

*Soggetta a copyright, fatti salvi i diritti della LUISS Guido Carli di riproduzione*



**Tesi di dottorato in Diritto ed Economia**

**XXIII ciclo**

Relatore: Prof.ssa Daniela Di Cagno

Candidato: Matteo Mazzotta

# Le aste nel mercato elettrico: agent-based models e experimental economics a confronto

Matteo Mazzotta

15/01/2013

## Abstract

Con l'ondata di liberalizzazioni che ha coinvolto i paesi industrializzati dagli anni 90 in poi, monopoli verticalmente integrati si trasformano in mercati ad asta caratterizzati da due metodi alternativi di formazione del prezzo: la discriminatory price auction e la uniform price auction. Alla luce dell'impatto significativo del meccanismo d'asta sugli esiti di mercato, l'economia mainstream si dimostra inadeguata nell'indicare quale sia il sistema più efficiente in quanto la trattazione analitica del problema trascura alcune caratteristiche quali la struttura della rete e l'interazione ripetuta tra la pluralità di soggetti che operano sul mercato. I due approcci teorici discussi nel presente lavoro, experimental economics e agent based models, spostano l'asticella aldilà dei limiti incontrati dalla teoria classica e individuano delle regolarità empiriche non sempre in linea con le previsioni analitiche, ma più aderenti alla realtà osservata. L'attività del legislatore dovrebbe essere guidata anche dalle conclusioni offerte dai due approcci alternativi al problema. In questa tesi, dopo la presentazione delle due metodologie e il loro contributo al problema economico trattato, viene prima effettuato un confronto epistemologico sui metodi che caratterizzano i due approcci e poi, in ottica normativa, vengono discussi i risultati proposti.

## Contents

<b>I</b>	<b>Il mercato elettrico</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Il problema economico</b>	<b>4</b>
1.1	Discriminatory Price Auction vs Uniform Price Auction . . .	6
1.1.1	Le aste nel mercato elettrico . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Il mercato elettrico: overview</b>	<b>15</b>
2.1	Sviluppo del mercato elettrico in Italia . . . . .	15
2.2	Il mercato elettrico oggi . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Regulation: esperienze significative</b>	<b>23</b>
3.1	California . . . . .	25
3.2	Regno Unito . . . . .	27
<b>II</b>	<b>Agent based models</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>Introduzione</b>	<b>30</b>
4.1	Complessità, modellizzazione e simulazione . . . . .	30
4.1.1	Complessità . . . . .	30
4.1.2	Modellizzazione . . . . .	35
4.1.3	Simulazione . . . . .	36
4.2	Complessità in Economia . . . . .	39
4.3	Agent-based computational economics . . . . .	41
4.4	Agenti . . . . .	46
4.4.1	Il Reinforcement learning e i meccanismi evolutivi . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Applicazioni degli ABM</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>Letteratura</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>L'utilizzo degli ABM nella regulation del mercato elettrico</b>	<b>68</b>
<b>8</b>	<b>UPA vs DPA negli ABM</b>	<b>69</b>
<b>III</b>	<b>Experimental economics</b>	<b>73</b>
<b>IV</b>	<b>ABM vs Experimental Economics: discussione</b>	<b>82</b>
8.1	Due approcci diversi: discussione sul metodo . . . . .	83
8.2	Due approcci diversi: discussione sui risultati . . . . .	90
8.3	Conclusioni . . . . .	94
	<b>References</b>	<b>97</b>

## Part I

# Il mercato elettrico

## 1 Il problema economico

Fino ai primi anni Novanta i mercati elettrici avevano una struttura piuttosto semplificata nella quale un monopolista verticalmente integrato si occupava di produrre energia elettrica, trasmetterla su una rete elettrica di sua proprietà e distribuirla alle utenze finali. Rispetto a questa struttura il contributo di law and economics verteva sulla regulation del regime di monopolio finalizzata a garantire la stabilità del mercato, a garantire l'effettività del cosiddetto servizio universale, prezzi relativamente bassi e comunque sufficienti a garantire investimenti infrastrutturali e crescita nel lungo periodo. Con l'ondata di deregulation che ha coinvolto i settori elettrici in (quasi) tutti i paesi industrializzati, il framework teorico cambia e cambia anche il ruolo della law and economics. Con la deregulation, il monopolista verticalmente integrato viene sostituito da una pluralità di soggetti che lavorano sui tre principali segmenti della filiera produttiva, ossia generazione, trasmissione e distribuzione. In particolare, mentre per la generazione si hanno diversi soggetti produttori e per la distribuzione esiste un vero e proprio mercato retail, per la trasmissione il regime continua a configurarsi come un monopolio naturale nel quale un unico soggetto, transmission system operator (TSO), è proprietario della rete di trasmissione e la gestisce secondo principi di indipendenza e parità di accesso all'infrastruttura. Soprattutto, con la liberalizzazione, nasce il mercato elettrico. I mercati elettrici sono mercati ad asta ed hanno una struttura spesso molto articolata. Conseguentemente, il settore presenta delle dinamiche nuove e nasce l'esigenza di un nuovo market design: le diverse strutture di mercato possono comportare la possibilità per gli op-

eratori di comportarsi strategicamente esercitando potere di mercato. Con l'introduzione del mercato, ogni operatore decide quanto produrre e a che prezzo offrire l'energia prodotta. È il sistema di aggregazione di domanda e offerta che caratterizza poi la struttura di mercato. La decentralizzazione delle decisioni di investimento/produzione crea una complessità rispetto alla quale la modellizzazione classica risulta insufficiente. In particolare, l'approccio tradizionale fallisce nell'analisi delle interazioni tra i diversi soggetti economici e nel comprendere le dinamiche di apprendimento di questi ultimi e l'evoluzione del loro comportamento sul mercato. Questi aspetti sono fondamentali dal punto di vista normativo, in quanto la loro comprensione è determinante nella scelta dell'ottimo market design. Il fatto che i processi di deregulation -il caso del mercato elettrico californiano ne è un esempio- hanno spesso portato a esiti imprevisti e non desiderati rappresenta la testimonianza storica di quanto l'introduzione di un market design non fondato su corrette fondamenta teoriche è esiziale rispetto agli obiettivi di policy del legislatore. Per il mercato elettrico, gli obiettivi di policy possono essere fondamentalmente ricondotti ai concetti di efficienza statica (o di breve periodo) ed efficienza dinamica (o di lungo periodo). L'efficienza statica consiste nell'assicurare che l'energia venga prodotta al minor costo possibile, che sia consumata da chi la valorizza di più, che venga prodotto l'output ottimale. Esiste poi la cosiddetta efficienza dinamica, che consiste nel corretto livello di investimenti nelle infrastrutture produttive e di trasmissione e nella selezione della tecnologia. Purtroppo, esiste un trade-off tra questi due tipi di efficienza, in quanto profitti bassi o nulli propri di un mercato in efficienza statica non sono incentivanti per il produttore che deve sostenere investimenti capital intensive con payback period molto lunghi. Il trade-off tra efficienza statica e dinamica è presente in tutti i settori nei quali l'importanza strategica degli investimenti è discriminante, ma il settore elettrico presenta delle caratteristiche intrinseche non modificabili che rendono il problema di più

difficile trattazione.

## 1.1 Discriminatory Price Auction vs Uniform Price Auction

Nel mercato elettrico viene tradata una merce, l'energia elettrica, che, per tecnologia produttiva è propriamente una commodity. Tuttavia, si tratta di un bene non stoccabile, che deve pertanto essere consumato contestualmente alla produzione, e questa è una caratteristica che lo assimila ad un servizio. Le tecnologie di produzione variano a seconda delle materie prime utilizzate (prevalentemente carbone e gas per l'Italia) e delle caratteristiche degli impianti utilizzati:

1. Impianti baseload: alti costi fissi e bassi costi variabili, ad esempio carbone e nucleare;
2. Impianti mid-merit o di modulazione: impianti flessibili che possono switchare da acceso a spento in tempi relativamente rapidi, ad esempio i cicli combinati CCGT;
3. Impianti peak: bassi costi fissi e alti costi variabili.

In base al proprio portafoglio di impianti e alla propria struttura di costi variabili gli operatori di mercato effettuano le proprie scelte di produzione in base al prezzo spot<sup>1</sup> dell'energia elettrica. La curva di offerta non è, dunque lineare, ma una funzione definita a tratti. Dal lato della domanda, le esigenze sono eterogenee a seconda della natura degli utenti. Il livello della domanda varia nelle fasi della giornata al variare delle esigenze orarie, con un picco di domanda nelle ore diurne ed un calo in quelle notturne.

Domanda e offerta sono collegate dalla rete di trasmissione. L'energia

---

<sup>1</sup>A causa dell'impossibilità di immagazzinazione dell'energia elettrica e della conseguente contestualità di produzione e consumo, le decisioni di produzione sono, entro i vincoli tecnologici di funzionamento dell'impianto, prese in tempo reale in base all'evoluzione dei prezzi spot. Per tale motivo, gli impianti di produzione di energia elettrica vengono considerati come delle opzioni finanziarie

prodotta viene immessa nella rete di trasmissione nazionale attraverso la quale viene veicolata alla domanda. La rete è, pertanto, quella che in law and economics viene definita un'essential facility.

Mentre prima delle liberalizzazioni il prezzo dell'energia era una tariffa regolamentata determinata nell'ambito di un sistema di regolamentazione più generale, con la liberalizzazione si può parlare di un vero e proprio prezzo di mercato che si determina dall'incontro di domanda e offerta prevalentemente<sup>2</sup> attraverso l'utilizzo di una piattaforma unica di scambio, la borsa elettrica. La borsa elettrica è il sistema di aggregazione di domanda e offerta e di garanzia della corretta esecuzione degli scambi. Quello che interessa ai fini del presente lavoro è, però, il meccanismo di formazione del prezzo, ossia il meccanismo di funzionamento della borsa e il suo impatto sul comportamento degli agenti e sulla loro capacità di esercitare potere di mercato.

### 1.1.1 Le aste nel mercato elettrico

La borsa elettrica funziona con un meccanismo di asta ripetuta nel tempo nel quale vengono presentate le offerte in acquisto e vendita generalmente con frequenza oraria. Pertanto, la ricerca del mechanism design ideale per la formazione del prezzo dell'energia elettrica si traduce nella ricerca del meccanismo d'asta ideale. Un meccanismo di asta per essere ideale deve essere incentive compatible, cioè indurre i produttori ad offrire tutta la propria capacità a prezzi di costo. Nella teoria delle aste, il Revenue Equivalence Theorem afferma che con partecipanti all'asta che hanno valutazioni del bene i.i.d.<sup>3</sup> e sono neutrali al rischio, tutti i meccanismi d'asta che assegnano il bene a chi lo valuta di più e per il quale il pagamento atteso per chi valuta il bene zero sia nullo hanno lo stesso valore atteso. Purtroppo, il teorema non è direttamente applicabile per il mer-

---

<sup>2</sup>Oltre alla borsa, altro meccanismo di incontro tra domanda e offerta è rappresentato dal sistema degli scambi bilaterali

<sup>3</sup>Indipendentemente e identicamente distribuite.

cato elettrico per il fatto che la ripetizione dell'asta implica la possibilità di comportamenti strategici collusivi dei partecipanti e che le ipotesi di base del teorema non sono applicabili in quanto i produttori non sono risk neutral né le valutazioni sono i.i.d..

Gli operatori possono operare in borsa in acquisto -dichiarando la quantità di energia che intendono acquistare e il prezzo che sono disposti a pagare- e in vendita offrendo energia a un determinato prezzo. Il market clearer, gestore della borsa, “pulisce” il mercato individuando le offerte migliori in acquisto e vendita. Storicamente le aste sui mercati elettrici sono state strutturate principalmente<sup>4</sup> in due modi: discriminatory price auction (DPA) e uniform price auction (UPA). Il ruolo del gestore nei vari paesi viene ricoperto da entità terze, i cosiddetto Independent System Operator introdotto con il processo di deregulation.

Secondo il meccanismo del DPA, tutte le offerte in acquisto e vendita vengono ordinate in base a prezzo e quantità (e ordine temporale di presentazione dell'offerta in caso di parità). Si tratta del meccanismo classico di asta a busta chiusa esteso al caso multi-unit, ossia di una pluralità di beni fungibili (quali l'energia elettrica). I produttori che risultano vincitori venderanno le quantità offerte al prezzo da loro proposto, per questo motivo il DPA è chiamato alternativamente anche “pay as bid”.

Nel meccanismo dell'UPA, il gestore dell'asta, a partire dalle offerte di acquisto e vendita, tratterà le curve aggregate di domanda e offerta dalla cui intersezione ricaverà il prezzo d'equilibrio, il system marginal price (SMP). Ogni produttore la cui offerta sarà in merit venderà il proprio output valorizzato al system marginal price, indipendentemente dal prezzo offerto. In termini analitici, il numero  $j^*$  di produttori che saranno nella merit area sarà:

$$j^* = \min \left\{ x \mid \sum_{j=1}^x q_j \geq q^* \right\} \quad (1)$$

---

<sup>4</sup>Si registrano anche esperienze ibride come il regime del soft-cap introdotto in California.



con  $x \in 1, 2, \dots, J$  numero intero compreso tra uno e il numero totale  $J$  di produttori, ordinati in maniera tale che il  $j$ -esimo produttore sia il produttore che abbia presentato la  $j$ -esima offerta più bassa, mentre  $q^*$  rappresenta la quantità di energia domandata.

Dal lato della domanda, saranno soddisfatte tutte le offerte di acquisto superiori rispetto al SMP. L'UPA è il meccanismo prevalente nelle borse elettriche e in Italia, ad esempio, è il meccanismo della formazione del prezzo sui mercati MGP e MI. Con l'UPA, i produttori beneficiano della cosiddetta rendita inframarginale, ossia di un surplus netto dato dalla differenza tra ogni unità prodotta e scambiata al prezzo SMP e ogni unità valorizzata al prezzo di offerta del produttore. La rendita inframarginale totale sarà data pertanto da:

$$q^* * SMP - \int_0^{q^*} S(x) dx \quad (2)$$

con  $S(x)$  funzione di offerta.

I due sistemi implicano per i produttori modalità differenti di bidding. Nel caso del SMP, la strategia razionale in regime di concorrenza perfetta sarà biddare al proprio costo marginale e beneficiare, successivamente, della rendita inframarginale in fase di settlement. Storicamente, è proprio per questo motivo che l'UPA è stato spesso ritenuto un meccanismo di mercato più fair: in questo modo, infatti, ogni produttore razionale rivelerà, biddando, la propria struttura di costi marginali. Tuttavia, quanto appena affermato è solo parzialmente vero, in quanto in alcuni casi, ad esempio agli albori del funzionamento del mercato italiano, si sono osservate offerte con prezzi molto bassi o addirittura nulli. Infatti, poiché il mercato elettrico si svolge in aste molto frequenti (in alcuni casi anche intervalli di quindici minuti) e, dunque, nel framework teorico classico si tratta di un gioco infinito ripetuto, possono verificarsi equilibri strategici tali per cui le modalità di bidding divergono rispetto a quella appena descritta. Nel caso dell'offerta nulla, si tratta ovviamente di un segnale lanciato al

mercato da una specifica controparte.

Nel DPA per i produttori non è razionale biddare al proprio costo marginale. La strategia razionale è offrire tutta la propria produzione, indipendentemente dalla fonte produttiva, ad un prezzo pari al prezzo di equilibrio atteso. Nella determinazione del prezzo d'offerta il produttore per generare le proprie aspettative di prezzo utilizzerà un set informativo più ampio dato dalle informazioni sulla struttura di costo propria e dei suoi competitor e del livello atteso della domanda.

L'andamento qualitativo del grafico della funzione di offerta evolve conseguentemente alla scelta del meccanismo di asta. Il meccanismo DPA porta ad una curva di offerta meno inclinata rispetto alle curve di offerta in caso di UPA. La ragione risiede nel meccanismo di bidding in DPA sopra descritto: poiché i soggetti bidderanno al clearing price atteso, la curva d'offerta sarà tanto più piatta tanto più le previsioni saranno omogenee tra gli operatori. Altro fattore che può rendere più piatta la curva d'offerta è l'omogeneità nell'attitudine al rischio degli operatori. Un operatore avverso al rischio, tenderà a biddare ad un prezzo  $p^* - \varepsilon$  inferiore al prezzo di equilibrio  $p^*$  di una componente  $\varepsilon$  tanto più grande quanto maggiore sarà la sua avversione al rischio. La spiegazione risiede nel fatto che biddando ad un prezzo inferiore al prezzo di equilibrio aumenta la probabilità ex ante di essere in-merit<sup>5</sup>. Nel DPA il prezzo offerto dal produttore farà riferimento a tutta la produzione disponibile, sia che questa sia prodotta da impianti baseload o che sia prodotta da impianti di picco,

---

<sup>5</sup>Il comportamento appena descritto è alla base di quel fenomeno noto in letteratura con il nome di "winner's curse": nelle aste in cui l'informazione sul valore del bene è dispersa tra i partecipanti (common value auction) e non vi è informazione completa, il vincitore, essendo colui il quale ha biddato più alto, potrà peggiorare la sua posizione in termini assoluti se il valore del bene aggiudicato sarà inferiore al prezzo pagato e in termini relativi se, pur essendo il valore del bene acquistato superiore al prezzo pagato, potrebbe essere inferiore rispetto a quanto previsto dal vincitore al momento dell'offerta. Per il mercato elettrico, Wolfram [83] teorizza che i prezzi delle aste in DPA sono più alti di quelli in UPA in quanto ogni produttore, sapendo di provare rimorso ("regret") nel caso in cui le sue previsioni sul prezzo di equilibrio dovessero rivelarsi più basse della realtà, tende a biddare molto alto per abbassare quanto più possibile la probabilità di trovarsi in questa condizione, evidentemente correndo il rischio di rimanere out-of-the-merit.

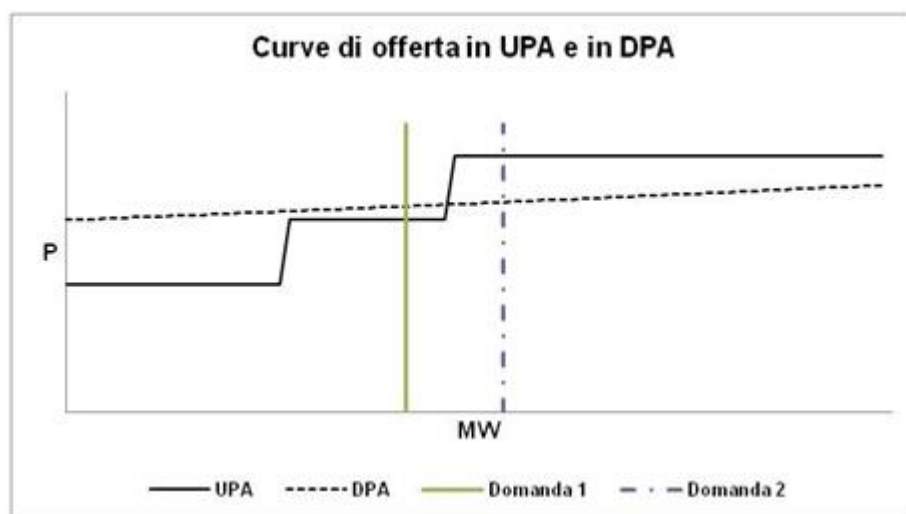


Figure 1: Curve di offerta in UPA e DPA

il cui costo marginale sia inferiore al prezzo di equilibrio atteso.

La differenza nelle inclinazioni delle curve di offerta nei due sistemi, ha spesso portato ad affermare che l'UPA producesse una maggiore volatilità. Guardando alla figura 1 è infatti possibile apprezzare come uno shift della domanda verso destra (da Domanda 1 a Domanda 2) o verso sinistra (da Domanda 2 a Domanda 1) comporta una variazione nel prezzo di equilibrio molto più rilevante in UPA che in DPA.

Nel DPA, contrariamente all'UPA, non è invece possibile prevedere quali soggetti saranno in merit. Infatti, i soggetti con costi marginali più bassi potrebbero offrire la propria produzione a un prezzo più alto rispetto al SMP, rimanendo fuori dalla merit area.

I prezzi di equilibrio, a differenza di quanto desiderabile, costituiscono segnali distorti. In un contesto di UPA, gli operatori, non conoscendo le offerte dei propri concorrenti ma osservando soltanto il prezzo di equilibrio sul mercato, non possono trarre informazioni circa la struttura di costi dei competitor e tecnologia utilizzata. I produttori hanno, però, delle infor-

mazioni sul costo marginale più alto che sarà pari al prezzo di equilibrio in quanto il produttore marginale avrà biddato, in condizioni di concorrenza, al proprio costo marginale. Con strutture di mercato oligopoliste, quanto appena affermato sarà solo parzialmente vero in quanto sono possibili equilibri di mercato nei quali il produttore marginale riesce a biddare più alto rispetto al proprio costo marginale, in particolar modo nel caso di domanda anelastica. In regime di concorrenza e con domanda anelastica, il produttore non potrà avere un'indicazione precisa sull'intera curva di offerta, ma poiché la domanda anelastica shifta verso destra o verso sinistra a seconda delle giornate e delle ore all'interno delle giornate, ripetendo l'asta un numero sufficiente di volte si può arrivare ad avere altri punti di riferimento (i prezzi di equilibrio corrispondenti ai vari livelli della domanda) utili a migliorare la stima sulla funzione di offerta. Il tutto, evidentemente, con una curva di offerta stabile durante le ripetizioni dell'asta. Qui emergono delle prime difficoltà teoriche nella modellizzazione in quanto, anche in un caso relativamente semplice come concorrenza e domanda anelastica, è possibile ipotizzare meccanismi di learning, resi possibili dalla ripetizione continua delle aste, difficilmente intercettabili nella modellizzazione classica.

Discorso analogo vale per il sistema DPA, nel quale il segnale dei prezzi è ancora meno interpretabile. A differenza del sistema UPA nel quale si ottiene l'indicazione del costo marginale più alto, nel DPA questa informazione non è disponibile in quanto l'offerta con il prezzo maggiore non è necessariamente presentata dal produttore con costo marginale più alto. L'assenza di questa informazione può creare delle distorsioni nella scelta tecnologica. Nell'incertezza sulla stima del prezzo di equilibrio e nell'ipotesi di avversione al rischio, i produttori potrebbero biddare a prezzi inferiori al prezzo atteso al fine di aumentare la probabilità di essere nella merit area. In questo modo, i produttori rinunciano a parte della rendita inframarginale con una diminuzione dei ritorni attesi

dell'investimento in tecnologie con costi marginali più bassi. L'esito finale del sistema, porterebbe dunque ad una distorsione della selezione della tecnologia e ad una potenziale inefficienza dinamica.

Altra critica storicamente rivolta al sistema DPA è che avvantaggia indebitamente i produttori maggiori in quanto questi ultimi, gestendo una capacità installata maggiore, hanno una maggiore visibilità sulle dinamiche di mercato e, conseguentemente, riescono ad avere una migliore stima del clearing price.

I due sistemi presentati non sono gli unici. Ad esempio in California è stato introdotto per un periodo di tempo limitato e senza grandi fortune un sistema ibrido di SMP fino al prezzo di 150\$/MWh e, in caso di produzione insufficiente, un sistema DPA per offerte superiori al prezzo limite [65].

In molti paesi è stato più volte proposto il passaggio dal sistema UPA al DPA nella convinzione che quest'ultimo portasse a prezzi più bassi. Nel 2001 il sistema elettrico di Inghilterra e Galles è stato riformato (per la seconda volta nel giro di un decennio) e dall'iniziale sistema di prezzo marginale UPA implementato con il meccanismo del Poolco si è passati ad un sistema di DPA (e di contratti bilaterali) nella convinzione che il sistema precedente facilitasse la collusione tra i partecipanti al mercato e portasse a prezzi più alti. Infatti, in un sistema UPA, per avere prezzi più alti è sufficiente che una sola offerta, quella del produttore marginale, sia più alta rispetto al prezzo di concorrenza, e non è necessario l'accordo tra i soggetti.

Anche per il mercato italiano vi è stato il dibattito circa un eventuale passaggio dall'UPA al DPA. La borsa elettrica italiana ha una storia abbastanza recente (l'attività di contrattazione è iniziata solo nel 2001) se paragonata agli altri paesi europei e la sua creazione è stata in linea con le pregresse esperienze europee. Il decreto legge 185 del 2008 (cosiddetto "Decreto anticrisi") convertito in legge 28 gennaio 2009, all'art. 3.10.a

imponere al Ministero dello Sviluppo Economico, sentita l'Autorità per l'energia elettrica ed il gas, di predisporre il passaggio, sul mercato MGP, dal sistema UPA al DPA con lo scopo dichiarato di abbassare i prezzi. Tuttavia, il tentativo di riforma è poi stato abbandonato, fortunatamente secondo Guerci e Rastegar [38] che avevano stimato attraverso la predisposizione ad hoc di un agent based model<sup>6</sup> (ABM) che i prezzi, contrariamente agli intenti del legislatore, avrebbero subito un incremento significativo.

Lo strumento di analisi principalmente utilizzato dalla teoria economica classica nella previsione del comportamento dei produttori rispetto ai differenti meccanismi di mercato è la teoria dei giochi. In particolare, il framework teorico è quello delle aste multi-unit ripetute. Tuttavia, i risultati analitici ottenuti con le aste a bene unico non possono essere estesi alle aste del tipo multi-unit e non c'è accordo sul meccanismo ideale.

Per questo motivo è necessario il ricorso a strumenti alternativi. In questo lavoro vengono presentati i due principali metodi alternativi per approcciare il problema: gli ABM e l'experimental economics. I modelli ABM, rispetto all'approccio tradizionale, permettono di intercettare le dinamiche strategiche degli operatori e il loro processo di apprendimento. L'experimental economics fa ricorso alla sperimentazione con esseri umani. Le due metodologie non sono necessariamente alternative, tant'è che sono utilizzate in maniera complementare: in alcuni lavori, infatti, gli ABM sono utilizzati per interpretare e riprodurre i dati ottenuti attraverso la sperimentazione. In alcuni ambiti, però, le due metodologie sono viste in contrapposizione.

Nel presente lavoro, dopo aver presentato il contributo degli ABM e dell'experimental economics all'analisi del mercato elettrico, si argomenterà sulla necessità di utilizzo per il legislatore di questi metodi alternativi alla teoria di mainstream, discutendo i temi epistemologici prima e

---

<sup>6</sup>vd. Parte II

i risultati ottenuti dalle due letterature, nell'ottica di tracciare una guida per l'utilizzo di questi strumenti da parte del legislatore.

## **2 Il mercato elettrico: overview**

### **2.1 Sviluppo del mercato elettrico in Italia**

I primi passi verso il sistema elettrico per come lo conosciamo oggi in Italia furono mossi con il Trattato di Maastricht nel 1992 con il quale si originò il processo verso la creazione di un mercato unico dell'energia tra i paesi europei. A questo seguì la Direttiva Europea 96/92/CE che obbligò gli stati membri a riorganizzare il sistema elettrico nazionale secondo il principio del libero accesso alle reti. Gli obiettivi da raggiungere furono la promozione della competizione nel processo di produzione e vendita all'ingrosso e la creazione di una gestione trasparente ed efficiente delle attività del dispacciamento.

Nel 1991 il Parlamento avviò la riorganizzazione del settore elettrico nazionale attraverso la L.n. 9/91 in quanto si doveva fare in modo che l'offerta elettrica provenisse anche da altri soggetti oltre all'Enel. Il provvedimento divenne attuativo nel 1992 (CIP 6/92). Con l'art. 22 della L.n. 9/91 si liberalizzò totalmente la produzione di energia elettrica mediante fonti rinnovabili ed assimilate, senza limitazioni di potenza e di particolari titoli autorizzativi per la costruzione ed il funzionamento (ad eccezione di quelli previsti per fini ambientali, di sicurezza ed urbanistici e previa comunicazione obbligatoria al Ministero Industria Commercio Artigianato, all'Enel ed all'Ufficio Tecnico delle Imposte di Fabbricazione territorialmente competente). Con l'art. 20, con riferimento alla produzione di energia elettrica da fonti convenzionali, si eliminò per i produttori terzi il vincolo di autoconsumo del 70% in modo tale che tutta l'energia prodotta poteva essere ceduta all'Enel. Il processo di liberalizzazione determinato dai due articoli sopracitati della L.n. 9/91 fu però parziale in quanto alla

liberalizzazione della produzione non era associata anche quella della vendita, poiché fu confermato l'obbligo di cessione all'Enel di tutta l'energia elettrica prodotta o di quella in eccesso rispetto all'autoconsumo. Con il provvedimento CIP 6/92 si creò un modello per definire le tariffe del mercato elettrico incentivando l'energia elettrica prodotta o da fonti rinnovabili o con impianti ad elevata efficienza termica. Questi incentivi ebbero però un effetto negativo a livello di elevati costi per la finanza pubblica. Il prezzo di acquisto dell'energia variava con la tipologia d'impianto ed era composto da due parti:

- un prezzo base, versato al produttore, che non si differenziava dalla tipologia di impianto e che a livello numerico era pari al costo evitato da Enel per la mancata realizzazione di un impianto per produrre la stessa quantità di energia (rimunerazione del capitale, spese di esercizio e di manutenzione, costi di combustibile);
- un supplemento sul prezzo base, solo per i primi otto anni di esercizio, diverso a seconda delle tecnologie adottate, considerando dei costi aggiuntivi rispetto a un impianto tradizionale.

La vera fine del modello monopolistico del mercato elettrico si ebbe nel 1992 con il decreto Bersani (D. Lgs. n. 79 del 16 marzo 1999 di recepimento della direttiva Ce 96/92). L'Enel da soggetto di diritto pubblico fu trasformata in una società per azioni (Enel S.p.A.) e fu suddivisa internamente in diverse aziende indipendenti (produzione, trasmissione, distribuzione e vendita) per favorire il passaggio al libero mercato. Fu collocata una prima tranche del pacchetto azionario di Enel S.p.A. di proprietà del Ministero del Tesoro pari al 35,5% del capitale. Questo fu il primo passo verso la privatizzazione del settore, che avvenne poi nel 1999.

Con il decreto Bersani fu creato un mercato elettrico organizzato (la Borsa elettrica) nel quale contrattare l'acquisto e la vendita di energia elettrica. Le contrattazioni in via eccezionale potevano avvenire anche con accordi bilaterali (OTC: Over the Counter), previa però autorizzazione



dell'Autorità per l'Energia, in quanto, non avvenendo in Borsa, ne riducevano la liquidità (aumentando la volatilità dei prezzi) e la trasparenza nella formazione dei prezzi. Questa norma fu in seguito abrogata, consentendo piena libertà nella scelta della modalità di acquisto/vendita dell'energia mentre la liquidità in Borsa è stata assicurata chiedendo all'Acquirente Unico di approvvigionarsi prevalentemente in Borsa. Con il decreto Bersani furono istituite le seguenti figure:

- il Gestore del Mercato Elettrico (GME), una società a cui fu affidata l'organizzazione e la gestione economica del mercato elettrico, secondo criteri di neutralità, trasparenza, obiettività e concorrenza tra produttori e, inoltre, la gestione economica di un'adeguata disponibilità della riserva di potenza. All'interno della Borsa Elettrica Italiana si gestiva il mercato elettrico attraverso un sistema d'asta per incrociare domanda e offerta di energia elettrica e si gestiva inoltre il mercato dei Titoli di Efficienza Energetica e quello degli Emission Trading, relativo agli scambi di certificati di emissione di CO<sub>2</sub>.
- Una società denominata Acquirente Unico (AU) per l'acquisto centralizzato dell'energia per conto dei clienti vincolati.

L'Enel fu riorganizzata internamente e scorporata in cinque società distinte:

- E.R.G.A. S.p.A. (Energie Rinnovabili Geotermiche ed Alternative S.p.A.);
- Enel distribuzione S.p.A. (per la distribuzione e vendita ai clienti vincolati);
- Enel Trade S.p.A. (per la vendita di energia elettrica ai clienti idonei);
- S.O.G.I.N. S.p.A. (Società Gestione Impianti Nucleari per Azioni, per lo smaltimento delle centrali elettronucleari dismesse, la chiusura del ciclo del combustibile e le attività connesse e conseguenti);

- T.E.R.N.A. S.p.A. (Trasmissione Elettricità Rete Nazionale S.p.A. per l'esercizio dei diritti di proprietà della Rete di Trasmissione e per la manutenzione e sviluppo della rete di sua proprietà in base alle decisioni in merito assunte dal Gestore della Rete).

Il processo di liberalizzazione fece un passo in avanti con la L.n. 55/02 di conversione del "Decreto Sblocca Centrali", la quale portò alla semplificazione dell'iter autorizzativo per la costruzione di centrali in quei casi in cui i progetti fossero già approvati dal Ministero dell'Ambiente, ferma restando un parere consultivo dei Comuni. Con questa norma fu stabilito che le centrali di potenza superiore a 300 MW, dichiarate opere di utilità pubblica, fossero soggette ad un'unica approvazione da parte del Ministero delle Attività Produttive, anziché ad approvazioni diverse da parte dei singoli comuni interessati. Nel 2003 entrò in vigore la Direttiva 2003/54/CE, abrogando la Direttiva 96/92/CE, che fissò agli Stati membri l'obiettivo di incrementare la concorrenza nel mercato dell'energia fermo restando il rispetto dell'ambiente per una crescita sostenibile. Sempre nello stesso anno fu varato il Decreto Legge n. 239/03 volto a garantire la tutela del mercato elettrico nazionale e il recupero della potenza di energia elettrica. Questo decreto entrò in vigore dopo che l'Italia restò al buio per ben due volte (il 27 giugno per una riduzione misurata dell'alimentazione ed il 28 settembre) ammettendo delle deroghe sull'utilizzo di alcuni combustibili e rimettendo in funzione impianti obsoleti. Il decreto fu poi convertito in legge, la L.n. 290/03, la quale prevedeva inoltre deleghe al Governo in materia di remunerazione della capacità produttiva di energia elettrica (capacity payment ora D. Lgs. n. 379/03) e di espropriazione per pubblica utilità. Tale legge all'art. 1-bis allo scopo di ridurre al massimo il rischio di distacchi di energia elettrica per l'utenza diffusa mise in atto dei provvedimenti finalizzati alla riduzione del rischio di distacchi di energia elettrica. All'art. 1-ter furono adottate delle misure per l'organizzazione e l'incremento dell'efficienza della rete elettrica, at-

traverso la riunificazione di proprietà e gestione della rete di trasmissione, e per assicurare la terzietà della rete stessa. Nel 2004 con la “Legge Marzano” (L.n. 239/2004) si volle riordinare il sistema energetico italiano, dando delega al Governo per il riassetto delle disposizioni vigenti in materia di energia. Le linee di intervento della legge Marzano furono: 1) la ripartizione delle competenze dello Stato (che definisce gli obiettivi e le linee guida e della politica energetica) e delle Regioni, per trovare un punto di equilibrio tra i due poteri, 2) il completamento della liberalizzazione dei mercati energetici, al fine di promuovere la concorrenza e ridurre i prezzi; 3) l’incremento dell’efficienza del mercato interno, attraverso procedure di semplificazione e interventi di riorganizzazione del settore; 4) una più incisiva diversificazione delle fonti energetiche, anche a tutela della sicurezza degli approvvigionamenti e dell’ambiente. La più completa liberalizzazione del mercato dell’energia ci fu in Italia il 1 luglio 2007 in attuazione all’art. 21 della direttiva 54/2003/CE. Per rispettare tale direttiva il governo approvò un decreto legge (73/07), poi convertito con alcune modifiche nella legge 125/2007. Tale legge aveva l’obiettivo di promuovere lo sviluppo di un’effettiva dinamica concorrenziale e di garantire al contempo un’adeguata tutela ai consumatori nel mercato liberalizzato. Gli ambiti di intervento del provvedimento normativo furono tre: i) la separazione societaria per gli operatori del settore; ii) l’introduzione di nuove forme di tutela per gli utenti di minori dimensioni; iii) la previsione di obblighi informativi a carico degli operatori del settore. In particolare, con riferimento alla separazione societaria, le aziende di distribuzione, con almeno 100.000 clienti, furono obbligate a costituire una o più società separate per l’attività di vendita. Oltre alle disposizioni in materia di unbundling per gli operatori del settore, la legge n. 125/2007 dettò anche disposizioni volte a garantire adeguata tutela all’utenza finale attraverso del diritto di recesso. In questo modo fu riconosciuta la concreta possibilità di scegliere un fornitore diverso dal proprio distrib-

utore recedendo dal preesistente contratto di fornitura che vincolava il cliente. Con la delibera 144/07 l'Autorità per l'energia ha provveduto in materia. Tale legge introdusse altresì due nuovi regimi di vendita dell'energia elettrica: il servizio di maggior tutela e il servizio di salvaguardia. Con il servizio di maggior tutela fu disposto che per i clienti finali domestici e non domestici in bassa tensione e le piccole imprese, che non avessero esercitato il diritto di recesso dal contratto con il proprio fornitore, ovvero non avessero stipulato un contratto di fornitura nel mercato libero, l'erogazione del servizio veniva comunque garantito dall'impresa di distribuzione, anche attraverso apposite società di vendita, e la funzione di approvvigionamento svolta dall'Acquirente Unico S.p.A.. Per i clienti che non rientravano nel servizio di maggior tutela, il provvedimento normativo istituì il servizio di salvaguardia, una forma di tutela più limitata, volta ad assicurare la continuità della fornitura di energia elettrica. In questo caso i prezzi del servizio di salvaguardia erano definiti in modo autonomo dal fornitore che si approvvigionava dell'energia elettrica necessaria sul mercato all'ingrosso e non dall'Acquirente unico. Una novità che introdusse la legge n. 125/2007 era relativa agli obblighi informativi imposti alle imprese al fine di promuovere la trasparenza, la concorrenza e il superamento delle asimmetrie informative esistenti nel settore. Di qui il compito per l'Autorità per l'energia di indicare condizioni standard per l'erogazione del servizio e di definire prezzi di riferimento per le forniture di energia, da inserire in modo obbligatorio nelle offerte commerciali rivolte ai clienti che avranno scelto di rimanere vincolati. [2]

## 2.2 Il mercato elettrico oggi

La tendenza generalizzata dei mercati elettrici nel mondo a partire dai primi anni Novanta è il passaggio da sistemi monopolistici a elevata integrazione verticale (dalla produzione alla distribuzione passando per la trasmissione) a sistemi più o meno di mercato con una scissione tra le

varie fasi della catena produttiva attraverso significativi processi di deregulation. La transizione dai monopoli alla concorrenza ha spesso generato esiti imprevedibili sul mercato e, a volte, disastrosi, come il caso della liberalizzazione del mercato elettrico californiano nel quale si è assistito ad un aumento dei prezzi e ad una instabilità nell'equilibrio domanda offerta di mercato con conseguenti differenziali di tensione sulla linea elettrica che hanno provocato nel tempo frequenti *black out*. Le liberalizzazioni dei mercati sono un fenomeno piuttosto complesso e il mercato elettrico non fa certo eccezione, tant'è che la frequenza dei cambiamenti normativi per il settore testimonia ancora oggi un certo fermento dell'attività legislativa al riguardo. Aggiungendo che il settore si caratterizza per investimenti con orizzonte temporale di lungo/lunghissimo periodo per via della struttura profondamente *capital intensive* si comprendono le difficoltà per gli operatori che si sono sostituiti all'originario monopolista che svolgeva il ruolo di pianificatore centrale. Si pensi, ad esempio, al caso italiano nel quale dopo la caduta (secondo qualcuno fittizia) del monopolio Enel gli operatori nuovi entranti sul mercato si sono trovati con una capacità produttiva non propriamente rispondente, in termini di dislocazione spaziale e caratteristiche degli impianti e della rete distributiva, alle esigenze della decentralizzazione delle decisioni di produzione e investimento. Quello elettrico, inoltre, è il settore maggiormente coinvolto nel processo di "greenificazione" dei sistemi produttivi a seguito del protocollo di Kyoto e dei relativi obiettivi comunitari. I produttori da fonti tradizionali sono tenuti prevalentemente a due obblighi: acquisto dei diritti di emissione di sostanze inquinanti nell'atmosfera come le CO<sub>2</sub> (sistema dei certificati neri) e livello minimo obbligatorio di produzione da fonti rinnovabili (sistema dei certificati verdi). Come osserva con ironia Zorzoli [92] al proposito, a testimonianza della specificità della regolazione del settore energetico, riterremmo assurdo che un produttore di sandali in cuoio fosse costretto a produrre zoccoli in legno per una determinata percentuale

minima del proprio output, eppure per il settore elettrico si tratta di un tipo di vincolo che oramai sembra essere stato metabolizzato dagli operatori. Il quadro si completa ricordando che il settore elettrico è un settore strategico sia per uso civile sia, soprattutto, per la difesa nazionale.

Per quanto fin qui descritto, è semplicemente intuibile la difficoltà del legislatore nell'approccio alla regolazione del settore. Oltre al già citato, ormai classico, esempio di letteratura della liberalizzazione del settore in California, è possibile osservare l'operato del legislatore nell'incentivazione della produzione di energia da fonti rinnovabili in Italia. Gli obiettivi europei sembrano infatti essere stati presi eccessivamente in considerazione dal legislatore italiano, il quale, attraverso la politica di incentivazione appena descritta, si è trovato con un comparto, quello del fotovoltaico, cresciuto troppo e in maniera troppo poco razionale, tanto da dover essere stati costretti ad interventi "calmieranti" per abbattere i ritmi di crescita del comparto. La mancata previsione degli esiti possibili dell'intervento legislativo ha portato, in questo caso a molteplici effetti negativi che potevano essere evitati. L'esplosione del fotovoltaico, infatti:

- ha portato a facili opportunità di profitto senza una crescita sostenibile per il paese;
- ha portato ad uno squilibrio interno nella generazione da fonti rinnovabili troppo sbilanciata verso il fotovoltaico;
- in alcuni casi il paesaggio è stato deturpato con un grosso problema di smaltimento delle componenti una volta smantellati gli impianti;
- ha portato una modifica di alcune logiche di prezzo *peak-off peak* a seguito della quale la capacità produttiva *baseload* è stata di fatto esclusa dal mercato elettrico a causa di prezzi non remunerativi. Il problema, in questo caso, è sistemico: senza la capacità produttiva *baseload* che funziona da stabilizzatore della variabilità della produzione da rinnovabili, la rete rischia il collasso. Data la strate-

gicità di questa produzione, il legislatore si trova in una posizione di *lock-in*. I produttori baseload, infatti, minacciando di sospendere la produzione (poco o per nulla remunerativa) minacciano il funzionamento stesso del sistema e il legislatore è costretto a pensare a degli interventi compensativi (cosidetto *capacity payment*) per i produttori baseload affinché continuino a produrre. Evidentemente, si tratterà di interventi non a costo zero.

Le caratteristiche del mercato, la complessità delle sue dinamiche e l'importanza del settore, unite al *track record* non sempre particolarmente di successo del legislatore, giustificano il ricorso in fase di analisi a strumenti alternativi rispetto all'analisi tradizionale.

### 3 Regulation: esperienze significative

A partire dagli anni Novanta, durante il post-Thatcherismo, in molti stati è iniziato un processo di deregulation dei mercati elettrici finalizzato alla creazione di un mercato efficiente e competitivo a detrimento degli esistenti monopoli statali verticalmente integrati.

I monopoli statali erano nati per garantire l'universalità del servizio a tariffa unica<sup>7</sup> e per riuscire a raggiungere le dimensioni economiche sufficienti per garantire un adeguato livello di investimenti a fronte di tassi crescenti di incremento della domanda. Con l'evoluzione della tecnologia produttiva, un fabbisogno di risorse per investimenti sempre più ridotto e livelli di reddito più alti<sup>8</sup> le ragioni di fondo per la sussistenza dei grandi monopoli nazionali decadevano. Se a queste considerazioni si aggiunge anche la componente ideologica che spesso è stata il catalizzatore del cam-

---

<sup>7</sup>L'universalità del servizio consiste nel garantire che ad ogni potenziale utente sia offerta la possibilità di accedere al servizio. Le criticità sono relative agli agglomerati urbani con massa critica insufficiente a rendere remunerativa la fornitura del servizio, ad esempio a causa degli alti costi fissi per la costruzione della connessione.

<sup>8</sup>Più alti livelli di reddito portano tendono a ridurre le pressioni "sociali" per una tariffa unica

biamento, si completa il quadro entro il quale i processi di deregulation hanno trovato terreno fertile.

In molti casi gli esiti di questi processi sono stati lontani rispetto alle finalità desiderate, tanto da richiedere una nuova serie di interventi legislativi di correzione delle storture sui nuovi mercati liberalizzati. Dai processi di *deregulation* si è passati ad una fase di *fine tuning* legislativo che ha reso il mercato elettrico ambito di continua sperimentazione e interventi legislativi. Le storie delle liberalizzazioni dei mercati elettrici dei vari paesi sembrano tutte assomigliarsi e ripetersi in maniera inesorabile. Generalmente, si ha un governo che prende atto del fallimento del sistema monopolistico pubblico e degli assetti regolatori per gestirlo<sup>9</sup> e intraprende la propria attività di deregulation. Gli obiettivi e le promesse tendono ad essere sempre gli stessi: servizi migliori per i cittadini, prezzi più bassi, nuovi posti di lavoro, nuovi investimenti, più ricerca, più tecnologia. Altra motivazione è la politica ambientale, ma sembra essere stata una motivazione fondamentale anche a costo di un incremento dei prezzi per i consumatori solo nel caso della Norvegia.

I processi di liberalizzazione hanno finora seguito due strade tra loro alternative. La prima prevede l'introduzione di un nuovo *market design* attraverso l'introduzione della concorrenza sia a livello di produzione che a livello di distribuzione attraverso lo scorporo della rete elettrica (e quindi la scissione del blocco monolitico verticalmente integrato in società di scopo diverse con netta separazione funzionale) e la regolamentazione dell'accesso alla rete (considerata *essential facility*). La seconda alternativa non prevede l'intervento sulla struttura del mercato o, più propriamente, dell'offerta, bensì consiste nell'introduzione della *performance-based regulation* (PBR)<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup>Cost-of-service regulation (COSR)

<sup>10</sup>La PBR consiste nella fissazione di standard minimi obbligatori, senza prescrizioni su come questi ultimi devono essere raggiunti e mantenuti. In questo modo, gli operatori sono liberi di scegliere le modalità operative più opportune e, soprattutto, si crea l'incentivo a efficientare e ammodernare i sistemi produttivi con l'obiettivo di abbassare i costi a parità di



Il nodo da sciogliere in ogni deregulation del mercato elettrico resta sempre il quadro regolatorio afferente il sistema di distribuzione, la rete. La criticità risiede nel fatto che il gestore della rete, pur riservandosi un ruolo meramente tecnico, è chiamato ad una gestione attiva dell'infrastruttura stessa con poteri decisionali e un certo grado di discrezionalità per il quale è piuttosto complesso garantire la neutralità dell'infrastruttura stessa. Una buona liberalizzazione del mercato elettrico non può prescindere da un'adeguata regolamentazione dell'accesso alla rete [91].

Alla luce delle esperienze di *deregulation*, è possibile affermare, seguendo Woo et al. [87], che gli insuccessi sono generalmente legati agli alti costi di implementazione di un *market design* spesso complicato, ad una elevata volatilità dei prezzi *spot*, al potere di mercato di pochi soggetti, al livello di investimenti insufficiente, alla difficoltà nella riduzione dei costi di produzione, ai mercati delle *commodities* anomali, alle *stranded cost recovery fees*<sup>11</sup> e, infine, ad una asimmetrica distribuzione dei benefici.

### 3.1 California

*"California's deregulation scheme is a colossal and dangerous failure. It has not lowered consumer prices; it has not increased supply. In fact, it has resulted in skyrocketing prices, price-gouging, and an unreliable supply of electricity. In short, an energy nightmare."* [Gray Davis, Governatore della California dal 1999 al 2003].

Il processo di deregulation della California è spesso citato in letteratura come uno degli esempi di fallimento della deregulation del mercato elettrico. La dichiarazione sopra riportata del governatore Gray Davis è emblematica in tal senso. Ma ancora più paradossale può apparire come gli errori commessi nel caso californiano non siano (almeno non del tutto)

---

standard minimi di *performance*.

<sup>11</sup>Per stranded cost, o costi incagliati, si intendono quei costi sostenuti dalle aziende del settore elettrico e divenuti non recuperabili a seguito della direttiva 96/92/CE che liberalizzava il settore.

serviti da monito per i legislatori alle prese con i processi di liberalizzazione.

La dimensione del fallimento diventa tangibile in alcune evidenze proposte da Woo [85]:

1. Febbraio 2001: la California Power Exchange (PX), la borsa elettrica californiana, chiude a causa dell'assenza di negoziazioni, assenza imputata all'ordinanza del 15 dicembre 2000 della Federal Regulatory Energy Commission che cancella l'obbligo -inizialmente imposto dalla California Public Utilities Commission- in capo alle tre società di distribuzione di acquistare l'energia a prezzi di mercato e distribuirla a tariffe convenzionate;
2. Aprile 2001: la Pacific Gas and Electric Company (PG&EC), la più grande *utility* dello stato, avvia le procedure per il Chapter 11;
3. Maggio 2001: il North American Electric Reliability Council programma una serie di *rolling blackout*<sup>12</sup> per un totale di 260 ore da effettuarsi nell'estate successiva<sup>13</sup>;
4. Nel periodo tra gennaio e maggio 2001, lo stato della California acquista energia per un controvalore totale pari a 7,6 miliardi di dollari (prezzo medio di 270 dollari per MWh) per sopperire all'insolubilità finanziaria delle due più grandi aziende di distribuzione dello stato incapaci di far fronte ai propri impegni derivanti dall'acquisto dell'energia elettrica.

La riforma del mercato elettrico californiano avvia i primi passi nel 1996 per essere completata nel 1998. Il mercato pre-riforma era caratterizzato dalla presenza di tre *integrated investor-owned utility* (IOU)<sup>14</sup> che ser-

<sup>12</sup>Un *rolling blackout* è un'interruzione programmata di servizio sulla rete di distribuzione. Si tratta di uno degli strumenti, di certo il più estremo, per gestire delle fasi in cui la domanda è sovradimensionata rispetto alla capacità produttiva disponibile o la rete di trasmissione risulta insufficiente per veicolare l'energia richiesta e prodotta.

<sup>13</sup>Si pensi che lo standard minimo di affidabilità per un impianto di generazione di corrente elettrica è di un giorno su dieci anni.

<sup>14</sup>La Pacific Gas and Electric (PG&E), Southern California Edison (SCE) e la San Diego Gas and Electric (SD&E).

vivano il mercato retail attraverso le proprie reti di distribuzione. Le tariffe per i consumatori erano normate con il metodo della regolamentazione del tasso di rendimento<sup>15</sup>, una regolamentazione che aveva portato ad alti livelli dei prezzi (data la scarsità di incentivi per il monopolista ad agire sulla propria struttura dei costi) e ad un servizio di qualità soddisfacente. Con la riforma, il primo intervento realizzato fu lo scorporo della rete di distribuzione dalle IOU con la garanzia di libero accesso alle stesse da parte dei potenziali *competitor* delle IOU.

Woo [85] evidenzia come le caratteristiche della riforma californiana siano emblematiche della maggior parte delle riforme intraprese in questo settore. La riforma, infatti, prevedeva anche la creazione di un mercato all'ingrosso dell'energia elettrica, l'introduzione di un *independent system operator* (ISO) a cui fosse delegata la gestione della trasmissione, la costituzione di società proprietarie delle reti di trasmissione e tenute a garantire il libero accesso a condizioni paritarie a tutti gli operatori, una regolazione del tasso di rendimento delle società di trasmissione, un mercato *retail* nel quale i consumatori finali fossero liberi di scegliere il proprio fornitore. Una riforma che, dunque, ex ante poteva essere considerata efficiente rispetto alle finalità dichiarate, si è rivelata come un insuccesso con i risultati appena descritti.

### 3.2 Regno Unito

Se l'esperienza californiana rappresenta un vero e proprio fallimento del legislatore nell'affrontare un tema di mercato molto complesso come la deregulation del mercato elettrico, l'esperienza del Regno Unito, pur non avendo i tratti drammatici delle vicende d'oltreoceano, testimonia l'importanza dei dati sperimentali e computazionali nell'attività di *mechanism design* messa in opera dal legislatore. Il Regno Unito è stato, infatti, il primo

---

<sup>15</sup>Determinato un tasso di rendimento equo per l'impresa in regime di monopolio naturale, il prezzo viene fissato per garantire all'impresa una redditività pari a quel tasso di rendimento.

paese a mettere in atto la deregulation del mercato, ma si è trattato di un processo durato, de facto, decenni. La situazione di partenza era quella comune a quasi tutti i paesi industrializzati con un monopolista, il Central Electricity Generation Board, nella produzione e trasmissione/distribuzione e un'industria del carbone, principale commodities per la produzione, a prevalente controllo pubblico. Con l'Electricity Act del 1989 ha inizio il processo di liberalizzazione attraverso la suddivisione del monopolista in quattro diverse società: National Grid, proprietaria della rete, National Power, PowerGen e Nuclear Electric, società di produzione. Solo quest'ultima non fu privatizzata e, pertanto, l'assetto di mercato si trasformava da monopolio a duopolio. L'aspetto che più interessa in questo lavoro fu l'introduzione del Pool, mercato spot dell'energia elettrica nel quale dovevano obbligatoriamente confluire tutte le transazioni all'ingrosso di energia elettrica [21]. Il Pool non era altro che una piattaforma d'asta del tipo UPA. Nel decennio successivo, i risultati non sono stati quelli sperati. A metà degli anni 90, infatti, si sono registrati prezzi medi significativamente più alti rispetto ai costi dei potenziali nuovi entranti.

Successivamente, nel 1998 l'Office of Electricity Regulation (OFFER) decise di sostituire il Pool con il sistema di scambi bilaterali nella convinzione che il meccanismo del Pool permettesse l'esercizio di potere di mercato da parte degli operatori. Nel 2001 si registrò, conseguentemente, l'introduzione del New Electricity Trading Arrangement (NETA) che prevedeva la sostituzione dell'unico mercato spot obbligatorio con quattro mercati su base volontaria: mercato bilaterale per le transazioni di lungo termine, mercato forward, mercato spot e mercato per la capacità di riserva. Il passaggio dal sistema del Pool al NETA ha coinvolti numerosi aspetti della struttura del mercato elettrico dell'epoca, ma il passaggio più importante ai fini del presente lavoro è stato dal sistema UPA del Pool al DPA del NETA.

L'esperienza inglese è un esempio concreto di come gli obiettivi del legislatore possono essere disattesi, anche nel caso in cui l'assetto regolatorio viene definito secondo i dettami della teoria economica tradizionale. L'introduzione di un duopolio à la Cournot che avrebbe dovuto far abbassare i prezzi rispetto al precedente sistema monopolistico ha portato, in realtà, ad un aumento dei prezzi con il Pool. Negli anni successivi al passaggio al NETA i prezzi hanno effettivamente subito un decremento, come nell'intendimento del legislatore, eppure guardando ai dati con maggiore attenzione, l'impatto positivo sui prezzi è derivato dalle altri interventi regolatori dell'epoca (sui contratti di carbone, sull'obbligo di scorporo di capacità produttiva per i due produttori...), mentre il meccanismo NETA non ha avuto un impatto sui prezzi e, in alcuni casi, non ha fatto altro che favorire i produttori con maggiore capacità produttiva e tecnologie più flessibili [19].

## Part II

# Agent based models

## 4 Introduzione

### 4.1 Complessità, modellizzazione e simulazione

#### 4.1.1 Complessità

*“Many of our most troubling long-range problems-trade imbalances, sustainability, AIDS, genetic defects, mental health, computer viruses-center on certain systems of extraordinary complexity. The systems that host these problems-economies, ecologies, immune systems, embryos, nervous systems, computer networks- appear to be as diverse as the problems. Despite appearances, however, the systems do share significant characteristics, so much so that we group them under a single classification at the Santa Fe Institute, calling them complex adaptive systems (CAS). There is more than terminology. It signals our intuition that there are general principles that govern all CAS behavior, principles that point to ways of solving the attendant problems. Much of our work is aimed at turning this intuition into fact” [Holland].[46]*

Galileo Galilei distingueva tra calcolatori, coloro i quali si preoccupano soltanto della tenuta dei propri modelli teorici e delle conseguenze matematiche di leggi date, e scienziati, ossia coloro i quali vogliono comprendere il mondo. Il mondo è complesso e si tratta di una complessità generata dalle tre particelle elementari che compongono la materia e le quattro forze fondamentali della fisica che le governano<sup>16</sup>, un set molto ridotto rispetto al risultato finale.

---

<sup>16</sup>Le particelle elementari che costituiscono la materia sono l'elettrone, il protone e il neutrone. Le quattro forze fondamentali sono l'interazione gravitazionale, l'interazione elettromagnetica, l'interazione nucleare forte e l'interazione nucleare debole.

I fenomeni che ci circondano e costituiscono la realtà sono fenomeni complessi perchè determinati dalla interazione di numerosissime parti con caratteristiche e comportamenti diversi, parti che costituiscono sistemi il cui macro comportamento non è la semplice somma delle stesse<sup>17</sup>.

La complessità è un concetto che difficilmente trova una definizione univocamente riconosciuta e in letteratura le definizioni sono molteplici. Ne è una dimostrazione concreta il fatto che il concetto debba essere spesso mutuato dall'informatica. In informatica la complessità di un fenomeno è misurata dal numero di *bit* del più breve programma possibile capace di descrivere il fenomeno ad un computer in maniera completa: quanti più bit sono necessari, tanto più il fenomeno è complesso<sup>18</sup>.

Quello di complessità è un concetto puramente interdisciplinare [52] e a diverse discipline sono dovute le numerose definizioni del concetto stesso. La prima derivazione del concetto è sicuramente dal caos deterministico della fisica, ma è fondamentale anche il contributo della biologia grazie al quale si sviluppa il concetto di *complex adaptive behavior* e di sistemi nei quali agenti autonomi si adattano al contesto e che esibiscono comportamenti collettivi diversi da quelli verificabili sui singoli individui.

Seth Lloyd [57] individua trentuno diverse definizioni di complessità<sup>19</sup>

---

<sup>17</sup>A tal proposito Christopher Langton, uno dei pionieri nel campo dell'*artificial life*: "There's a reason for poetry. Poetry is a very nonlinear use of language, where the meaning is more than just the sum of the parts. And science requires that it be nothing more than the sum of the parts. And just the fact that there's stuff to explain out there that's more than the sum of the parts means that the traditional approach, just characterizing the parts and the relations, is not going to be adequate for capturing the essence of many systems that you would like to be able to do. That's but I just have the feeling that culturally there's going to be more of something like poetry in the future of science"[46]

<sup>18</sup>Come osserva Horgan[46], anche questa definizione non è soddisfacente in quanto anche un libro battuto a macchina da una squadra di scimmie risulterebbe più complesso di Finnegans Wake, la famosa opera letteraria di James Joyce.

<sup>19</sup>La definizione usata in informatica, l'entropia, l'*algorithmic information content*, lunghezza delle descrizione minima, informazione di Fisher, entropia di Renyi, lunghezza del codice, Informazione di Chernoff, dimensione, dimansione frattale, complessità di Lempel-Ziv, complessità computazionale, complessità dei tempi di calcolo, complessità spaziale di calcolo, complessità di informazione, profondità logica, profondità termodinamica, costi, cripticità, entropia metrica, dimensione frattale, excess entropy, complessità stocastica, sofisticazione, effective measure complexity, true measure complexity, topological epsilo-machine size, conditional information, condionale algorithmic information, schmea lenght, ideal complexity, hierarchical complexity, tree subgraph diversity, homogeneous complexity, gramatical complexity, algorithmic mutual information, channel capacity, correlation, stored information e

proponendo il felice parallelo della descrizione dell'elettromagnetismo prima delle equazioni di Maxwell, prima cioè che elettricità e magnetismo fossero visti come due aspetti dello stesso fenomeno fisico, l'elettromagnetismo appunto. Lloyd enuclea tre domande fondamentali che i ricercatori nel campo dei sistemi complessi si pongono per misurarne la complessità: quanto è difficile descrivere il sistema, quanto è difficile crearlo e che grado di organizzazione presenta quest'ultimo. La semplice elencazione delle definizioni da lui individuate presenta un indiscutibile carattere di interdisciplinarietà che si riscontra anche nel lavoro di Anderson ([4] e [22]) che individua otto approcci alternativi per arrivare a perimetrare il concetto:

1. Matematica: la teoria della complessità di Turing-Von Neumann con il contributo delle classi di problemi NP<sup>20</sup>;
2. Teoria dell'informazione: misura della complessità e informazione nello spazio di Hamming<sup>21</sup> attraverso i bit;
3. Teoria ergodica: lo studio dei sistemi dinamici dissipativi<sup>22</sup>, includendo la teoria del caos e la teoria delle biforcazioni;
4. Entità artificiali: lo studio di entità artificiali computerizzate come gli automi cellulari<sup>23</sup>, di cui è stato precursore il matematico inglese John Conway con il suo gioco della vita;
5. Sistemi fisici casuali: sistemi con una meccanica della complessità di

---

organization [57].

<sup>20</sup>Le classi di problemi NP sono costituite da quei problemi la cui soluzione può essere verificata attraverso un algoritmo a un tempo polinomiale

<sup>21</sup>Gli spazi di Hamming sono utilizzati nella teoria della trasmissione. Uno spazio di Hamming  $H(n, k)$  è l'insieme di tutti i possibili codici di lunghezza  $n$  generabili da un determinato alfabeto  $K$  di lunghezza  $k$ . La misura nella metrica dello spazio di Hamming è definita come il numero minimo degli errori che possono modificare il codice  $x$  in  $x'$ .

<sup>22</sup>A livello euristico i sistemi dissipativi sono sistemi aperti che interagiscono con l'esterno (altri sistemi) in maniera tale l'energia che restituisce all'esterno è sempre minore o uguale all'energia che viene immessa nel sistema a causa dell'assorbimento interno di energia da parte del sistema.

<sup>23</sup>Un automa cellulare consiste in un allineamento di celle, ognuna colorata alternativamente di bianco o nero e, ripetutamente, una regola prestabilita determina il colore di ogni singola cella a seconda del colore delle celle che la circondano [84].



tipo statistico con attrattori statistici. Si tratta di sistemi generalmente non-ergodici;

6. Criticità auto-organizzate: si tratta di una classe di sistemi dinamici con un punto critico<sup>24</sup> come attrattore;
7. Intelligenza artificiale: lo studio della complessità dei sistemi attraverso la costruzione degli stessi;
8. Wetware: lo studio di sistemi complessi, quali il cervello umano, attraverso la loro riproduzione computerizzata.

Nel linguaggio comune, osserva Stephen Wolfram [84], definiamo complesso quanto non siamo in grado di descrivere in maniera immediata o, meglio, quanto rappresenta un ostacolo troppo alto per le nostre percezioni e analisi<sup>25</sup>. Percezioni e analisi agiscono in due modi: il primo consiste nell'eliminare informazioni di dettaglio apparentemente inutili, il secondo nel filtrare le ridondanze dalle regolarità (*pattern*) che si cerca di individuare. Attraverso questa definizione di complessità, è possibile tracciare la distinzione tra complessità e casualità: per Wolfram, infatti, si ha aleatorietà (*randomness*) nel momento in cui è la seconda funzione (eliminazione ridondanze dalle regolarità) a fallire, mentre, invece, la complessità richiede il fallimento di entrambe.

Altro uso improprio nel linguaggio quotidiano (e a volte in letteratura) del concetto di complessità è come sinonimo di complicato o di caos. Vi sono delle differenze. Un sistema complesso non è (semplicemente) un sistema complicato in quanto quest'ultimo è dotato di organicità per la quale ogni componente può essere analizzata singolarmente e svolge una funzione specifica necessaria per il funzionamento del sistema tutto [76].

---

<sup>24</sup>In un sistema dinamico un punto critico è un insieme di condizioni del sistema nelle quali il sistema stesso non presenta confini di fase.

<sup>25</sup>Per Wolfram percezioni e analisi svolgono il ruolo di ridurre un'enorme mole di dati, alla quale siamo esposti quotidianamente, ad una struttura facilmente interpretabile. Quello che generalmente viene trattato dal nostro cervello in maniera automatica è la percezione, mentre invece si ha l'analisi nel momento in cui l'attività di sintesi viene espletata attraverso uno sforzo cognitivo, matematico o computazionale.

La complessità è un'evoluzione del concetto di caos, nonostante i due concetti siano spesso sovrapposti<sup>26</sup>. Si ha il caos quando un sistema ha degli sviluppi prevedibilmente imprevedibili, che cambiano in maniera significativa anche a causa di piccole modifiche delle condizioni iniziali<sup>27</sup>. In un sistema caotico, nonostante una dinamica deterministica, le variabili evidenziano un comportamento stocastico. In un sistema complesso le parti costituenti hanno un loro comportamento ed è il comportamento generale del sistema che non può essere previsto semplicemente analizzando la dinamica delle parti che lo compongono. Quest'intuizione è stata alla base della teorizzazione del concetto di automi cellulari. Alla fine dei Quaranta, Stanislaw Ulam e John von Neumann lavoravano negli Stati Uniti e a loro si devono i primi studi che hanno portato alla definizione del concetto. Ulam, in particolare, attraverso il ricorso ad alcuni semplici giochi su scacchiere quadrate suddivise in celle sulle quali far lavorare il calcolatore dell'epoca, si accorse che a partire da configurazioni iniziali e regole molto semplici si arrivava ad ottenere delle rappresentazioni grafiche che tendevano a ripetersi nel tempo e ad evolvere secondo un certo "ordine". Si trattava di schemi che il matematico polacco definì "oggetti geometrici definiti ricorsivamente" [17]. Successivamente, von Neumann<sup>28</sup>, studiando le macchine automatiche e la possibilità di autoriproduzione delle stesse, teorizzò l'*universal copier and constructor*, ossia un automa cellulare in grado di autoriprodursi infinite volte. L'automa operava in una scacchiera ed era composto da un numero finito di celle. Ogni cella assumeva un determinato stato seguendo delle regole di transizione predefinite e calcolate sugli stati delle celle confinanti. Il risultato era un comportamento emergente di sistema, il comportamento di quel sistema complesso che è l'automa cellulare.

---

<sup>26</sup>La sovrapposizione dei due concetti in letteratura è stata tale da indurre Horgan a coniare l'espressione *chaoplexity*.

<sup>27</sup>L'esempio classico in letteratura è rappresentato dalla curva logistica.

<sup>28</sup>Von Neumann e Ulam avevano un rapporto di amicizia. Fu lo stesso von Neumann a invitare l'amico e collega all'Institute for Advanced Study di Princeton.

I sistemi complessi, pur in assenza di una definizione universalmente accettata, presentano delle tipicità che li caratterizzano [13]:

1. Interazioni non lineari: le parti costituenti del sistema interagiscono in maniera non lineare. La non linearità delle relazioni è una condizione necessaria per la caoticità di un sistema;
2. Interdipendenza delle parti;
3. Struttura comprendente diverse dimensioni e ogni dimensione presenta una propria struttura;
4. Comportamenti emergenti: come già accennato sopra, i sistemi complessi possono presentare, se osservati nella dimensione appropriata, dei comportamenti emergenti. L'esempio è quello del corpo umano in camminata: osservando durante la camminata una singola parte del corpo non è possibile cogliere la dinamica del sistema, ma, alzando di un livello l'osservazione, è possibile cogliere come l'interazione tra le parti porti al comportamento emergente del sistema, ossia la camminata.

Alla luce di quanto appena riportato, è possibile chiarire i punti di contatto e le differenze tra un sistema caotico e un sistema complesso. Un sistema complesso è necessariamente un sistema caotico, ma non vale il contrario. Infatti, un sistema complesso può esibire comportamenti caotici in una determinata regione, ma mostrerà delle regolarità nei livelli ad essa superiori. Per questo motivo, in letteratura ci si riferisce alla complessità con l'espressione "the edge of chaos" perchè la complessità implica e risolve in sé una dinamica caos-non caos.

#### 4.1.2 Modellizzazione

Alla domanda retorica "Why model?", Epstein [31] immagina la risposta perfetta "You are a modeler". La modellizzazione non è una scelta, ma è inevitabile. Lo studio di un fenomeno di qualsiasi natura, implica l'esistenza

di un modello. La vera scelta è se esplicitare o meno il proprio modello. Esplorare un modello vuol dire enuclearne le ipotesi, descriverne il metodo e testarne la struttura logica. Nel proporre un modello i requisiti che generalmente viene chiesto di soddisfare sono la validazione del modello e le sue capacità predittive. Il problema è che un modello non può essere validato dai dati empirici in quanto, popperianamente, una teoria scientifica deve essere falsificabile, non verificabile: serie enorme di evidenze a favore non sono determinanti quanto un solo esempio contrario. Le capacità predittive è sicuramente uno degli obiettivi di ogni modello, ma non l'unico e non è possibile valutare la bontà di un modello guardando alla sola capacità predittiva di quest'ultimo. La modellizzazione, infatti, permette di spiegare i fenomeni e di comprendere quali siano le variabili effettivamente da monitorare (e quindi quali evidenze raccogliere). La spiegazione dei fenomeni ha un valore epistemologico in sé: Epstein propone l'esempio della teoria della tettonica delle placche che spiega, ma non prevede, i terremoti.

Spiegare un fenomeno utilizzando il linguaggio senza ricorrere alla matematicizzazione dei concetti vuol dire proporre un modello con un metodo estremamente flessibile ma poco rigoroso. Allo stesso modo, un modello matematico offre un'esattezza difficilmente riscontrabile in un modello linguistico non formalizzato, ma richiede una macchina logica pachidermica e poco adattabile allo studio di fenomeni complessi.

#### **4.1.3 Simulazione**

Se la realtà è complessa, lo sforzo epistemologico è, o dovrebbe essere, quello di individuare quei principi generali citati da Holland che la governano. Comprendere i principi generali della complessità vuol dire non soltanto dotarsi degli strumenti concettuali per interpretarla scientificamente, ma anche dotarsi di strumenti applicabili trasversalmente ai più disparati fenomeni fisici, biologici piuttosto che economici. Quei prin-

cipi generali sono i principi sottesi al funzionamento di un mercato dato dall'interazione degli operatori come alla dinamica dei fluidi, all'epidemiologia delle malattie come all'evoluzione genetica delle popolazioni. Quello che di seguito verrà presentato non è un approccio riduzionista<sup>29</sup>, in quanto si tratterà di definire le particelle elementari di un sistema complesso, modellarne matematicamente l'interazione e permettere tra le particelle l'interazione tramite l'utilizzo della simulazione computerizzata. La questione epistemologica non è banale. La ricerca scientifica spesso studia i fenomeni utilizzando una finzione logica apparentemente necessaria. Si pensi allo studio dei sistemi gassosi<sup>30</sup>, composti da molecole che si muovono indipendentemente l'una dall'altra, eppure trattati come un oggetto unico. Trattare un fenomeno come un *unicum* organico pur ammettendo che si tratta dell'insieme di più parti equivale ad ammettere l'utilizzo di una finzione logica funzionale all'attività speculativa. Ad esempio, la macroeconomia, che misura e modella grandezze aggregate, è una scienza basata su questo strumento intellettuale. Il ricorso a tale finzione logica potrebbe essere superato grazie alle potenzialità offerte dagli elaboratori con delle capacità di calcolo inimmaginabili ai tempi nei quali le scienze assumevano la struttura teorica che oggi conosciamo.

Le capacità di calcolo degli elaboratori offrono la possibilità di effettuare la simulazione dei fenomeni oggetto di studio, simulazione che permette un nuovo approccio alla materia. La simulazione è un diverso modo di guardare ai classici modelli costituiti da sistemi di equazioni. La potenza di calcolo raggiunta dagli elaboratori permette oggi di poter modellizzare i fenomeni attraverso la micro-simulazione. La micro-simulazione prevede un database di individui che si aggiorna con il passare del tempo attraverso l'applicazione di regole predefinite. L'elaboratore tiene traccia delle variazioni degli individui ed elabora delle statistiche che colgono le

---

<sup>29</sup>L'approccio riduzionista suddivide iterativamente i sistemi complessi in parti sempre più elementari da poter essere trattate con relativa semplicità. [15]

<sup>30</sup>Si noti che il termine gas deriva dal greco *Chaos*.

caratteristiche dei modelli ritenute salienti da chi le elabora. La micro-simulazione può essere applicata tanto ad un campione teorico quanto ad un campione reale (e qui risiede uno dei grandi vantaggi dell'utilizzo del metodo). Evidentemente, la microsimulazione comporta anche degli svantaggi. Il primo e forse più importante consiste nel fatto che simulare fenomeni dipendenti dal tempo può portare a risultati difficilmente interpretabili in quanto può non esserci corrispondenza tra il tempo reale e quello modellizzato. In altre parole, immaginiamo una micro-simulazione utilizzata per misurare la crescita del prodotto interno lordo di una determinata economia: l'economia potrebbe impiegare un tempo enorme per raggiungere i livelli di crescita risultanti dal modello per il semplice fatto che la dimensione temporale della simulazione risulta non tarata rispetto alla dimensione del tempo reale. In questo modo avremmo una simulazione formalmente corretta, ma poco utile ai fini della ricerca. Il limite appena esposto rappresenta una delle maggiori critiche all'utilizzo della simulazione nella modellizzazione dei fenomeni sociali. L'altro limite della micro-simulazione è la mancanza di interazione tra gli individui del campione di riferimento.

La simulazione ad agenti (*Agent Based Models* - ABM) non presenta quest'ultimo limite. La simulazione ad agenti indaga la realtà semplicemente ricreandola in un laboratorio virtuale. Creare sistemi artificiali, studiarne le regolarità emergenti dall'operare di tali sistemi e validarne la bontà attraverso il confronto con i dati reali: è questo un nuovo approccio che evidentemente è diverso dalla modellizzazione matematica classica. Rispetto alla modellizzazione matematica, la simulazione permette di affrontare fenomeni complessi difficilmente trattabili matematicamente, tuttavia garantisce lo stesso rigore e la stessa generalità dei risultati garantiti dalla modellizzazione classica. Si noti, inoltre, come il metodo sia generalizzabile alle più disparate discipline grazie alla sua trasversalità, caratteristica, quest'ultima assente, ad esempio, nella sperimentazione in

laboratorio reale.

Per quanto sin qui descritto, è ragionevole affermare che la simulazione rappresenta un nuovo metodo scientifico. A tal proposito, Terna [76] si è spinto ad affermare che la simulazione può rappresentare per le scienze dell'uomo quello che la matematica ha rappresentato per le scienze della natura ad inizio '600. Se l'autore avesse ragione, ci troveremmo di fronte ad una vera e propria rivoluzione scientifica.

## 4.2 Complessità in Economia

In *economics* l'era neoclassica si è chiusa ed è stata sostituita da quella che Richard Holt, David Colander and Barkley Rosser [45] definiscono l'era della complessità. Secondo gli autori, il passaggio non è avvenuto attraverso una rivoluzione culturale, ma si è trattato di un'evoluzione necessaria nel momento in cui si è preso coscienza che i fenomeni economici non possono essere trattati senza avere a che fare con il concetto di complessità. Introdurre il concetto di complessità richiede l'utilizzo di strumenti concettuali nuovi rispetto a quelli dell'economia neoclassica e, soprattutto, fa sorgere la necessità epistemologica di trovare un nuovo metodo. L'economia neoclassica vede la complessità ma non la gestisce. Ricorre alla costruzione di finzioni logiche quali l'agente rappresentativo che, dotato di razionalità illimitata, agisce massimizzando una propria funzione obiettivo sotto vincoli esogeni di sistema.

Per le scienze economiche, Herbert Simon definisce un sistema complesso se è composto da un gran numero di parti che interagiscono tra loro in maniera non semplice. In un sistema di questo tipo, il tutto è superiore alla somma delle parti, non in senso metafisico, ma nel senso pragmatico per il quale, date le proprietà delle parti e le leggi di interazione reciproca, non è banale derivare le proprietà del tutto. L'ultima parte della definizione è fondamentale in quanto contiene in nuce il con-

retto di eterogenesi dei fini che è, di fatto, una declinazione del concetto di complessità.

Il contributo sistemico più importante all'analisi della complessità è da riconoscere al lavoro del Santa Fe institute, nel New Mexico, a partire dalla fine degli anni Ottanta<sup>31</sup>. Tre esponenti rappresentativi della scuola di Santa Fe, Arthur, Durlauf, e Lane [7] evidenziano alcune caratteristiche dei sistemi economici, da loro definiti *adaptive nonlinear networks*, che esulano dalle capacità interpretative dell'economia matematica:

1. *Dispersed interaction*: si prenda come riferimento un mercato azionario. Ogni soggetto che vi opera può avere una propria natura (investitori istituzionali, risparmiatori, trader...) e prende le proprie decisioni senza un meccanismo di coordinamento esplicito ed eterodiretto. Ogni operatore prende le proprie decisioni, simultaneamente a tutti gli altri, di acquisto/vendita a seconda delle proprie aspettative sul comportamento degli altri operatori e sulla conseguenziale evoluzione del prezzo.
2. *No global controller*: in ogni economia decentralizzata non vi è la figura del controllore (quale ad esempio lo stato pianificatore o il banditore di Walras) e gli unici controlli derivano dai sistemi di concorrenza e cooperazione tra gli agenti economici, così come le regole di sistema.
3. *Cross-cutting hierarchical organization*: i sistemi economici moderni sono suddivisibili in organizzazioni di vari livelli (un ufficio lavora in una funzione, una funzione in un'azienda, un'azienda in un gruppo etc.) e le unità che compongono ogni singolo livello costituiscono i *building blocks*<sup>32</sup> per strutture organizzative di livello superiore, pertanto i rapporti non sono semplicemente gerarchici.
4. Adattamento continuo: i sistemi economici cambiano perchè i soggetti

---

<sup>31</sup> Brownlee fa risalire al 1987 la data di fondazione della teoria dei CAS[22]

<sup>32</sup> definizione di bb



che li compongono imparano dall'esperienza e adattano la propria condotta.

5. Novità continua: dall'adattamento continuo deriva la costante dinamicità dei sistemi che si traduce nel susseguirsi di configurazioni senza precedenti.
6. *Out-of-equilibrium dynamics*: diversamente dall'ipotesi equilibrio e ottimo globale alla base di molti modelli dell'economia classica, i sistemi economici sono in continua transizione (adattamento e novità continua) e, pertanto, lontani dalla condizione di ottimo.

Come già chiarito, la teoria della complessità coinvolge lo studio di diversi attori e delle loro interazioni. Gli attori possono avere varia natura dalle particelle elementari a entità più complesse quali gli essere umani. Al pari degli attori, anche le interazioni possono essere di diversi tipi. Il coinvolgimento di un set numeroso di attori come anche delle azioni che questi possono intraprendere fa della simulazione computerizzata uno strumento di studio necessario.

Per generare complessità non è necessario partire dalla complessità. Si tratta del cosiddetto approccio KISS<sup>33</sup>, che la filosofia degli ABM adotta. La complessità di un ABM non risiede, infatti, nel set di ipotesi per la costruzione del modello, ma nei risultati ottenibili attraverso la simulazione.

### 4.3 Agent-based computational economics

L'agent-based computational economics (ACE) consiste nello studio di modelli economici caratterizzati dalla presenza di agenti che interagiscono tra loro [56] attraverso la simulazione computerizzata. Rispetto all'economia tradizionale di *mainstream* i modelli sono costituiti da agenti eterogenei che interagiscono sulla base di norme sociali, secondo un pro-

---

<sup>33</sup>“Keep it simple, stupid” dallo slogan militare.

prio modello e giudicando sulla base della propria esperienza, quindi con una struttura cognitiva significativamente più sviluppata. Inoltre, gli agenti si adattano ai cambiamenti dell'ambiente portando i sistemi economici a evidenziare forme di autoorganizzazione. I processi evolutivi non si applicano direttamente all'universo di agenti ma ai loro comportamenti degli agenti che, dunque, sperimentano continuamente nuove regole di comportamento testandone l'efficacia a seconda del *payoff* ottenuto (meccanismo della coevoluzione). Infine, una volta che il set di ipotesi iniziali viene definito, il modello ha uno sviluppo autonomo (attraverso la simulazione) senza l'intervento esterno arbitrario da parte del modellizzatore [77]. Conseguentemente, possiamo affermare che l'ACE è, in realtà, una declinazione del concetto di sistemi adattivi complessi (CAS). Il concetto di CAS è stato sviluppato dal Santa Fe Institute e deriva dall'osservazione, riportata da Holland [43], secondo la quale diversi approcci delle diverse discipline che trattano fenomeno complessi sono in qualche modo accumulabili:

	<b>Controllo</b> Ottimo	<b>Economia</b>	<b>Biologia</b>	<b>Giochi</b>
<b>Formalismo</b>	Variabili di processo	Attività	Fenotipi	Configurazione iniziale
<b>Costi delle azioni</b>	Costi operativi	Costi	Metabolismo	Valutazione conf. iniziale
<b>Valore degli obiettivi</b>	Funz. obiettivo	Profitto	Idoneità	Payoff
<b>Guida del sistema</b>	Control policy	Pianificazione	Rete di reazione	Strategia

Un CAS è così definibile [15]:

1. è composto da un numero finito di agenti che interagiscono tra loro;

2. gli agenti sono adattivi e intelligenti e prendono decisioni in base a propri modelli mentali che si modificano a seconda dell'esperienza;
3. nessun agente possiede una conoscenza dettagliata del comportamento di ogni altro agente.

In un sistema complesso un agente si dice adattivo se:

1. alle azioni dell'agente può essere associato un determinato payoff;
2. il comportamento dell'agente mira a ottenere il payoff massimo.[44]

Nei CAS, non vi è miglior modello previsivo per un agente se non il modello che ha dato le migliori performance nel passato. In questi modelli, però, ogni agente ha aspettative sul comportamento degli altri e i modelli di previsione degli agenti evolvono in parallelo. Elementi qualificanti di un CAS sono, dunque, l'esistenza di un'interrelazione, un *network*, tra gli agenti che lo compongono e la dinamicità di questi ultimi. L'interrelazione genera forme aggregative e organizzative tali da far emergere comportamenti di sistema, che, seppur paragonabili, sono affatto differenti rispetto ai concetti di ottimo globale e attrattore che si incontrano rispettivamente nella teoria del controllo ottimo e dei sistemi dinamici. Gli agenti, in quanto adattivi, modificano l'ambiente che li circonda e cambiano essi stessi attraverso dei meccanismi di *learning* che ne permettono l'evoluzione. In questo modo, il *coevolutionary*<sup>34</sup> *learning* induce a determinati *outcome* del sistema, ma la serie di *outcome* osservati dagli agenti ne condiziona l'evoluzione dei modelli previsivi. Come evidenziato da D.F. Batten [15], la popolazione di agenti che si formano delle aspettative sull'evoluzione del sistema rappresenta quella che John Holland definirebbe un' "ecologia"<sup>35</sup>. L'unico modo per congetturare circa l'evoluzione di un CAS è la simulazione. In un CAS emerge un comportamento globale che non

---

<sup>34</sup>In biologia per coevoluzione si intende un processo evolutivo che coinvolge congiuntamente due specie diverse in relazione tra loro. La relazione può essere di diverso tipo, tipicamente si ha predatoria, simbiotica e parassitica.

<sup>35</sup>John Holland ha introdotto la classe di modelli denominati *Echo models*, modelli CAS focalizzati sulle dinamiche di interazione tipiche degli ecosistemi naturali.

può essere previsto *ex ante* dalla conoscenza delle relazioni tra gli agenti: in un sistema economico l'interazione tra gli operatori può indurre allo sviluppo di proprietà collettive non derivabili dalla sola conoscenza degli agenti. Rispetto alla formalizzazione classica del comportamento degli agenti economici che postula la capacità di ottimizzazione di questi ultimi, in un CAS è possibile modellare il processo attraverso il quale questi sono capaci di arrivare a soluzioni di ottimo. Di fronte alla complessità di un CAS, le risposte offerte dall'approccio *mainstream*[30], la cui finalità è quella di derivare soluzioni analitiche, sono, per quanto fin qui esposto, insoddisfacenti. Gli approcci utilizzati nella tabella precedente, infatti, utilizzano prevalentemente il calcolo differenziale e in particolare i sistemi di equazioni differenziali che evidenziano tutti i propri limiti nella modellazione dei meccanismi di interazione (non lineari) tra agente e contesto di riferimento.

È proprio da tale insoddisfazione che prende le mosse l'approccio ACE. Quest'ultimo è differente dal classico approccio top-down nel quale un fenomeno viene modellizzato a partire da equazioni che descrivono la dinamica del sistema. Infatti, in un ABM è necessario individuare gli agenti, i loro payoff e il tipo di interazione che possono avere con l'ambiente esterno e con gli altri agenti. Per determinare l'esito di un ABM e l'emergere di un comportamento del sistema è necessario l'utilizzo degli elaboratori elettronici che *runnano* il modello per comprenderne gli esiti, in altre parole, l'elemento fondamentale nella prospettiva ACE è, in assenza di formule chiuse, la simulazione. Per questo motivo, l'approccio ACE permette di trattare con rigore scientifico problemi (ad esempio l'equilibrio generale multisettore) che non hanno una soluzione analitica facilmente derivabile o che addirittura prevederebbero soluzioni non uniche (Holland e Miller [44] a questo proposito propongono l'esempio della molteplicità di soluzioni ammesse dal Folk Theorem nei giochi ripetuti).

Il metodo ABM non è deduttivo in quanto, pur contemplando una

serie di assunzioni esplicite, non perviene alla dimostrazione di teoremi. Il metodo non è nemmeno induttivo in quanto, sebbene il modello genera dati analizzabili per via induttiva, i dati stessi derivano da un set di assunzioni e non dall'osservazione empirica. Per questo motivo Robert Axelrod [9] ha affermato che l'ABM è “the third way of doing science”. Il metodo rientra nel campo degli *exploratory computer-based models* che ci permettono la sperimentazione virtuale attraverso esperimenti mentali<sup>36</sup> di laboratorio.

Holland [43] offre un contributo importante nell'individuazione delle quattro principali caratteristiche comuni a tutti i CAS. Un primo elemento caratterizzante è infatti il parallelismo. Gli agenti comunicano inviando e ricevendo contemporaneamente dei segnali, producendo un gran numero di segnali simultaneamente. Il secondo elemento è rappresentato dalle azioni condizionali: gli agenti possiedono una logica interna del tipo IF/THEN, ossia leggono gli input esterni ed interni e associano allo stato proprio e del sistema una determinata azione. La modularità è la terza peculiarità è la modularità. Diversi insiemi di regole di un agente si possono combinare tra loro in *subroutine*. L'utilità di organizzare la logica interna di un agente in *subroutine* emerge nella gestione di eventi nuovi (l'alternativa sarebbe quella di pensare ad una regola per ogni scenario possibile). L'ultima caratteristica è l'adattamento (e conseguente evoluzione) che rende gli agenti dinamici nel tempo. Evidentemente, l'adattamento è finalizzato al miglioramento delle *performance* e non può essere un processo casuale. Quest'ultimo punto solleva due temi molto importanti nella modellizzazione dei CAS:

- *Credit Assignment*: è il problema informativo che riguarda la performance dovuto al fatto che l'informazione disponibile non è facilmente decodificabile in quanto il risultato di interazioni con dinamica

---

<sup>36</sup> A tale proposito Holland ha mutuato l'espressione *Gedankenexperiment*, coniata dal fisico e chimico H. C. Ørsted, che indica in fisica un esperimento immaginato ma non realizzato materialmente.

complessa. Holland propone l'interessante metafora del gioco degli scacchi. Un giocatore sa solo a fine della partita (dopo una lunga sequenza di mosse) se ha vinto o perso, ma difficilmente nella sequenza di mosse che ha portato alla configurazione vincente difficilmente può individuare quale strategia sia stata quella vincente.

- *Rule of discovery*: consiste nell'individuazione del corretto meccanismo di produzione di nuove regole di comportamento che siano coerenti con l'esperienza dell'agente. L'esigenza nasce nel momento in cui si l'agente ha evidenza che la regola utilizzata in passato non è efficace rispetto all'obiettivo posto.

#### 4.4 Agenti

In un ABM gli agenti interagiscono tra loro in un ambiente artificiale. Gli agenti sono porzioni di codice informatico che rappresentano in un modello gli attori dello stesso. Agiscono nell'ambiente (statico o dinamico che sia) reagendo agli *input* provenienti dall'ambiente stesso o dagli altri agenti e si scambiano messaggi relativamente al proprio status o alle informazioni acquisite sullo stato del sistema. La formalizzazione del concetto di agente non trova in letteratura una definizione formale univocamente riconosciuta ed è possibile affermare che venga mutuato direttamente dall'informatica, soprattutto ai nostri giorni nei quali il paradigma di programmazione più diffuso è la programmazione orientata agli oggetti<sup>37</sup> e rispetto alla quale il concetto di oggetto è particolarmente analogo al concetto di agente. Franklin e Graesser [36] propongono una definizione generale di agente: “un agente autonomo è un sistema inserito in - e parte di - un ambiente, in grado di percepire ciò che lo circonda ed agire in conseguenza, per portare a termine determinati obiettivi e perseguire ciò che esso programma per

---

<sup>37</sup>La programmazione orientata agli oggetti (OOP, Object Oriented Programming) è un paradigma di programmazione che permette di definire oggetti software in grado di interagire gli uni con gli altri attraverso lo scambio di messaggi. È particolarmente adatta nei contesti in cui si possono definire delle relazioni di interdipendenza tra i concetti da modellare (contenimento, uso, specializzazione) WIKIPEDIA

il futuro”. A partire dalla definizione precedente è possibile raffinare il ragionamento per arrivare ad un concetto di agente meno *noisy*. In particolare, Wooldridge & Jennings 1995 [88] propongono le definizioni di agente in forma debole e in forma forte. Un agente in forma debole è un sistema computerizzato *hardware* o *software* che presenta le seguenti caratteristiche:

- Autonomia: l'agente opera senza essere eterodiretto dall'intervento umano e gestisce le proprie azioni e il proprio stato interno;
- Abilità sociale: l'agente scambia informazioni con gli altri agenti utilizzando un linguaggio proprio degli agenti;
- Reattività: l'agente osserva l'ambiente nel quale è inserito e risponde tempestivamente alle modifiche che in esso intervengono;
- Proattività: l'agente non soltanto reagisce agli stimoli e alle variazioni dell'ambiente esterno, ma mette in atto strategie orientate alla massimizzazione della propria utilità.

Un agente in forma forte, oltre a presentare tutte le caratteristiche appena esposte, possiede delle qualità che lo avvicinano all'essere umano. Può essere infatti caratterizzato con nozioni “mentaliste” come in Shoham [74](come conoscenza, credenza, intenzione) o, addirittura “emozionali” [14]. Vi sono altre caratteristiche degli agenti riscontrabili nelle strutture degli ABM, quali ad esempio la mobilità, ossia la capacità di muoversi all'interno di *network*, la veridicità, ossia l'assunzione che un agente non comunicherà mai scientemente informazioni false, la benevolenza, ossia l'assunzione per la quale gli agenti in un modello non hanno obiettivi in conflitto, e la razionalità. Nell'ambito di definizione forte di agente c'è anche chi, come il logico statunitense Daniel Dennet, è arrivato a pensare agli agenti come sistemi intenzionali, ossia entità che nutrono desideri e credenze dai quali le loro azioni sono condizionate e guidate.

Un agente in senso forte ha la possibilità di cooperare con gli altri agenti e ingloba un meccanismo di *learning* dall'esperienza in un contesto virtuale definibile *multi-agent system* (MAS) . In particolare, la cooperazione tra agenti può essere intesa in senso positivo di collaborazione o in senso negativo di competizione. Poichè dall'interazione (cooperazione o competizione) possono scaturire esiti di sistema apparentemente imprevedibili e svincolati da caratteristiche, obiettivi e comportamenti dei singoli agenti, un MAS stesso può essere a sua volta definito come un agente. In ottica di sistema e in funzione della dinamicità dell'ambiente l'efficacia della cooperazione deve essere garantita da meccanismi di coordinamento. A questo proposito gli agenti si suddividono in tre tipi:

1. Agenti reattivi: sprovvisti di uno stato interno, agiscono automaticamente in risposta ad uno stimolo esterno. L'architettura che li caratterizza è generalmente molto semplice, così come la natura delle loro interazioni. Tuttavia, ciò non pregiudica l'emergenza di *pattern* complessi a livello di comportamento aggregato di sistema. Per Maes [58] in un contesto con agenti reattivi si ha funzionalità emergente, ossia comportamento di sistema complesso pur ammettendo solo azioni semplici, scomposizione dei compiti, per la quale ogni agente svolge un compito parziale e delimitato rispetto al proprio ecosistema, e la tendenza degli agenti a operare su rappresentazioni. Evidentemente, si può ricorrere ad agenti reattivi solo quando si vuole modellare un ambiente piuttosto statico nel quale adattabilità e cooperazione tra agenti non sono caratteristiche necessarie;
2. Agenti deliberativi: per gli agenti deliberativi è possibile introdurre il concetto di intelligenza artificiale in quanto, a differenza degli agenti reattivi che rispondono ad uno stimolo, gli agenti deliberativi possiedono un proprio sistema di ragionamento e la capacità di pianificare e implementare sequenze di azioni orientate ad un risultato. Un agente deliberativo possiede un proprio modello di rapp-



resentazione della realtà che lo guida nella definizione delle azioni da intraprendere. Evidentemente, il limite degli agenti deliberativi è il limite fisico della capacità di calcolo e del tempo necessario per elaborare le decisioni;

3. Agenti ibridi: l'introduzione di tali agenti rappresenta un tentativo di ovviare ai lunghi tempi di calcolo necessari agli agenti deliberativi attraverso un approccio "reattivo" in caso di situazioni note e un approccio più propriamente "deliberativo" nel caso di situazioni nuove che richiedono la pianificazione delle azioni. Gli agenti ibridi ricordano, secondo chi scrive, l'interpretazione di Daniel Kahneman della *dual process theory* <sup>38</sup>.

#### 4.4.1 Il Reinforcement learning e i meccanismi evolutivi

Il reinforcement learning, o apprendimento mimetico, è il processo messo in atto da un agente che deve apprendere le regole di comportamento attraverso il *trial and error* in un contesto dinamico [49]. Gli approcci per selezionare il comportamento corretto sono due. Il primo consiste nel cercare nell'insieme dei comportamenti disponibili quello che garantisce le migliori performance nell'ambiente di riferimento: in questo caso si tratta di utilizzare algoritmi genetici. Il secondo approccio richiede invece l'utilizzo di tecniche statistiche e di programmazione dinamica per la valutazione di regole di comportamento *state contingent*.

Come osservano Holland e Miller [44], c'è un unico modo di essere razionali, ma molti modi di avere una razionalità limitata. Alla ricerca di soluzioni analitiche razionali, l'economica classica si fonda sul concetto di perfetta razionalità e ragionamento deduttivo degli individui, eppure, questa ipotesi permette di risolvere solo una limitatissima parte dei problemi decisionali. Esistono due ragioni principali, ormai classiche nella let-

---

<sup>38</sup>Kahneman distingue tra l'intuizione (sistema 1) che è veloce, automatica e a basso consumo energetico e il ragionamento (sistema 2) che è lento, strutturato, logico e dispendioso.

teratura economica, per le quali la razionalità non è sufficiente per tutti i problemi: la prima è che la razionalità deduttiva è limitata (*bounded rationality*) e pertanto i problemi con un grado di complessità elevato vanno oltre tale limite, la seconda è che nelle interazioni umane, un soggetto deve tener conto che i suoi interlocutori potrebbero non comportarsi in maniera razionale (*subjective beliefs*) [6]. Le scienze comportamentali ([42]) gli esser umani affrontano temi complessi non attraverso una logica deduttiva, ma attraverso l'induzione. La mente umana ricerca gli schemi ricorrenti (*patterns*) e su questi costruisce il proprio apparato teorico. Nella modellizzazione ABM, gli agenti tendono a lavorare in maniera induttiva, aggiornando le proprie aspettative soggettive a seconda delle performance passate. L'esperienza permette infatti di alimentare il proprio set informativo e un set informativo più esteso, a sua volta, permette un processo decisionale più efficiente: è il meccanismo di *learning*. I modelli decisionali sono validati dagli agenti non perchè corretti, ma perchè vantano una storia di successi. Pertanto i modelli evolvono e si modificano con il tempo. Arthur definisce questo fenomeno come *temporarily fulfilled expectations*. Tra le aspettative che vengono aggiornate con questo sistema, vi sono anche le aspettative sui modelli decisionali degli altri agenti. Pertanto, anche l'ambiente nel quale gli agenti operano subisce delle modifiche alle quali gli agenti dovranno adattarsi: per tale motivo si tende ad affermare che negli ABM gli agenti coevolvono.

La coevoluzione e l'apprendimento sono garantiti prevalentemente da due meccanismi: gli algoritmi genetici e i sistemi a classificatore.

Gli algoritmi genetici furono sviluppati originariamente da Holland e riproducono le dinamiche dell'evoluzione genetica. Gli algoritmi genetici lavorano su popolazioni di agenti ai quali sono associati vettori che rappresentano le caratteristiche degli agenti che ne determinano i comportamenti e le strategie. Ad ogni vettore è associata una misura di *performance* (cosiddetta *fitness*) dipendente dall'ambiente in cui l'agente interagisce.

Gli algoritmi genetici modificano la popolazione di agenti derivando una nuova popolazione che mostra mediamente una *fitness* superiore rispetto alla precedente. Nel passaggio tra una generazione e la successiva, infatti, gli algoritmi genetici, attraverso gli operatori genetici, fanno sì che siano i vettori di caratteristiche con maggiore *fitness* ad avere più probabilità di riproduzione. Esistono diversi tipi di operatori genetici. Il più importante è l'operatore *crossover*. Quest'ultimo lavora in tre fasi: viene scelta una coppia di vettori (strutture sintattiche elementari), i vettori vengono affiancati e viene scelto un punto in maniera casuale lungo il vettore risultante dall'unione dei due, i segmenti a sinistra vengono invertiti nell'ordine<sup>39</sup>. La caratteristica più apprezzabile di questo meccanismo è che viene sfruttata l'informazione "genetica" implicita alla popolazione e non si limita ad individuare semplicemente gli individui più adatti.

I sistemi a classificatore, anche questi introdotti da Holland, sono sistemi adattivi basati su regole nei quali l'ambiente è modificato attraverso l'applicazione di gruppi di regole. Le regole subiscono un processo evolutivo riconducibile alla metodologia degli algoritmi genetici. Le regole presentano una struttura del tipo IF/THEN, ossia verificano l'esistenza delle condizioni (IF) che le attivano e, se tali condizioni sono verificate, restituiscono un messaggio di output. Due componenti funzionali sono quelli che Holland definisce *effectors*, ossia gli strumenti che permettono di inviare messaggi di *output* al sistema, e i *detectors*, ossia le componenti che permettono di intercettare gli *input* del sistema. Poiché diverse regole possono essere attivate simultaneamente, le regole attive riescono a inviare il proprio *output* al sistema solo dopo aver affrontato e superato il confronto con le altre. Il confronto viene vinto dalla regola con più forza (*strenght* nella terminologia di Holland), che rappresenta una misura dell'utilità ricoperta in passato dalla regola. Tale misura viene costantemente aggiornata da un meccanismo di *learning*.

---

<sup>39</sup>Holland e Miller propongono l'esempio di *crossover* con i due vettori 111000 e 010101, la cui progenie dopo la seconda posizione è data da 011000 e 110101.

Uno di questi è il *bucket-brigade algorithm*. L'applicazione di tale algoritmo prevede di trattare ogni regola come inserita in un sistema produttivo nel quale acquista messaggi di *input* e vende messaggi di *output*. La dinamica è la seguente: una determinata regola acquisisce un messaggio che soddisfa la sua condizione di attivazione (IF), produce il proprio *output* e, una volta che ha prevalso nella competizione con le altre regole riuscendo a inviare il proprio *output* al sistema, remunera la regola che le ha fornito l'*input* cedendo parte della propria forza. Evidentemente l'*input* della regola costituirà un *output* per un'altra regola che a sua volta ripercorrerà il ciclo remunerando la prima regola in caso di successo. Ogni regola, dunque, acquista e cede forza quale mezzo di scambio e, evidentemente, la sua forza in ogni istante dipenderà dal risultato netto dello storico delle transazioni.

## 5 Applicazioni degli ABM

Gli ABM sono adattabili ad una grande varietà di fenomeni economici, ma mostrano la loro utilità soprattutto nello studio di quei fenomeni in cui vi è un reciproco condizionamento tra la microstruttura (delle interazioni locali) e la macrostruttura del comportamento emergente di un fenomeno.

Seguendo Tesfatsion [56]-[77] si possono distinguere otto principali aree di ricerca per l'utilizzo degli ABM:

1. *learning*: si focalizza sulle tecniche per la modellizzazione dei processi mentali dei soggetti economici e sul tipo di logica utilizzata da questi ultimi. Se nell'ipotesi di perfetta razionalità il tema del *learning* viene trascurato, nell'ACE la modellizzazione delle dinamiche di *learning* quanto più vicine alle dinamiche della vita reale ha un contenuto predittivo importante. Nel seguito del lavoro verranno presentati i più importanti algoritmi di learning utilizzati in letteratura, con particolare riferimento al settore elettrico;

2. evoluzione di regole di comportamento: in un contesto in cui ci sono diversi soggetti la cui utilità è condizionata non solo dalle proprie azioni, ma anche dalle azioni degli altri, si ha un'interazione strategica (sia essa collaborazione o conflitto) generalmente trattata dall'economia classica con lo strumento della teoria dei giochi. La finalità di quest'area di ricerca è la comprensione dell'importanza delle norme comportamentali (coercitive o semplici usi e tradizioni) e della loro stabilità nel tempo. Un importante contributo all'approccio ACE nello studio delle norme di comportamento si deve a Robert Axelrod. In un articolo del 1986 [10] egli utilizza l'approccio ACE per studiare l'emersione di norme<sup>40</sup> sociali e la loro stabilità in un contesto di agenti a razionalità limitata. Axelrod struttura un gioco nel quale gli agenti possono scegliere se rispettare le regole e se punire chi non le rispetta. Il *framework* teorico prescelto non è quello classico della teoria dei giochi, bensì quello che l'autore stesso definisce un approccio evolutivo per il quale un agente continuerà ad scegliere un determinato comportamento fin quando questo risulta proficuo e cambia in caso di fallimento (approccio *trial-and-error*). L'autore dimostra che per arrivare a norme stabili è necessario lo sviluppo spontaneo di metanorme<sup>41</sup> che rappresentano anche la condizione necessaria per lo sviluppo della cooperazione tra individui. Le norme, come le conosciamo, sono frutto di un processo evolutivo [72] e attraverso l'utilizzo di ABM, Axelrod ha dimostrato come la cooperazione possa essere il risultato dell'interazione tra agenti che massimizzano focalizzati sul soddisfacimento dei propri bisogni e con una limitata lungimiranza<sup>42</sup>.

---

<sup>40</sup> Axelrod definisce la norma così: "Una norma esiste in un dato contesto sociale nella misura in cui gli individui generalmente agiscono in un certo modo e spesso vengono puniti quando non agiscono così".

<sup>41</sup> Axelrod definisce la metanorma come la norma che impone di punire chi sceglie di non punire i colpevoli.

<sup>42</sup> A testimonianza dell'importanza ricoperta dal lavoro di Axelrod anche per la teoria dei giochi, ricordiamo la *tit for tat*, una strategia sviluppata da Anatol Rapoport per affrontare

3. modellizzazione di processi di mercato *bottom-up*: in quest'area l'approccio è sia positivo che normativo, perchè da un lato si indaga sulla natura dei processi di mercato quali, ad esempio, l'evoluzione dei prezzi o le dinamiche di un mercato oligopolistico, dall'altro si cerca di creare nuovi *market design* con un impatto regolatorio potenzialmente enorme. Uno dei primi e influenti contributi è stato quello di Robert Marks [60]. Il focus di Marks è sull'apparente auto-organizzazione dei mercati e, in particolare, su come le strutture dei mercati sono condizionate dall'interazione e dal *learning* degli agenti. Nel paper citato, Marks costruisce un modello di mercato oligopolistico per comprendere come un'impresa *price-setting* possa competere. L'autore ipotizza un contesto di gioco ripetuto nel quale ad ogni passaggio ogni impresa sceglie la propria strategia attraverso l'applicazione di un algoritmo genetico. Il risultato principale è un comportamento collusivo senza alcuna forma di coordinamento volontario o esplicito.
4. formazione di network economici: il tema di ricerca è condiviso con la *network economics*. Il contributo dell'ACE consiste nell'individuazione di meccanismi di formazione di *network* attraverso l'interazione di agenti con comportamento adattivo;
5. modellizzazione delle organizzazioni: l'indagine normativa nell'economia classica consiste nella ricerca della struttura organizzativa più efficace, dato un determinato obiettivo da perseguire. L'ACE porta ad un'estensione dell'ambito di ricerca introducendo elementi quantitativi nell'analisi in un contesto più generalizzato;
6. *design* degli agenti di calcolo per i mercati automatizzati: alcuni autori ([51]) hanno teorizzato che in futuro esisterà l'*information economy*, ossia un'economia costituita da soli agenti virtuali che,

---

il dilemma del prigioniero. In un contesto di gioco ripetuto, la strategia consiste nel punire l'avversario quando devia con una ritorsione di pari entità rispetto alla deviazione.

di algoritmi, tendono a massimizzare il proprio profitto acquistando informazione da altri agenti, informazione che verrà rielaborata e ceduta ad altri agenti o a umani;

7. esperimenti paralleli con agenti reali e di calcolo: è una strada molto interessante per conoscere la realtà. Conducendo esperimenti paralleli, è possibile tracciare le differenze con i comportamenti virtuali e da qui conclusioni interessanti;
8. costruzione di laboratori di calcolo: i laboratori di calcolo permettono lo studio dei sistemi multiagente attraverso esperimenti controllati. I temi che si aprono sono diversi, su tutti la necessità di comprendere se i risultati di un determinato esperimento sono realmente aderenti al fenomeno oggetto di osservazione o semplicemente dipendono dalla struttura del codice e del linguaggio di programmazione utilizzati.

Lo strumento ABM è stato con successo applicato a diversi mercati: mercato finanziario, elettricità, lavoro.

Lo sviluppo delle capacità di calcolo dei moderni elaboratori elettronici influisce sull'economicità dell'utilizzo degli ABM. Rispetto alla *experimental economics*, dunque, emerge qui un grande pregio degli ABM: il risparmio dei costi connessi all'attività di laboratorio con soggetti umani. Inoltre, rispetto all'approccio sperimentale gli ABM godono dell'apprezzabile vantaggio di permettere un ambiente di studio più complesso e realistico in quanto non vi sono gli stessi limiti incontrati nella sperimentazione in laboratorio nell'indurre determinate caratteristiche nei gruppi di soggetti sotto osservazione.

Negli ABM costruiti per il mercato elettrico gli agenti rappresentano per lo più i produttori e i *trader*, più raramente viene modellizzato il comportamento dei consumatori o del gestore della rete di trasmissione. Weidlich e Veit [82] individuano alcune fasi tipiche nella costruzione degli ABM per il settore elettrico:

1. Definizione dell'obiettivo della ricerca;
2. Costruzione del settore e set up degli agenti;
3. Attribuzione agli utenti delle specificità osservate nel settore (dimensioni, capacità di apprendimento, conoscenza degli altri operatori);
4. Simulazione senza alcun intervento;
5. Analisi delle evidenze risultanti dalla simulazione e ricerca di regolarità, schemi o *pattern* emergenti.

## 6 Letteratura

Uno sguardo più dettagliato alla letteratura, permette di affermare che i modelli costruiti in letteratura hanno finora seguito approcci diversi, tant'è che non sembra possibile una categorizzazione univoca. L'utilizzo degli ABM segue generalmente quattro filoni principali: 1) empirico, nel quale il ricercatore runna il modello cercando di osservare delle regolarità; 2) normativo, nel quale il modello costituisce il laboratorio nel quale vengono testati gli ambienti economici e i loro esiti; 3) generazione delle basi teoriche, ossia lo studio delle dinamiche evolutive dei sistemi e la dipendenza dalle condizioni iniziali, e, infine, vi è il filone 4) di quei ricercatori che cercano di migliorare la metodologia di analisi e le *technicality* di costruzione dei modelli stessi. Per il settore elettrico, l'analisi attraverso ABM è prevalentemente di tipo normativo.

Seguendo Weidlich e Veit [82], vengono di seguito esposti i maggiori risultati a cui si è giunti in letteratura.



**Algoritmi model-based adaptation** I model-based adaptation -ne sono un esempio lampante quelli della London School of Economics- ipotizzano dei meccanismi di apprendimento degli agenti costruiti appositamente per lo specifico mercato che si sta analizzando, senza ricorrere a strutture di *learning* proprie della letteratura specifica, e, quindi, senza poter contare su una base psicologica per i meccanismi di *learning*. Un esempio importante è rappresentato dall'articolo di Bower e Bunn [21] e tratta proprio il tema oggetto di analisi di questo lavoro. Gli autori propongono una simulazione basata su agenti del mercato elettrico in Inghilterra e Galles. Il loro contributo si contestualizza in un momento storico (l'articolo è del 2000) nel quale l'Office of Electricity Regulation è in fase di trasformazione del mercato dal Poolco al sistema di scambi bilaterali.<sup>43</sup> La modifica regolamentare prevedeva che il Pool fosse sostituito da contratti bilaterali tra produttori e consumatori ed era motivata dalla convinzione che il meccanismo del Pool agevolasse l'esercizio del potere di mercato da parte dei produttori. L'obiettivo dichiarato degli autori era quello di comprendere sotto quali condizioni i contratti bilaterali potevano portare a prezzi inferiori rispetto al pool. I produttori di energia sono rappresentati da *autonomous adaptive agent* capaci di formulare le proprie strategie di offerta a seconda del *design* di mercato di volta in volta vigente. Gli agenti usano semplici regole interne di comportamento allo scopo di aumentare continuamente la propria profittabilità e di raggiungere un livello obiettivo di utilizzo del proprio parco produttivo. Gli agenti ricevono un feedback sui risultati della propria attività rispetto alle variabili più importanti (ad esempio il tasso di utilizzo degli impianti o il profitto conseguito nei giorni precedenti), non conoscono le azioni passate, presenti e future dei propri competitor.

È interessante analizzare i criteri decisionali degli agenti:

- Se il tasso di utilizzo target del portafoglio impianti non è stato

---

<sup>43</sup>vd 3.2 per approfondimenti.

raggiunto nella tornata precedente, allora il prezzo offerto il giorno precedente deve essere ridotto di una percentuale random;

- Se ogni impianto ha venduto tutto l'output prodotto, allora il prezzo di ogni impianto dovrà essere aumentato fino al prezzo della più vicina tra le offerte migliori;
- Se il profitto totale non aumenta, allora il prezzo deve essere aumentato o diminuito in maniera random per un percentuale anch'essa casuale;
- Se il giorno precedente sono stati raggiunti gli obiettivi prefissati su tutto il portafoglio, allora deve essere ripetuta la stessa strategia del giorno precedente.

Dai criteri decisionali utilizzati dagli autori si comprende come gli agenti rispondano semplicemente in maniera reattiva a delle sollecitazioni dell'ambiente esterno. Siamo molto lontani dalla teoria classica, nella quale i soggetti si comportano in maniera strategica prevedendo i comportamenti altrui, e siamo molto più vicini ad un set sperimentale con esseri umani che non vantano alcuna expertise sul mercato elettrico. La simulazione permette agli autori di individuare l'importanza della struttura di mercato (intesa come allocazione della capacità produttiva totale) nella scelta tra UPA e DPA e stabilisce la superiorità dell'UPA nel neutralizzare il vantaggio strutturale di cui godono i produttori più grandi grazie alla propria maggiore potenza installata.

Dato il contesto nel quale è stato pubblicato, il risultato ottenuto con questo modello ABM, in contrasto con gli intendimenti del legislatore, è un risultato storicamente importante per la letteratura ABM.

**Simulazioni con algoritmi genetici** Nelle simulazioni con algoritmi genetici, le strategie utilizzabili dagli agenti sono in qualche modo codificate in essi come patrimonio genetico. Il processo evolutivo caratterizza una strategia come adatta al contesto di mercato. Il metodo è

particolarmente adatto per lo studio delle strategie di bidding sul mercato elettrico, anche se in realtà nel dibattito UPA vs DPA non trova un grande utilizzo. Nel solco della letteratura generata dal fallimento del legislatore californiano, il lavoro di Zhou et al. [90] testimonia l'utilità che l'approccio ABM può ricoprire per il legislatore. Gli autori studiano le strategie di bidding degli operatori in contesto UPA e, attraverso l'utilizzo degli algoritmi genetici, riescono a riprodurre le dinamiche degli spike di prezzo che spesso si manifestano sul mercato elettrico e suggeriscono l'introduzione di un design di mercato che migliora il benessere totale prevedendo la possibilità di presentare, piuttosto che offerte d'acquisto con prezzo unico, vere e proprie funzioni nelle quali la quantità richiesta dipende dal prezzo di mercato.

**Simulazioni con il meccanismo di Erev-Roth** Erev e Roth [34] propongono un meccanismo di learning a tre parametri, il *reinforcement learning*. Nel loro *paper* originario [73], Erev e Roth propongono, in contesto di teoria dei giochi, un algoritmo dinamico utilizzato da ogni player per determinare la strategia da utilizzare all'interno di una rosa di strategie disponibili. Per ogni strategia disponibile  $k$  il giocatore  $n$  esibisce una determinata propensione individuale  $q$  verso quella strategia, propensione che varia nel tempo  $t$  sulla base della somma dei payoff ottenuti nel passato ( $x$ ) utilizzando quella determinata strategia:

$$q_k(t) = q_k(t-1) + x \quad (3)$$

Dalla 3, la probabilità di selezione di una determinata strategia è:

$$p_{nk}(t) = \frac{q_{nk}(t)}{\sum_j q_{nj}(t)} \quad (4)$$

dove con  $j$  vengono indicate tutte le strategie disponibili.

In questo modo, è evidente come strategie che si sono rivelate di successo tendono ad essere scelte con maggiore probabilità rispetto alle altre

scelte disponibili. Questo fenomeno è definito dagli autori come “*law of effect*” ed è un effetto molto più evidente quando  $t$  è un valore basso in quanto il denominatore tende a crescere con l’incrementare di  $t$ . Al semplice modello proposto, gli autori apportano tre modifiche principali per rendere i meccanismi di *learning* più aderenti alla realtà. La prima modifica è l’introduzione del parametro  $\mu$ , un parametro di *cutoff* utile a portare a zero le probabilità troppo piccole:  $p_{nk}(t) < \mu \rightarrow p_{nk}(t) = 0$ . La seconda modifica è l’introduzione del parametro  $\varepsilon$  da interpretarsi come un parametro che non permette che la probabilità di scelta di una strategia “simile” ad una strategia con alta probabilità di essere scelta non si avvicini a zero. La 3 si modifica così:

$$q_k(t) = q_k(t-1) + (1-\varepsilon)x \quad (5)$$

L’altra modifica al modello base è l’introduzione del parametro  $\phi$  che limita l’abbassamento di pendenza che può assumere la curva di learning. Con questa modifica, la 5 diventa:

$$q_k(t) = (1-\phi)q_k(t-1) + (1-\varepsilon)x \quad (6)$$

Il parametro  $\phi$  è un parametro che introduce un fattore di dimenticanza per il quale con l’incrementare di  $t$  le scelte passate pesano sempre di meno.

L’algoritmo è stato utilizzato da Petrov e Shlebé [69] e Nicolaisen [67] che ne hanno evidenziato un limite importante, e cioè che non c’è aggiornamento delle *propensity* in caso di profitti pari a zero o quasi. In altri lavori è stato invece evidenziato come per alcuni valori di  $\varepsilon$  non vi è apprendimento. Da qui, l’introduzione dell’algoritmo Modified Roth-Erev (MRE):

$$q_k(t) = \{ (1-\phi)q_k(t-1) + (1-\varepsilon)x(1-\phi)q_k(t-1) + q_k(t-1) \frac{\varepsilon}{1-M} \quad (7)$$

Gli autori hanno utilizzato l'MRE per simulare un mercato elettrico con il meccanismo DPA. I risultati ottenuti mostrano che il potere di mercato non cresce con l'aumentare del peso relativo della capacità produttiva e che il mercato è efficiente. Dalla comparazione dei risultati effettuata dagli autori stessi, emerge che l'MRE è più performante degli algoritmi genetici nel riprodurre le dinamiche del mercato reale.

Un altro esempio della felice applicazione degli algoritmi di *learning* è rappresentato da Koesrindartoto e Tesfatsion [54] che modellizzano un mercato che riprende il *Wholesale Power Market Platform*<sup>44</sup> suddiviso in due momenti (molto simile alla struttura reale del mercato elettrico italiano): mercato del giorno prima ed un mercato in tempo reale nei quali i produttori di energia elettrica, trovando una domanda giornaliera per semplicità ipotizzata anelastica, imparano a ottimizzare la propria offerta sul mercato. Il processo di *learning* porta gli operatori a “biddare” con successo a livelli di *pricing* superiori rispetto ai propri costi marginali, con un equilibrio nel quale i costi variabili totali di sistema sono tre volte superiori rispetto ai costi marginali di un sistema nel quale gli operatori sono obbligati a fare *disclosure* dei propri costi marginali. La simulazione, in questo caso, ha portato a sconfessare l'architettura regolamentare proposta dagli organi legislativi.

Micola et al. [62] propongono un modello di tre oligopoli concatenati: il mercato del gas, il mercato elettrico all'ingrosso e il mercato elettrico *retail*. Analizzano come l'interdipendenza della profittabilità nelle diverse business unit di un'azienda integrata verticalmente può aumentare i profitti in un contesto di mercato oligopolistico. Il gas rappresenta uno degli input fondamentali per la produzione di energia elettrica e, pertanto, gli autori presuppongono una stretta correlazione tra i mercati del gas e dell'energia elettrica. Ancora più evidente è la correlazione tra i mercati elettrici all'ingrosso e retail. Relativamente all'interdipendenza

---

<sup>44</sup>Il market-design proposto dalla Federal Energy Regulatory Commission statunitense nel suo Notice of White Paper del 2003.

dei margini, gli autori ricordano come meccanismi quali bonus calcolati sulla profittabilità complessiva dell'azienda possono indurre all'interno dell'organizzazione dei comportamenti di collaborazione virtuosa non soltanto a livello individuale ma anche tra divisioni/dipartimenti aziendali, non dimenticando che premi sui risultati collettivi creano anche un incentivo a risparmiare il proprio *effort* nella speranza che il lavoro degli altri soggetti possa compensare le proprie mancanze. I tre mercati sono ipotizzati a domanda inelastica costante, gli agenti nei tre mercati sono identici e con costi marginali costanti nulli e biddano per tutta la propria capacità produttiva. L'unica variabile decisionale è il prezzo d'offerta. Il primo mercato ad essere cleared è il mercato retail sul quale si forma un prezzo che sarà il riferimento massimo per il mercato all'ingrosso. Il prezzo di equilibrio sul mercato all'ingrosso costituirà il riferimento per il mercato del gas. Gli autori modellizzano le aziende integrate come due agenti operanti in mercati diversi (gas e ingrosso energia) i cui *payoff* sono correlati. È interessante notare come nel caso di azienda integrata verticalmente il meccanismo di *reinforcement learning*, basandosi sui *payoff* ottenuti in passato, permette di gestire informazioni relative a due mercati e di sviluppare, pertanto, strategie di ottimizzazione valide su entrambi. I risultati delle simulazioni evidenziano che la presenza di integrazione verticale porta ad un incremento dei prezzi in almeno due dei mercati considerati e che imprese integrate verticalmente riescono ad ottenere profitti superiori rispetto al caso di due imprese separate. Soprattutto, gli autori individuano nel sistema di remunerazione basato sui risultati congiunti una delle cause della crescita dei prezzi sui mercati. Gli autori spiegano i risultati analizzando diversi aspetti della simulazione. Il primo è relativo alle scelte di pricing dei soggetti economici. Con la determinazione dei prezzi al *merit order*, il prezzo finale è fissato dall'impresa marginale. Per questo motivo, per poter esercitare potere di mercato (vd. influenza sui prezzi) è necessario occupare la posizione di offerente marginale per fissare il prezzo

rinunciando a quote di mercato. Meccanismi di remunerazione congiunta tra *business unit* portano l'impresa ad avere sempre meno potere di mercato sul mercato all'ingrosso, ma, d'altra parte, aumentano la frequenza con la quale sul mercato *retail* l'impresa si trova ad occupare la posizione del *price maker* (con relativa diminuzione della quota di mercato). Gli autori individuano e spiegano un'evidenza diversa rispetto alla letteratura. Secondo l'approccio tradizionale, infatti, ci si sarebbe aspettato che la *business unit retail* applicasse prezzi altamentene competitivi beneficiando di costi marginali più bassi dei propri competitor grazie al potere di mercato esercitato sul mercato all'ingrosso (che fornisce l'*input* essenziale) da parte della business unit "sorella". Nel modello di Micola succede esattamente il contrario in quanto sul mercato retail l'impresa opta per prezzi più alti a discapito della propria quota di mercato, il tutto esercitando un potere di mercato.

**Simulazioni con il Q-learning** Il *Q-learning* è stato introdotto nel 1989 da Watkins [80] e rappresenta una forma di *reinforcement learning* o, più precisamente, *model-free reinforcement learning*. Rientra tra i metodi di programmazione dinamica, ma ha il vantaggio di richiedere capacità computazionali relativamente limitate. Euristicamente, si tratta di un continuo affinamento della valutazione delle diverse azioni nei vari stati del mondo: l'elemento distintivo consiste nel fatto che il Q-learning permette di modellare agenti con la capacità di apprendimento di strategie ottime in dominio Markoviano attraverso l'esperienza offerta dalle conseguenze delle proprie azioni, senza la necessità di dover mappare i domini. Watkins and Dayan [81] hanno dimostrato che il Q-learning converge con probabilità pari a 1 al valore dell'azione ottima. Definiamo  $x_n \in \mathcal{X}$  l'insieme degli stati del mondo al momento  $n$  e  $a_n \in \mathcal{A}$  l'insieme delle azioni a disposizione dell'agente allo stesso momento. La scelta dell'agente comporta il passaggio da uno stato del mondo al successivo attraverso la regola

probabilistica:

$$Prob[y_n = y|x_n, a_n] = P_{xy}[a_n]$$

A seguito dell'azione, l'agente riceve un premio stocastico  $r_n$  il cui valore medio si indica con  $\mathcal{R}_{x_n}(a_n)$ . Nei periodi successivi, l'agente riceverà altri premi il cui valore deve essere scontato per un tasso di preferenza intertemporale  $\gamma$  positivo e strettamente minore di 1. Data una policy  $\pi : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{A}$ , il valore  $V$  dello stato  $x$  è, pertanto, così definibile:

$$V^\pi(x) \equiv \mathcal{R}_x(\pi(x)) + \gamma \sum_y P_{xy}[\pi(x)]V^\pi(y)$$

Il valore-Q può essere definito come il valore attuale del premio atteso associato alla policy  $\pi$ , dalla precedente uguaglianza:

$$Q^\pi(x, a) = \mathcal{R}_x(a) + \gamma \sum_y P_{xy}[\pi(x)]V^\pi(y)$$

Determinare la policy ottimale, vuol dire per l'agente massimizzare il valore atteso totale dei premi, pertanto nel meccanismo del Q-learning l'obiettivo è determinare il valore-Q per una *policy* ottima. Indicando con  $Q^*(x, a)$  il valore-Q della *policy* ottima  $\pi^*$ , e con

$$V^*(x) = \max_a [\mathcal{R}_x(a) + \gamma \sum_y P_{xy}[a]V^*(y)]$$

si ha

$$V^*(x) = \max_a Q^*(x, a)$$

Di conseguenza:

$$\pi^*(x) = \arg \max_a Q^*(x, a)$$



L'equazione precedente è il risultato più importante dell'utilizzo del Q-learning, in quanto per l'agente è sufficiente imparare i valori-Q per poter facilmente decidere la *policy* ottima.

Per il mercato elettrico gli algoritmi di Q-learning sono stati utilizzati da Krause et al.[55]. Gli autori comparano l'analisi degli equilibri di Nash con un ABM che utilizza il Q-learning per comprendere le dinamiche in un mercato con vincoli di rete. Gli autori ipotizzano un mercato spot dell'energia elettrica nel quale l'offerta è composta da produttori in regime di oligopolio che avanzano le proprie offerte sotto forma di funzioni lineari di prezzo marginale. Nel modello i produttori influenzano i prezzi di mercato principalmente shiftando la propria funzione d'offerta verso l'alto (aumentando l'intercetta con l'asse delle ordinate). Le funzioni d'offerta sono raccolte da un gestore indipendente che ha il compito di *clearing* del mercato minimizzando i costi di produzione rispettando i vincoli di rete. Gli agenti (i produttori) utilizzano un meccanismo di Q-learning per comprendere il valore delle singole azioni (i possibili livelli di mark-up sulla curva di costo marginale). Rispetto al Q-learning descritto in precedenza, nel lavoro degli autori non è svolto un ruolo attivo dagli stati del mondo e, pertanto, non vi è per gli agenti la massimizzazione dei premi futuri. La simulazione porta ad una rapida convergenza verso l'equilibrio di Nash nei casi di equilibrio unico, mentre si osserva un comportamento ciclico nei casi di equilibrio multiplo.

Naghibi-Sistani et al. [66] arrivano a conclusioni simili con un modello di mercato differente che contempla due possibili stati: bassi costi di produzione e alti costi di produzione. Nel modello gli autori propongono un meccanismo di Q-learning basato sull'osservazione della temperatura atmosferica per determinare la strategia ottima per la definizione della curva d'offerta di un produttore di energia elettrica. Gli agenti biddano modulando strategicamente la pendenza della funzione d'offerta che può essere alta, media o bassa e hanno informazione completa sui propri pay-

off mentre non conoscono i pay-off dei concorrenti. Il gestore della rete anche in questo modello riceve le offerte e provvede al *matching*. Il lavoro dimostra che attraverso il Q-learning basato sulla temperatura, gli agenti possono arrivare ad assumere gli stessi comportamenti derivabili dalla teoria dei giochi, pur non avendo a disposizione tutto il set informativo (in particolare le informazioni sugli altri produttori) necessario per derivare una soluzione nell'approccio classico della teoria dei giochi. In particolare, gli autori dimostrano che se tutti i partecipanti utilizzano questo metodo (pur agendo in maniera del tutto indipendente), il sistema converge verso un equilibrio di Nash.

Nel dibattito UPA vs DPA, il Q-learning risulta particolarmente utile, come dimostra il ricorso della letteratura a tale algoritmo. La proprietà fondamentale che rende adatto il Q-learning alla trattazione del problema in quanto, non richiedendo un modello mentale del mercato elettrico e lavorando in condizione in asimmetria informativa, si adatta al processo di learning in aste ripetute messo in atto dagli operatori sul mercato che non osservano il comportamento dei propri competitor.

**Simulazioni con sistemi a classificatore** I sistemi a classificatore uniscono l'approccio di reinforcement learning e gli algoritmi genetici.

Bagnall e Smith [11] propongono un modello del mercato elettrico del Regno Unito che utilizza un sistema a classificatore per lo sviluppo di strategie d'offerta. Il modello è composto da agenti produttori di energia elettrica, ognuno in possesso di una unità produttiva. Le fonti di produzione sono nucleare, carbone, gas e cicli combinati e presentano diversi costi fissi, costi di avviamento e di generazione. Il modello prevede anche dei vincoli sulla capacità di trasmissione e la domanda, sulla quale gli agenti formulano aspettative, varia con frequenza di due volte all'ora e gli agenti operano su di essa le proprie previsioni. Gli agenti sono suddivisi in tre tipi: *unconstrained*, *constrained on* e *constrained off*. Gli obiettivi degli

agenti consistono nell'evitare perdite e massimizzare i profitti e, durante la simulazione, gli agenti apprendono quale sia il modo più profittevole di offrire la propria produzione sul mercato. Ogni sistema a classificatore è costituito da tre componenti: la componente performance genera il vettore di stime dei *payoff* attesi per ogni azione possibile, la componente reinforcement modifica i parametri del set di regole correnti sulla base del *feedback* ambientale, la componente di scoperta della regola genera nuove regole a partire da quelle precedenti attraverso l'applicazione di algoritmi genetici. Con sorprendente aderenza a quanto si osserva nel mondo reale, il modello mostra come gli agenti imparano con il tempo e modificano i propri comportamenti esattamente come accade nel mondo reale, tendono a offrire prezzi più alti nei sistemi pay as bid (vd in Italia il mercato MSD) e il livello di cooperazione è basso data la molteplicità di possibili azioni disponibili per gli agenti.

**Simulazioni con agenti che massimizzano la funzione di offerta** Day e Bunn nel 2001 [28] hanno sviluppato un modello computazionale per comprendere le dinamiche del comportamento strategico nel mercato dell'energia. In particolare, modellizzano produttori di energia in competizione tra loro che operano su un mercato pool in un sistema UPA. La caratterizzazione metodologica dell'approccio scelto dagli autori consiste nel dotare gli agenti di una propria congettura sul comportamento dei competitors ipotizzando che si comporteranno esattamente come il giorno precedente e quotidianamente cerca di ottimizzare la funzione d'offerta. L'obiettivo per ogni produttore è la massimizzazione del profitto e, oltre alla modulazione della propria offerta, i produttori possono accedere al mercato finanziario stipulando contratti differenziali (CFD) con i quali è possibile trasferire il rischio prezzo. Le dinamiche generate dalla simulazione sono davvero interessanti. Innanzitutto, il comporta-

mento degli agenti genera dei cicli nei livelli di prezzo<sup>45</sup>. Il modello computazionale permette, inoltre, di spiegare come mai viene generalmente osservato che per avere concorrenza nel settore elettrico c'è bisogno di avere indici di concentrazione più bassi rispetto agli altri settori (questa sarà un'evidenza piuttosto ricorrente in molte delle simulazioni qui riportate). Tali conclusioni rappresentano, dal punto di vista normativo, una fondazione computazionale dell'attività di policy implementata in Inghilterra e Galles attraverso l'imposizione dell'obbligo di dismissione di parte della propria capacità produttiva imposto ai due più importanti player di mercato dell'epoca.

## 7 L'utilizzo degli ABM nella regulation del mercato elettrico

L'utilizzo dei modelli computazionali quali strumenti di analisi al servizio delle decisioni del legislatore sono già una realtà in alcuni paesi. Lo scopo è quello di indagare i vari strumenti di market design a disposizione del legislatore per perseguire gli obiettivi di interesse pubblico quali la limitazione dell'esercizio di potere di mercato, l'affidabilità della rete e, più in generale, la salute del sistema di generazione elettrica.

L'esempio più importante è sicuramente l'Electricity Market Complex Adaptive System (EMCAS) sviluppato dagli Argonne Laboratories<sup>46</sup> di Chicago, uno dei più grandi laboratori del Dipartimento americano per l'Energia. L'EMCAS è un ABM che nasce appositamente per l'esigenza di comprendere e regolare le dinamiche instabili osservate nei processi di liberalizzazione. Gli approcci tradizionali riuscivano in molti casi a

<sup>45</sup>Si tratta dei cosiddetti cicli di Edgeworth, ossia variazioni asimmetriche e cicliche del livello dei prezzi che tenderà a muoversi dal livello di equilibrio verso il costo marginale e viceversa.

<sup>46</sup>Argonne Laboratories, con un budget di ca. \$mln 794 nel 2012, impiega oggi più di 1.250 scienziati e ingegneri che si occupano dei temi strategici nel campo dell'energia, dell'ambiente e della sicurezza nazionale.

prevedere l'esito dei processi di liberalizzazione, ma erano molto carenti nel prevedere o spiegare la meccanica dell'evoluzione del mercato da un monopolio verticalmente integrato ad un sistema liberalizzato. Gli agenti del modello sono tutti i principali attori presenti nella filiera produttiva.

## 8 UPA vs DPA negli ABM

In questa sezione vengono presentati alcuni paper nei quali si cerca, attraverso l'utilizzo di ABM di dare una risposta al quesito su quale sia il miglior meccanismo di asta per il settore elettrico.

**Il caso italiano** Sulla scorta del dibattito italiano<sup>47</sup>, Guerci e Rastegar [38] hanno proposto una valutazione degli effetti del passaggio dal sistema UPA (che attualmente vige in Italia nel mercato MGP e MI nonostante i propositi legislativi di cambiamento) al sistema DPA. L'importanza di questo lavoro, oltre che per la validità tecnica dell'operato dei due autori, è a mio avviso individuabile nel fatto che costituisce un esempio di come lo strumento ABM può essere utile al legislatore in sede di market design. In questo caso, infatti, la simulazione è stata eseguita in una fase in cui la modifica dell'assetto normativo non era ancora stata definita e pertanto, l'analisi di impatto non poteva contare su evidenze empiriche se non quelle relative ad altri paesi (es. Inghilterra e Galles) difficilmente adattabili al contesto italiano. Gli autori giungono a conclusioni completamente opposte rispetto agli obiettivi dichiarati di policy (diminuzione del livello dei prezzi nel mercato elettrico).

Nel modello proposto, gli agenti sono di due tipi e rappresentano i produttori di energia elettrica e gli acquirenti. I produttori che hanno costi marginali costanti e direttamente dipendenti dal costo unitario del combustibile. Il market clearer, il Gestore del Mercato Elettrico, massimizza il benessere sociale garantendo che l'energia totale sia prodotta

---

<sup>47</sup>vd 1.1.1

al costo minore possibile nell'ipotesi di domanda anelastica e tenendo conto dei vincoli tecnici della rete di trasmissione<sup>48</sup>. Coerentemente con quanto accade nella realtà, gli autori hanno suddiviso il mercato in zone e ogni operatore in merit verrà remunerato al local marginal price (SMP della zona di appartenenza). Inoltre, nel modello la topologia della rete è riprodotta fedelmente. Sia i produttori che gli acquirenti biddano ogni ora sul mercato e apprendono con l'algoritmo di Erev-Roth e il modello presentato è stato calibrato rispetto ai dati reali. Gli autori dimostrano che il passaggio da UPA a DPA comporta, almeno per la struttura del mercato italiano, un rilevante aumento dei prezzi dovuto principalmente al processo di learning uguale per ogni agente a causa del quale sembra ravvisarsi una sorta di coordinamento implicito che porta a equilibri di prezzo più alti in DPA. Inoltre, come previsto dalla letteratura, i due tipi d'asta modificano la profittabilità relativa delle diverse tecnologie: ad esempio, nell'UPA la tecnologia più redditizia è dimostrato essere il carbone e la meno redditizia è il repower, mentre invece in DPA il repower è la tecnologia più profittevole assieme a olio combustibile e cicli combinati.

**Prezzi e volatilità** Un contributo interessante è quello proposto da Xiong, Okuma e Fujita [89]. Gli autori sviluppano un ABM in cui gli agenti, a differenza di quanto visto per il caso italiano, apprendono con il Q-learning. Il focus degli autori è sul livello e volatilità dei prezzi. Il contesto di riferimento è il classico mercato del giorno prima in concorrenza nel quale gli operatori conoscono quotidianamente soltanto la quantità che hanno offerto e piazzato sul mercato ed il prezzo di clearing per ognuna delle ventiquattro ore nelle quali si articola il mercato. I produttori non scelgono la quantità da offrire, ma solo il prezzo (si tratta di una limitazione piuttosto comune in letteratura e ha scopo meramente semplificativo). Lo stato del sistema è rappresentato ogni giorno dai ventiquattro

---

<sup>48</sup>Il meccanismo di massimizzazione è conosciuto in letteratura con il nome di DC optimal power flow.

clearing price del giorno precedente che vengono assunti come migliore stima della prezzi per la giornata in corso. L'agente, registrati tali prezzi, sceglie i ventiquattro prezzi che gli permettono per presentare l'offerta che massimizza il proprio profitto che calcolerà con i dati di mercato disponibili a fine giornata. Nel modello i produttori sono 10, suddivisi in due gruppi con parametri differenti dell' algoritmo di learning.

Le evidenze presentate dagli autori sono in parte inaspettate e sembrano corroborare le argomentazioni politiche per il passaggio dall'UPA al DPA. Infatti, per Xiong et al. tale modifica comporta una diminuzione di prezzi e volatilità. Il lavoro conferma inoltre che, date le differenti modalità di bidding nei due meccanismi, la curva d'offerta si presenta più inclinata in UPA rispetto al DPA.

**Il problema del potere di mercato** Bakirtzis e Tellidou [12] indagano il tema del potere di mercato introducendo utilizzando una variante del Q-learning, il Simulated Annealing Q-learning (SA-Q-learning) sviluppato da Guo et al. [39]. Gli autori guardano al comportamento dei produttori che presentano le offerte ad un ISO. Nel modello i produttori offrono tutta la propria capacità, pertanto l'unica variabile di controllo è il prezzo e non sono possibili strategie di capacity withholding. Inoltre, i produttori non conoscono le strutture di costo dei propri competitor.

Per esaminare il tema del potere di mercato, gli autori runnano la simulazione ipotizzando una struttura di mercato con un'impresa incumbent in grado di poter far fronte a tutta la domanda con la propria capacità produttiva e poi ripetono la stessa simulazione nell'ipotesi di confronto nella quale la capacità dell'incumbent è ripartita tra tre soggetti diversi per avere una struttura di mercato più equilibrata.

Lo stato del sistema è rappresentato all'agente da un'unica variabile, il clearing price sul mercato, come un'unica azione, la scelta del prezzo, può essere implementata dall'agente. Considerato il set di possibili scelte e la

rappresentazione delle variabili di stato del sistema, il quadro delineato dagli autori è piuttosto scarno, tuttavia, le dinamiche riprodotte dalla simulazione sono molto interessanti.

Infatti, gli autori dimostrano che un'incumbent impara a biddare ad un prezzo che massimizza i suoi profitti, lo stesso prezzo che verrebbe applicato da un'incumbent con perfetta informazione sulla struttura di costo degli altri operatori di mercato. In particolare, il processo di learning funziona sia in UPA che in DPA generando gli stessi esiti di mercato e apparentemente dimostrando l'indifferenza tra i meccanismi di asta in condizioni di mercato non concorrenziale.

**Model-based adaptation di Bower e Bunn** Bower e Bunn [20] offrono un ulteriore importante contributo nel dibattito UPA vs DPA. Il lavoro rappresenta un arricchimento e una prosecuzione dell'articolo dell'anno precedente. Anche in questo caso l'approccio di riferimento è il model-based adaptation e il modello di riferimento.

Gli autori dimostrano ancora l'impotenza dell'auction design nel caso di mercato oligopolistico perché con questa struttura di mercato gli agenti riescono sempre ad apprendere come biddare per generare equilibri collusivi. L'asimmetria informativa, secondo quanto concluso nel lavoro, ha un impatto maggiore un DPA piuttosto che in UPA.



## Part III

# Experimental economics

La letteratura di experimental economics sul design del mercato elettrico è piuttosto recente. Muove, infatti, i primi passi a partire dalla metà degli anni Ottanta. Nell'ambito del mercato elettrico, vengono assegnati da Staropoli e Jullien [75] due importanti obiettivi alla experimental economics:

1. Ricerca di fatti e significati: consiste nella ricerca di regolarità derivanti dall'utilizzo del laboratorio come primo luogo nel quale introdurre le novità istituzionali per valutare le performance delle eventuali novità legislative. Si tratta di un ruolo che può essere ricoperto soltanto dall'experimental economics in quanto, poiché si tratta di valutare innovazioni, per definizione non ci possono essere dati empirici da raccogliere e valutare. L'utilizzo non si limita semplicemente a mera prova dei fatti precedente ad un eventuale nuovo assetto regolatorio, ma anche per gettare le basi di nuova teoria, permettendo al ricercatore l'osservazione di dati sperimentali conseguenti alla modifica di un ambiente complesso.
2. Indicazioni per i teorici: la teoria economica deve necessariamente fondare su basi microeconomiche l'analisi dei comportamenti degli operatori del settore elettrico. È quello che comunemente accade nella comparazione di due design di mercato quali possono essere il DPA e l'UPA. Tuttavia, come osserva Milgrom [63], la teoria tradizionale schematizza e semplifica troppo i comportamenti umani, soprattutto i comportamenti strategici degli esseri umani che, in qualche modo, uniscono alla teoria esperienza e senso pratico.

Tra i maggiori risultati raggiunti dalla experimental economics nello studio del settore elettrico, vi è sicuramente il contributo sulla comprensione degli

effetti dell'auction design sui comportamenti degli operatori e sugli esiti di mercato, in particolare nel dibattito DPA vs UPA.

**Primi passi significativi** Il primo contributo della experimental economics nel dibattito DPA vs UPA risale al 1990 con il lavoro di Hahn e Van Boening [40]. Gli autori confrontano un particolare tipo di DPA, la split-saving rule (SSR). Nella SSR le offerte in acquisto e vendita vengono presentate e ordinate in ordine di merito per poi essere accoppiate. Il prezzo finale di ogni transazione si determina come la media dei due prezzi in acquisto e vendita per quella transazione. I partecipanti furono selezionati tra gli studenti delle università Carnegie Mellon University e University of Arizona ed era prevista una remunerazione pari al profitto conseguito nell'esperimento. L'esperimento veniva condotto sia sul lato della domanda che sul lato dell'offerta, pertanto alcuni partecipanti assumevano il ruolo di produttori mentre altri simulavano gli acquirenti. In particolare, ogni tornata di esperimento coinvolgeva gruppi da quattro buyer e quattro seller, nella convinzione che quattro soggetti operanti sul mercato fosse un numero sufficiente per convergere all'equilibrio competitivo. Gli autori giungono ad un primo importante risultato: le deviazioni dei prezzi dall'equilibrio competitivo sono più probabili in regime DPA rispetto all'UPA. Si tratta di un risultato in contrasto con quello che, come visto precedentemente, sarebbe stata da lì a qualche anno la tendenza legislativa nel Regno Unito. Tutti e due i meccanismi risultavano molto efficienti (sopra il 90% nei dati presentati dagli autori), sebbene anche da questo punto di vista l'UPA sembrava preferibile.

**Efficienza dell'UPA** Schulze et al. [16] propongono uno studio sperimentale sul market design ottimale per il mercato elettrico all'ingrosso evidenziandone l'impatto sul prezzo retail e sulla stabilità del sistema. Infatti, l'obiettivo degli autori è individuare l'impatto di due forme alternative di UPA su prezzi e efficienza di mercato. Il framework di riferimento

vede un unico buyer, l'independent system operator, e diversi produttori che offrono il proprio output in un'asta single-sided. La domanda è ipotizzata completamente anelastica e pari alla metà della capacità produttiva massima dell'intero parco produttivo. Le due declinazioni di UPA che vengono testate sono la last-accepted-offer (LAO) e la first-rejected-offer (FRO). La LAO prevede che tutti i produttori inviino le proprie offerte in busta chiusa, offerte che verranno in un secondo momento ordinate in ordine di merito (dalla più bassa alla più alta). Il compratore acquisterà la quantità di energia domandata (curva di domanda completamente verticale) remunerando i produttori che avranno presentato le offerte più basse con il prezzo marginale dell'ultima offerta accettata. La FRO ha un meccanismo simile alla LAO, ma, contrariamente a quest'ultima, prevede che il prezzo finale uguale per tutti i partecipanti sia fissato pari alla prima delle offerte non accettate. I partecipanti all'esperimento, reclutati tra gli studenti della Cornell University, furono suddivisi in gruppi da due, quattro e sei partecipanti al fine di rappresentare strutture di mercato rispettivamente di duopolio, aderenti alla realtà e in concorrenza. Ogni partecipante rappresentava un produttore, ognuno con un portafoglio costituito da tre generatori con costi parametrati ai reali livelli di baseload, midlevel e off-peak. La capacità produttiva totale era uguale per ogni produttore, ma variava la distribuzione della capacità tra gli impianti in dotazione. I partecipanti avevano piena informazione sul livello di domanda, ma non sulla struttura di costi dei competitors. Il primo importante risultato suggerito dall'esperimento è che la numerosità dei gruppi ha un impatto su prezzi ed efficienza di mercato molto più significativo rispetto al design di mercato. I prezzi, infatti, sono risultati essere in media più che doppi nei gruppi con due soggetti rispetto ai gruppi da sei. In termini di efficienza<sup>49</sup>, tutti gruppi hanno mostrato livelli bassi, sebbene la convergenza dei gruppi più numerosi verso gli stessi livelli di efficienza

<sup>49</sup>Per efficienza viene intesa la capacità del sistema di produrre la quantità di bene domandata al minor costo possibile

dei gruppi meno numerosi è stata più rallentata. Rispetto all'efficienza, sia la LAO che la FRO hanno mostrato performance simili.

**Smart market** Mount et al. [65] offrono un brillante esempio dell'utilizzo della sperimentazione per lo studio dei differenti meccanismi di asta per il mercato elettrico. In particolare, si focalizzano sul tema oggetto di studio di questo lavoro, ossia sulle performance relative della DPA e UPA. L'esperimento proposto è stato realizzato sulla piattaforma informatica POWERWEB, inizialmente ideata da Bob Thomas nel 1995. POWERWEB è costruito sull'idea di smart market<sup>50</sup> proposta da Vernon Smith. Rispetto agli altri lavori di experimental economics, l'utilizzo di questa piattaforma garantisce la possibilità di introdurre vincoli sulle capacità trasmissive della rete elettrica simili ai vincoli che si incontrano in realtà. Inoltre, l'utilizzo della piattaforma arricchisce l'analisi attraverso l'introduzione di due fenomeni generalmente osservati nella realtà: le perdite di energia in fase di trasmissione e la congestione.

Nell'esperimento, la rete elettrica è composta da trenta nodi e sei generatori e i partecipanti interpretano il ruolo di produttori che presentano offerte (quantità/prezzo) per immettere energia in rete. I partecipanti conoscono i costi del proprio portafoglio di impianti, la capacità installata totale, le previsioni sulla domanda per il turno di aste successivo e le eventuali limitazioni di sistema sui prezzi massimi. Ogni offerta presentata da un produttore include dei cosiddetti standby costs, indipendentemente dal fatto che quest'ultima sia in merit o no. L'obiettivo prefissato per i partecipanti è la massimizzazione del profitto. Il premio monetario ricevuto dai partecipanti alla fine dell'esperimento sarà direttamente proporzionale al profitto raggiunto durante la simulazione. Inoltre, il profitto sarà ri-

---

<sup>50</sup>Uno smart market è strutturato come un pool nel quale vengono effettuate delle aste con periodicità regolare a valle delle quali il market clearer, attraverso la programmazione lineare, aggrega domanda e offerta e procede all'accoppiamento di tutte le offerte. Il mercato elettrico è un tipico esempio di smart market poiché le offerte in domanda e in offerta si ripetono con frequenza oraria e il market clearer deve svolgere il proprio ruolo tenendo conto dei vincoli di sistema quali la capacità di trasmissione e i requisiti di funzionamento della rete.

parametrato in base alla categoria di appartenenza del soggetto partecipante, e, quindi, aumentato o diminuito a seconda che il partecipante sia rispettivamente un professionista del settore elettrico o uno studente.

Ad ogni partecipante è affidata la stessa capacità produttiva e ad ogni periodo di trading è associato un costo fisso uguale per tutti che rappresenta gli oneri della struttura finanziaria del capitale investito.

Le tornate di esperimento sono condotte con quattro varianti: UPA del tipo LAO a domanda anelastica, UPA del tipo LAO a domanda anelastica con possibilità di interruzione dell'immissione di energia in rete, DPA a domanda anelastica, asta con soft-cap a 75 \$/MWh e domanda anelastica.

La prima conclusione che suggeriscono i risultati dell'esperimento è vicina ai risultati di [16]: per avere concorrenza nel settore elettrico sono richiesti più operatori di quanto non accada negli altri settori. Gli studiosi concludono, infatti, che sei produttori non sono sufficienti per arrivare ad un equilibrio con prezzi efficienti. L'esperimento mostra, inoltre, che l'UPA tende a produrre numerosi spike sui prezzi medi, meno osservabili nel caso DPA e soft-cap. La situazione si inverte guardando ai prezzi medi, in quanto l'UPA rappresenta il sistema con prezzi più bassi tra quelli analizzati nell'esperimento. La volatilità è, invece, un fattore a vantaggio del DPA.

**Impatto della domanda** Abbink et al. [3] focalizzano la propria analisi sulla domanda, interrogandosi su quali siano gli effetti dell'incertezza dal lato della domanda sulle due istituzioni DPA e UPA. Nel loro design sperimentale, i produttori affrontano soltanto due tipi di costi: i cosiddetti “avoidable costs”<sup>51</sup> e i costi marginali. Nel set sperimentale i produttori, in gruppi da quattro, sono generalmente suddivisi in due produttori a basso costo e due ad alto costo, in maniera tale da replicare la dinamica tra i pro-

---

<sup>51</sup>Per avoidable cost si intende tutti quei costi che non devono essere sostenuti se il produttore decide di non produrre l'energia.

duttori baseload che hanno alti avoidable cost<sup>52</sup> ma bassi costi marginali e i produttori peak con bassi avoidable cost ma alti costi marginali. I due regimi DPA e UPA vengono sperimentati nei due differenti scenari di informazione completa e informazione asimmetrica sulla domanda. Sorprendentemente, gli autori verificano che le differenze tra i due sistemi non sono significative quando c'è completa informazione sulla domanda, mentre con asimmetria informativa la DPA si rivela un'istituzione non performante dal punto di vista dell'efficienza. La DPA implica anche prezzi più alti e molti più picchi rispetto alla UPA. Questi risultati suggeriscono al legislatore di focalizzare l'attenzione sulla distribuzione dell'informazione più che al design istituzionale del mercato.

**Il trade-off tra volatilità e livello dei prezzi** Rassenti, Smith e Wilson [71] indagano un particolare aspetto del confronto tra le due istituzioni di mercato oggetto dell'analisi del presente lavoro, ossia la volatilità indotta sul mercato elettrico. La volatilità è una caratteristica molto importante per il mercato elettrico, tant'è che parte della letteratura ha dedicato particolare attenzione al ruolo che gli strumenti di copertura (principalmente i contratti forward di acquisto e vendita di energia) utilizzati per fronteggiare tale volatilità rivestono nella determinazione degli esiti di mercato. Per gli operatori è un tema particolarmente attuale e sentito, soprattutto a fronte della necessità di ricorrere ai mercati finanziari per reperire il funding necessario alla realizzazione di investimenti di medio-lungo periodo che caratterizzano il settore. Comprendere la volatilità e gestirla è, in alcuni casi, più importante del comprendere il livello dei prezzi di mercato in quanto un'incapacità di determinare la volatilità (incertezza che equivale in termini di funding a ipotizzare una volatilità molto elevata) può richiedere un apporto di mezzi propri molto più alto rispetto ad una previsione di prezzi (e quindi ricavi) bassi

---

<sup>52</sup>Ad esempio i costi di start up

con un effetto peggiorativo rispetto alla capacità di investimento del settore. Il contesto di mercato presentato dagli autori è piuttosto realistico in quanto, oltre a riprodurre le tipologie di impianti tipiche di tutti i set sperimentali, la domanda viene segmentata in domanda “interruptible”, ossia quei contratti di fornitura che prevedono la possibilità per l’acquirente di sospendere la fornitura nel caso in cui il prezzo del bene fornito supera una soglia determinata ex ante, e domanda “must serve”, ossia quella parte di domanda necessariamente anelastica. Gli autori si propongono di controllare il potere di mercato attraverso un opportuno setting della capacità produttiva e della tipologia di impianti dei singoli produttori, in maniera tale che nessun produttore possa unilateralmente abbassare il proprio livello di produzione e portare ad un innalzamento dei prezzi al di sopra dei prezzi di concorrenza. Gli esperimenti sono, pertanto, condotti in due scenari: potere di mercato e assenza potere di mercato. Questa è una caratteristica molto importante del lavoro degli autori perché i mercati reali presentano delle situazioni nelle quali, almeno localmente o per periodi limitati, alcuni soggetti possono esercitare potere di mercato. Il che è vero soprattutto per il mercato italiano. L’esperimento è stato condotto attraverso l’utilizzo di un software appositamente sviluppato dagli autori in quattro sessioni da novanta minuti ciascuna e i partecipanti erano tutti studenti dell’Arizona University, i quali erano completamente informati sulle caratteristiche della capacità produttiva di tutto il mercato, ma non avevano alcuna informazione sulla struttura della domanda.

I risultati dell’esperimento sono significativi. In assenza di potere di mercato, nelle ore off-peak e shoulder i prezzi UPA tendono a convergere a quelli di equilibrio competitivo, mentre i prezzi DPA si dimostrano sensibilmente più alti, mentre nelle ore di picco queste differenze vengono limitate. Inoltre, con UPA e assenza di potere di mercato, soprattutto nelle ore shoulder, il mercato elettrico registrerà prezzi di equilibrio al di sopra dei prezzi prevedibili con un modello à la Bertrand, ma comunque con

livelli di efficienza elevati. I prezzi più alti associati alla DPA si traducono in minore efficienza e in un eccesso di capacità produttiva non utilizzata. La rendita marginale rivelata, e questo è un risultato prevedibile e in linea con l'analisi classica, è più alta in UPA in quanto in DPA vi è incentivo a biddare prezzi uguali per ogni fonte produttiva. Un risultato imprevedibile proposto dagli autori è il seguente: nelle ore shoulder, la DPA in assenza di mercato produce esiti (non-) competitivi paragonabili a quelli della UPA in condizioni di potere di mercato. Nel lavoro degli autori l'UPA sembra rappresentare l'istituzione di mercato migliore, se non per un aspetto: la volatilità. In condizioni di assenza di mercato, la varianza dei prezzi è più bassa in DPA rispetto alla UPA. La DPA, dunque, pur avendo degli effetti benefici in termini di riduzione della volatilità dei prezzi, può rivelarsi un'involontaria facilitazione della collusione tacita per i produttori: ecco individuato un importante trade-off che il legislatore deve tenere a mente.

**Letteratura di confronto** In modo molto interessante, qualche autore si è spinto a trattare il problema DPA vs UPA utilizzando entrambi gli approcci presentati nel presente lavoro. I risultati a cui giungono Trinh, Saguan e Meeus [79] presentano il principale vantaggio di mettere in luce, più o meno volontariamente, alcuni degli aspetti che differenziano le due metodologie e la robustezza dei risultati ottenibili. Gli autori applicano i due approcci ad un contesto di mercato che stilizza i tratti del mercato elettrico europeo nel quale le linee di trasmissione sono settate appositamente per contemplare la possibilità di generazione di congestioni che rendono più realistiche le simulazioni. La domanda anelastica è servita dall'output di 14 produttori con capacità produttive e costi marginali diversi. Nell'esperimento di laboratorio, agli studenti della facoltà di ingegneria elettrica dell'università di Lovanio (Belgio) partecipanti all'esperimento era richiesto di interpretare il ruolo di produttori e biddare



la propria capacità produttiva sul mercato. Utilizzando l'approccio ABM l'attività per gli agenti rimane la presentazione di offerte di vendita di energia elettrica e l'obiettivo è, come per gli studenti, la massimizzazione del profitto. Quello che cambia è il meccanismo di learning: gli autori scelgono di utilizzare l'algoritmo di Erev-Roth. I risultati ottenuti indicano una elevata varianza tra i risultati ottenuti tra le varie sessioni con gli esseri umani, segnale interpretabile con un fenomeno comune negli esperimenti con esseri umani: il condizionamento reciproco. Gli studenti, inoltre, hanno mostrato una maggiore rapidità di apprendimento della strategia ottimale arrivando a razionalizzare le proprie scelte in un numero limitato di ripetizioni, mentre, invece, gli agenti hanno mostrato una convergenza verso la strategia ottima solo dopo un numero di gran lunga più elevato di round. Questo risultato non è, a parere di chi scrive, generalizzabile in quanto la velocità di apprendimento in un algoritmo Erev-Roth dipende dal setting iniziale dei parametri dell'algoritmo. Differenze così importanti nel ritmo dell'apprendimento andrebbero indagate ulteriormente e, per quanto possibile, annullate in fase di calibratura del modello ABM. Un risultato generalizzabile è, invece, il seguente: la simulazione ABM genera equilibri di mercato nei quali si osservano prezzi significativamente più alti rispetto all'esperimento di laboratorio, così come pure i profitti generati dagli agenti software sono nettamente superiori rispetto a quelli degli esseri umani. Posti i (non modificabili) limiti computazionali degli esseri umani, un set sperimentale che non prevedeva un valido sistema di incentivi ha molto probabilmente portato ad una sottoperformance degli individui rendendo i risultati dei due approcci non paragonabili.

## Part IV

# ABM vs Experimental

## Economics: discussione

L'economista è oggi chiamato al compito importante del design delle istituzioni di mercato. Per spiegare il ruolo della design economics, Alvin E. Roth traccia un parallelo interessante tra la teoria economica, il design dei mercati, la fisica e l'ingegneria utilizzando l'esempio dei ponti sospesi. Nella costruzione di un ponte sospeso, il modello formalizzato gode di propria eleganza e formalizzazione analitica, ma la vera e propria costruzione del ponte richiede di dover affrontare delle complicazioni alle quali la trattazione analitica non trova risposta e per le quali è necessario l'approccio computazionale. Ingegneria e fisica sono complementari ed entrambe necessarie per la realizzazione del progetto, in quanto si tratta di un progetto complesso. Così per il design dei mercati l'approccio analitico si limita alla progettazione del ponte sospeso, ma non può essere sufficiente se non accompagnato dall'approccio computazionale. Gli esempi di regulation citati (vd. pag. 23) sono sintomatici della necessità per il legislatore di utilizzare gli approcci computazionali nel costruire i market design e non limitarsi alle semplici conclusioni teoriche che, in una realtà complessa, trascurano gli aspetti che portano all'ordine senza piano<sup>53</sup>.

Di seguito, e questo è il contributo principale del presente lavoro, vengono individuati alcuni temi metodologici e relativi ai risultati ottenibili con i due approcci presentati, che devono costituire per il legislatore una guida nella selezione del miglior metodo computazionale nella scelta dell'auction market design per il settore elettrico. L'idea del confronto tra i due metodi deriva dal lavoro di Duffy[30].

---

<sup>53</sup>Per la definizione di "ordine senza piano" si rimanda a [47]

## 8.1 Due approcci diversi: discussione sul metodo

**Costi** Gli ABM rispetto agli esperimenti di laboratorio presentano costi di implementazione più bassi per via della dotazione informatica più ridotta e dell'assenza di costi relativi al sistema incentivante per i partecipanti all'esperimento. Idealmente, per runnare un ABM è sufficiente un elaboratore elettronico, mentre per gli esperimenti è richiesto il laboratorio con relativa dotazione hardware. In realtà, queste affermazioni sono solo parzialmente vere. Fatti salvi i costi relativi al sistema incentivante, la tecnologia permette sicuramente un risparmio di costi. Ad esempio, in alcuni casi sono state sviluppate delle specifiche piattaforme come POW-ERWEB ([65]) attraverso le quali è stata possibile la partecipazione attraverso collegamento da remoto su base web, ottenendo in questi casi un risparmio sui costi di laboratorio. D'altra parte, un ABM può essere davvero molto costoso nel caso in cui si volesse replicare un determinato assetto infrastrutturale o produttivo realmente esistente.

**Learning** Sono stati analizzati in precedenza i vari algoritmi di learning utilizzati nella modellistica ABM. L'apprendimento attraverso algoritmi formalizzati permette di isolare il fenomeno e di comprenderne con relativa precisione l'impatto sull'evoluzione dei comportamenti individuali e del comportamento del sistema. Negli esperimenti con gli esseri umani, invece, l'apprendimento dei soggetti può essere in qualche modo guidato, ma difficilmente è possibile controllarne l'evoluzione. Nella letteratura sul settore elettrico vengo selezionati come partecipanti agli esperimenti soggetti che per caratteristiche e background culturale possono essere molto simili rispetto a chi, nei contesti aziendali di riferimento, si occupa di attività di bidding. Tuttavia, rispetto agli agenti software, ogni partecipante presenta capacità di apprendimento che possono essere solo stimate ex ante ed il cui impatto sulle performance nell'esperimento non è determinabile con precisione ex post.

**Controllo variabili** Gli esseri umani presentano delle caratteristiche proprie come cultura, stato d'animo, freschezza mentale, esperienza rispetto allo stesso esperimento, credenze religiose... non misurabili prima delle prova sperimentale.

Il design degli agenti software, invece, permette di avere un'informazione completa sulle variabili di stato del sistema agente che impattano sull'esito del mercato. Le variabili di stato iniziali sono settate ad hoc dallo sperimentatore ed è possibile discriminare tra gruppi di agenti con caratteristiche diverse anche se queste ultime non sono osservabili nella realtà. Molto spesso infatti nella sperimentazione con soggetti umani, i partecipanti vengono suddivisi in gruppi a seconda delle loro caratteristiche osservabili e ritenute significative ai fini del problema trattato. In particolare, spesso la sperimentazione viene condotta con un gruppo di soggetti che presentano una determinata caratteristica e con un gruppo di soggetti privi della stessa, il cosiddetto gruppo di controllo. Le conclusioni a cui può giungere la sperimentazione sono in questi casi vere solo all'interno di un certo intervallo di confidenza, mentre per la simulazione questo problema viene superato dalla perfetta visibilità su tutte le variabili di stato dell'esperimento.

**Time** Il tempo è un aspetto caratterizzante dei fenomeni dinamici. Il laboratorio umano è adatto a spiegare fenomeni di breve periodo in quanto i contesti decisionali possono essere replicati un numero relativamente limitato di volte, mentre alcuni fenomeni convergono all'equilibrio solo asintoticamente e dopo un numero elevato di ripetizioni. Gli ABM offrono risultati più robusti nel momento in cui si tratta di analizzare fenomeni di lungo o lunghissimo periodo, come ad esempio l'impatto del sistema UPA piuttosto che il DPA sulle scelte di investimento e quindi nella composizione del portafoglio di impianti dei produttori. D'altra parte, è necessario tener conto del fatto che il tempo della simulazione ABM è dif-

facilmente calibrabile rispetto al tempo reale per via di fenomeni quali il learning che in natura può avere ritmi completamente diversi al learning indotto attraverso l'utilizzo degli algoritmi descritti.

**Struttura incentivi** Il grande vantaggio nell'utilizzo degli ABM è che la struttura di incentivi è completamente irrilevante, mentre invece una delle difficoltà, forse la maggiore, nella strutturazione di un esperimento con esseri umani consiste nel definire la giusta struttura di incentivi in quanto è necessario proporzionare il premio reale concesso ai partecipanti con il payoff effettivamente conseguito nell'esperimento. Inoltre, l'entità del premio monetario per i partecipanti deve essere commisurata alla natura dei partecipanti stessi. Si tratta di un tema già noto in letteratura e trattato da Davis e Holt [26] per i quali una struttura di incentivi efficace deve presentare il requisito della saliency, ossia i soggetti devono percepire il legame tra i risultati conseguiti nell'esperimento e i premi monetari che devono essere superiori al costo individuale di prendere decisioni ed effettuare transazioni. In alcuni esempi di letteratura, sono stati condotti esperimenti che coinvolgevano studenti e professionisti del settore energetico ed è stata prevista una remunerazione differenziata (più del triplo quella per i professionisti rispetto a quella degli studenti) per tenere conto del fenomeno appena descritto. Il problema non è di semplice soluzione, in quanto l'impossibilità di misurare la bontà del sistema di incentivi non permette di discriminare tra i limiti della razionalità umana ed una struttura di incentivi inappropriata.

**Replicabilità** Tra le potenzialità implicite degli ABM vi è la possibilità di resettare dopo ogni tornata i risultati ottenuti e replicare l'esperimento per un numero illimitato di volte. Con i soggetti umani non è possibile replicare lo stesso esperimento perchè non esiste la possibilità di reset: lavorando con le stesse persone, queste ultime avranno già appreso i meccanismi dell'esperimento e i risultati non saranno confrontabili con

l'esperimento precedente. Lavorando su un campione differente (come spesso viene previsto negli esperimenti reali), cambia certamente il background dei soggetti. Allo stesso modo, anche se per un motivo diverso, il confronto potrebbe non essere possibile.

**Dipendenza da condizioni iniziali** Negli esperimenti con soggetti umani non è possibile isolare l'impatto delle condizioni esterne e anteriori rispetto all'esperimento stesso. Lo stesso problema, evidentemente, non si pone con gli ABM.

**Numero di ripetizioni** Con gli esseri umani il numero di ripetizioni dell'esperimento non può essere elevato per evidenti limiti fisici. Evidentemente, in esperimenti con durate lunghe, possono subentrare stanchezza o noia che impattano negativamente sulle performance.

**Controllo delle preferenze** Ogni persona ha una propria struttura di preferenze che guida e condiziona le scelte durante l'esperimento non modificabile dallo sperimentatore né tantomeno misurabile in maniera esatta. Non necessariamente le preferenze sono razionali o razionalizzabili, il che rappresenta un elemento di difficoltà che gli agenti software non presentano.

**Complessità del framework sperimentale** Gli esperimenti condotti con esseri umani devono necessariamente essere limitati nel tempo per ottenere un livello costante nelle prestazioni dei partecipanti. Il vincolo temporale impone che il framework decisionale proposto ai partecipanti sia abbastanza semplice da poter essere pienamente compreso o appreso velocemente durante l'esperimento. Pertanto, esiste un limite alla complessità del contesto e delle variabili di controllo a disposizione dei partecipanti dato dalle capacità di apprendimento di questi ultimi. Gli ABM consentono, invece, uno spettro decisionale più ampio, limitato solo

dalle capacità computazionali dell'hardware utilizzato e dalla difficoltà relativa alla progettazione degli agenti stessi.

**Tempi di elaborazione** Le sessioni di mercato nelle simulazioni ABM per il mercato elettrico hanno tempi brevissimi, in alcuni casi trascurabili. In laboratorio i tempi si dilatano per poter permettere a tutti partecipanti di elaborare le proprie scelte. Evidentemente, il tempo messo a disposizione dei partecipanti condiziona l'approfondimento e l'attenzione per i dettagli posti dai partecipanti.

**Gradi di libertà** Gli esseri umani lasciano allo sperimentatore pochi gradi di libertà. Con gli agenti la possibilità di poter determinare ogni singolo aspetto del contesto nel quale operano garantisce una libertà decisionale per lo sperimentatore che può foriera di importanti sviluppi. Da questo punto di vista, gli ABM possono tramutarsi da potente strumento di ricerca in un arma sterile al servizio del ricercatore. Il pericolo è di cadere nell'autoreferenzialità della modellizzazione fine a stessa. Lasciando al ricercatore l'arbitrarietà di dettagliare eccessivamente il sistema o, al contrario, di definirne dinamiche troppo lasche, l'aderenza alla realtà che deve rappresentare uno dei requisiti essenziali della sperimentazione.

**Rendimento decrescente della funzione di learning** Gli esseri umani apprendono con tassi decrescenti per via dell'effort sempre maggiore che deve essere profuso per apprendere delle informazioni con utilità marginale sempre più bassa. Per gli agenti software, sebbene le informazioni acquisite abbiano utilità marginale decrescente, continuano ad apprendere allo stesso ritmo. In linea di principio, l'esperimento con soggetti umani potrebbe apparire più vicino alla realtà e replicare meglio le dinamiche di mercato. Tuttavia, in un contesto di mercato dinamico come il mercato elettrico, nel quale ci sono diversi operatori che competono tra loro, la funzione di learning non è associata a specifiche persone che

operano come player di mercato. È possibile infatti parlare di una “intelligenza collettiva” generata dall’operare dei vari soggetti, ognuno motivato dalla ricerca del proprio profitto. Sarà pur vero che per il singolo individuo il tasso di learning sarà decrescente, ma per la comunità non è vero in quanto l’ipotesi più probabile è che nel momento in cui un soggetto stia sperimentando la fase piatta della curva di learning, ci siano altri individui il cui apprendimento abbia tassi di rendimento crescenti. A livello globale, il contributo che viene perso dal minore rendimento del primo soggetto, viene in qualche modo rimpiazzato dal contributo del secondo.

**Relazioni umane** Rispetto alla pratica di mercato, il limite comune alle due metodologie è replicare la dinamica delle relazioni umane che sui mercati è importante. In particolare, mi riferisco a tutta quella attività basata su informazioni ottenute attraverso il rapporto di natura puramente sociale. Quest’ultimo, infatti, è difficilmente riproducibile in quanto non misurabile. Il trader A potrà ottenere una determinata informazione privilegiata sul mercato dal trader B in quanto con quest’ultimo ha un rapporto umano coltivato in ambiti non contigui rispetto al mercato. In altre parole, i soggetti nella realtà prendono anche decisioni “politiche” non spiegabili dalle dinamiche strategiche limitate al mercato di riferimento.

**Razionalità limitata e cambiamenti nell’avversione al rischio** La calibratura dei parametri iniziali è un’attività importante sia nel caso dell’experimental economics che per l’approccio ABM. Si è già rilevato come per gli ABM in alcuni casi di simulazioni concrete (vedi il caso dell’algoritmo di learning in [79]) la calibratura possa portare a delle distorsioni nello svolgimento dell’esperimento nei confronti dello stesso lavoro eseguito nel laboratorio con soggetti umani. Molto spesso negli esperimenti i soggetti vengono posti di fronte a scelte probabilistiche: è quanto accade, ad esempio, nel caso di simulazioni con produttori che si



trovano a fronteggiare una funzione di domanda stocastica. Situazioni di scelta in condizioni di rischio o incertezza, se da un lato rappresentano il campo d'analisi nel quale l'experimental economics mostra i suoi maggiori pregi e benefici, dall'altro lato celano, nell'ottica del confronto tra experimental e modellizzazione ABM, un pericolo latente. Evidenze empiriche ormai consolidate indicano che nelle scelte in condizioni di incertezza teorie alternative alla teoria classica del valore atteso sembrano trovare maggior riscontro con la realtà. Si prenda il caso della prospect theory<sup>54</sup> e la funzione valore da quest'ultima contemplata. Nella funzione valore le probabilità associate ad ogni potenziale payoff vengono ponderate per un determinato fattore individuale tale per cui la funzione valore assume un caratteristico andamento a “S” risultando concava nell'area dei guadagni e convessa nell'area delle perdite in quanto, a parità di valore assoluto, una perdita comporta una diminuzione di valore atteso superiore al corrispondente guadagno. La stessa valutazione delle probabilità associate a singoli eventi tende ad essere distorta data la tendenza umana alla sovrastima delle probabilità alte e alla sottostima delle probabilità basse. Negli esperimenti con esseri umani questi fenomeni possono impattare in maniera determinante sull'esito della simulazione. I fenomeni di “razionalità limitata” appena descritti possono essere indotti deliberatamente nella programmazione degli agenti (è il caso degli agenti ibridi), ma in realtà l'utilizzo di tali tipologie di agenti nella letteratura sul mercato elettrico è un campo inesplorato e non necessariamente fertile. Data la difficile misurabilità in un contesto sperimentale dell'impatto delle deviazioni dalla razionalità, il confronto tra i risultati dei due approcci corre il serio rischio di essere semplicemente inappropriato.

**Herding** Negli esperimenti con esseri umani, come visto nei risultati ottenuti in [79], può manifestarsi quel fenomeno che potremmo definire di

---

<sup>54</sup>La prospect theory fu elaborata nel 1979 da Daniel Kahneman e Amos Tversky in contrapposizione alla teoria del valore atteso di von Neumann e Morgenstern.

“herding”, ossia l’idea (basata su ragioni più o meno fondate) generantesi in alcuni partecipanti che all’interno del gruppo ci sia qualche partecipante con un set informativo più ampio o con migliori capacità strategiche. In questo caso si può avere un effetto di condizionamento implicito delle scelte. Negli ABM l’herding può essere un fenomeno volutamente indotto, programmando appositamente alcuni agenti per avere un atteggiamento da “follower” rispetto al comportamento di altri agenti “first mover”.

## 8.2 Due approcci diversi: discussione sui risultati

Fin qui è stato effettuato un confronto epistemologico circa le caratteristiche dei due approcci e delle complessità che si nascondono nel confronto tra le due, con particolare attenzione al caso del settore elettrico. Di seguito viene proposta un’analisi dei risultati ottenuti con i due metodi limitatamente al problema UPA vs DPA suddividendo i risultati stessi negli aspetti più caratterizzanti delle due analisi. Evidentemente, la rilevanza e la validità di tali risultati sono limitati al mercato all’ingrosso dell’energia, ossia il mercato che è direttamente regolato da queste due istituzioni. Gli esiti del mercato retail a valle del mercato all’ingrosso rispondono a logiche differenti, quali, ad esempio, la struttura concorrenziale stessa del mercato retail o l’eventuale presenza di fornitori retail verticalmente integrati. Pertanto, è all’ambito del mercato all’ingrosso che vanno limitate le conclusioni qui riportate.

**Prezzi di equilibrio** Il livello dei prezzi di equilibrio sul mercato rappresenta una discriminante molto importante principalmente a livello politico. Basti pensare al fatto che storicamente il vessillo di ogni deregulation è stato la promessa di prezzi più bassi per i consumatori.

Le conclusioni sui prezzi di equilibrio sono piuttosto allineate tra experimental economics e simulazioni ABM. Il market mechanism che produce prezzi di equilibrio più bassi è l’UPA. Vi sono delle differenze di

valutazione relativamente a quale tipo di prezzi subisca maggiormente l'impatto del tipo di asta. Ad esempio i test di laboratorio tendono a non rilevare differenze significative per i prezzi di picco [71], mentre negli ABM questa tendenza sembra non essere presente e i prezzi in UPA si mantengono sempre significativamente più alti dei prezzi in DPA. Tuttavia, si segnala anche l'esistenza di risultati marginali nella letteratura ABM [89] che mostrano prezzi più alti in UPA rispetto che in DPA.

**Efficienza del mercato** L'efficienza consiste nel produrre tutta la quantità di output domandata al costo minore. La natura del problema è notevolmente cambiata con l'avvento del mercato e la frammentazione della produzione dal monopolista verticalmente integrato a beneficio di una pluralità di soggetti. Infatti, il problema nasce come una questione tecnica, ossia come un problema di ottimizzazione della produzione data una domanda conosciuta e, soprattutto, dato il costo marginale di ogni singolo impianto, il tutto sotto il vincolo della topologia di una rete di trasmissione detenuta e gestita in proprio. Con la produzione frazionata in più soggetti, l'efficienza di mercato non è più la soluzione di un problema centralizzato, ma dipende dalla capacità del meccanismo di coordinamento del mercato di individuare la combinazione produttiva più efficiente. L'UPA, incentivando a biddare al costo marginale, è sempre stato considerato come l'unico meccanismo di rivelazione della struttura dei costi dei produttori.

In contesti ABM l'UPA mostra una maggiore efficienza [20] principalmente perché in DPA la maggiore quantità di informazioni disponibili per gli operatori con le quote di mercato più grandi rende più lasca la pressione competitiva per questi ultimi che sono molto più facilitati nel presentare offerte che nascondono la struttura dei costi. In questo caso, l'informazione pubblica disponibile è molto scarsa e poco utilizzabile per la programmazione del funzionamento della rete.

Anche le evidenze sperimentali confermano una minore efficienza della DPA dovuta a minori livelli produttivi e alla selezione di tecnologie non basata sull'effettiva efficienza tecnologica. In DPA, infatti, si rileva dalle evidenze che i soggetti tendono a biddare ad un prezzo unico per tutte le fonti produttive.

Nella soluzione del problema di ottimizzazione della produzione, l'UPA ha per il legislatore sicuramente un enorme appeal e, coerentemente con quanto previsto dalla teoria classica, può costituire la risposta corretta. Tuttavia, il tema rimane aperto e discutibile.

**Potere di mercato** I processi di deregulation hanno portato a mercati oligopolistici, per questo motivo tra le discriminanti nella scelta del market design da parte del legislatore deve essere compresa la capacità dell'istituzione di mercato prescelta di mantenere un assetto quanto più competitivo possibile del mercato. Come visto in precedenza, il nodo teorico principale è la comprensione delle dinamiche di gaming tra gli operatori a fronte dell'auction mechanism del mercato. Attraverso la simulazione ABM [12] è possibile dimostrare che, con la presenza di un'incumbent, UPA a DPA producono prezzi di equilibrio pressoché identici e molto vicini rispetto al prezzo di monopolio con una sola significativa differenza: gli altri player di mercato, in DPA biddano a livelli più alti e più lontani dal proprio costo marginale rispetto ai livelli osservati in UPA. Con una struttura di mercato più equilibrata, quindi eliminando il potere di mercato dell'incumbent suddividendone la capacità installata tra gli altri operatori, l'UPA performa meglio della DPA. Il lavoro di [20] corrobora l'idea dello scarso impatto del tipo di asta sulla concorrenzialità del mercato, rilevando che il passaggio dall'UPA al DPA non comporta il tanto propagandato aumento dell'assetto concorrenziale del mercato.

Gli esperimenti con esseri umani testimoniano che nel mercato elettrico equilibri collusivi sono molto più probabili di quanto non accada per

gli altri mercati, indipendentemente dal sistema d'asta utilizzato. Sembra essere pacifico che gli esseri umani trovano presto meccanismi di coordinamento, soprattutto in contesti nei quali è possibile la comunicazione. Alcune esperienze, come [3], indicano una maggiore capacità dei soggetti di esercitare potere di mercato nel sistema DPA piuttosto che in UPA, ma si tratta di evidenze poco significative.

Ai fini della regolazione del potere di mercato, la scelta del sistema di aste può essere irrilevante, in quanto l'allocazione della capacità produttiva disponibile sembra avere un impatto molto più determinante rispetto alla scelta del tipo di asta. Pertanto, il tentativo del legislatore di utilizzare un determinato meccanismo di asta quale catalizzatore di un processo evolutivo del grado di concorrenzialità del mercato risulterà vano.

**Volatilità dei prezzi** Il tema della volatilità è importante non solo per i produttori, ma anche per i consumatori finali. Uno degli obiettivi più politicamente spendibili nell'ambito di una riforma del mercato elettrico è certamente la stabilità dei prezzi. La catena di trasmissione della volatilità dal mercato wholesale al mercato retail non necessariamente vede una coincidenza nella variabilità dei prezzi tra i due mercati in quanto gli operatori retail possono decidere di offrire ai propri clienti tariffe flat entro determinati livelli di consumo. Non è possibile negare, però, che prezzi fissi a valle della catena del valore e costi di approvvigionamento variabili costituiscono per il venditore retail un rischio di mercato da dover gestire, il che vuol dire che sono necessari mercati finanziari efficienti per permettere la trasmissione dei rischi. In ogni caso, la gestione della componente incertezza ha un costo che necessariamente viene prezzato nelle tariffe ai consumatori. Inoltre, la forte stagionalità della domanda e le complessità strutturali nella gestione della rete (congestioni, interruzioni temporanee della produzione per mancato funzionamento degli impianti, guasti alla rete fisica) rappresentano fattori di volatilità per il sistema, a testimoni-

anza del fatto che il mercato elettrico tende naturalmente a mostrare una propria volatilità basata su fattori fisici. Oltre alle ragioni fin qui esposte, un efficiente design di mercato non può prescindere dall'obiettivo di una bassa volatilità che vorrebbe dire minore rischio associato al mercato e, pertanto, maggiore crescita attraverso gli investimenti di lungo periodo. I contributi di experimental economics e ABM corroborano le conclusioni raggiunte dalla teoria classica [8]. L'experimental economics individua un trade-off tra minore volatilità e un più basso livello dei prezzi nel caso in cui venga scelto il sistema DPA. I modelli ABM, seppur con risultati sui prezzi non sempre allineati, confermano il dato empirico. Infatti, i due approcci alternativi tendono a produrre in DPA curve di offerta meno inclinate e, pertanto, oscillazioni nel livello della domanda o errori di previsione della stessa, comportano una variazione nel prezzo di equilibrio relativamente ridotta rispetto a quanto accade in UPA.

L'indicazione utile per il legislatore è la seguente: se le condizioni infrastrutturali (rete elettrica ed efficienza degli asset produttivi) sono lontane dall'ottimalità e sono richiesti investimenti, se il clima presenta una propria intrinseca instabilità, se i mercati finanziari non sono sufficientemente efficienti per permettere un'efficace gestione del rischio prezzo, allora il sistema DPA è sicuramente preferibile in quanto permette una stabilizzazione dei prezzi in un contesto che tende spontaneamente a generare volatilità.

### 8.3 Conclusioni

Nel lavoro sono stati presentati due approcci teorici alternativi alla teoria economica tradizionale nello studio di un problema, le conseguenze economiche della scelta UPA vs DPA, rispetto al quale la teoria classica trova, ad oggi, le proprie colonne d'Ercole. Il limite invalicabile è rappre-

sentato dalla modellizzazione delle dinamiche complesse che si generano dall'interazione di una molteplicità di soggetti autonomi e goal-oriented quali i player del mercato elettrico. Eppure il tema non è di secondaria importanza -e gli esempi di regulation analizzati nella prima parte ne sono una testimonianza- in quanto la scelta di un determinato market design può portare a conseguenze sociali ed equilibri di mercato indesiderati in un settore, quello elettrico, che necessariamente è prioritario nella gerarchia dei temi di politica economica. ABM e experimental economics si pongono come due metodologie differenti che rispondono ad una stessa lacuna dimostrata dalla speculazione teorica classica, portando delle evidenze empiriche, utili soprattutto nei casi in cui non è possibile o è troppo complicato ottenere dei dati lavorabili. L'utilizzo dei due approcci non si esaurisce certamente nella produzione di dati di laboratorio, ma è anche un modo di creare teoria riproducendo le dinamiche dei sistemi sociali che, per quanto raccontato nella prima parte del presente lavoro, sono intrinsecamente complessi.

Esiste un aspetto che experimental economics e ABM trascurano e per il quale possono rivelarsi strumenti poco adatti: le aspettative. Nel mondo reale le persone formulano in vario modo delle aspettative sulle policy implementate dal legislatore e si comportano conseguentemente, tant'è che un intervento di politica economica può sortire effetti solo se imprevisto e non anticipato dagli individui. L'aspetto strategico che coinvolge il legislatore, operatori di mercato di mercato e consumatori è un tema non sviluppato nei due approcci relativamente al problema economico oggetto di questo lavoro.

Il tema UPA vs DPA rimane controverso e sia gli ABM che l'experimental economics presentano testimonianze coerenti e vi sono alcuni aspetti qualitativi -come ad esempio l'andamento della curva d'offerta- nel quale le evidenze empiriche ottenute sono significativamente vicine all'indagine teorica classica. Dal punto di vista epistemologico, il dato non va letto in

termini di validazione della teoria delle aste, ma sicuramente questo tipo di convergenza va a conforto anche della robustezza teorica dei due metodi sperimentali.

Nonostante ABM e experimental economics siano state da me messe a confronto, le due metodologie non devono essere necessariamente viste in contrapposizione reciproca. Le due metodologie sono complementari in quanto gli ABM possono offrire una migliore comprensione delle dinamiche di scelta in condizioni di incertezza da parte degli esseri umani<sup>55</sup>. Guardando ad esempio al paper di Trinh, Sagan e Meeus [79] presentato nella sottosezione dedicata alla letteratura di confronto, l'osservazione alla quale non è possibile sottrarsi è che l'utilizzo congiunto dei due metodi è un valore aggiunto in quanto permette di comprendere quali risultati sono distorti dal metodo utilizzato e quali sono invece robusti. A quanto risulta a chi scrive, sul tema DPA vs UPA questo tipo di confronto, nonostante sia foriero di possibili nuovi importanti risultati, è piuttosto carente in letteratura.

Thomas Edison, agli albori dello sviluppo del mercato elettrico e in un momento in cui sembrava che l'energia elettrica fosse una tecnologia poco utile, difficilmente gestibile e molto costosa, affermò: "Produrremo energia elettrica così conveniente che solo i ricchi potranno bruciare le candele". Nessuno poteva prevedere che avesse ragione, eppure, ancora una volta, il mondo si è dimostrato molto più complesso di qualsiasi previsione che la speculazione teorica possa generare. Anche la scienza economica e il legislatore che intende applicarla dovrebbero tenerne conto.

---

<sup>55</sup>vd Heckbert [41] per approfondimenti.



## References

- [1] Electricity deregulation report global 2006. (cover story). *Electricity Deregulation Report Global*, (5):1 – 284, 2006.
- [2] Relazione annuale sullo stato dei servizi e sull'attività svolta. Technical report, Autorità per l'Energia elettrica e il gas, 2011.
- [3] Klaus Abbink, Jordi Brandts, and Tanga Morae McDaniel. Asymmetric demand information in uniform and discriminatory call auctions: An experimental analysis motivated by electricity markets. *Journal of Regulatory Economics*, 23(2):125–44, 2003.
- [4] Philip W. Anderson. Complexity. chapter The eightfold way to the theory of complexity: a prologue, pages 7–16. Perseus Books, Cambridge, MA, USA, 1999.
- [5] W. Brian Arthur. On learning and adaptation in the economy. Working Papers 92-07-038, Santa Fe Institute, July 1992.
- [6] W. Brian Arthur. Inductive reasoning and bounded rationality. *The American Economic Review*, 84(2):406–411, 1994.
- [7] W.B. Arthur, S.N. Durlauf, D.A. Lane, and SFI Economics Program. *The Economy as an Evolving Complex System II: Proceeding Volume XXVII*, Santa Fe Institute, *Studies in the Sciences of Complexity*. Number v. 2 in Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity Series. Basic Books, 1997.
- [8] Lawrence M. Ausubel and Peter Cramton. Demand reduction and inefficiency in multi-unit auctions. Papers of Peter Cramton 98wpdr, University of Maryland, Department of Economics - Peter Cramton, Nov 1995.
- [9] R.M. Axelrod. *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton Studies in Complexity Series. University Press, 1997.
- [10] Robert Axelrod. An evolutionary approach to norms. *The American Political Science Review*, 80(4):1095–1111, 1986.
- [11] A. J. Bagnall and G. D. Smith. A multiagent model of the uk market in electricity generation. *Trans. Evol. Comp*, 9(5):522–536, oct 2005.
- [12] A.G. Bakirtzis and A.C. Tellidou. Agent-based simulation of power markets under uniform and pay-as-bid pricing rules using reinforcement learning. In *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES*, pages 1168 –1173, 29 2006-nov. 1 2006.
- [13] Michel Baranger. Chaos , complexity , and entropy a physics talk for non-physicists. *I Can*, pages 1–17.
- [14] Joseph Bates. The role of emotion in believable agents. *Communications of the ACM*, 37:122–125, 1994.
- [15] D.F. Batten. *Discovering Artificial Economics: How Agents Learn and Economics Evolve*. Westview Press, Boulder, CO, 2000.
- [16] Schulze W. Mount T. Zimmerman R. Thomas R. Bernard, J. and R. Schuler. Alternative auction institutions for purchasing electric power: An experimental examination. *Proceedings of Bulk Power Systems Dynamics and Control IV, Santorini, Greece*, 1998.

- [17] C.S. Bertuglia and F. Vaio. *Complessità e modelli. Un nuovo quadro interpretativo per la modellizzazione nelle scienze della natura e della società*. Saggi. Scienze. Bollati Boringhieri, 2011.
- [18] Seth A. Blumsack, Jay Apt, and Lester B. Lave. Lessons from the failure of u.s. electricity restructuring. *The Electricity Journal*, 19(2):15 – 32, 2006.
- [19] John Bower. Why did electricity prices fall in england and wales? market mechanism or market structure? Others 0401008, EconWPA, Jan 2004.
- [20] John Bower and Derek Bunn. Experimental analysis of the efficiency of uniform-price versus discriminatory auctions in the england and wales electricity market. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 25(3-4):561–592, March 2001.
- [21] John Bower and Derek W. Bunn. Model-based comparisons of pool and bilateral markets for electricity. *Energy Journal*, 21(3):1, 2000.
- [22] Jason Brownlee. Complex adaptive systems, March 2007.
- [23] L. Bull and T. Kovacs. *Foundations of Learning Classifier Systems*. Studies in Fuzziness and Soft Computing. Springer, 2005.
- [24] David Colander, Richard Holt, and Barkley Rosser. The changing face of mainstream economics. *Review of Political Economy*, 16(4):485–499, 2004.
- [25] Kenneth W Costello and Kenneth Rose. Some fundamental questions on market power: No easy answers for state utility regulators. *The Electricity Journal*, 11(6):71 – 79, 1998.
- [26] D.D. Davis and C.A. Holt. *Experimental Economics*. Princeton University Press, 1993.
- [27] Herbert Dawid and Giorgio Fagiolo. Agent-based models for economic policy design: Introduction to the special issue. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 67(2):351 – 354, 2008.
- [28] ChristopherJ. Day and DerekW. Bunn. Divestiture of generation assets in the electricity pool of england and wales: A computational approach to analyzing market power. *Journal of Regulatory Economics*, 19:123–141, 2001.
- [29] AntonyW. Dnes, DevendraG. Kodwani, JonathanS. Seaton, and Douglas Wood. The regulation of the united kingdom electricity industry: An event study of price-capping measures. *Journal of Regulatory Economics*, 13:207–226, 1998.
- [30] John Duffy. Agent-based models and human subject experiments. In Leigh Tesfatsion and Kenneth L. Judd, editors, *Handbook of Computational Economics*, volume 2 of *Handbook of Computational Economics*, chapter 19, pages 949–1011. Elsevier, 00 2006.
- [31] Joshua M. Epstein. Why model? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(4):12, 2008.
- [32] Erkan Erdogdu. The impact of power market reforms on electricity price-cost margins and cross-subsidy levels: A cross country panel data analysis. *Energy Policy*, 39(3):1080 – 1092, 2011.

- [33] Erkan Erdogdu. What happened to efficiency in electricity industries after reforms? *Energy Policy*, 39(10):6551 – 6560, 2011.
- [34] Ido Erev and Alvin E. Roth. Predicting how people play games: Reinforcement learning in experimental games with unique, mixed strategy equilibria. *American Economic Review*, 88:848–881, 1998.
- [35] Joanne Evans and Richard Green. Why did british electricity prices fall after 1998? Working Papers 0307, Massachusetts Institute of Technology, Center for Energy and Environmental Policy Research, May 2003.
- [36] Stan Franklin and Art Graesser. Is it an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agents. In *Intelligent Agents III Agent Theories, Architectures, and Languages*, volume 1193 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 21–35. Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- [37] Richard J Green. Increasing competition in the british electricity spot market. *Journal of Industrial Economics*, 44(2):205–16, June 1996.
- [38] Eric Guerci and Mohammad Ali Rastegar. From uniform auction to discriminatory auction: Assessment of the restructuring proposal for the italian electricity day-ahead market.
- [39] Maozu Guo, Yang Liu, and J. Malec. A new q-learning algorithm based on the metropolis criterion. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, 34(5):2140–2143, oct. 2004.
- [40] Robert W. Hahn and Mark V. van Boening. An experimental examination of spot markets for electricity . *Economic Journal*, 100(403):1073 – 1094, 1990.
- [41] S. Heckbert. Experimental economics and agent-based models. In *18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009*.
- [42] J.H. Holland and K.J. Holyoak. *Induction: Processes of Inference*. Computational Models of Cognition and Perception Series. Mit Press, 1989.
- [43] John H. Holland. Studying complex adaptive systems. *Journal of Systems Science and Complexity*, 19:1–8, 2006.
- [44] John H Holland and John H Miller. Artificial adaptive agents in economic theory. *American Economic Review*, 81(2):365–71, May 1991.
- [45] Richard Holt, Barkley Rosser, and David Colander. The complexity era in economics. *Review of Political Economy*, 23(3):357–369, 2011.
- [46] J. Horgan. *The End of Science*. Helix Books. Crown Publishing Group, 1997.
- [47] L. Infantino. *L'ordine senza piano. Le ragioni dell'individualismo metodologico*. Temi del nostro tempo. Armando Editore, 2008.

- [48] J. Barkley Rosser Jr. On the complexities of complex economic dynamics. *The Journal of Economic Perspectives*, 13(4):pp. 169–192, 1999.
- [49] Leslie Pack Kaelbling, Michael L. Littman, and Andrew W. Moore. Reinforcement learning: a survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 4:237–285, 1996.
- [50] Brian T. Kench. Let's get physical! or financial? a study of electricity transmission rights. *Journal of Regulatory Economics*, 25:187–214, 2004.
- [51] Jeffrey O. Kephart. Software agents and the route to the information economy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(Suppl 3):7207–7213, 2002.
- [52] Henry E. Kilpatrick. Complexity, spontaneous order, and friedrich hayek: Are spontaneous order and complexity essentially the same thing? *Complexity*, 6(4):16–20, 2001.
- [53] Paul Klemperer. What really matters in auction design. *Journal of Economic Perspectives*, 16(1):169 – 189, 2002.
- [54] D. Koesrindartoto and L. Tesfatsion. Testing the reliability of ferc's wholesale power market platform: an agent based computational economics approach. In *Proceedings of the 24th USAEE/IAEE North American Conference, Washington, D.C., USA.*, 2004.
- [55] Th. Krause, G. Andersson, D. Ernst, E. V. Beck, R. Cherkaoui, and A. Germond. A comparison of nash equilibria analysis and agent-based modelling for power markets. In *Power Systems Computation Conference (PSCC), Liege*, 2005.
- [56] Leigh and Tesfatsion. Agent-based computational economics: modeling economies as complex adaptive systems. *Information Sciences*, 149(4):262 – 268, 2003.
- [57] Seth Lloyd. Measures of complexity : a non-exhaustive list. Technical report, Department of Mechanical Engineering, MIT, 2001.
- [58] Pattie Maes. The agent network architecture (ana). *SIGART Bull.*, 2(4):115–120, jul 1991.
- [59] David Manuel-navarrete. Complexity and social systems david manuel-navarrete approaches and implications of using complexity theory for dealing with social systems abstract.
- [60] Robert Ernest Marks. Breeding hybrid strategies: Optimal behaviour for oligopolists. *Journal of Evolutionary Economics*, 2(1):17–38, 1992.
- [61] Augusto Rupérez Micola, Albert Banal-Estañol, and Derek W. Bunn. Incentives and coordination in vertically related energy markets. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 67(2):381 – 393, 2008.
- [62] Augusto Rupérez Micola, Albert Banal-Estañol, and Derek W. Bunn. Incentives and coordination in vertically related energy markets. CIG Working Papers SP II 2006-02, Wissenschaftszentrum Berlin (WZB), Research Unit: Competition and Innovation (CIG), Jan 2006.

- [63] P.R. Milgrom. *Putting Auction Theory to Work*. Churchill Lectures in Economics. Cambridge University Press, 2004.
- [64] T. Mount. Market power and price volatility in restructured markets for electricity. In *Systems Sciences, 1999. HICSS-32. Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on*, volume Track3, page 13 pp., 1999.
- [65] T.D. Mount, W.D. Schulze, R.J. Thomas, and R.D. Zimmerman. Testing the performance of uniform price and discriminative auctions. 2001.
- [66] M.B. Naghibi-Sistani, M.R. Akbarzadeh-Tootoonchi, M.H. Javidi-Dashte Bayaz, and H. Rajabi-Mashhadi. Application of q-learning with temperature variation for bidding strategies in market based power systems. *Energy Conversion and Management*, 47(11-12):1529–1538, 2006.
- [67] James Nicolaisen, Valentin Petrov, and Leigh Tesfatsion. Market power and efficiency in a computational electricity market with discriminatory double-auction pricing. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 5:504–523, 2001.
- [68] S. Oren. When is a pay-as bid preferable to uniform price in electricity markets. In *Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES*, pages 1618 – 1620 vol.3, oct. 2004.
- [69] V. Petrov and G. Sheblé. Building electric power auctions with improved roth-erev reinforced learning. Technical report, Department of Electrical and Computer Engineering, Iowa State University, 2001.
- [70] Morteza Rahimiyan and Habib Rajabi Mashhadi. Supplier's optimal bidding strategy in electricity pay-as-bid auction: Comparison of the q-learning and a model-based approach. *Electric Power Systems Research*, 78(1):165–175, 2008.
- [71] Stephen J Rassenti, Vernon L Smith, and Bart J Wilson. Discriminatory price auctions in electricity markets: Low volatility at the expense of high price levels. *Journal of Regulatory Economics*, 23(2):109–23, March 2003.
- [72] Robert Rider. The evolution of cooperation : Axelrod, robert, (basic books, inc., 1984) pp. 256. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 5(3-4):406–409, 1984.
- [73] A. Roth and I. Erev. Learning in extensive form games: Experimental data and simple dynamic models in the intermediate run. Levine's Working Paper Archive 387, David K. Levine, 1995.
- [74] Yoav Shoham. Agent-oriented programming. *Artif. Intell.*, 60(1):51–92, mar 1993.
- [75] Carine Staropoli and Jullien. Using laboratory experiments to design efficient market institutions: The case of wholesale electricity markets. *Annals of Public and Cooperative Economics*, 77(4):555–577, 2006.
- [76] P. Terna. *Modelli per la complessità. La simulazione ad agenti in economia*. Strumenti. Economia. Il Mulino, 2006.

- [77] Leigh Tesfatsion. Introduction to the special issue on agent-based computational economics. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 25(3 - 4):281 – 293, 2001.
- [78] A. Tishler and C.K. Woo. Likely failure of electricity deregulation: Explanation with application to israel. *Energy*, 31(6 - 7):845 – 856, 2006.
- [79] Q. C. Trinh, M. Saguan, and L. Meeus. Experience with electricity market test suite: Students versus computational agents. *Power Systems, IEEE Transactions on*, PP(99):1, 2012.
- [80] C. J. C. H. Watkins. *Learning from Delayed Rewards*. PhD thesis, King’s College, Cambridge, UK, 1989.
- [81] Christopher J.C.H. Watkins and Peter Dayan. Q-learning. *Machine Learning*, 8:279–292, 1992.
- [82] Anke Weidlich and Daniel Veit. A critical survey of agent-based wholesale electricity market models. *Energy Economics*, 30(4):1728–1759, July 2008.
- [83] C.D. Wolfram. Electricity markets: Should the rest of the world adopt the united kingdom reforms? *Regulation*, 22(4):48–53, 1999.
- [84] S. Wolfram. *A new kind of science*. General science. Wolfram Media, 2002.
- [85] Chi-Keung Woo. What went wrong in california’s electricity market? *Energy*, 26(8):747 – 758, 2001.
- [86] Chi-Keung Woo, Debra Lloyd, and Asher Tishler. Electricity market reform failures: Uk, norway, alberta and california. *Energy Policy*, 31(11):1103 – 1115, 2003.
- [87] C.K. Woo, M. King, A. Tishler, and L.C.H. Chow. Costs of electricity deregulation. *Energy*, 31(6 - 7):747 – 768, 2006.
- [88] Michael Wooldridge and Nicholas R. Jennings. Intelligent agents: Theory and practice. *Knowledge Engineering Review*, 10:115–152, 1995.
- [89] G. Xiong, S. Okuma, and H. Fujita. Multi-agent based experiments on uniform price and pay-as-bid electricity auction markets. In *Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004. (DRPT 2004). Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 72 – 76 Vol.1, april 2004.
- [90] H. Zhou, Zhiyong Tu, Sarosh Talukdar, and K.C. Marshall. Wholesale electricity market failure and the new market design.
- [91] G.B. Zorzoli. *Il mercato elettrico dal monopolio alla concorrenza*. Energie / [Muzzio]. Franco Muzzio Editore, 2005.
- [92] G.B. Zorzoli. *I due volti del mercato elettrico*. Associazione Italiana Economisti dell’Energia, 2011.