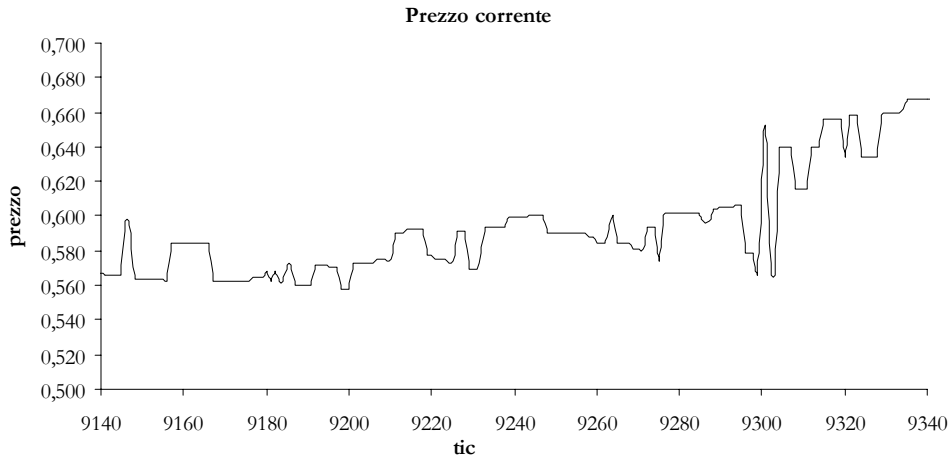


Figura 6.6b. Serie dei prezzi nell'intervallo [9140,9340] oggetto dell'analisi.

Come si può osservare nella Figura 6.6b intorno al tic 9190 si ha il passaggio da una fase di prezzi con andamento costante ad una improvviso cambio di tendenza.

Lo scopo della seguente analisi è quello di individuare se tale cambiamento possa essere intrinsecamente legato alla struttura del *book* di negoziazione (ipotesi1).

Nel corso di ogni giornata di contrattazione gli ordini di acquisto e di vendita che non trovano una controparte al momento della loro immissione vengono immagazzinati nelle rispettive liste, mentre gli ordini che trovano una controparte vanno a definire il prezzo di mercato del titolo in tale istante.

Come si può vedere nella Figura 6.7 che riporta nello stesso grafico l'andamento del numero di ordini nelle liste, ad una fase in cui il numero di ordini segue un andamento contraddistinto da un aumento degli ordini di vendita registrati ed una riduzione degli ordini di acquisto, segue una fase contraddistinta da un aumento di pendenza per quanto riguarda gli ordini di acquisto e da una riduzione per gli ordini di vendita, che si mantiene fino alla fine dell'intervallo e costituisce la fase di sviluppo della bolla. In particolare l'accumulo di ordini di acquisto significa che un maggior numero di ordini di acquisto rimangono ineseguiti: arrivano molti più ordini di acquisto dagli agenti che vanno ad allungare la rispettiva lista perché i prezzi proposti sono troppo bassi e non trovano in controparte ordini di vendita a tale prezzo; affinché gli ordini di acquisto trovino una controparte devono avere un prezzo più elevato. Un ordine di acquisto che in tale situazione trova una controparte e definisce il prezzo di mercato del titolo, è accompagnato da un aumento del prezzo rispetto ai precedenti. La tendenza a proposte di acquisto più elevate si riflette nella composizione della lista degli ordini di vendita, che trovano più facilmente una controparte, riducendo la tendenza all'aumento degli ordini registrati. Nella fase di preparazione, al contrario, diminuiscono gli ordini di acquisto registrati a fronte di un aumento di quelli di vendita. Sul mercato giungono più ordini di vendita: quelli a prezzo più elevato

vanno ad allungare la rispettiva lista, mentre quelli che si mantengono su prezzi più bassi, in analogia con quelli di mercato, trovano facilmente una controparte, accorciando al lista degli ordini di acquisto. Sempre all'interno della fase preparatoria, tuttavia si assiste ad una inversione di tendenza nei comportamenti osservati: la lista di ordini di vendita inizia a diminuire, mentre aumentano gli ordini di acquisto registrati. Queste caratteristiche, proprie della fase di sviluppo della bolla, si manifestano quindi in una fase precedente al repentino aumento dei prezzi, in cui le contrattazioni si concludono sullo stesso livello del prezzo di mercato.

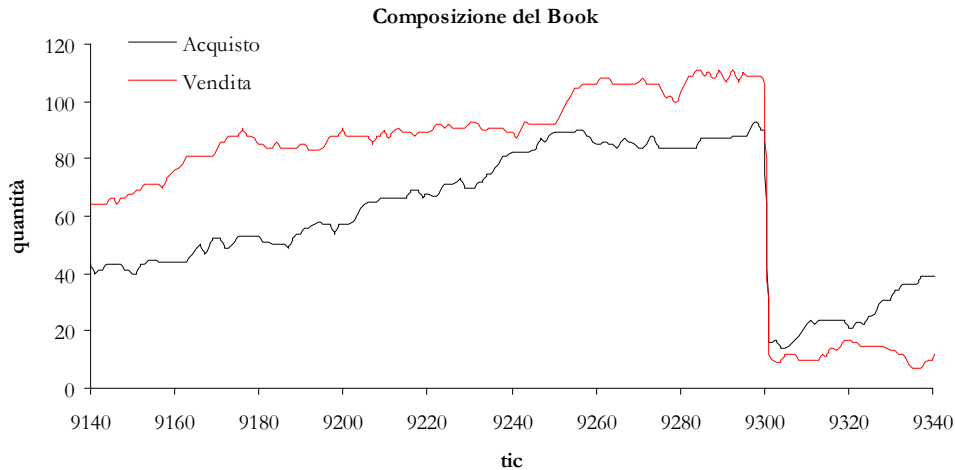


Figura 6.7 Numero di ordini di acquisto e di vendita che vengono collocati nel *book*, istante per istante.

L'insorgenza della bolla sembra essere quindi preceduta da un periodo nel quale si ha un cambiamento nella composizione del *book* di negoziazione, in presenza di prezzi costanti.

Tale affermazione è confermata anche dall'andamento della serie che rappresenta la differenza tra il numero di ordini di vendita presenti nel *book* ed il numero di ordini di acquisto in Figura 6.8: dopo una fase in cui tale differenza ha un andamento crescente, inizia una fase di decremento antecedente il momento di insorgenza della bolla che corrisponde all'aumento della differenza tra le quantità di ordini e quindi un progressivo sbilanciamento di tali quantità. Pertanto si può osservare come il perdurare di una fase decrescente fornisca un'anticipazione sulla possibilità di insorgenza di una bolla (Ipotesi 2).

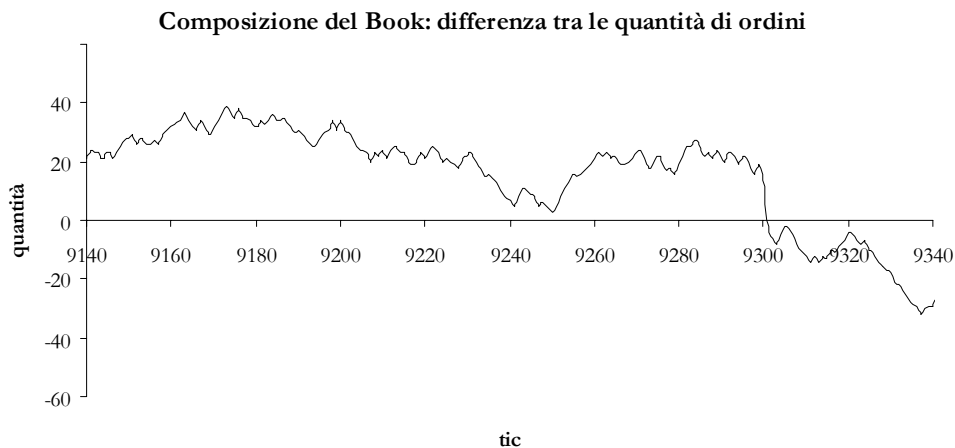


Figura 6.8 Differenza tra numero di ordini di acquisto e di vendita che vengono collocati nel *book*, istante per istante.

Osservando le figure sopra descritte si può notare nella posizione centrale un'interruzione delle serie. Tale interruzione è dovuta al termine della giornata di contrattazione numero 30 e all'inizio della numero 31. Il passaggio da una giornata alla successiva avviene con la pulitura del *book* al termine della giornata, la fase di apertura della giornata successiva, durante la quale vengono inseriti degli ordini nel *book* da parte di alcuni agenti e la successiva fase di contrattazione continua. Nonostante tale interruzione però l'andamento delle serie di dati riprende con la stessa intensità che aveva alla fine della giornata precedente. In questo caso ciò è dovuto alla presenza di agenti che utilizzano le previsioni per la formulazione di decisioni e di agenti cognitivi, che conferiscono una certa continuità al mercato, nonostante l'interruzione di giornata.

In figura 6.9 viene riportato l'andamento della differenza tra miglior denaro e miglior lettera negli istanti precedenti e successivi all'insorgenza della bolla. Si può osservare che l'andamento di tale variabile è direttamente correlato all'andamento dei prezzi, con una fase di crescita accentuata al momento di insorgenza della bolla, che persiste nella fase di sviluppo.

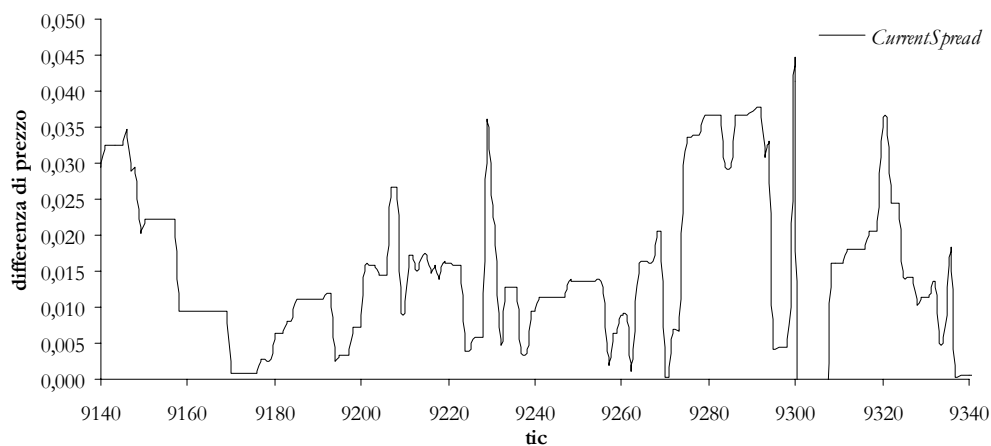


Figura 6.9. Differenza tra miglior denaro e miglior lettera.

Per quanto riguarda l'Ipotesi 4, la serie che identifica la differenza tra primo ed ultimo prezzo della lista degli ordini di acquisto assume un andamento crescente circa 50 tic prima dell'insorgenza della bolla, per poi continuare ad aumentare nella fase successiva. Con la stessa cadenza temporale la serie che rappresenta la differenza tra primo ed ultimo prezzo della lista degli ordini di vendita assume un andamento dapprima crescente, poi decrescente (Figura 6.10). Gli ordini presenti in quest'ultima lista, quindi, presentano dei prezzi contenuti in un intervallo più ristretto rispetto agli ordini di acquisto. Quindi è meno probabile che un ordine di acquisto trovi una controparte rispetto ad un ordine di vendita: infatti un ordine di acquisto viene combinato se il prezzo proposto è contenuto nell'intervallo di prezzi registrati nella lista degli ordini di vendita, che essendo molto ristretto comporta un maggior numero di ordini in acquisto ineseguiti.

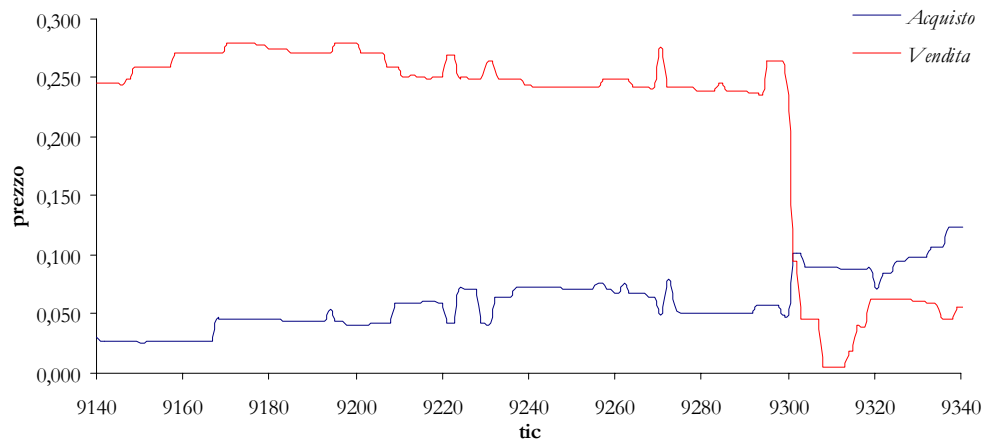


Figura 6.10. Differenza tra primo ed ultimo prezzo delle liste di ordini.

Una rappresentazione delle relazioni così individuate si può osservare nella tabella 6 che suddivide l'intervallo considerato in tre fasi successive:

- Fase preparatoria alla bolla dal tic 9140 al tic 9190
- Momento di variazione dei prezzi al tic 9191
- Fase di sviluppo della bolla dal tic 9192 al tic 9340

Variabili	Fase preparatoria	Bolla	Fase di sviluppo
<i>Prezzi</i>	Costanti	Presenta un salto rispetto al prezzo precedente	Aumento del prezzo accentuato
<i>Lista ordini di acquisto</i>	Diminuisce la velocità di crescita	Velocità di crescita Aumenta	Velocità di crescita aumenta
<i>Lista ordini di vendita</i>	Aumenta la velocità di crescita	Velocità di crescita si mantiene sui livelli precedenti	Velocità di crescita diminuisce
<i>Differenza tra numero di ordini di vendita e numero di ordini di acquisto</i>	Aumenta	Diminuisce	Diminuisce
<i>Bid-ask spread</i>	Aumenta	Aumenta più velocemente	Aumenta più velocemente
<i>Differenza tra migliore e peggiore ordine di acquisto</i>	Aumenta	Aumenta più velocemente	Aumenta più velocemente
<i>Differenza tra migliore e peggiore ordine di vendita</i>	Aumenta	Diminuisce più velocemente	Diminuisce più velocemente

Tabella 6.6. Come si modifica l'andamento delle variabili nel periodo di tempo della simulazione che è stato scelto come istante in cui si manifesta la bolla.

Le variazioni delle variabili sopra considerate sembrano quindi verificarsi in un momento precedente all'istante in cui si ha un improvviso aumento dei prezzi. Sembra quindi che la combinazione di più fattori sia all'origine della bolla. Occorre quindi effettuare un'analisi quantitativa per individuare un'eventuale collegamento tra i valori assunti dalle variabili individuate ed il valore dei prezzi.

A questo proposito la tabella seguente fornisce uno schema riassuntivo delle correlazioni tra le variabili analizzate ed i prezzi nello stesso istante nell'intervallo di tic oggetto di studio.

Variabili	Intero intervallo	Fase preparatoria	Fase di sviluppo
<i>Prezzi</i>	Crescenti	Relativamente costanti	Crescenti
<i>Lista ordini di acquisto</i>	-0,376	-0,343	-0,387
<i>Lista ordini di vendita</i>	-0,704	-0,284	-0,711
<i>Differenza tra quantità di ordini</i>	-0,890	-0,173	-0,891
<i>Bid-ask spread</i>	-0,026	0,171	-0,014
<i>Differenza tra migliore e peggiore ordine di acquisto</i>	0,804	-0,520	0,802
<i>Differenza tra migliore e peggiore ordine di vendita</i>	-0,859	-0,191	-0,860

Tabella 6.7. Tabella delle correlazioni tra le variabili oggetto dell'analisi.

Da quanto traspare dalla tabella i prezzi sono correlati positivamente solo con la differenza tra migliore e peggiore ordine di acquisto nell'intero intervallo di tempo. Ma la particolarità dell'intervallo scelto rende necessaria la sua suddivisione in base in una fase preparatoria della bolla e nella fase di sviluppo. La fase preparatoria, come detto sopra, è contraddistinta da un'inversione di tendenza nell'andamento delle variabili, che si può tradurre in coefficienti di correlazione su valori assoluti più bassi rispetto alla fase di sviluppo.

In particolare nella fase preparatoria, in cui il livello dei prezzi si mantiene costante, si può individuare una correlazione negativa tra andamento dei prezzi e quantità di ordini registrate nelle liste del *book*. Questo perché in tale fase si ha un andamento dei prezzi costante contrapposto ad una dinamicità delle liste degli ordini. La lista degli ordini di acquisto assume un andamento crescente, come anche quella degli ordini di vendita ma per quest'ultima la tendenza è più marcata. L'aumento della quantità di ordini di vendita registrati si può dedurre dal valore assoluto più basso della correlazione, rispetto ad uno più elevato per la lista degli ordini di acquisto, a conferma delle conclusioni tratte dall'osservazione dei grafici relativi, svolta precedentemente. Anche la differenza tra le quantità di ordini ha una correlazione negativa con l'andamento dei prezzi, ma molto più contenuta nella fase di preparazione della bolla, rispetto alla fase di sviluppo: a fronte di prezzi costanti si ha una differenza tra le due liste in crescita, mentre nella fase di prezzi crescenti la differenza tra le quantità di ordini assume un andamento fortemente negativo come si è potuto osservare nell'analisi grafica.

Un'altra interessante relazione si può individuare nelle variabili relative alla differenza tra primo ed ultimo elemento delle liste di ordini. Per quanto riguarda gli ordini di acquisto da una correlazione negativa nella fase preparatoria che rivela un aumento della variabile ad una forte correlazione positiva che ne rappresenta un aumento in linea con l'andamento dei prezzi nella fase di sviluppo della bolla. Al contrario nella fase di sviluppo la lista degli ordini di vendita si riduce in

ampiezza comportando un andamento della serie in netto contrasto con la fase di prezzi crescenti (in questo caso la correlazione con i prezzi è fortemente negativa).

La correlazione tra prezzo e *spread*, in ogni istante, si mantiene su valori piuttosto bassi, dovuti al fatto che la serie di dati in esame possiede un'elevata variabilità a causa della quale è difficile individuare una tendenza se non individuando una retta di regressione dei dati. Il calcolo della correlazione è quindi poco significativo rispetto all'impatto grafico grazie al quale si può individuare una relazione positiva tra prezzi e *spread*.

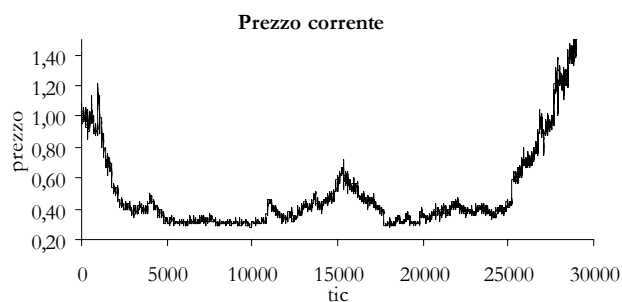
Interazione nel mercato di agenti di diversi tipi¹⁵

La presenza di soli agenti *random* nella simulazione permette di studiare l'andamento dei prezzi su un mercato, indipendentemente dalle caratteristiche degli operatori che sono chiamati ad agire. Tuttavia nei mercati reali si osservano varie tipologie di investitori più o meno competenti ed in grado di utilizzare vari livelli di informazione. In questo paragrafo vorrei quindi proporre una simulazione in cui nel mercato vengono introdotte altre tipologie di agenti previsti nel programma di simulazione SUM, in diverse proporzioni, in modo da ottenere una simulazione che presenti una sufficiente stabilità dei prezzi, ma allo stesso tempo produca in un determinato istante una bolla di entità accettabile. Il tipo ed il numero di agenti è stato impostato come segue:

```
randomAgentNumber = 250
marketImitatingAgentNumber = 5
locallyImitatingAgentNumber = 5
aNNForecastAppAgentNumber = 10
bPCTAgentAEO_EP_3_Number = 15
bPCTAgentBEO_EP_3_Number = 15
```

mentre gli altri parametri della simulazione rimangono invariati. Anche in questo caso è stato individuato un intervallo di 200 tic durante il quale si sviluppa una bolla (dal tic 10700 al tic 10900), suddiviso in tre fasi attraverso le quali si sviluppa l'analisi.

Le serie di dati prodotte dall'esperimento sono raccolte nella figura 6.11. Anche in questo caso dall'intera serie di prezzi è stata individuato un intervallo per il quale sono riportati i grafici relativi alle quantità di ordini registrati nel *book* e la relativa differenza e quelli rappresentanti lo *spread* e le differenze tra primo ed ultimo prezzo delle liste.



¹⁵ Per una descrizione dei differenti tipi di agenti vedere Capitolo 5.



Figura 6.11. Grafici relativi all'esperimento con agenti eterogenei.

Anche in questo caso si può osservare che nella fase preparatoria il *book* presenta un progressivo aumento degli ordini di acquisto registrati ed una riduzione nella quantità degli ordini di vendita. Inoltre anche se le serie di dati sono interrotte dal termine della giornata di contrattazione l'andamento osservato si mantiene nella giornata successiva. Questo è dovuto alla presenza di alcuni tipi di agenti, come gli ANNForecastApp ed i BP-CT i cui comportamenti sono influenzati dalla memoria di dati dei giorni precedenti.

L'esperimento con agenti conferma quindi i risultati ottenuti dall'esperimento con soli agenti *random*, ovvero la presenza di una fase in cui il *book* di negoziazione presenta certe caratteristiche che possono fornire un'anticipazione sull'insorgenza di un netto aumento dei prezzi e quindi di una bolla speculativa.

6.4 Ordini senza limite di prezzo

In questo paragrafo vorrei proporre un esperimento il cui obiettivo è quello di aumentare la veridicità della simulazione, in quanto prevede, nella fase di contrattazione continua, la possibilità che gli agenti introducano ordini senza limite di prezzo. Le serie di dati prodotte dall'esperimento sono confrontate con quelle della simulazione base, inizialmente sull'intero lasso di tempo, per quanto riguarda i prezzi, dopodiché l'attenzione è spostata sull'analisi puntuale della microstruttura del *book* di negoziazione ed in particolare come la presenza di *market order* modifica le quantità di ordini registrati e l'intervallo di prezzo in cui gli stessi sono racchiusi.

Nella Figura 6.12 si può osservare l'effetto dell'introduzione di un numero sempre maggiore di ordini senza limite di prezzo (che si ottiene aumentando la probabilità che un agente emetta un ordine senza limite di prezzo assegnando determinati valori al parametro `probMarketOrder`) sull'andamento del titolo oggetto di scambio. Il numero di bolle aumenta, come anche la loro dimensione, mentre diminuisce la durata dei fenomeni. La presenza di investitori che introducono ordini che saranno combinati con la migliore offerta di segno opposto ha l'effetto di amplificare le tendenze del mercato al rialzo o al ribasso e contemporaneamente di rendere l'andamento dei prezzi meno prevedibile e maggiormente instabile.

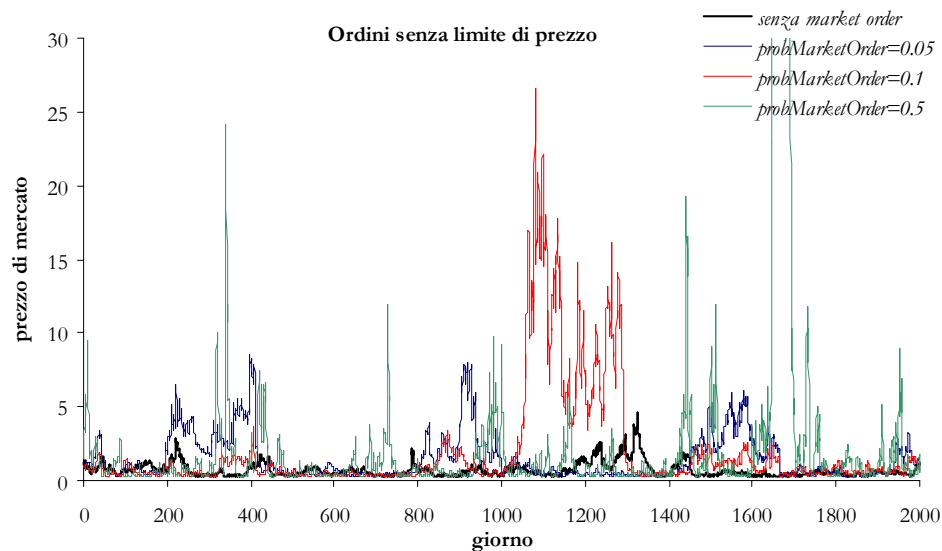


Figura 6.12. Serie dei prezzi prodotte aumentando la probabilità che l'ordine inserito nella fase di contrattazione continua sia senza limite di prezzo.

Come per le analisi precedenti ho costruito una tabella riassuntiva che riporta i dati relativi alle quattro serie di prezzi sopra rappresentate: prezzo medio, deviazione standard, prezzo massimo e numero di bolle e *crash* calcolato con la procedura vista sopra. Si può notare una proporzionalità diretta tra la percentuale di ordini senza limite di prezzo ed il livello del prezzo medio calcolato sull'intera

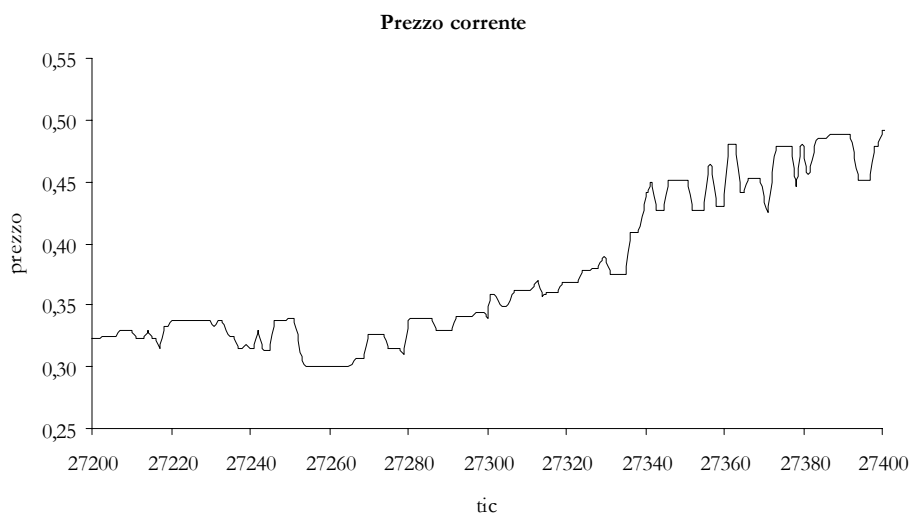
simulazione. Tale caratteristica è propria anche del prezzo massimo e della deviazione standard, i cui valori confermano l'aumento della volatilità dei prezzi nelle diverse simulazioni. Il numero di bolle generate si mantiene sugli stessi livelli, mentre si osserva una riduzione dei *crash* che conferma l'aumento del livello dei prezzi raggiunti. Il fatto che il numero di bolle rimanga invariato conferma l'effetto dell'introduzione di ordini senza limite di prezzo sulla rilevanza dei fenomeni rispetto alla loro frequenza.

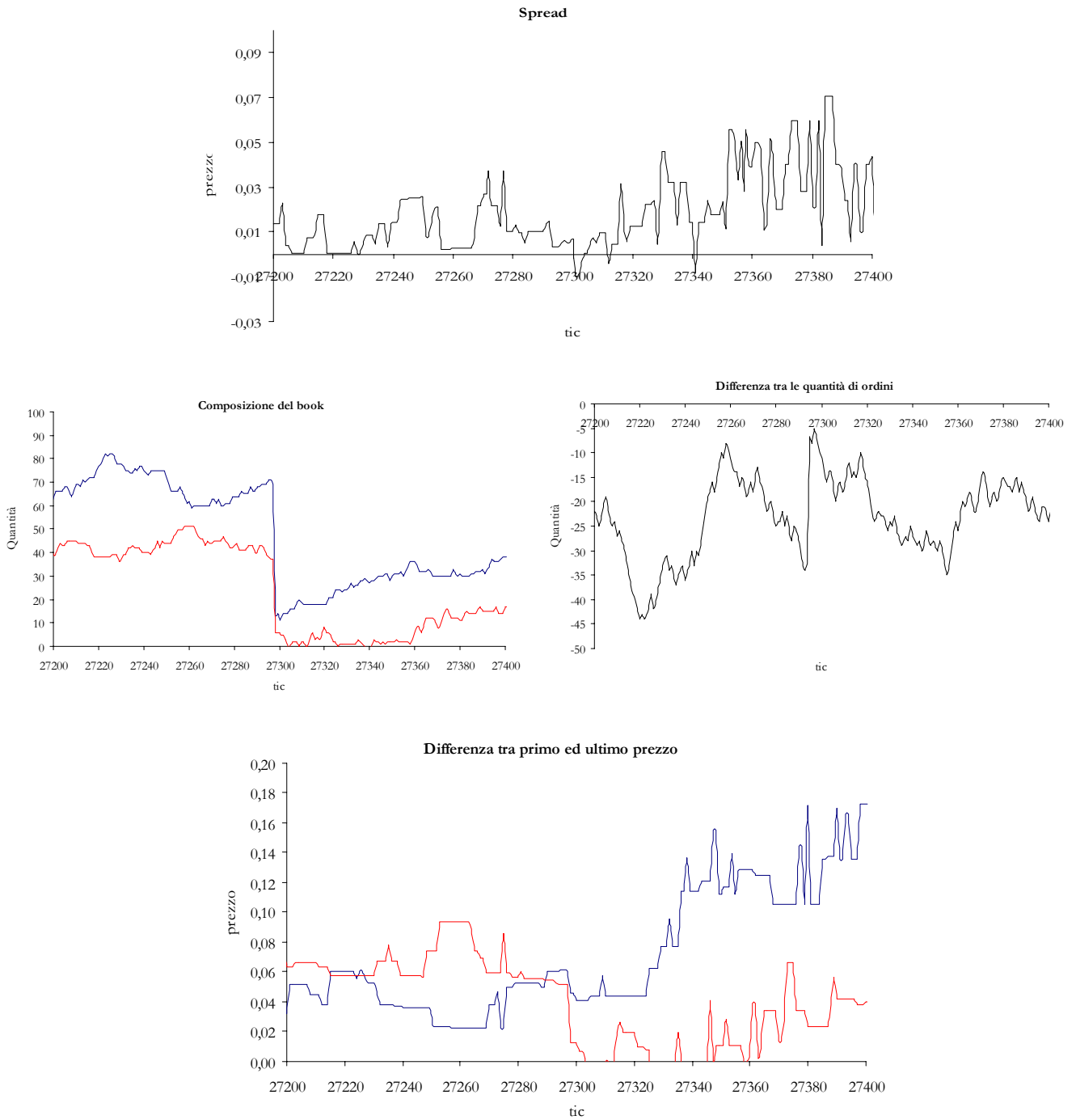
	Solo ordini limitati	Con <i>Market order</i>		
		0%	5%	10%
Prezzo medio	0.697	1.432	1.897	3.386
Prezzo massimo	4.663	8.561	26.527	222.21
Dev. Standard	0.492	1.491	3.406	15.384
Numero bolle	7	6	8	7
Numero crash	7	5	5	4

Tabella . Dati relativi alla simulazione con ordini senza limite di prezzo.

A questo punto rimane da verificare come i fenomeni osservati si possano ricondurre alla microstruttura del mercato tramite l'osservazione della dinamica del *book* di negoziazione. Le variabili osservate sono il numero di ordini presenti nelle rispettive liste ed il loro sviluppo nel corso della simulazione; la differenza tra i migliori prezzi delle due liste e la differenza tra primo ed ultimo prezzo delle rispettive liste per verificare come l'introduzione di ordini che vengono immediatamente combinati modifichi la composizione del *book* di negoziazione. Intuitivamente si può ipotizzare che la presenza di *market order* conferisca una maggiore dinamicità al mercato, causando una maggiore differenza nell'andamento delle due liste di ordini.

Come per gli esperimenti precedenti viene identificato un intervallo di 200 tic nel quale si ha l'inizio di un processo di veloce aumento dei prezzi.





Da una prima osservazione dei grafici si può notare che nel momento in cui i prezzi iniziano la fase di salita, questa assume un'entità rilevante, confermando la maggiore dinamicità del mercato in presenza di ordini senza limite di prezzo. Anche in questo caso è utile suddividere l'intervallo di tic selezionato in due fasi successive: la fase preparatoria alla bolla che ha inizio al tic 27200 e finisce al tic 27270 in cui ha inizio la bolla e la fase di sviluppo che si protrae fino alla fine dell'intervallo prescelto.

Anche in questo caso si possono osservare delle caratteristiche comuni delle variabili nella fase preparatoria, come la riduzione degli ordini di acquisto registrati

nel *book* e l'aumento del numero di ordini di vendita, che può anche essere dedotta dalla serie che rappresenta la differenza tra le due quantità. All'interno della fase preparatoria le variabili assumono andamenti opposti caratteristici della fase successiva di sviluppo. La differenza tra primo ed ultimo prezzo delle liste degli ordini, inoltre, assumono andamenti che vanno nella direzione opposta nella fase preparatoria della bolla, nel senso di un aumento della differenza tra il miglior prezzo di vendita e miglior prezzo d'acquisto. L'aspetto interessante della fase preparatoria sta nel fatto che tale dinamicità del *book*, che si traduce in cambiamenti nella composizione delle liste degli ordini, avviene con prezzi dei titoli sul mercato pressoché costanti. La fase di sviluppo è caratterizzata anche in questo caso da andamenti delle variabili analizzate in linea con quanto osservato sopra.

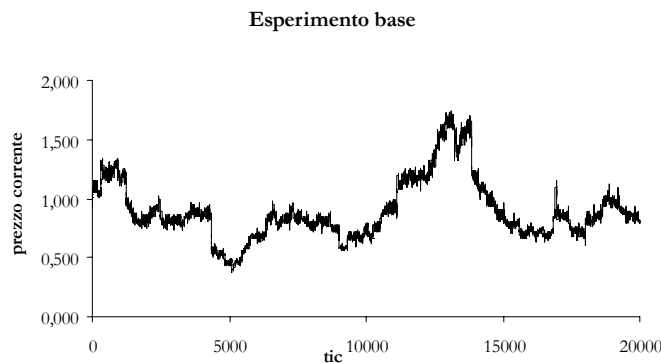
A differenza delle analisi precedenti, le caratteristiche analizzate sono più visibili e coinvolgono intervalli di valori più elevati, anche se si riduce la fase di preparazione all'evento.

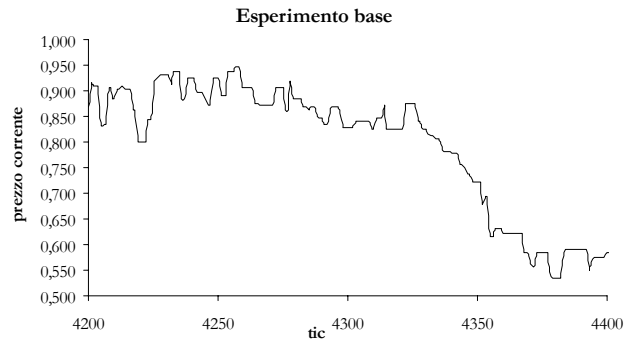
L'introduzione, quindi, di ordini senza limite di prezzo nella fase di contrattazione continua, aggiunge al modello un elemento di maggiore rappresentazione della realtà, confermando i risultati ottenuti per quanto riguarda l'evoluzione delle liste di ordini nelle fasi immediatamente precedenti e successive al verificarsi di una bolla.

6.5 I *crash*

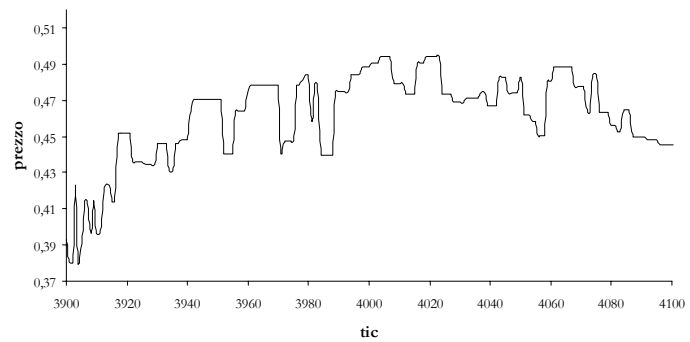
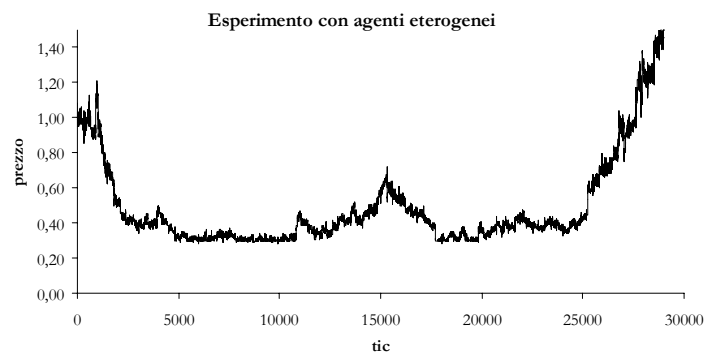
I dati raccolti dagli esperimenti sono stati fino ad ora utilizzati per individuare l'istante in cui ha origine una bolla. Si può arrivare alle stesse conclusioni per i *crash*? Dalle serie di prezzi prodotte dalle simulazioni si può osservare che vi sono vari fenomeni di caduta dei prezzi: a conclusione di una fase di forte aumento dei prezzi o dopo un periodo relativamente lungo di prezzi costanti. In questo paragrafo vorrei proporre un confronto grafico di tre situazioni di riduzione dei prezzi repentine (come sempre ho individuato un intervallo dei 200 tic più significativi per il fenomeno che ho intenzione di analizzare), relative ai tre esperimenti spiegati nel dettaglio in precedenza: con soli agenti *random*, con diverse tipologie di agenti e con la possibilità di inserire sul mercato ordini senza limite di prezzo.

Esperimento con agenti random

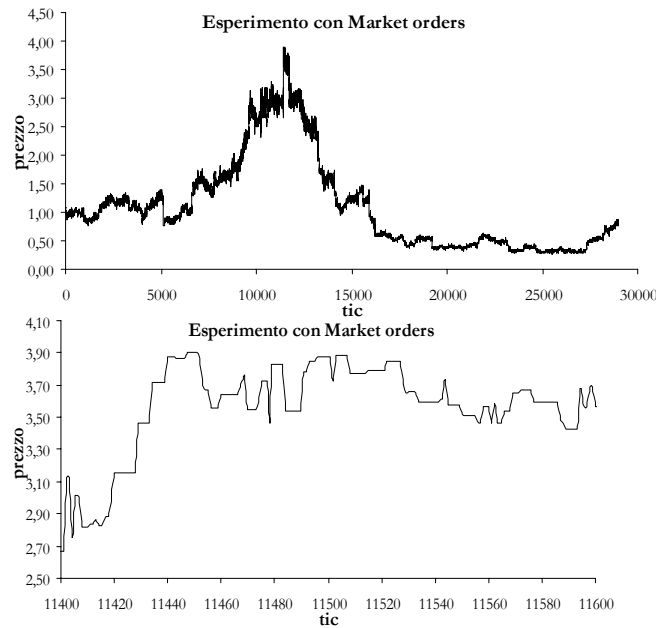




Esperimento con agenti eterogenei



Esperimento con ordini senza limite di prezzo

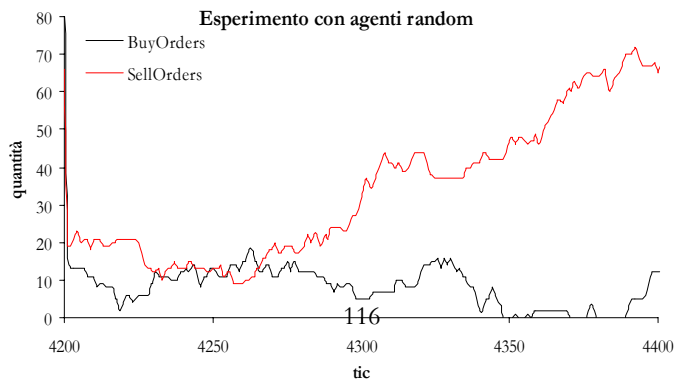


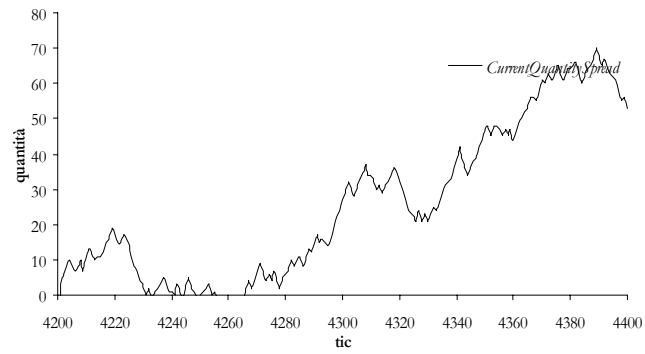
Nel primo esperimento ho scelto l'intervallo che corrisponde alla forte ed improvvisa caduta dei prezzi visibile intorno al tic 4200. Nel secondo esperimento ho scelto il fenomeno che si manifesta intorno al tic 4000, mentre per il terzo esperimento l'intervallo considerato è quello che corrisponde alla fine della grande bolla e all'inizio della discesa dei prezzi (intorno al tic 11500). Anche in questo caso la serie di prezzi rappresentata può essere suddivisa in tre momenti fondamentali: la fase di preparazione, l'istante in cui si manifesta il fenomeno e la fase di sviluppo dello stesso (riportati nella tabella seguente in termini di tic).

	Fase preparatoria	Crash	Fase di sviluppo
<i>Agenti random</i>	4200-4260	4261	4262-4400
<i>Agenti eterogenei</i>	3900-4022	4023	4024-4100
<i>Market orders</i>	11400-11500	11501	11502-11600

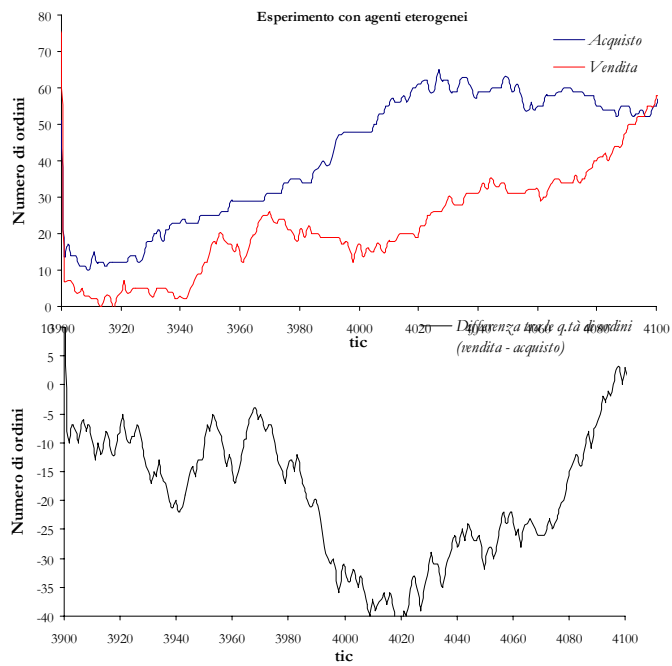
Di seguito riporto per tutti e tre gli esperimenti i grafici relativi alla composizione del *book* di negoziazione: il numero di ordini registrato nelle liste di acquisto e di vendita istante in ogni istante della simulazione.

Esperimento con agenti random

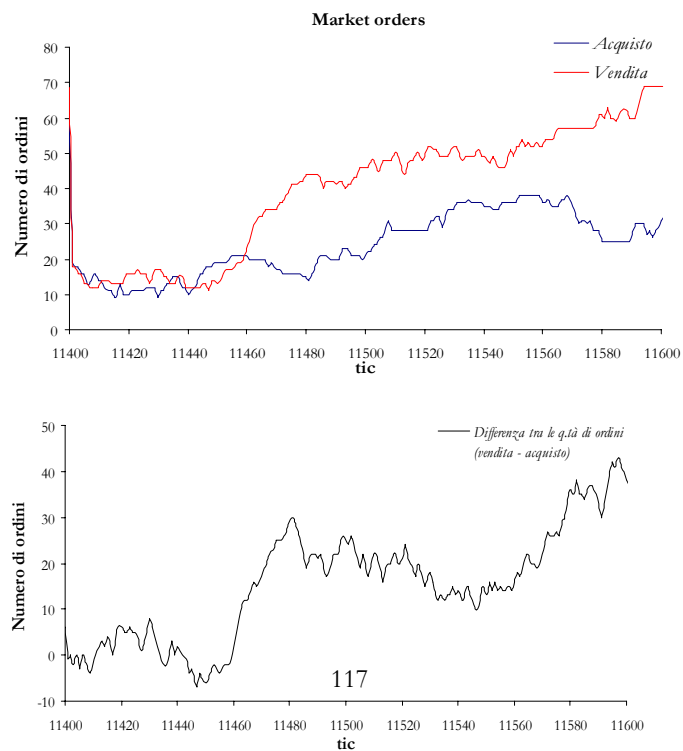




Esperimento con agenti eterogenei



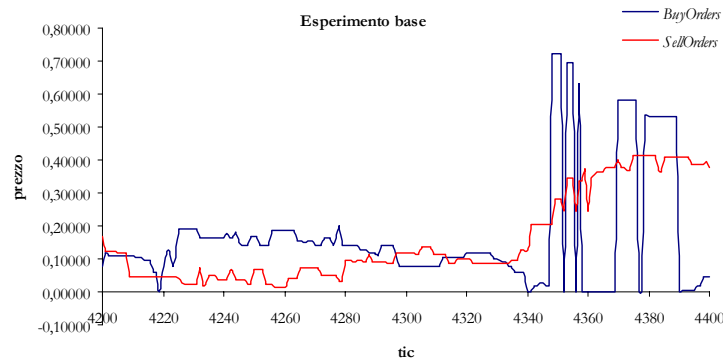
Esperimento con ordini senza limite di prezzo



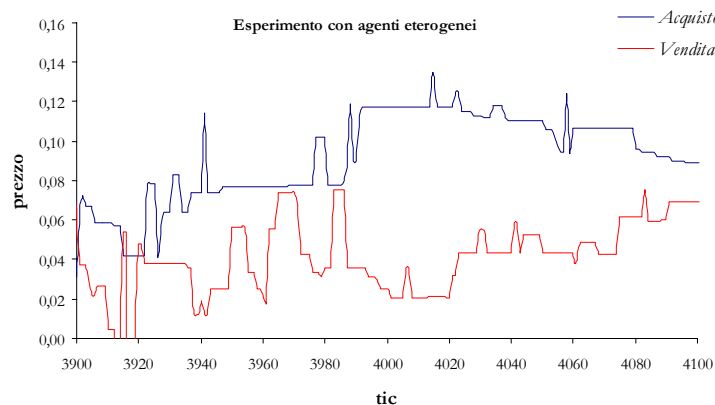
I grafici mostrano che le serie che rappresentano le liste di ordini seguono comportamenti analoghi negli istanti precedenti alla caduta dei prezzi. Le due liste di ordini, nel periodo antecedente al *crash*, presentano andamenti opposti: la lista degli ordini di vendita tende ad un aumento, mentre quella degli ordini di acquisto ha una tendenza a diminuire. Questa caratteristica è molto visibile nei primi due esperimenti e meno nel terzo. Questo perché, come visto in precedenza, i fenomeni in un mercato in cui gli investitori possono introdurre ordini senza limite di prezzo, sono più veloci e di entità più rilevante. In questo caso, infatti, la bolla è caratterizzata da una forte variabilità, che influenza anche la serie dei prezzi nell'istante in cui inverte la tendenza.

Il passaggio da prezzi crescenti e prezzi in calo è preceduta da una fase più o meno marcata di prezzi che si mantengono sugli stessi livelli. In questo intervallo si modifica la dinamica delle liste di ordini: queste si avvicinano, per poi assumere l'andamento caratteristico della fase di sviluppo del *crash*: un aumento degli ordini di vendita registrati ed una riduzione di quelli di acquisto in cerca di una controparte all'interno del *book* di negoziazione. Queste caratteristiche si riflettono anche nella differenza tra primo ed ultimo prezzo all'interno di ogni lista: al diminuire delle quantità registrate aumenta la dispersione dei prezzi e di conseguenza la differenza tra primo ed ultimo elemento della lista.

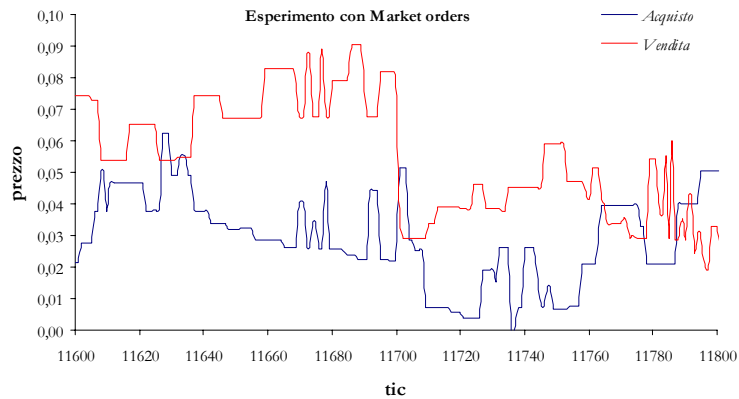
Esperimento con agenti random



Esperimento con agenti di diversi tipi



Esperimento con ordini senza limite di prezzo



Come per le analisi precedenti la tabella seguente raccoglie le l'andamento delle variabili in due situazioni particolari: la fase di preparazione del fenomeno e la fase di sviluppo.

Variabili	Fase preparatoria	Crash	Fase di sviluppo
Prezzi	Crescenti/Costanti	Decrescenti	Fortemente decrescenti
Lista ordini di acquisto	Aumenta la velocità di crescita	Velocità di crescita diminuisce	Velocità di crescita diminuisce
Lista ordini di vendita	Diminuisce la velocità di crescita	Velocità di crescita aumenta	Velocità di crescita aumenta
Differenza tra numero di ordini di vendita e numero di ordini di acquisto	Diminuisce	Aumenta	Aumenta
Bid-ask spread	Diminuisce	Diminuisce più velocemente	Diminuisce più velocemente
Differenza tra migliore e peggiore ordine di acquisto	Diminuisce	Aumenta	Aumenta
Differenza tra migliore e peggiore ordine di vendita	Aumenta	Diminuisce	Diminuisce

Sembra quindi che fenomeni come le bolle ed i *crash* si manifestano dopo una fase preparatoria all'evento, in cui, pur in presenza di prezzi costanti, le liste degli ordini all'interno del *book* di negoziazione sviluppano andamenti opposti e caratterizzati da una certa durata e rilevanza. La fase preparatoria consiste quindi in evoluzioni dinamiche del *book* che portano il sistema ad un punto critico dal quale segue un cambiamento delle variabili analizzate alcuni istanti prima del momento in cui si manifesta il cambiamento dei prezzi di mercato.

6.6 Prevedibilità delle bolle speculative

La ricerca delle possibili cause delle bolle ed i *crash* nell'economia è un argomento che attrae molte attenzioni da parte degli studiosi. Partendo dalle serie di prezzi registrate sui mercati finanziari in determinati periodi storici, come il grande *crash* dell'Ottobre 1987 sui mercati americani, in Sornette, Johansen, Bauchaud (1995) e Sornette, Johansen (1997), si ricercano le cause dell'improvviso calo dei prezzi nelle scelte degli investitori sui mercati. Gli autori collegano il forte calo dei prezzi come il raggiungimento di un punto critico nel quale il sistema, portato all'estremo, effettua un'inversione di tendenza. Nel caso in esame, il *crash*, è una conseguenza di un periodo di forte rialzo dei prezzi, causato da un'omogeneità comportamentale degli investitori, al quale segue un periodo di instabilità che si traduce nell'inversione di tendenza. Tuttavia la causa del *crash* non può essere, secondo gli autori, attribuita ad un unico fattore, ma all'interazione dei numerosi elementi che compongono il sistema complesso. Gli autori utilizzano una funzione esponenziale per rappresentare i prezzi nei periodi precedenti al *crash* ed osservano che tale inversione di tendenza si verifica in un momento di forte incremento nell'andamento dei prezzi, rispetto ai valori osservati nei periodi precedenti. L'incremento improvviso dei prezzi può essere quindi interpretato come una previsione sulla possibilità del verificarsi di un *crash*, soprattutto se l'entità del fenomeno è piuttosto rilevante.

L'interpretazione dei mercati finanziari dal punto di vista dei comportamenti degli agenti che vi operano è una caratteristica comune di molti studi, come anche il modello su NetLogo, citato nel Capitolo 4, i quali collegano la comparsa di fenomeni come bolle e *crash* ad una certa omogeneità comportamentale degli investitori sul mercato, mentre le fasi di prezzi costanti sono identificate con periodi di transazione e di eterogeneità comportamentale. Le decisioni degli investitori si traducono sui mercati finanziari nelle azioni effettuate tramite il *book* di negoziazione. L'omogeneità comportamentale collegata all'insorgenza di una bolla o un *crash* può essere tradotta nella presenza di notevoli differenze tra le due liste di ordini e in una tendenza di queste ad andamenti opposti, come è stato osservato nelle analisi precedenti (soprattutto per quanto riguarda le quantità di ordini registrate nel *book*).

Un altro tentativo di spiegare l'insorgenza di bolle e *crash* si può ricavare dall'articolo di Farmer et altri (2003) in cui la causa di forti cambiamenti dei prezzi è identificata con una caratteristica della microstruttura del mercato dei titoli. Nell'articolo gli autori dimostrano, studiando l'andamento dei prezzi di diversi titoli del London Stock Exchange, che larghe fluttuazioni dei prezzi sono collegate alla liquidità dei titoli. Tale caratteristica è identificata con una determinata composizione delle liste degli ordini con limite di prezzo presenti nel *book* di negoziazione. Una maggiore liquidità del titolo si ha quando i prezzi degli ordini registrati nelle apposite liste sono dotati di una certa continuità, pur costituendo una serie di valori discreta. L'insorgenza di forti variazioni dei prezzi avviene quando il *book* è composto da liste all'interno delle quali prezzi contigui manifestano forti sbalzi. In tale situazione, quindi, la combinazione di ordini con una controparte nella lista di ordini limitati di segno opposto, avviene a prezzi notevolmente differenti, causando quindi una tendenza al rialzo o al ribasso. In questa prospettiva le variazioni dei prezzi improvvise non sono collegate alla

dimensione degli ordini che arrivano al *book* di negoziazione: un ordine di elevate quantità non sortisce alcun effetto in termini di forte variazione dei prezzi se nella lista di ordini di segno opposto sono molto ravvicinati. Tale teoria conferma in parte l'analisi delle bolle e *crash* condotta negli esperimenti presentati nel paragrafo precedente: tra le variabili analizzate c'è, infatti, anche la differenza tra primo ed ultimo prezzo registrati nelle liste di ordini e lo *spread*. La differenza tra primo ed ultimo prezzo, infatti, è una misura dell'intensità degli ordini registrati all'interno di un certo intervallo di prezzi, che è quello che gli autori dell'articolo sopra descritto chiamano liquidità del mercato. Osservando il grafico che riporta le serie di valori ottenute dalla differenza tra primo ed ultimo prezzo registrati nelle liste, ad esempio per l'esperimento con ordini senza limite di prezzo, si nota come nella fase in cui si verifica la bolla la lista relativa agli ordini di acquisto aumenta in termini di ampiezza dell'intervallo, mentre si riduce quella della lista degli ordini di vendita. Di conseguenza la combinazione di un ordine sul mercato, con uno o più di acquisto, determina una forte variazione dei prezzi a causa della maggiore dispersione degli ordini registrati all'interno della lista.

La ricerca quindi delle possibili cause di fenomeni come bolle e *crash* è quindi sempre più orientata allo studio delle serie di prezzi, nella prospettiva dell'identificazione degli elementi che ne determinano l'andamento. Sia le teorie comportamentali degli investitori, che la dinamica della microstruttura del *book* di negoziazione, possono essere studiate in modo più proficuo con l'ausilio di strumenti informatici come le simulazioni ed i modelli ad agenti, ed il fatto che siano studiati per comprendere meglio la dinamica dei prezzi sul mercato, conferma la definizione del mercato finanziario come sistema complesso.

6.7 Modello e realtà

Nella costruzione di un modello di simulazione un elemento di notevole importanza è l'attinenza dei risultati prodotti con i fenomeni osservati nel mondo reale. La costruzione di un modello, infatti, procede con la modifica ed introduzione di variabili, ripetendo gli esperimenti finché non si ottengono i risultati desiderati in termini di realismo. Il modello di simulazione SUM in è un progetto che è stato ampliato nel tempo inserendo elementi che aumentino la veridicità dei risultati: la versione utilizzata per gli esperimenti è la versione base che prevede una molteplicità di agenti ed una ambiente che riproduce le regole di funzionamento del *book* di negoziazione reale della Borsa Italiana Spa. In alcune tesi precedenti (Cappellini e Mezzera) sono stati inseriti nel modello agenti reali, per testare l'ambiente artificiale rispetto a quanto accade nella realtà; inoltre la caratteristica del modello di utilizzare strumenti informatici per l'esecuzione delle simulazioni, rende necessario un continuo aggiornamento degli strumenti utilizzati che è stato messo in pratica con il *porting* in Java del modello sopra analizzato. In particolare la tesi di laurea di Mencarelli contiene un'analisi del *book* di negoziazione che presenta collegamenti ed analogie con l'analisi da me descritta in precedenza, giacché si è voluto verificare che i risultati prodotti con il nuovo modello di simulazione fossero in linea con quelli ottenuti con la versione precedente, in termini di dinamica della microstruttura del mercato. Entrambi i modelli, quindi confermano la presenza di una fase preparatoria in cui le liste di ordini presentano un certo andamento che può fornire anticipazioni sul verificarsi di un periodo di forte aumento o riduzione dei prezzi di mercato. Tuttavia tali

modelli utilizzano la stessa struttura di mercato e le stesse tipologie di agenti, ed i risultati ottenuti rimangono caratterizzati da una forte componente teorica. Sarebbe interessante verificare se anche nella realtà nel periodo immediatamente precedente al verificarsi della bolla si ha effettivamente una variazione dell'andamento delle liste di ordini limitati che possa anticipare l'insorgenza di bolle e *crash*. Quello che manca quindi all'analisi svolta nel capitolo è una comparazione dei valori ottenuti dalla simulazione con valori raccolti sui mercati reali, mentre la ricerca svolta si concentra principalmente sull'osservazione e lo studio di dati qualitativi, che comunque forniscono degli spunti per osservare con maggiore attenzione la dinamica del *book* di negoziazione per comprendere meglio l'andamento dei prezzi sul mercato finanziario.

Conclusioni

L'analisi sviluppata rappresenta un tentativo di studiare un mercato finanziario secondo i principi della recente dottrina della teoria della complessità. In questa prospettiva il mercato di Borsa è stato analizzato individuando relazioni tra le caratteristiche delle sue componenti e l'evoluzione dei prezzi. Questi ultimi sono definiti continuamente dalle azioni di individui che sono chiamati ad agire sul mercato in ogni istante. La centralità delle azioni degli individui può efficacemente essere riprodotta utilizzando modelli ad agenti all'interno di un mercato simulato. Questo è individuato con il *book* di negoziazione attraverso il quale gli agenti sono in grado di operare e modificare l'andamento dei prezzi e che registra, istante per istante, gli ordini di acquisto o di vendita, che non trovano immediatamente una controparte. Ho quindi cercato di spiegare l'utilità dell'osservazione della microstruttura del mercato per comprendere l'andamento dei prezzi ed in particolare come si modifica l'andamento delle liste di ordini nelle fasi precedente ed immediatamente successiva ad un repentino cambiamento dell'andamento dei prezzi. Dopo aver perfezionato il modello di simulazione, modificando alcune caratteristiche strutturali dell'ambiente artificiale implementato nel modello SUM, tramite esperimenti in grado di generare fenomeni che si manifestano nel mondo reale, ho analizzato i dati prodotti in funzione di alcune variabili ritenute importanti per lo studio del *book* di negoziazione di un mercato di Borsa. In particolare ho confrontato l'evoluzione dei prezzi con i dati relativi alle variabili prodotte dalla simulazione, ottenendo risultati analoghi in diverse situazioni.

Il momento di sviluppo di una bolla o di un *crash* viene individuato e suddiviso in due intervalli di tempo successivi: la fase di preparazione alla e la fase di sviluppo. Il principale risultato ottenuto consiste in cambiamenti nella composizione del *book* di negoziazione nella fase di preparazione: le liste di ordini manifestano andamenti opposti. Nella fattispecie del sorgere di una bolla, si verifica un periodo di tempo in cui la lista degli ordini di acquisto subisce un decremento, mentre aumenta il numero di ordini vendita registrati. Anche la dispersione delle liste subisce modifiche analoghe: una lista con meno elementi è caratterizzata da una maggiore dispersione dei prezzi relativi agli ordini. La differenza tra i migliori prezzi delle liste di ordini, o *spread*, è fortemente correlata all'andamento dei prezzi e segue quindi la stessa scansione temporale. Prima della fase di sviluppo, tuttavia, le variabili sviluppano andamenti opposti in presenza di un intervallo di tempo, più o meno breve, in cui i prezzi si mantengono sugli stessi livelli: ad esempio aumenta il numero di ordini di acquisto registrati e diminuisce la quantità di ordini di vendita in attesa di una controparte.

Una possibile evoluzione del mio lavoro potrebbe essere il confronto dei risultati ottenuti con dati realmente prodotti sui mercati finanziari in situazioni

analoghe a quelle riprodotte con il modello SUM. I risultati ottenuti, comunque, presentano analogie con altri studi analizzati: l'inversione di tendenza delle variabili analizzate all'interno della fase preparatoria, può essere associata con il raggiungimento del sistema di un punto critico che si manifesta in un secondo tempo sul livello dei prezzi; le liste di ordini che sviluppano andamenti opposti e definiti che caratterizzano un andamento dei prezzi sul mercato, sono una conseguenza di omogeneità comportamentali degli agenti che operano sul mercato (si veda ad esempio il modello su NetLogo o quello sviluppato da Bartolozzi e Thomas, 2003). Una conferma sull'importanza della dinamica del *book* di negoziazione per la comprensione dei prezzi può, inoltre, derivare da diversi studi che, partendo da dati raccolti su mercati finanziari reali, ricercano proprio nella dinamica delle quantità di ordini che vengono inseriti sul mercato, una causa di particolari caratteristiche nell'andamento dei prezzi come nei modelli di Farmer et alii (2003) e Maslov e Mills (2001).

Appendice A – Programmazione ad oggetti e Swarm

L'argomento della seguente appendice è l'approfondimento delle caratteristiche di un linguaggio di programmazione ad oggetti e della piattaforma di funzioni Swarm che li rendono particolarmente utili per l'analisi di sistemi economici condotta nello sviluppo del mio lavoro.

La programmazione ad oggetti

La tecnica della programmazione ad oggetti permette di sviluppare al meglio le potenzialità della metodologia delle simulazioni ad agenti e rappresenta un utile strumento per la rappresentazione dei processi all'interno di sistemi complessi.

In un linguaggio di programmazione *Object oriented* gli elementi significativi del modello sono implementati in *file* separati. Questi file contengono le caratteristiche di ogni elemento, ma affinché gli oggetti siano inizializzati e possano interagire con il modello, occorre aspettare il momento dell'esecuzione del programma. Tale struttura permette di avere parti separate che si combinano in diversi modi. Quindi in questo modo possono essere costruite varie tipologie di agenti, solo modificandone alcune caratteristiche e mantenendo le altre condizioni del modello. Infatti un modello costruito con la tecnica della programmazione ad oggetti è formato da varie entità distinte che sono in grado di interagire tra loro grazie alla presenza di funzioni o metodi. Un oggetto consiste in un insieme di funzioni correlate e di una base di dati che serve a tali funzioni. La base di dati è formata da variabili, dette anche variabili iniziali o *instances* (caratterizzazioni). Le funzioni sono anche chiamate metodi e permettono all'oggetto di comunicare con le altre parti del modello o applicare certe procedure. Ogni oggetto è in grado di comunicare con altri oggetti del programma esclusivamente attraverso i metodi.

Un programma può avere più di un oggetto dello stesso tipo. Oggetti dello stesso genere appartengono alla stessa classe. Tutti i membri di una classe sono in grado di utilizzare gli stessi metodi e sono caratterizzati da combinazioni delle stesse variabili iniziali. Quindi gli oggetti sono delle caratterizzazioni di una classe.

La programmazione ad oggetti offre, dunque, la possibilità di creare sistemi caratterizzati da diverse componenti tradotte in parti di codice informatico separate. Una importante distinzione che è possibile fare all'interno di un sistema è quella tra ambiente esterno ed agenti che vi agiscono. Nell'oggetto agente le variabili iniziali ne rappresentano alcune caratteristiche, mentre i metodi ne definiscono le regole comportamentali. L'oggetto ambiente possiede delle caratteristiche o variabili iniziali che definiscono il sistema simulato e delle regole che rappresentano le regole di funzionamento della struttura. Fra queste si

possono individuare i metodi che permettono all'ambiente di individuare ed interagire con gli agenti del sistema.

Con la programmazione ad oggetti è piuttosto semplice creare una eterogeneità di agenti. Allo stesso modo è possibile utilizzare gli stessi oggetti e verificare le conseguenze di cambiamenti strutturali del modello, come possono essere modifiche nelle caratteristiche dell'ambiente che si intende rappresentare.

La presenza di una struttura di oggetti e metodi permette di generare relazioni non lineari e parallele tra i vari elementi del programma in modo da rappresentare situazioni complesse caratterizzate da una molteplicità di agenti e di azioni in uno stesso istante.

Objective C

Objective C è un linguaggio di programmazione che amplia il linguaggio C, adattandone le caratteristiche alle esigenze della programmazione ad oggetti. Rispetto a C, l'uso di ObjC permette di ottenere una certa dinamicità del modello, nel senso di un'interrelazione tra le varie componenti dello stesso. La particolarità di Objective C è quindi quella di introdurre nuovi concetti e metodi di implementazione rispetto al linguaggio C. Infatti ObjC è un linguaggio di programmazione ad oggetti e quindi l'elemento fondamentale è l'oggetto, costituito da una collezione di dati e da una serie di operazioni che li possono modificare. Queste operazioni sono caratteristiche di ciascun oggetto e vengono definite metodi.

Ogni oggetto è identificato con un indirizzo: affinché si possa individuare un particolare oggetto nel programma occorre conoscere il suo indirizzo. A questo fine la dichiarazione di un oggetto avviene con il comando `id nomeOggetto`. Questa assegnazione però serve esclusivamente a conferire la natura di oggetto ad un determinato elemento. Affinché questo possieda delle caratteristiche occorre specificare a quale classe appartiene. Una classe è la struttura dalla quale può essere generato un particolare tipo di oggetto. In una classe sono quindi definite le variabili ed i metodi che potranno essere utilizzati da tutti gli oggetti che sono creati da questa, in quanto ogni classe definisce anche la procedura di creazione di ogni oggetto di un certo tipo. Sempre all'interno della classe sono implementati i metodi che saranno utilizzati dagli oggetti per l'interrelazione con il programma nel corso dell'esecuzione.

La dinamicità di un programma scritto in ObjC si concreta nella possibilità di interpellare un oggetto e fargli eseguire una certa operazione. Questo procedimento si ottiene mandando all'oggetto un messaggio: che è semplicemente un richiamo ad un metodo definito precedentemente per l'oggetto in questione. Il metodo richiamato può utilizzare solo variabili definite per l'oggetto a meno che il metodo non richiami esplicitamente le variabili di un altro oggetto. Inoltre un metodo è caratteristico di un certo oggetto, quindi differenti oggetti possono avere un metodo con lo stesso nome, ma che si traduce in azioni differenti in risposta ad un determinato messaggio. In questo modo è possibile, in una simulazione, ottenere diversi comportamenti in situazioni analoghe ed in seguito allo stesso messaggio, per oggetti differenti. Un messaggio può quindi essere interpretato come una forma di comunicazione tra programma e l'oggetto. Tale interrelazione conferisce all'esecuzione del programma una certa dinamicità: gli effetti del messaggio possono essere osservati solo nel momento dell'esecuzione del programma in una certa

collocazione temporale. Inoltre un programma ad oggetti ha una scansione del tempo definita nell'ambiente, ma all'interno di questa, si può richiamare un metodo per più oggetti, generando quindi relazioni non lineari e processi in parallelo, difficilmente ottenibili con altre tecniche di programmazione.

Applicazioni economiche in Swarm

Swarm sta diventando un ambiente di programmazione largamente utilizzato per le simulazioni economiche. Swarm è una piattaforma di funzioni che è possibile utilizzare per costruire modelli di simulazione ad agenti. Sfruttando la tecnica della programmazione ad oggetti, ogni elemento del sistema come l'ambiente e gli agenti sono implementati con parti di codice indipendenti.

Swarm è stato sviluppato al Santa Fe Institute in New Mexico da numerosi ricercatori tra i quali Chris Langton, Roger Burkhart, Manor Askenazi, Nelson Minar, Glen Ropella, Marcus C. Daniels, Alex Lancaster, Sven Thommesen ed è definito dagli autori stessi:

“multi agent platform for the simulation of complex adaptive systems”

Swarm è costituito da un insieme di librerie da associare per la creazione di simulazioni in diversi campi. Questo permette di avere un linguaggio universale e facilmente comprensibile per poter sviluppare ed interpretare simulazioni di carattere economico. Ciò permette di evitare i rischi connessi all'esistenza, nella programmazione, di diversi ambienti e tecniche che possono rendere difficile l'interpretazione, lo studio e l'evoluzione di modelli sviluppati da programmatori differenti.

La programmazione di un modello di simulazione deve avere tre obiettivi:

- *Validità*: il programma deve implementare correttamente il modello;
- *Usabilità*: deve essere facile eseguire il programma, interpretare gli *output* e capire come lavora il programma;
- *Estensibilità*: deve essere possibile per futuri utenti adattare il programma per nuovi usi.

Un modello di simulazione è utile principalmente se può essere adattato e modificato in base alla produzione di risultati in linea con quanto è possibile osservare nella realtà. Quindi la terza caratteristica è quella più importante per chi intende produrre un modello il più possibile realistico, aperto alle idee e modifiche di più studiosi sullo stesso argomento. L'estensibilità di un modello può essere ottenuta con la modularità del programma, la comunicazione e la possibilità di riutilizzare il modello. La modularità del programma consiste nell'implementazione di ambiente ed agenti come entità autonome in quanto rappresentate da proprie strutture informatiche; la comunicazione consiste nella produzione di nuovi modelli solo nel caso in cui altre simulazioni esistenti non possano essere adattate agli obiettivi che si intende raggiungere ed in ultimo la possibilità di riutilizzare parti di codice esistenti riduce la molteplicità di linguaggi e di tecniche di implementazione che ne impedirebbero l'usabilità e l'estensibilità.

L'obiettivo principale che ha guidato gli autori nella creazione di Swarm è quello di avere a disposizione e divulgare una libreria di funzioni studiate appositamente per la rappresentazione dei sistemi economici. Questo consente la produzione di modelli dotati di una certa struttura e stesse tecniche di

programmazione, evitando quindi la produzione di modelli eccessivamente diversi tra loro e poco comprensibili ad un potenziale utilizzatore esterno. L'utilizzo di una piattaforma di programmazione comune ha diversi vantaggi:

- *Usabilità*: è facile per i programmatori meno esperti costruire il primo semplice modello e osservare i risultati;
- *Tipologia*: la riproduzione di caratteristiche standard del sistema a partire dalle quali possono essere modificate alcune caratteristiche permette una maggiore comprensione del modello da parte di altri programmatori;
- *Verifica*: è possibile verificare il modello eseguendo esperimenti con diverse componenti del sistema ed individuare la sensibilità del modello a specifici elementi;
- *Studi trasversali*: si possono confrontare gli effetti di caratteristiche strutturali del sistema con diversi modelli di simulazione;
- *Macro-fondamenti*: si possono generare microstrutture per ottenere risultati definiti a livello aggregato.

La principale caratteristica di un modello di simulazione che utilizza Swarm è la suddivisione del modello in una particolare struttura che consiste in due ambienti distinti: Il Model e l'Observer. Il Model è la parte di programma nella quale sono definiti tutti gli oggetti che ne fanno parte: l'ambiente della simulazione, le regole di funzionamento del modello e la sua scansione temporale e gli agenti che operano in questa struttura. Solo attraverso il Model le varie componenti del sistema sono in grado di agire e determinarne la dinamica.

La particolarità di Swarm è il fatto di mettere a disposizione un numero elevato di strumenti per consentire, ad un osservatore esterno o allo stesso sviluppatore del modello, l'osservazione dei dati relativi a variabili o agenti nel corso della simulazione. Questo è ottenuto con diverse possibilità di rappresentazione grafica o di raccolta dei dati, tra le quali anche la finestra di visualizzazione delle variabili e dei parametri inizializzati nel Model e nell'Observer. Attraverso le due finestre, infatti, l'utilizzatore può modificare il valore dei parametri del modello ed osservarne le conseguenze nel corso della simulazione, oppure modificare la visualizzazione dei dati, ampliando o riducendo la scansione temporale di visualizzazione o ancora inserire una "sonda" per analizzare il comportamento di un singolo agente nel corso della simulazione.

Il Model e l'Observer sono oggetti, come anche oggetti sono gli elementi del sistema, primi fra tutti gli agenti. Questi possono avere caratteristiche comuni raccolte in un oggetto identificato come agente base. Le varie tipizzazioni possono essere sviluppate in file separati, introducendo parametri o altre variabili o con la definizione di metodi che traducono procedimenti comportamentali differenti. La particolarità di Swarm consiste quindi nella possibilità di creare una struttura che distingue le varie componenti del sistema, in parti di codice informatico separate, ma ognuna di queste ha un insieme di regole che ne consentono l'interazione. In questo modo si possono creare strutture che riproducono semplici sistemi economici, e da queste sviluppare le caratterizzazioni necessarie ad ottenere gli obiettivi che hanno portato alla creazione del modello di simulazione. La possibilità di osservare i processi nel corso dell'esecuzione dell'esperimento

permette di evidenziare caratteristiche comportamentali difficilmente rilevabili dall'osservazione dei dati prodotti dalla simulazione.

La programmazione ad oggetti e la piattaforma di funzioni Swarm permettono quindi di rappresentare con strumenti informatici sistemi complessi con la metodologia dei modelli ad agenti e di rilevare la dinamica dei processi che si sviluppano dall'interazione delle loro componenti.

Appendice B – Ricerca su EconLit

Per una introduzione e per meglio comprendere l'ambito di ricerca nel quale si colloca l'argomento da trattare, ho utilizzato uno dei maggiori strumenti di ricerca bibliografica EconLit, con l'obiettivo di individuare i lavori di maggiore interesse sviluppati nel campo delle simulazioni economiche con l'utilizzo del computer, restringendo la ricerca, in particolare, sulle applicazioni che riguardano i mercati dei titoli e le simulazioni ad agenti. Questo è stato fatto con l'obiettivo di passare da un'analisi generale ad una particolare che porta fino allo studio e allo sviluppo di una specifica applicazione di un progetto di simulazione di un mercato di Borsa (SUM¹⁶) sviluppato da Terna (Terna 2001) ed ampliato grazie al lavoro di diversi tesisti e dell'autore stesso.

Simulazioni e mercato dei titoli

L'uso delle simulazioni per lo studio di fenomeni o per la loro spiegazione è un'attività in forte crescita come si può notare cercando il termine simulazione (*simulation*) su EconLit (anni di riferimento 1986-2001): si ottengono 6986 riferimenti bibliografici. Restringendo il campo di ricerca alle sole simulazioni economiche il numero di documenti individuati si riduce della metà. Questo evidenzia l'utilità delle simulazioni per gli studi economici rispetto ad altre discipline. La particolare utilità delle simulazioni in economia può essere ricondotta alla specifica struttura dei fenomeni che vengono studiati in tale settore, caratterizzati da un considerevole numero di agenti differenti che interagiscono, dando vita ad un sistema con proprie caratteristiche e regole, a sua volta in grado di modificare l'azione dei singoli agenti.

All'interno delle simulazioni economiche ho posto l'attenzione sulle simulazioni che abbiano come argomento i mercati dei titoli: "*stock market simulation*", con tale restrizione il numero di riferimenti si aggira intorno ai 35.

¹⁶ *Surprising (Un)realistic Market model* approfondito nel capitolo 5.



Figura 1- Simulazioni economiche

Procedendo in particolare nell'individuazione dei lavori su simulazione e mercati dei titoli, viene posta l'attenzione sulle date di pubblicazione degli articoli, e si può notare come l'interesse per le simulazioni applicate ai mercati dei titoli sia una disciplina piuttosto recente e che sta suscitando sempre maggiore interesse.

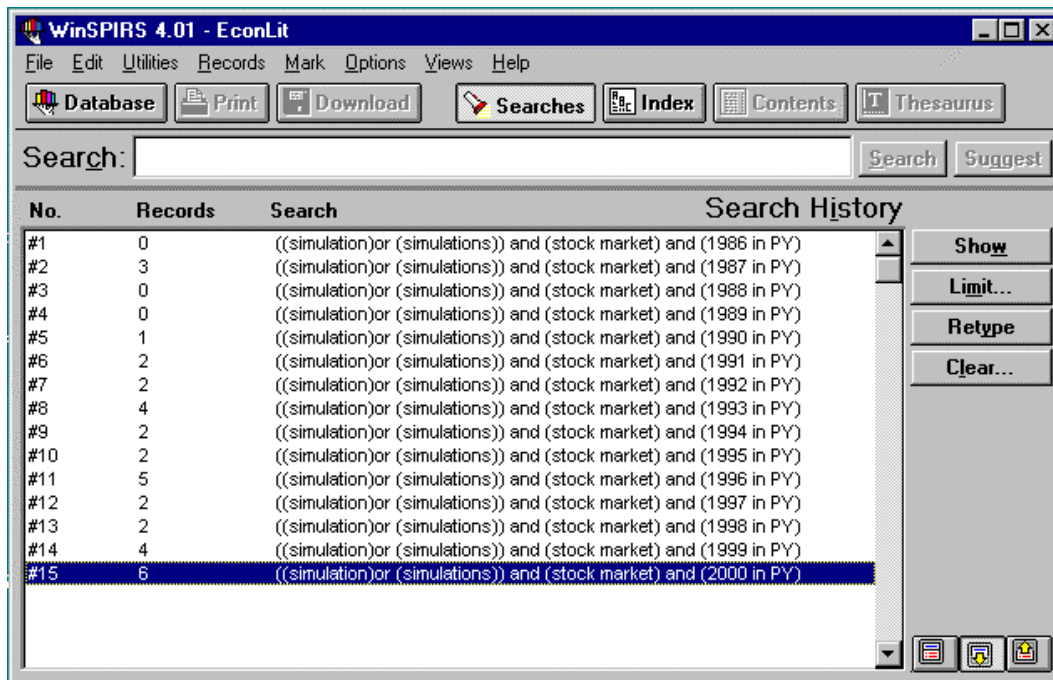


Figura 2. "Simulation" e "stock market"

Modelli ad agenti, Reti neurali artificiali e mercato dei titoli

Un tipo di simulazioni in economia che rivestono particolare importanza sono i modelli ad agenti. Questo tipo di simulazioni è caratterizzato dalla presenza di molti agenti che interagiscono tra loro. L'obiettivo dei modelli ad agenti è quello di studiare la dinamica di determinati processi.

In particolare in economia è importante verificare l'effetto di certi eventi sulla azioni degli individui. In questi casi sono molto utili i modelli che si basano su processi di apprendimento, come le reti neurali artificiali.

In tale ambito si sviluppa il lavoro di ricerca bibliografica intrapreso, individuando i lavori di maggior interesse, tra quelli individuati con EconLit con i termini “*artificial stock market*”, “*artificial agents*”, “*agent based models*” e “*neural networks and stock market*”.

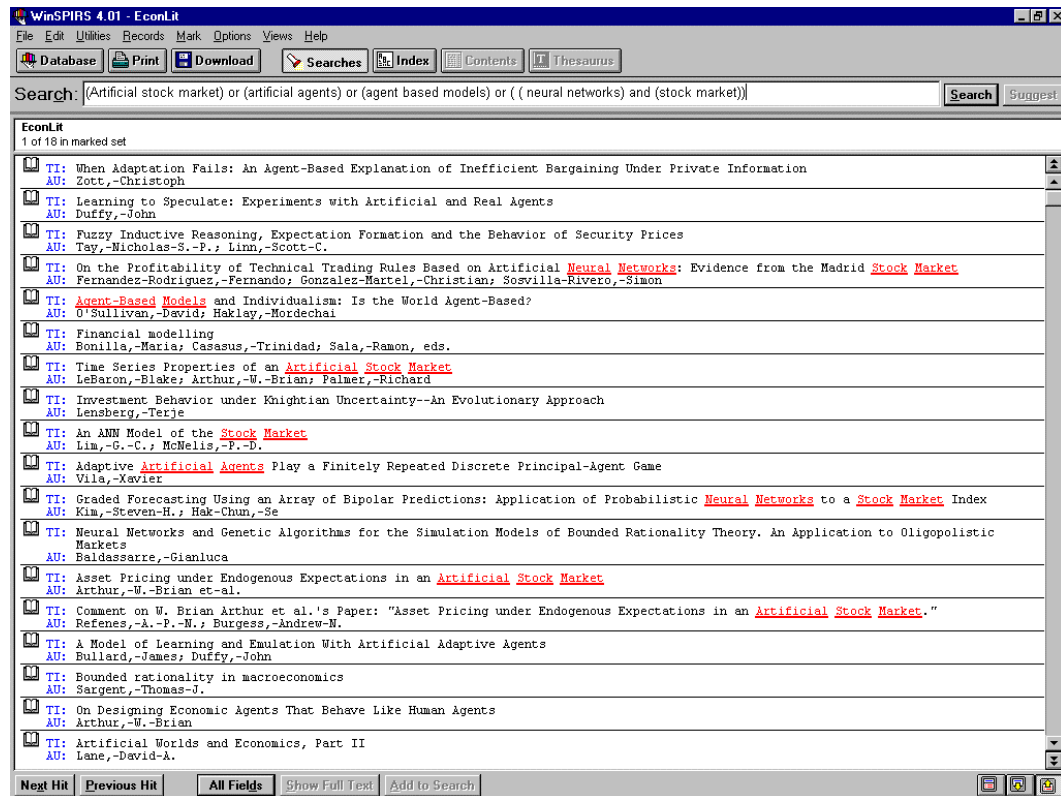


Figura 3. “*artificial stock market*”, “*artificial agents*”, “*agent based models*” e “*neural networks and stock market*”

I riferimenti bibliografici così individuati sono stati alla base del materiale per l'analisi di modelli di simulazione dei mercati finanziari condotta nel Capitolo 4 e per la parte teorica relativa all'uso, in generale, di modelli per lo studio e l'approfondimento di tematiche economiche che si può leggere nel Capitolo 2.

Data l'attualità e la vivacità di produzione di modelli e trattati nell'ambito di ricerca studiato, molto materiale è stato anche reperito da appositi siti internet interamente dedicati all'uso delle simulazioni in diversi settori di studio come ad esempio l'enciclopedia multimediale Wikipedia, che fornisce chiare e complete definizioni scientifiche, o il sito *Jasss* (*Journal of artificial Societies and Social Simulations*, www.soc.surrey.ac.uk/Jasss) o ancora siti come quello dedicato agli utilizzatori della piattaforma di funzioni Swarm (www.swarm.org) o il sito del Santa Fe Institute (www.santafe.edu).

Bibliografia

ABREU D. e BRUNNERMEIER M.K.(2003), *Bubbles and crashes*, in «Econometrica», Vol. 71, n. 1, pp. 173-204.

ARTHUR W.B. (1999), *Complexity and the economy*, in «Science», 284, pp. 107-109.

ARTHUR W.B. (1991), *Designing economic agents that act like human agents: a behavioural approach to bounded rationality*, in «American Economic Review», vol. 81, 2, pp. 353-59.

ARTHUR W.B, DURLAUF S. e LANE D.A. (1997), *The Economy as an Evolving Complex System II- Introduction: Process and Emergence in the Economy*.

ARTHUR W.B., HOLLAND J.H., LEBARON B., PALMER R., TAYLER P. (1996), *Asset Pricing under endogenous expectations in an artificial stock market*.

AXELROD R. (2003), *Advancing the art of simulation in the social sciences*, Japanese Journal for Management Information Systems, www.personal.umich.edu/~axe/research/AdvancingArtSim2003.pdf.

AXTELL R.L. (2000), *Why agents? On the varied motivations for agent computing in the social sciences*, CSED Working Paper n. 17. www.brookings.edu/es/dynamics/papers/agents/agents.htm

AXTELL R.L., EPSTEIN J.M.(1994), *Agent-Based Modelling: Understanding Our Creations*, in «The Bulletin of the Santa Fe Institute: Winter 1994».

BARKLEY ROSSER J.(1999), *On the complexities of complex economic dynamics*, in «Journal of Economic Perspectives», Vol. 13, N. 4, pp 169-192.

BARTOLOZZI M. e THOMAS A.W. (2003), *Stochastic cellular automata model for stock market dynamics*, arXiv:cond-mat/ 0311372.

BLANCHARD O. (1999), *Macroeconomia*, Il Mulino, pp. 253-260.

BOIN A. (2004), *On financial crises*, in «British Journal of management», Vol. 15, pp. 191-195.

BRUUN, C.(2000), *Prospect for an economics framework for Swarm*, in *Agent –Based Methods in Economics and Finance: simulations in Swarm*, Dordrecht and London, Kluwer Academic.

BULLARD J. e DUFFY J. (1998), *On Learning and the Stability of Cycles*, in «Macroeconomic Dynamics», March 1998, The Federal Reserve Bank of St Louis Working paper 1995-006, <http://research.stlouisfed.org/wp/1995/96-006.pdf>.

BULLARD J. e DUFFY J. (1998), *A model of learning and emulation with artificial adaptive agents*, in «Journal of Economic Dynamics and Control», 22, pp 179-207.

CHALLET D. e MARSILI M. (2002), *Critically and finite size effects in a simple realistic model of stock market*, arXiv:cond-mat/0210549.

CHALLET D. E STINCHCOMBE R. (2001), *Analyzing and modelling 1+1d markets*, arXiv:cond-mat/0106114.

DANIELS M.G.E FARMER G.D. IORI G., SMITH E.(2002), *How storing supply and demand affects price diffusion*, Santa Fe Working Paper.

DUFFY, JOHN (2001), *Learning to Speculate: Experiments with Artificial and Real Agents*, Journal of Economic Dynamics and Control, 25(3-4), March 2001, pp. 295-319.

ELIEZER (1998), *Scaling laws for the market microstructure on the interdealer broker market*, arXiv:cond-Mat/9808240.

FARMER J.D., GILLEMOT L., LILLO F., MIKE S. e SEN A. (2003), *What really causes large price changes?*, Santa Fe Institute Working Paper 04-02-006.pdf.

FARMER J.D., PATELLI P., ZOVKO I.I. (2003), *The predictive power of Zero intelligence in financial markets*, arXiv:cond-mat/0309233.

FERNANDEZ-RODRIGUEZ F., GONZALES-MARTEL C., SOSVILLA-RIVERO S. (2000), *On the profitability of technical trading rules based on artificial neural networks: Evidence from the Madrid stock market*, in «Economics Letters», n. 69, pp. 89-94.

FRANCI F., MATASSINI L. (2000), *Life in the Stockmarket - a realistic model of trading*, arXiv:cond-mat/0008466.

FREIFELDER J. (1996), *Speculative bubbles: "financial genius before the fall"*, <http://clarity.net/jake/bubble.htm>.

GIARDINA I. e BOUCHAUD J.P. (2002), *Bubbles, crashes and intermittency in agent based market models*, ArXiv:cond-mat/0206222.

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

GODE D. e SUNDER S. (1993), *Allocative efficiency of markets with zero intelligence traders: Markets as a partial substitute for individual rationality*, «Journal of Political Economy», Vol. 101, n.1, pp. 119-137.

GONÇALVES C.P. (2003), *Artificial financial market model*, all'indirizzo <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/community/ArtificialFinancialMarketModel> come commento al modello.

HAWKING S. (2000), *The use of complexity science*, www.complexsys.org/Smithsonian04.pdf.

JOHANSEN A. LEDOIT O. e SORNETTE D. (2001), *Crashes as critical points*, arXiv:cond-mat/9810071.

JOHANSEN A., SORNETTE D. (1997), *Stock Market Crashes are outliers*, arXiv:cond-mat/9712005.

JOHNSON P.E (2001), *What I learned from the Artificial Stock Market*, paulijohn@ku.edu.

KAIZOJI T. (2000), *Speculative bubbles and crashes in stock markets: an interacting agent-model of speculative activity*, arXiv:cond-mat/0010263.

- KIRMAN A. (1997), *The economy as an evolving network*, in «Journal of Evolutionary Economics», n. 7, pp. 339-353.
- LEBARON B.(2000), *Agent based computational finance: suggested readings and early research*, «Journal of economic Dynamics and Control», n. 24, pp. 679-702.
- LEBARON B., ARTHUR W.B.,PALMER R. (1999), *Time Series Properties of an Artificial Stock Market*, in «Journal of Economic Dynamics and Control», 23(9-10), September 1999, pp. 1487-1516.
- LENSBERG T. (1999), *Investment Under Knightian uncertainty- An evolutionary approach*, in «Journal of Economic Dynamics & Control», n. 23, pp 1587-1604.
- MARGARITA, S. (1992), *Verso un "robot oeconomicus": algoritmi genetici ed economia*, in Sistemi intelligenti, Anno IV, n. 2, pp. 421-459.
- MASLOV S. (2000), *Simple model of a limit order-driven market*, in «Physica A», n.278, pp. 571-578.
- MASLOV S, MILLS M. (2001), *Price fluctuations from the order book perspective – empirical facts and a simple model*, arXiv:cond-mat/0102518.
- MATASSINI L. e FRANCI F.(2001A), *How traders enter the market through the book*, arXiv:cond-mat/0103106.
- MATASSINI L. e FRANCI F.(2001B), *On financial markets trading*, in «Physica A», n.289, pp. 526-542.
- MYERS J. (1999), *Investments Manias and Speculative Bubbles*, tratto da J. Myers, Profits Without Panic: Investment Psychology for personal Wealth.
- NOLFI S. (1994), *Learning and evolution in Neural networks*, in «Adaptive Behavior», Vol. 3, 1, pp.5-28.
- ODELL J. (2002), *Bounded rationality and the World Political Economy:the Nature of Decision Making*, in *Governing the World's Money*, ed. David M. Andrews, C. Randall Henning and Louis W. Pauly, Cornell University Press.
- ODELL J.(2004), *Agents and Complex Systems*, JOT: Journal of Object Technology.
- O’SULLIVAN D., HAKLAY M. (2000), *Agent-based model and individualism: is the world agent-based?*, Environment and Planning A, 32(8), pp 1409-1425.
- PALMER R.G., ARTHUR W.B., HOLLAND J.H., LE BARON B.(1998), *An Artificial stock Market*, in Artificial Life and Robotics, 3.
- PARISI D. (2003), *Economia o economia?*, in Sistemi Intelligenti, anno XV, n.2, pp 185-219.
- PLEROU V., GOPIKRISHNAN P., GABAIX X., STANLEY H.E.(2002), *Quantifying stock price response to demand fluctuations* Phys. Rev. E66, 027104, <http://polymer.bu.edu/Hes/econophysics>.
- ROSSER J.B.JR.(1999), *On the complexities of complex economic dynamics*, in Journal of Economic Perspectives, vol. 13, n. 4, pp 169-192.

SHACHMUROVE Y. (2002), *Applying Artificial Neural Networks to Business, Economics and Finance*, Penn CARESS Working Papers, <http://ideas.repec.org>.

SHATNER M., MUSHNIK L., LESHNO M. SOLOMON S.(2000), *A continuous time asynchronous model of the stock market; Beyond the LLS Model*, arXiv:cond-mat/0005430.

SLANINA F. (2001), *Mean-field approximation for a limit order driven market model*, arXiv:cond-mat/0104547.

SOLOMON S., LEVY M. (2000), *Market ecology, Pareto wealth distribution and Leptokurtik returns in microscopic simulation of the LLS stock market model*, arXiv:cond-mat/0005416.

SORNETTE D., JOHANSEN A. e BAUCHAUD J.P., (1995), *Stock Market Crashes, Precursors and Replicas*, arXiv:cond-mat/9510036.

SRBLJINOVIC A., SKUNCA O. (2003), *An introduction to agent based modelling and simulation of social processes*, in *Interdisciplinary Description of Complex Systems* 1(1-2), pp. 1-8.

STEFANSSON B. (2000), *Simulating Economic Agents in Swarm*, in Luna e Stefansson *Economic Simulations in Swarm: Agent-Based Modelling and Object Oriented Programming*, Dordrecht and London, Kluwer Academic.

TAY N., LINN S.P., SCOTT C. (2001), *Fuzzy Inductive Reasoning, Expectation Formation and the Behavior of Security Prices*, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 25(3-4), March 2001, pp. 321-61.

TERNA P.(2000), *Economic Experiments with Swarm: a Neural Network Approach to the Self-Development of Consistency*, in Luna e Stefansson (eds), *Economic simulations in swarm: Agent based modelling and object oriented programming*, Dordrecht and London, Kluwer Academic, pp. 73-103.

TERNA P.(2000), *Simulations tools for social scientists: building agent based models with swarm*, in *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 1, n.2, <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/1/2/4.html>.

TERNA P.(2001), *Cognitive agents behaving in a simple stock market structure*, in F. Luna and A. Perrone (eds), *Agent -Based Methods in Economics and Finance: simulations in Swarm*, Dordrecht and London, Kluwer Academic, pp. 188-227.

TERNA P.(2003), *Another ASM (Artificial Stock Marker), so AASM : Why?*

YANG C., ZHOU T., ZHOU P., LIU J. e TANG Z.(2004), *Study on evolution complexity in an artificial stock market*, arXiv:cond-mat/0406168.

Wikipedia: Enciclopedia multimediale

ZOTT C. (1999), *When Adaptation Fails: An Agent-Based Explanation of Inefficient Bargaining Under Private Information*, INSEAD Working Paper, 99/44/ENT, pages 35, www.insead.fr/research.

