



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Complex Adaptive Systems

## Modelli computazionali

**Facoltà di Ingegneria Informatica, Informatica e Statistica**  
**Dipartimento di Informatica**  
**Corso di laurea in Informatica**

**Pietro Dondi**  
**Matricola 1797080**

Relatore  
Pietro Cenciarelli

A.A. 2021-2022



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# COMPLEX ADAPTIVE SYSTEMS

## **modelli computazionali**

Pietro Dondi

Relatore  
Pietro Cenciarelli

## Indice

<b>Glossario .....</b>	<b>3</b>
<b>0. Introduzione.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Nella Teoria dei Sistemi .....</b>	<b>6</b>
<i>System .....</i>	<i>6</i>
<i>Open and Close Systems.....</i>	<i>6</i>
<i>Statical and Dynamical Systems.....</i>	<i>6</i>
<i>Dynamical Linear System .....</i>	<i>7</i>
<i>Dynamical Non-Linear System .....</i>	<i>8</i>
<i>Complex Systems.....</i>	<i>8</i>
<i>Chaotic Systems.....</i>	<i>10</i>
<i>Una visione d'insieme.....</i>	<i>12</i>
<b>2. Un minimo di contesto storico .....</b>	<b>13</b>
<b>3. Vita e gruppi sociali.....</b>	<b>13</b>
<i>Sistemi Complessi Adattivi .....</i>	<i>14</i>
<i>Sistemi Complessi Adattivi Sociali .....</i>	<i>14</i>
<b>4. Esempi di CS e loro pattern .....</b>	<b>15</b>
<b>5. Com'è fatto un CAS? .....</b>	<b>17</b>
<i>Locale vs globale .....</i>	<i>17</i>
<i>Emergence .....</i>	<i>18</i>
<i>Pattern.....</i>	<i>19</i>
<i>Bottom-up behavior .....</i>	<i>19</i>
<i>Multi Agent System .....</i>	<i>20</i>
<i>Obiettivi .....</i>	<i>21</i>
<i>Storia e Memoria.....</i>	<i>22</i>
<i>Interdipendenza, influenzabilità e imprevedibilità.....</i>	<i>22</i>
<i>Adattamento .....</i>	<i>23</i>
<i>Apprendimento.....</i>	<i>24</i>
<i>Evoluzione.....</i>	<i>25</i>
<i>Anticipazione .....</i>	<i>26</i>
<i>Non ottimalità .....</i>	<i>26</i>
<i>Riproduzione.....</i>	<i>27</i>

<i>Comunicazione</i> .....	28
<i>Feedback</i> .....	29
<i>Cooperazione vs Competizione</i> .....	30
<i>Aggregazione e Ricombinazione</i> .....	32
<i>Self organization</i> .....	33
<b>6. Un esempio di riferimento</b> .....	34
<b>7. Modellazione</b> .....	37
<i>Incipit alla Modellazione</i> .....	37
<i>Modellare la complessità</i> .....	38
<i>Regole</i> .....	40
<i>Casualità</i> .....	41
<i>More is better</i> .....	42
<i>Parallelismo</i> .....	42
<b>8. Il nostro modello di CAS</b> .....	43
<b>Bibliografia</b> .....	44
<b>Sitografia</b> .....	44

## Glossario

CS = complex systems (sistemi complessi)

CAS = complex adaptive systems (sistemi complessi adattivi)

CASS = complex adaptive social systems (sistemi complessi adattivi e sociali)

AI = artificial intelligence (intelligenza artificiale)

## 0. Introduzione

In natura siamo circondati da sistemi complessi, noi stessi siamo un sistema complesso, uno dei più studiati e misteriosi, a sua volta composto da molti sottosistemi complessi. Ad essi dobbiamo la nostra vita e la nostra evoluzione nel tempo. È un sistema complesso il nostro sistema nervoso e soprattutto il nostro encefalo, lo sono i sistemi di neural networks di deep learning a cui si sono ispirati, lo è l'universo globale e ogni sua galassia, lo è la città in cui viviamo, lo è il clima e tutto ciò che influenza il riscaldamento globale, lo è la diffusione di un virus, lo sono molti videogiochi e software in generale e lo sono tantissimi altri sistemi e realtà a cui siamo abituati, le cui complessità e profondità diamo per scontate.

La disciplina della Teoria della Complessità, che si occupa di studiare, catalogare e modellare sistemi complessi, è giovane e sta compiendo i primi passi verso la comprensione di questo affascinante argomento. Uno dei problemi che si riscontrano, ma che al contempo attraggono di più, è l'interdisciplinarietà della materia, la sua continua evoluzione ed adattabilità ad ogni nuovo sistema che emerge o muore influenzato da altri sistemi complessi. Potremmo affermare che la teoria della complessità sia essa stessa un sistema complesso.

La Teoria della Complessità si occupa di una vasta gamma di sistemi complessi molto differenti gli uni dagli altri, ognuno dei quali presenta spesso peculiarità e caratteristiche univoche. Si sono delineate tuttavia, nel tempo, gruppi di sistemi complessi accomunati da proprietà condivise dai sistemi dello stesso gruppo. Approfondiremo alcuni dei suoi più noti sottogruppi, tra i quali i sistemi caotici, adattivi e sociali.

L'obiettivo di questo lavoro è modellare un sistema complesso adattivo (CAS).

Per raggiungere questo scopo è necessario svolgere prima dei passi introduttivi e teorici che forniranno le linee guida al modello. Serve quindi capire cosa sia un CAS, che caratteristiche abbia, cosa andiamo a modellare, come verifichiamo che il modello è conforme alla descrizione, cosa è necessario alla modellazione. Per far questo la teoria è essenziale sia come guida che come supporto. Tuttavia, è bene notare come non esista una teoria centrale e globalmente condivisa per sistemi complessi adattivi. Il primo vero obiettivo sarà allora quello di provare a far convergere il più possibile la teoria sviluppata negli anni in un unico lavoro. Questo è reso possibile solo con il contributo di vari libri e articoli sull'argomento scritti dai più celebri ricercatori di CAS, i quali consigliano loro stessi di provare a costruire una teoria sulla base di varie fonti, essendo l'argomento fortemente ampio e multidisciplinare.

Prima di saltare direttamente a descrivere i CAS è importante prima contestualizzarli nella Teoria dei Sistemi, la disciplina che si occupa dello studio dei sistemi in generale. Dato il contesto sarà allora possibile capire meglio l'eredità che hanno i CAS nella Teoria dei Sistemi e, più specificatamente, nella Teoria della Complessità.

Si vorrà successivamente estrapolare delle caratteristiche chiave comuni ai sistemi complessi. In seguito, si potrà finalmente specializzarsi sui sistemi complessi adattivi e sui sistemi complessi adattivi e sociali, due celebri sottogruppi.

Una volta che si è arrivati a poter restringere il campo di studi, l'attenzione ricadrà su provare a dare una definizione di adattabilità, la parola chiave di tutto il lavoro. Capire cosa si intende per adattabilità di un sistema complesso, e dove stabilire la linea di confine con il suo sottogruppo di CAS sociali o CASS. Quindi risulterà necessario per completare la teoria elencare e studiare tutte le caratteristiche tipiche di CAS.

Questa tesi vuole proporsi come un compendio di studi dei Sistemi Complessi Adattivi, sulla base dei lavori svolti da numerosi ricercatori. Questa disciplina è ancora molto aperta, giovane, poco studiata, altamente multidisciplinare, fortemente dinamica ed in evoluzione. Le fonti di questo lavoro vengono quindi da molteplici risorse. Le principali sono *Emergence* di Steven Johnson ed un libro e due articoli tutti omonimi tra loro: *Complex Adaptive Systems*, scritti rispettivamente da Miller e Page, John Holland e Serena Chan. Tutte le altre fonti minori insieme a queste quattro principali sono elencate nelle sezioni di Bibliografia e Sitografia.

Nell'esposizione vengono menzionati esplicitamente gli autori di un libro quando il riferimento ad essi viene riportato direttamente e non reinterpretato. A tutto il resto, invece, ci si riferisce in modo implicito al lavoro di ricerca di tutti gli scienziati che hanno contribuito a sviluppare questa disciplina. Non è semplice fondere in un'unica trattazione un argomento così poco strutturato e vasto, sulla base di ricerche interdisciplinari e indipendenti tra loro. Tuttavia, la necessità di creare una base teorica è risultata necessaria e favorevole alla comprensione profonda dell'argomento, delle sue tecniche di modellazione e delle sue implicazioni pratiche.

## 1. Nella Teoria dei Sistemi

Come anticipato nell'introduzione è bene fare una contestualizzazione dei sistemi complessi adattivi nella disciplina della Teoria dei Sistemi che si occupa, tra le altre cose, anche di sistemi complessi. Si ritiene essenziale fare un breve excursus su altre categorie di sistemi. Non verranno definiti né elencati tutti i sistemi possibili. La disciplina è veramente così vasta da portarci velocemente fuori dagli obiettivi di questa tesi. L'attenzione verrà riposta solo sui tipi di sistemi che hanno influenzato maggiormente la Teoria della Complessità, sotto disciplina della Teoria dei Sistemi.

Partendo dalla definizione di sistema, si scenderà continuamente in sottosistemi e sottogruppi meno generali per arrivare a studiare e collocare in modo chiaro i sistemi complessi. Studieremo allora i sistemi statici e dinamici, quindi quelli lineari e non lineari, quindi quelli caotici e complessi.

### ***System***

Un sistema è un *insieme di elementi connessi fra loro*. Tali connessioni sono caratterizzate da relazioni di causa ed effetto. Un evento nel sistema causa uno o più eventi, i quali effetti si ripercuotono nel sistema o nel suo ambiente. Per ambiente del sistema intendiamo tutto ciò che non fa parte del sistema ma con il quale esso può interagire esternamente.

### ***Open and Close Systems***

Si differiscono subito due macro categorie di sistemi: aperti e chiusi. Un sistema è aperto se interagisce con il suo ambiente. Le modalità di interazione sono molteplici, ad esempio lo sono gli scambi di materia, di energia, di elementi immateriali, di comunicazioni, di valori o parametri, di obiettivi. Un sistema è chiuso se è isolato dal suo ambiente, non interagisce con esso.

L'essere umano è un sistema aperto, una pianta, un virus, ma anche il web o una pentola d'acqua. Allo stato attuale della fisica si considera un sistema chiuso l'universo, non conoscendo ancora la presenza di un ambiente esterno ad esso. Altri esempi possibili sono pressoché infiniti.

### ***Statical and Dynamical Systems***

Un sistema si definisce dinamico se almeno uno dei suoi elementi o connessioni cambia nel tempo. Vengono rappresentati da *stati* che cambiano, in funzione del tempo. Sono quindi sistemi che mutano nel tempo e la loro evoluzione è modellata in

stati definiti. Un esempio elementare di sistema dinamico è il moto di un punto nello spazio.

Al contrario un sistema si definisce statico se nessun suo elemento o connessione cambia nel tempo. Ovvero se esso può essere rappresentato sempre nello stesso stato.

Un sistema dinamico manifesta delle transizioni da uno stato all'altro nel corso della sua vita ed evoluzione nel tempo. È possibile che si trovi in uno stesso stato per un certo intervallo di tempo, ed essere quindi statico, per poi subire una nuova transizione verso un nuovo stato. Spesso vengono modellati tramite equazioni differenziali che ne descrivono l'andamento nel tempo.

Esistono molteplici sottogruppi dei sistemi dinamici differiti per la loro relazione con il fattore tempo, ad esempio se esso è discreto o continuo, e se il sistema è variante o invariante rispetto ad esso. Tuttavia, ignoriamo questa differenziazione perché non contribuisce veramente a caratterizzare i sistemi complessi. Due importanti sottogruppi dei sistemi dinamici che invece ci serve conoscere sono i sistemi dinamici lineari e non lineari.

### ***Dynamical Linear System***

In teoria dei sistemi un sistema lineare è un sistema descritto da funzioni lineari che rispettano il *principio di sovrapposizione*. Il principio secondo il quale un sistema lineare reagisce a sollecitazioni o input diversi in modo indipendente da essi. La somma degli effetti nel sistema è la somma degli effetti dei singoli input.

Formalmente sia  $H$  un sistema dinamico lineare e  $\alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_n x_n$  una combinazione lineare di input  $x_i$  linearmente indipendenti al sistema, ognuno moltiplicato da uno scalare  $\alpha_i \in \mathbb{R}$ . Il sistema risponde ad ognuno di essi in modo indipendente ovvero la risposta del sistema all'insieme di tutti gli input è data dalla somma delle singole risposte ad ogni variabile, che per omogeneità vale  $H(\alpha x_i) = \alpha H(x_i)$ , e per additività:  $H(\alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_n x_n) = \alpha_1 H(x_1) + \dots + \alpha_n H(x_n)$ .

Un sistema dinamico lineare viene descritto da un insieme di equazioni per le quali l'obiettivo principale è studiarne almeno una soluzione, che esiste sempre, dato lo stato iniziale e le funzioni lineari di transizione di stato. Inoltre, un sistema lineare ha la proprietà chiave di produrre sempre lo stesso output dato lo stesso input.

Essi sono fondamentali perché molti sistemi non lineari vengono spesso semplificati ed il loro comportamento approssimato tramite un processo di "*linearizzazione*" che consiste nell'approssimare il sistema non lineare nei suoi punti di equilibrio tramite l'uso di funzioni lineari.



## ***Dynamical Non-Linear System***

Un sistema dinamico non lineare invece è un sistema, la quale risposta in output non è proporzionale agli input ricevuti. Essi sono descritti da funzioni non lineari, in genere equazioni differenziali e funzioni polinomiali di grado *maggiore* ad uno. Non obbediscono al principio di sovrapposizione di sistemi lineari; infatti, il loro comportamento non è indipendente dall'insieme degli input bensì altamente *dipendente* da essi e quindi spesso *imprevedibile*, e talvolta quindi anche contro intuitivo.

Ciò è dovuto alla proprietà chiave del sistema di essere composto da sottosistemi od elementi, le quali relazioni rispettano principi di causa effetto non lineari. Questo implica che un piccolo cambiamento di stato di uno di questi componenti tipicamente porta a cambiamenti a cascata esponenziali su tutti gli altri componenti del sistema in modo imprevedibile e talvolta caotico. Ancor più particolare è la differenza di comportamento del sistema dati gli stessi input, infatti, l'output atteso potrà non essere lo stesso o essere unico e irripetibile. Per sistemi dinamici non lineari non è sempre possibile trovare una soluzione, essa può non esistere o non è possibile trovarla con i mezzi che abbiamo attualmente a disposizione. Più importante di trovare la soluzione al sistema è infatti capire come esso evolve nel tempo, come reagisce e si comporta a stimoli differenti, come si diffonde un cambiamento al suo interno e la più importante di tutte: il sistema tende ad un *equilibrio*, ad uno stato *ottimale*?

## ***Complex Systems***

Si occupa di studiare, classificare e modellare sistemi complessi la Teoria della Complessità, una branca della Teoria dei Sistemi che si occupa di aspetti così vasti che abbracciano molteplici campi della scienza, dalla matematica alla fisica, dalla chimica alla biologia, dall'informatica alle scienze naturali, dalla politica all'economia e alle scienze sociali. È difficile trovare una qualsiasi scienza priva di sistemi complessi.

Non esiste una definizione di sistema complesso. Almeno non esiste una definizione *formale, unica* e comunemente *accettata* dalla comunità scientifica. Questo primo grande scoglio nel voler comprendere i sistemi complessi per modellarne uno non ha una vera e propria soluzione. Il metodo usato per approcciare la descrizione, mai definizione, di sistemi complessi è quella di elencare e approfondire tutte le loro più note proprietà e delinearne un insieme minimale senza le quali non si può parlare di complessità.

I sistemi complessi (CS da qui in poi) sono un sottoinsieme dei sistemi dinamici non lineari. Non tutti i sistemi dinamici sono complessi, né lo sono tutti quelli non lineari. Sono sistemi tipicamente composti da numerose variabili e quindi sono molto difficili da risolvere e talvolta non hanno proprio una soluzione.

Un sistema complesso è un sistema composto da un insieme di sottosistemi, o elementi o agenti (continueremo sempre ad usare tutti e tre i termini), con la proprietà chiave che essi siano interconnessi tra loro, a formare un complesso insieme di collegamenti. Tali connessioni tra un elemento e l'altro del sistema creano una rete di connessioni che genera uno o più comportamenti *globali* del sistema (per differenziarlo dalle connessioni *locali* tra componenti) che si chiama *comportamento "emergente"*.

In natura la quasi totalità di CS è composta da elementi interdipendenti tra di loro. Ognuno influenza anche in minima parte ogni altro e questo rende impossibile prevedere con certezza il comportamento del sistema nel tempo e nello spazio.

Data la natura dinamica, non-lineare, interconnessa, interdipendente e a comportamento emergente di tali sistemi, il classico approccio alla modellazione, di semplificare e ridurre il sistema nei suoi componenti alla base fallisce nel suo intento. Ci occuperemo più avanti di modellazione ma è bene sapere fin da subito come l'approccio da perseguire migliore sia di tipo *olistico*, ovvero studiando il sistema "in toto" o "dall'alto" senza scomporlo. La regola aurea dei CS è infatti *"la somma dei componenti non è uguale al tutto"*.

Tale approccio ha trovato nell'informatica, e quindi in modelli computazionali supportati da modelli matematici, il suo ambiente naturale di studio e modellazione. I calcolatori si pongono in modo naturale come ambiente adatto a modellare sistemi complessi data la loro potenza computazionale che nel tempo si è sempre più evoluta e potenziata, permettendo un progressivo miglioramento nella comprensione della natura dei sistemi complessi.

Il termine complesso fa riferimento anche alla composizione del sistema di un numero cospicuo di elementi interagenti e dipendenti, la quale modellazione – del sistema - per vie matematiche o computazionali è per l'appunto complesso. In informatica un sistema complesso implica spesso la presenza di almeno un algoritmo che li modella ad alta complessità computazionale.

La maggioranza dei CS è *non deterministico*, non esiste in generale una funzione che lega tutti gli elementi del sistema o tutte le sue connessioni. In virtù di non determinismo non è possibile determinare con precisione matematica il comportamento, a lungo termine, del sistema. Anche conoscendo tutti i possibili dati sullo stato del sistema, le funzioni di evoluzione e cambiamento di ogni sua componente, è possibile fare previsioni stocastiche sul suo stato successivo ma non c'è determinismo matematico.

Esistono anche CS *deterministici* composti tipicamente da pochi agenti, le cui regole di connessione sono ben determinate. Tuttavia, sono accomunati ai CS non deterministici dalla proprietà di comportarsi in modo imprevedibile, lontana da possibili previsioni e tendenti, avvolte, a manifestare comportamenti caotici.

I sistemi dinamici di ogni tipo sono caratterizzati dalla capacità di tendere verso *stati ottimali* e verso *punti di equilibrio* che rendono il sistema stabile e soggetto a minimi scambi di energia con il suo ambiente. I CS, loro sottoinsieme, manifestano anch'essi la presenza di punti di equilibrio, e di condizioni di stabilità. Nonostante ciò, essi vengono più comunemente associati a sistemi che operano in grandi condizioni di *instabilità* e *disequilibrio*. In natura, infatti, un CS tipicamente cambia continuamente e si sposta da uno stato di equilibrio all'altro, oppure ci si avvicina il più possibile. Raramente si trovano CS che si stabilizzano in modo perpetuo su un punto di equilibrio e, se presentano punti di equilibrio sono spesso più di uno, raramente tali punti sono stabili e fissi nel tempo.

La trattazione di questo argomento in profondità, ovvero della presenza e tendenza dei sistemi dinamici in generale verso punti di equilibrio, esula dagli argomenti di questa tesi essendo specifici di altri ambiti di ricerca. Nonostante ciò, analizzeremo più avanti il punto di vista dei sistemi complessi adattivi e vedremo come questi ultimi differiscono profondamente dal concetto di equilibrio, di ottimalità e di stabilità.

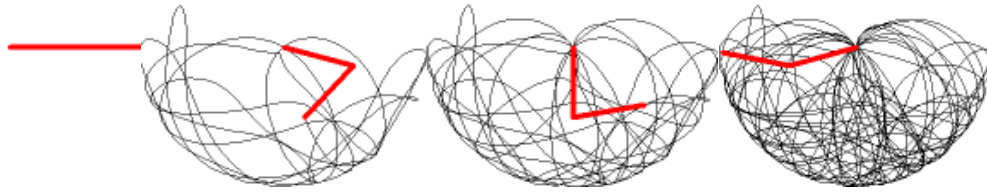
Successivamente vediamo tre importanti sottogruppi dei sistemi complessi: i sistemi caotici, i sistemi complessi adattivi e i sistemi complessi adattivi e sociali.

### ***Chaotic Systems***

Un sistema caotico è un sistema dinamico non lineare e complesso, caratterizzato da tre proprietà essenziali: una forte *sensibilità* (di tipo tipicamente esponenziale) agli input che riceve, esibire transitività topologica, avere un insieme denso di orbite periodiche.

Non entreremo nel dettaglio di tutte le caratteristiche che definiscono un sistema caotico. Bisognerebbe avventurarsi nel mondo della topologia, degli attrattori, della periodicità, che sono ambiti trattati in corsi avanzati di matematica e fisica ed esulano dall'argomento della tesi. È però importante sapere per eshaustività che esiste un forte legame tra la teoria dei sistemi complessi e la teoria del caos.

L'unica precisazione che intendiamo fare è cosa si intende per *caos*. Caos, in teoria dei sistemi, non vuol dire casuale o aleatorio, anche se talvolta un comportamento caotico presenta un certo grado di aleatorietà, ma è inteso come forte sensibilità agli stimoli o input che riceve internamente o dal suo ambiente. Tale caratteristica è intrinsecamente legata ad un comportamento non prevedibile e non lineare. Il legame fortemente dipendente e sensibile tra input e output del sistema e tra componenti stessi viene definito come caotico. Un sistema può definirsi caotico anche con pochissimi elementi costituenti, le quali interazioni altamente non lineari e, feedback loop prevalentemente positivi, tendono a portare il sistema in stati sempre più caotici. Un esempio tipico è il *doppio pendolo* in fisica.



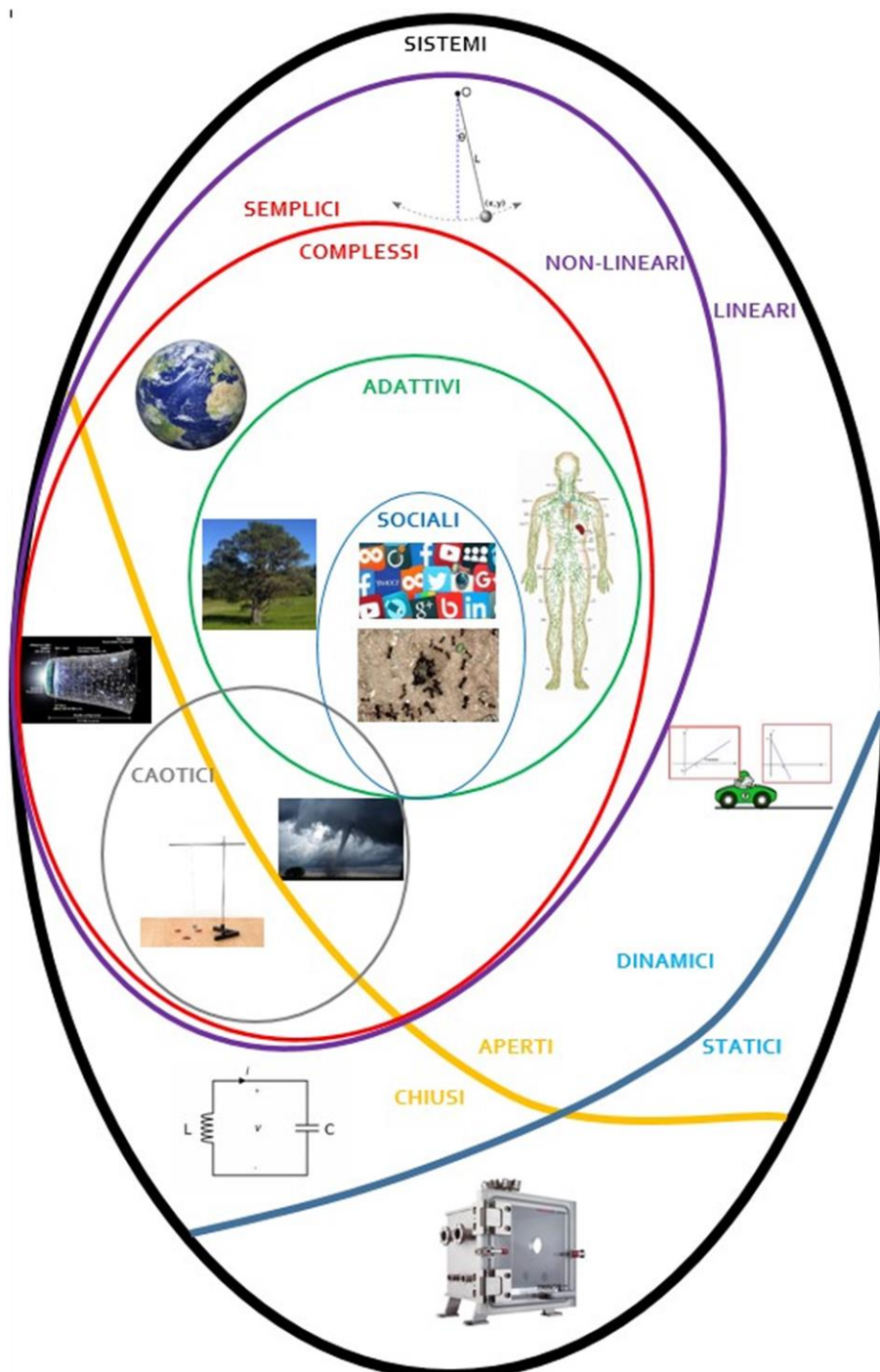
4 possibili fasi di un doppio pendolo. Due pendoli uniti fra loro, una estremità di uno dei due è fissata mentre l'altra è mobile ed unita al secondo pendolo. Le linee di sfondo sono create immaginando di disegnare su un foglio i movimenti dell'estremità della seconda parte libera del pendolo.

Un aspetto importante da notare di questo esempio, coerente con quanto descritto sinora: il sistema (composto da un doppio pendolo immerso tipicamente in un ambiente chiuso e isolato) si comporta sempre in modo diverso ogni volta che viene lasciato libero di muoversi dalla sua posizione iniziale (la prima figura a sinistra). Le variazioni possono essere minime o numerose, comunque sia, date le stesse condizioni iniziali, il sistema si comporta sempre in modo diverso e imprevedibile, quindi caotico. Se poi interagisce col sistema, ad esempio toccando brevemente o dando un input di forza al pendolo, esso reagisce in modo ogni volta differente, producendo effetti visibili a cascata registrati dal tratto di disegno.

Contrariamente a quanto si pensi, esistono sistemi caotici *deterministici*, ovvero governati da funzioni e leggi note che legano le variabili o gli elementi del sistema. Nonostante il determinismo, ciò che li rende caotici è la difficoltà crescente nel tempo di essere accurati con possibili calcoli. Il sistema a lungo andare differisce sempre più dalle previsioni iniziali diventando quindi non prevedibile il comportamento a lungo termine e spesso contro intuitivo.

## Una visione d'insieme

Di seguito presentiamo una possibile classificazione a diagrammi insiemistici dei sistemi appena descritti. Enfatizziamo la parola possibile, dato che non è l'unico modo di classificare i sistemi. In particolar modo la gerarchia organizzata in sottogruppi è corretta e universalmente accettata. Non lo sono i confini dei diagrammi. Quello che viene mostrato è una rappresentazione coerente con la trattazione appena descritta di ogni tipo di sistema ma è bene ricordare che più si scende di gerarchia più i confini tra i sistemi sono correntemente oggetto di dibattito, come ad esempio il confine dei sistemi caotici e di quelli complessi, nonché di quelli adattivi.



## 2. Un minimo di contesto storico

I primi studi sui CS risalgono tra la fine dell'Ottocento e i primi anni del Novecento soprattutto nel campo fisico e matematico, ma per molto tempo non fu mai istituita una disciplina od un *modus operandi* comune tra gli scienziati che approcciavano questa nuova disciplina.

Nella metà del secolo scorso iniziarono a confluire conoscenze multidisciplinari che contribuirono a creare una Teoria della Complessità. Teoria che è tuttora in sviluppo e revisione continua.

Per quanto riguarda lo studio in particolare di sistemi complessi adattivi, fu solo negli anni 80 che un gruppo copioso di scienziati, professori, ricercatori e studenti di diverse discipline, si riunì negli Stati Uniti presso l'*Istituto di Santa Fe*, New Mexico, per delineare le fondamenta dello studio dei sistemi complessi adattivi contribuendo enormemente a rafforzare la Teoria della Complessità. Tra queste menti brillanti e visionarie, di cui alcuni futuri premi Nobel, citiamo John Holland, Murray Gell-Mann, Philip Anderson, John Miller, George Cowan.

La loro eredità viene tuttora raccolta da altri scienziati che nel tempo si sono dedicati a questi studi. Con orgoglio ricordiamo il premio Nobel conferito nel 2021 a Giorgio Parisi, professore di Fisica dell'università La Sapienza di Roma per il suo studio sui sistemi complessi nell'ambito dei cambiamenti climatici.

## 3. Vita e gruppi sociali

Quanti possibili CS diversi esistono in natura? La risposta breve è *non si sa* ancora. La risposta completa è che sono talmente onnipresenti in natura che continuamente se ne scoprono di nuovi, è quindi altamente probabile che la loro ricerca e classificazione non termini mai.

Tutti i sistemi complessi condividono un minimo insieme di peculiarità comuni che formano una base tipica distinguibile da altri possibili tipi di sistemi.

Tuttavia, per natura, ognuno di essi è unico e distinguibile da ogni altro. È però possibile, e necessario, delineare delle divisioni in sottogruppi per poterne tracciare delle caratteristiche comuni a tutti i CS appartenenti alla stessa categoria. Questo anche per concentrare la propria attenzione verso un solo gruppo alla volta per migliorarne la comprensione, lo studio e quindi la sua modellazione.

## ***Sistemi Complessi Adattivi***

In questa tesi focalizzeremo, come già accennato, la nostra attenzione su una macrocategoria di CS: i *Sistemi Complessi Adattivi* (CAS da qui in poi).

Definiamo, informalmente, per adattabilità la capacità di un sistema complesso di reagire agli stimoli esterni del suo ambiente, o interni al sistema, di raccogliere informazioni e feedback e imparare da essi, affinché stimoli un processo di apprendimento e provochi nel sistema un'evoluzione e quindi una nuova fase di adattamento. Nei prossimi capitoli torneremo su questa definizione e ne approfondiremo il significato.

I CAS compongono la stragrande maggioranza di CS presenti in natura. La maggior parte della letteratura scientifica si concentra sui CAS essendo il sottogruppo più numeroso e affascinante dei CS.

La distinzione che adottiamo per distinguere CS da CAS è informale. Il motivo risiede fondamentalmente nella definizione non formale di adattabilità e soggetta a discussioni non ancora convergenti verso un'unica definizione e categorizzazione di CAS. Capita per l'appunto che molti CS vengano descritti come CAS in alcuni articoli o libri, mentre altri non li considerino CAS affatto.

Quasi tutti i CS che rientrano nella nostra definizione di adattabilità hanno in comune una fondamentale componente primaria: la *vita*. Inseriamo quindi nel gruppo dei CAS tutti quei sistemi complessi vivi, o i quali elementi sono a loro volta sottosistemi vivi. Purtroppo, non è possibile nemmeno dare una definizione formale di vita dato che non ne è stata data ancora una che sia globalmente accettata dalla comunità scientifica. Se volessimo tentare di avvicinarci ad un minimo di formalità si potrebbe dire che generalmente un sistema vivo è considerato essere un sistema biologico e termodinamico aperto che, tra le altre cose, manifesta *omeostasi* ed *autopoiesi*. Ma ovviamente sappiamo che è molto di più di così. A proposito del "*molto più di così*", ritroveremo questa perifrasi quando faremo riferimento alle proprietà o comportamenti *emergenti* di un CS. Si è concordi, infatti, che la vita in un sistema biologico complesso è un fenomeno emergente del sistema.

## ***Sistemi Complessi Adattivi Sociali***

Notabile di menzione è il sottogruppo più celebre dei CAS: i *Sistemi Complessi Adattivi Sociali* (CASS). Un CASS è un CAS i cui agenti vivono in *società*, o formano un *gruppo sociale*. La definizione di gruppo sociale deriva direttamente dalla *sociologia* e dalla *sociobiologia*. L'essere umano è un animale fortemente sociale, e lo sono anche moltissime specie di animali come i lupi, i leoni, i buoi, gli elefanti, alcune specie di uccelli, le termiti, le api, le formiche e tante altre specie.

Nella struttura sociale del CASS risiede l'origine della sua complessità. La comunicazione tra agenti sociali è quindi il denominatore comune tra i CASS ma soprattutto è la chiave per comprenderli ed il loro punto focale.

Un CASS per essere tale deve essere composto da una moltitudine di agenti, alcuni di loro devono far parte di un gruppo sociale e quindi generalmente essere dei CAS.

Sono CASS sistemi naturali i quali agenti sono sottosistemi complessi adattivi vivi, come un alveare. Sono CASS anche quelli aventi agenti e sottosistemi sia artificiali che naturali. Lo sono un social network, il web in generale o una community su internet, che devono gran parte della loro complessità agli utenti umani (CAS) che li usano formando gruppi sociali.

I CASS che andiamo a studiare sono sistemi complessi con forti e distintive note caratteriali di adattamento, composte da un tessuto sociale di elementi che comunicano tra loro e dei quali sia l'adattabilità sia la socialità sono entrambi punti chiave.

#### 4. Esempi di CS e loro pattern

Data le linee di categorizzazione di CS diversi presentata prima possiamo finalmente osservare ed elencare quali CS appartengono ad ogni gruppo.

Esempi di CS sono: i fenomeni atmosferici come il vento, una tempesta, le nuvole, i tornado, la crosta terrestre, un mare, un'onda o la diffusione di un maremoto, il clima di una regione o l'universo o una galassia o cluster di galassie, le molecole di un gas o di un liquido, molti sistemi di fisica atomica e subatomica, e molti tipi di reti artificiali.



Esempi di CAS sono: un qualsiasi ecosistema, il corpo umano e i suoi sistemi organi o tessuti (il sistema nervoso, endocrino e linfatico soprattutto), ogni organismo vivente (piante, animali, funghi e batteri) o anche gruppi di organismi viventi eterogenei ed omogenei (non facenti parte di una società), automi cellulari (ad esempio quello descritto dal gioco della vita di Conway), reti neurali di deep learning.

Esempi di CASS sono: un alveare, un formicaio, una mandria di buoi, un branco di lupi, una città, la politica, l'economia e la finanza, un'associazione o un'azienda, un gruppo di persone





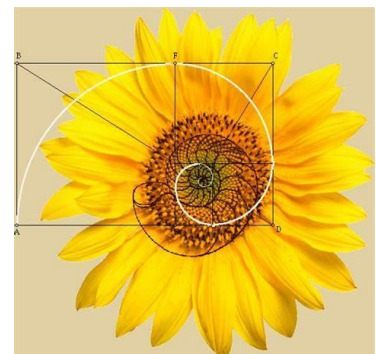
(famiglie e amici ad esempio), un popolo, il web ed alcune sue realtà come i forum, i social network e le community.

Abbiamo accennato prima come uno dei fenomeni più affascinanti dei CS sia *"l'emergence"*, tradotto informalmente in italiano come comportamento emergente, caratteristica chiave affrontata nel dettaglio successivamente. Una degli effetti più noti del comportamento emergente di CS è l'affioramento di *pattern*. Di seguito vengono riportati un considerevole numero di pattern o di comportamenti emergenti. La differenza tra i due sarà più chiara successivamente quando li definiremo formalmente. Portiamo adesso la nostra attenzione su quali sono possibili pattern dei sistemi complessi prima elencati.



Esempi di pattern o di comportamenti emergenti da CS: l'innalzamento delle temperature e lo scioglimento dei ghiacciai, la conformazione delle foglie e la distribuzione di terremoti nella crosta terrestre, la nascita di stelle e la formazione di pianeti in una galassia a distanze specifiche dalle stelle, il modo in cui si legano gli atomi di un liquido al passaggio di stato di solidificazione e la sua struttura chimica, la conformazione dei fiocchi di neve, la forma e la composizione di un terreno naturale, la forma di minerali e gemme, le dune o le righe del vento sulla sabbia, la forma di un'onda.

Esempi di pattern o di comportamenti emergenti da CAS: la vita, la coscienza, l'intelligenza, la forma e distribuzione di solchi sul cervello, la differenziazione e il riconoscimento da parte del sistema linfatico tra cellule interne al sistema e agenti patogeni esterni, la disposizione delle proteine nel capsido di un virus, il numero e l'equilibrio di prede, predatori e risorse disponibili in un ecosistema, la conformazione di una pianta o un vegetale o di una



singola foglia o petalo (si pensi al numero aureo presente nella conformazione dei broccoli, dei girasoli, delle chiacce o di tante specie di fiori), i periodi di maturazione della frutta o i periodi di germogliazione di un seme, la crescita diffusione e conformazione delle radici e dei rami di un albero, la rete di connessioni di un fungo mucillaginoso (slime mold), in particolare il *Physarum polycephalum*, la formazione di righe, chiazze, punti sulla pelle di molti animali, la presenza di frattali nelle piante o fiori o sulla pelle di animali, un apprendimento specifico da un sistema di intelligenza artificiale basato su deep learning.



Esempi di pattern o di comportamenti emergenti da CASS: le figure nel cielo che producono gli stormi di uccelli, le fluttuazioni dei prezzi nei mercati finanziari, il traffico in una città, la struttura interna (sale e gallerie) di un formicaio e la sua divisione in caste, la geometria e la termoregolazione di un alveare,

la scelta dei prezzi per i prodotti nel mercato, lo sviluppo e la diffusione di un'epidemia, l'evoluzione di una parola o di una lingua in un popolo, la velocità di crescita di una popolazione di organismi viventi, la diffusione di un'idea politica, la diffusione di un coro in uno stadio o una standing ovation in teatro.

## 5. Com'è fatto un CAS?

Siamo finalmente giunti al momento di entrare nel merito della questione. Analizziamo ora nel dettaglio tutte le caratteristiche prima citate appartenenti a sistemi complessi adattivi, e ne approfondiremo di altre non ancora affrontate.

Useremo CS quando ci riferiamo a caratteristiche comuni a ogni tipo possibile di sistema complesso, CAS quando una proprietà è tipica di soli sistemi complessi adattivi, CASS quando ci riferiamo a caratteristiche proprie di soli sistemi complessi adattivi e sociali.

Comunque sia il riferimento, ogni CAS presenta tutte le seguenti caratteristiche chiave. Sapremo alla fine di questo elenco, distinguere con chiarezza un CAS da altri tipi di sistemi complessi o non. Inoltre, queste caratteristiche ci serviranno come base per poi modellare un CAS e verificare che sia conforme ad ognuno di questi parametri.

### ***Locale vs globale***

Useremo continuamente questi due termini quindi è bene specificare il significato che hanno nell'ambito dei CS.

*Locale* è un aggettivo che assoceremo spesso ad un solo agente nel sistema o ad un piccolo numero di agenti. Sono locali i suoi cambiamenti, oppure le sue comunicazioni, connessioni con i suoi agenti vicini. Locale può essere un pattern prodotto da pochi agenti oppure un comportamento che emerge da pochi elementi del sistema, o uno o più eventi generati o scatenati dall'interazione di pochi agenti vicini. Due agenti sono vicini secondo una dimensione spaziale, ovvero localmente vicini rispetto allo spazio in cui si sviluppa il sistema.

*Globale* è un aggettivo che assoceremo all'insieme di tutti gli agenti, o al sistema totale. Globale può essere un pattern generato da tutti gli agenti o una intelligenza emergente dal sistema in toto o l'insieme di tutti i processi che avvengono nel sistema. La globalità ha effetto sia nel luogo in cui vive il CS, che sul suo ciclo di vita. L'effetto di un'interazione o un cambiamento locale ha quasi sempre effetto a cascata su tutto il resto del sistema o solo su un gruppo di altri agenti, dovuto dall'interdipendenza di agenti.

Continuamente avvengono processi locali e globali in un CS. L'insieme di processi locali spesso genera uno o più effetti o processi globali. Si dice che un CS sia caratterizzato da una *causalità verso l'alto*, ovvero relazioni di causa-effetto locali che si ripercuotono in modo tipicamente non lineare nel sistema. All'opposto accade anche che fenomeni ed eventi globali si ripercuotono su proprietà locali del sistema, manifestando *causalità verso il basso*. L'influenza continua di eventi o processi locali verso quelli globali e viceversa contribuisce alla complessità dei sistemi.

## ***Emergence***

Intraducibile di per sé. "*Intelligenza emergente*" o "*comportamento emergente*" è l'espressione italiana che più si avvicina al concetto nato in terra statunitense. Per Emergence si intende la capacità di un CS di mostrare un insieme di comportamenti globali, non prevedibili o calcolabili semplicemente studiando i componenti del sistema. Emergence è l'affioramento di uno o più fenomeni dal sistema, non calcolabili a priori, dalla sola osservazione degli elementi del sistema. Tale fenomeno complesso si manifesta a partire dalla più semplice interazione locale tra agenti.

Ogni CS prima elencato ha una forma propria di Emergence, chi producendo pattern inaspettati, chi apprendendo in modo decentralizzato e ogni volta originale, chi reagendo in funzione di input esterni ed interni, chi attuando meccanismi di difesa, chi evolvendosi nel tempo grazie a conoscenza appresa o evoluzione dell'ambiente di sviluppo. Un CS manifesta sempre un qualche tipo di Emergence nel corso della sua vita, è nella sua natura. Nel caso specifico di CAS, ci si riferisce ad Emergence come la capacità di far emergere dall'interazione di agenti una intelligenza globale non programmata, non centrale ma diffusa e condivisa, di cui ogni agente è direttamente e indirettamente responsabile. Si usa riferirsi ad Emergence come "comportamento" emergente verso CS non adattivi; mentre viene più usata un'accezione all'"intelligenza" emergente se ci si riferisce a CAS.

Non esiste un'unica modalità di manifestare comportamento od intelligenza emergente. Ogni CS è unico nel suo genere e mostra una qualche forma unica, particolare al sistema, di Emergence. Esso è tutto ciò che è possibile che un sistema manifesti nella globalità a partire dalla più semplice interconnessione locale di agenti costituenti. Nei CS vale infatti la seguente regola aurea: *La somma delle parti non fa il tutto.*

Studiare le singole componenti del sistema secondo il classico approccio di semplificazione o riduzione non funziona, non fornisce nessuna comprensione su quale sia poi la natura del sistema globale e su che tipo di comportamento emerga da esso. Quel *"molto di più"* che manca alla sola somma degli agenti del sistema è proprio la sua Emergenza. Una migliore equazione, espressa in linguaggio naturale, di come è composto ogni CS sarebbe:

$$\sum (\text{agente} + \text{sue interazioni locali}) = \text{Sistema globale} + \text{Emergenza}.$$

## **Pattern**

Spesso questa Emergenza dovuta ad interazioni locali produce dei pattern riconoscibili ed espliciti o altri più velati o nascosti di cui non era possibile predire la loro manifestazione semplicemente studiando le singole interazioni. Pattern è un termine che anch'esso viene tradotto e declinato diversamente per ogni campo di studi. Qui definiamo pattern secondo le due solite dimensioni *spaziali* e *temporali*. Un pattern nello spazio è un'aggregazione di elementi che produce uno schema con una forma o caratteristiche definite; un pattern nel tempo sono degli eventi o comportamenti specifici e ripetuti.

Un pattern non è tale se si presenta una sola volta nel tempo o nello spazio ma solo se si *ripete* in posti diversi o tempi diversi. Un pattern può essere globale o semi-globale se si presenta come risultato rispettivamente dell'interazione di tutte le componenti del sistema o solo di alcune, quest'ultimo tipo di pattern è molto più frequente.

Precedentemente abbiamo elencato un gran numero di pattern prodotti da sistemi complessi. Si può notare ora come tutti loro hanno in comune la proprietà di essere forme, configurazioni o disposizioni ripetute nel luogo o nel tempo di vita di un CS.

## **Bottom-up behavior**

Possiamo tradurlo con comportamento decentralizzato, distribuito e governato a partire dalle interazioni locali degli agenti, o emerso dalle fondamenta del sistema, dalle sue componenti alla base. È tra le caratteristiche primarie di ogni CS. Necessaria anche per far sì che un CS manifesti Emergenza è che esso abbia una natura *"bottom-up"* (letteralmente dal basso verso l'alto), che l'emersione avvenga a partire dall'interazione dei suoi agenti semplici e non da regole centrali univoche, o strutture globali prefissate. L'emergenza di un sistema deve appunto emergere da esso a partire da regole locali agli agenti, e non venire programmata o prestabilita. È quindi il termine che racchiude la sintesi della struttura di un CS e indica dove risiede l'origine della sua complessità: a partire dal basso dai suoi comportamenti bottom-up.

Il comportamento bottom-up del sistema è ciò che crea meccanismi di causalità verso l'alto. Prima abbiamo detto che nei CS esistono anche meccanismi di causalità verso il basso. Il punto è che il comportamento bottom-up è propriamente caratteristico dei sistemi complessi, è uno dei suoi punti chiave.

L'opposto di bottom-up è un sistema top-down, dove tipicamente regna una struttura gerarchica con potere decisionale e di controllo sul sistema, oppure dove regnano delle regole imposte dall'alto su come deve essere il sistema e cosa deve fare. I sistemi top-down sono molto comuni nell'ingegneria, sono tali da permettere una formulazione unica del sistema, governata da regole centrali che ne stabiliscono il comportamento. Sono assolutamente essenziali anche in molte altre discipline come approccio a problemi deterministici e quantificabili, dei quali si vogliono dimostrare delle proprietà o garantire la presenza di certe qualità o stabilire un governo centrale del sistema.

Molti sistemi complessi presentano caratteristiche di entrambi. Ad esempio, la *politica* ha regole ben definite ed è costituita da un parlamento che le discute e le cambia e il loro effetto si ripercuote su tutta la popolazione, caratteristica di un sistema top-down. Eppure, la politica stessa è un CASS, infatti, si studiano e manifestano tipici comportamenti emergenti e "regole" auto prodotte e condivise da tutti quanti senza che nessuno le abbia decise o imposte, come ad esempio come fare propaganda o come diffondere una idea e che effetto essa abbia. Un altro esempio chiave sono le *cellule* dell'essere umano. Esse hanno un DNA al loro interno che "detta legge" su cosa deve essere una specifica cellula, cosa fare e quando. Eppure, le cellule formano uno dei più complessi CAS in natura. Nessuna ha la visione dall'alto del funzionamento del corpo umano e nessuna governa tutte le altre. Alla nascita l'aggregazione di cellule produce pattern visibili - un braccio o un cervello - senza che nessuna di esse abbia deciso cosa fanno le altre, non c'è nessun piano superiore. Sono le interazioni tra cellule vicine a produrre tali pattern e comportamenti emergenti che danno forma e vita. Sono le interazioni tra cellule vicine a produrre un accordo e un adattamento condiviso, che genera un certo tipo di intelligenza emergente dal sistema.

Questo non vuol dire però che un CS non possa avere una struttura gerarchica al suo interno o non possa avere regole fisse, tutt'altro, i CS hanno bisogno di regole, di controllo e talvolta di gerarchie. La differenza è che non bastano solo quelle stabilite a priori ma anzi le più importanti e interessanti sono quelle emerse, distribuite e decentralizzate.

## ***Multi Agent System***

Un sistema si definisce *multi-agente* (MAS) semplicemente se è composto da una moltitudine - più di uno - di sottosistemi o agenti. Non tutti i MAS sono necessariamente dei CS. Troviamo MAS nel settore videoludico e cinematografico, ad esempio, che non necessariamente hanno le caratteristiche di un CS, come quelle che

stiamo trattando in questo elenco. La CG (computer graphics) e la AI (Artificial Intelligence) fanno uso estensivo di MAS senza che essi sviluppino necessariamente caratteristiche di complessità.

Tutti i CS sono dei MAS, è proprio nella moltitudine che nasce la complessità, anche se essa è una caratteristica necessaria ma non sufficiente a garantire complessità. Esistono CS composti da poco più di un agente e questo basta a creare complessità, ad esempio in un sistema composto da tre pianeti che interagiscono per forza di gravità. Nell'insieme dei CAS è invece molto raro (forse non ne esistono) trovare sistemi adattivi non composti da un elevato, molto più di uno, numero di agenti. La componente adattiva del sistema richiede tipicamente un vasto numero di agenti per emergere. Rimaniamo vaghi sul numero specifico di agenti in un CS, continuando ad usare parole non formali come pochi e molti, dato che ogni sistema è a sé e non avrebbe senso stabilire numeri fissi validi per gruppi di sistemi diversi tra loro.

## ***Obiettivi***

Analizziamo ora un aspetto cruciale della presenza di CS in natura. La loro esistenza è profondamente collegata ad una naturale tendenza a raggiungere un *obiettivo*. Avere uno scopo o un fine è essenziale, dà significato a tutto. Gli obiettivi del sistema fanno in modo di dare una direzione ed un verso al sistema globale. Il sistema tenderà a voler raggiungere e compiere il più possibile i suoi obiettivi. Senza obiettivi un CS è più difficile che cambi stato, non avendo un motivo intrinseco per farlo, perdendo probabilmente la sua natura dinamica e quindi rompendo la sua complessità.

Affinché il sistema rimanga complesso l'esistenza di almeno un obiettivo è necessario al suo sostentamento. Tuttavia, questo non è tutto, serve ancora un'altra componente al sistema: l'obiettivo stesso deve essere *dinamico*. Senza questo aggettivo associato ad almeno uno degli obiettivi del sistema, una volta raggiunto l'obiettivo, il sistema potrebbe degradare a sistema non dinamico, quindi non complesso.

Gli obiettivi possono essere preesistenti, costituiti alla nascita, oppure adottati nel corso di vita, talvolta anche auto prodotti. Un esempio possibile per CAS è quello più naturale di tutti: rimanere in vita; operare quindi tutte le azioni necessarie alla sopravvivenza del sistema, prime fra tutte nutrirsi e riprodursi. L'obiettivo d'esempio di rimanere in vita è altamente dinamico, cambia continuamente, non serve solo a far sì che il sistema sia vivo nell'attimo presente, ma comporta mettere in atto una serie di funzioni affinché il sistema punti alla sua sopravvivenza futura, preparandosi ad ogni possibile stravolgimento dello stato presente.

Si collega al concetto di *strategia*, ogni CS ne definisce almeno una per il conseguimento dei suoi obiettivi. Ovviamente tale strategia è spesso frutto di un comportamento bottom-up, nessuno nel sistema la decide e la impone agli altri, è una scelta che emerge dalle necessità condivise e distribuite nel sistema.

## ***Storia e Memoria***

Molti CS hanno una parte della loro complessità fondata sulla loro *storia*. Molti CS basano le proprie scelte in funzione della propria storia, ovvero di eventi accaduti nel passato, di informazioni memorizzate o esperienze fatte, magari per raggiungere meglio i propri obiettivi, migliorare il proprio stato o anticipare eventi futuri. Non sappiamo ancora tutti i motivi del perché un CS faccia affidamento alla propria storia e come la usi. Qualunque sia il motivo, sappiamo che la storia gioca un ruolo importante nella vita di un CS.

Alla storia è profondamente collegato un altro concetto chiave. Essa necessita di un meccanismo di *memorizzazione* per poterne fruire e consultarla. Tale memorizzazione avviene in modo quasi sempre decentralizzato. Ogni agente non è mai totalmente cosciente di tutti i processi che avvengono nel sistema e tanto meno della sua memoria globale. Essa è costruita sulla base dell'insieme condiviso di valori e processi ricordati da ogni singolo agente, l'unione della memoria di ogni agente crea la memoria totale del sistema.

Faremo tuttavia riferimento alla memoria del sistema e all'affidamento alla sua storia come se il sistema possa accedervi come fosse una risorsa centrale unica e ben definita. Questa semplificazione risulta efficace ogni volta che ci si riferisce a comportamenti globali, tra i quali l'affidamento alla storia ne fa parte, fondata sul ricorso ad una memoria.

## ***Interdipendenza, influenzabilità e imprevedibilità***

Si è parlato già di interdipendenza, influenzabilità ed imprevedibilità nel contesto dei sistemi dinamici non lineari. Qual è il significato che attribuiamo a queste caratteristiche rispetto ai CS?

Analizziamo queste tre parole, a loro volta connesse, nei due soliti punti di vista: locale e poi globale. Per *interdipendenza* e *influenzabilità* locale in un CS si intende la dipendenza *reciproca* tra agenti vicini nel sistema. Lo stato di un agente dipende ed influenza lo stato degli agenti vicini in funzione delle comunicazioni e dei feedback scambiati vicendevolmente. Ogni agente ha tipicamente vicini diversi, un cambiamento di stato in un agente può influenzare un cambiamento in un altro suo vicino e questo ad uno dei suoi, come si può immaginare, crea una *catena* di dipendenze che si ripercuote globalmente nel sistema, generando forme delle più disparate di comportamento emergente. In un sistema altamente connesso ogni agente è quindi direttamente dipendente e influenzabile dai suoi vicini e indirettamente dipendente da ogni altro agente del sistema.

Questa rete *diretta* e *indiretta* di influenzabilità e interdipendenza causa una *imprevedibilità* globale nel sistema. È imprevedibile una risposta ad un nuovo input capace di causare una serie di effetti a cascata nel sistema. Addirittura, è possibile che il sistema si comporti in modo del tutto differente in due occasioni distinte in reazione agli stessi input, se la propagazione degli stessi avviene anche solo in modo leggermente diverso nelle due volte. La proprietà di imprevedibilità è spesso associata a sistemi caotici, tuttavia è anche presente in quasi tutti i sistemi complessi non caotici.

Nella cultura moderna ci si riferisce a questo insieme di fenomeni come "*Effetto Farfalla*", tipico dei sistemi caotici.

Su questo tema sono stati girati film, scritti libri e articoli scientifici riferendosi ad una nota provocazione lanciata dal matematico Edward Lorentz su quale possa essere la possibilità che "*un battito d'ali di una farfalla in Brasile possa scatenare un uragano in Texas*". L'affermazione è chiaramente un'esagerazione dei comportamenti dipendenti di un CS, ma *non* è falsa. Non è infatti proprio possibile quantificare gli effetti di un minimo evento sul comportamento globale di un CS.

Molti effetti globali devono la loro manifestazione alla natura fortemente interconnessa, interdipendente ed influenzabile del sistema. I pattern che si generano dipendono da questa natura dei CS, la sua stessa Emergenza ne è direttamente connessa. La complessità risiede quindi anche in queste tre parole chiave, e da esse dipendono molte altre proprietà che stiamo elencando e analizzando.

## **Adattamento**

Conseguenza e necessità di forti cambiamenti a cascata nel sistema è la sua capacità di adattarsi ad essi. L'*adattamento* è una parola chiave, tanto da essere una proprietà di confine tra CS e CAS (è proprio la "a" in CAS).

Abbiamo prima distinto CS da CAS in base al concetto di adattabilità a cui abbiamo dato una prima definizione. Ricordiamo che un CAS è adattivo se sa reagire agli stimoli che riceve, ai cambiamenti e alle modifiche del suo stato iniziale operando principalmente due azioni chiave in funzione di esse: *imparare* ed *evolvere*.

Tali modifiche al sistema possono essere temporali: un evento che accade, un nuovo stimolo esterno, un cambiamento interno; o spaziali: uno spostamento di uno o qualche agente del sistema, uno spostamento delle risorse o degli obiettivi.

Ci possono essere varie forme e modalità di adattarsi a dei cambiamenti come ad esempio: un adattamento all'ambiente mutevole in cui vive, un adattamento all'invecchiamento del sistema, un adattamento alla morte o alla nascita di nuovi agenti del sistema, un adattamento ad un cambiamento di stato del sistema, o ai mezzi comunicativi degli agenti.



Come e perché un CAS si adatta? Un CAS si adatta modificando il suo stato ed il suo comportamento globale e locale. Localmente un singolo agente può cambiare il suo stato o il modo in cui si connette con altri agenti per adattamento, globalmente operando modifiche su alcuni o tutti gli agenti o gruppi di essi o mostrando pattern diversi. Possono esistere quindi modalità di adattamento multi-livello in funzione del livello gerarchico interno al sistema. Generalmente ci sono sempre almeno due livelli: locale e globale. Ovvero esiste un adattamento lato agenti, localmente alla loro natura i loro stati, le loro connessioni in funzione a cambiamenti e reazioni ad eventi locali; ed esiste un adattamento globale del sistema, emerso dall'insieme di processi adattivi prodotti dai suoi agenti. Non dobbiamo pensare questa struttura multi-livello a compartimenti stagni, all'opposto ogni livello influenza gli altri. L'adattamento bottom-up al livello più basso influenza l'adattamento globale al livello più alto e viceversa. La causalità verso il basso e verso l'alto ricordiamo essere sempre presenti in CS e influenzare molti se non tutti i suoi processi, tra i quali, appunto, l'adattamento in CAS.

Il motivo dell'adattamento è invece più complesso. I CAS si adattano prima di tutto perché sono sistemi dinamici quasi sempre vivi. Necessitano, quindi, di un continuo adattamento alle condizioni perennemente mutevoli della loro stessa struttura e dell'ambiente in cui sono immersi. Sebbene ciò sia vero, l'adattamento non è semplicemente una risposta dinamica e continua a stimoli e variazioni di stato ma è legata a motivi più intrinseci. Primo e più importante fra essi è il bisogno del sistema di tendere continuamente ad uno *stato globale ottimale*. Se non si adattasse un CAS rimarrebbe sempre nello stesso stato senza mai raggiungere una condizione a lui maggiormente favorevole. È qui che si gioca tutto. Tendere a migliorare sempre il proprio stato in funzione di un ambiente dinamico e di sconvolgimenti continui che necessitano quindi una ricerca *senza fine* di un possibile stato ottimale o semplicemente migliore.

L'insieme dei processi messi in atto per adattarsi è spesso infinito, uno stato ottimo globale raramente viene raggiunto, sia che esso non esista o che non possa essere raggiunto, ma tratteremo questo più avanti quando si parlerà di non ottimalità.

I due processi chiave (apprendimento ed evoluzione, con la possibile presenza di un terzo elemento) costituenti dell'adattamento di un CAS, sono così importanti da meritare una trattazione specifica.

## ***Apprendimento***

Prima componente chiave della definizione di adattamento di un CAS. Per potersi adattare al meglio all'ambiente ed alle situazioni che li circondano, i CAS sviluppano meccanismi di *apprendimento*, inteso come l'insieme delle funzioni di raccolta delle informazioni sullo stato iniziale e su eventi presenti e passati, e di elaborazione delle

stesse per ricordarle in futuro ed evolvere in funzione di esse. Abbiamo parlato prima di storia e di memoria nei CS. Nell'ambito dei processi di apprendimento, l'affidamento alla memoria ed alla propria storia è una componente fondamentale, esse permettono la classificazione e il riconoscimento di pattern già visti e formano il materiale di base per studiare una strategia per il futuro che tenda a migliorare il processo di adattamento. Per adattarsi quindi i CAS hanno bisogno di sapere ciò che esiste nel loro ambiente o conoscere gli eventi che accadono, e reagire ad essi ovvero imparare per poter comportarsi meglio in futuro agli stessi eventi, o simili, o alle stesse condizioni ambientali.

Il problema, tuttavia, risiede nel fatto che sappiamo cosa si intende per apprendimento ma abbiamo pochi strumenti per misurare effettivamente un apprendimento da parte di un CAS. Ovvero è difficile capire quando e in che quantità un CAS sa imparare da ciò che accade intorno a lui e adattarsi meglio al suo ambiente di sviluppo. Esso è un processo chiave della vita di un qualsiasi CAS; eppure, presenta ancora molti misteri di come avvenga nel dettaglio e nello specifico di ogni CAS diverso, tanto che è oggetto di molta ricerca scientifica.

## ***Evoluzione***

Seconda componente chiave della definizione di adattamento di un CAS. Per *evoluzione* si intende la proprietà di un CS adattivo di mutare nel tempo e nello spazio cambiando: forma, configurazioni, stati, processi, interconnessioni, agenti; ovvero possibilmente tutto ciò di cui è composto. L'evoluzione è la conseguenza naturale di un CAS vivo, si può considerare *morto*, infatti, un CAS che rimane statico e uguale per un periodo di tempo prolungato indefinito.

C'è però una distinzione importante tra cambiamento ed evoluzione. L'evoluzione, in Teoria dei Sistemi, è intesa come un cambiamento con uno scopo o verso un obiettivo. Non è un cambiamento fine a sé stesso, ci deve essere un *motivo* per il quale un CAS evolva. Può capitare che i CAS stessi non siano consci di avere un obiettivo o uno scopo, nonostante sia insito nella loro natura raggiungerli, ne abbiamo parlato prima nel paragrafo omonimo. Nonostante il CAS decida o no, sia cosciente o no, di avere o scegliere obiettivi essi sono presenti e sono l'incentivo grazie al quale si mette in moto tutto il processo evolutivo. Questo perché essi tendono sempre a stati migliori, a condizioni migliori di vita, a metodi di adattamento preferenziali in funzione dello stato presente e alle condizioni ambientali.

Apprendimento ed evoluzione sono intimamente collegati e collaborano nel processo adattivo. L'evoluzione è infatti conseguenza diretta di un apprendimento. Questo processo di apprendimento ed evoluzione che chiamiamo adattamento è costante e continuo. Non si arresta mai se non con la morte del CAS.

## ***Anticipazione***

Esiste una possibile terza componente dell'adattabilità di un CAS, essa è l'*anticipazione*. Se i meccanismi di apprendimento sono ancora per lo più oscuri alla teoria della complessità ancor di più lo è la capacità di un CAS di anticipare eventi o situazioni future. Intendiamo anticipazione, infatti, come la capacità di un CAS, di prevedere sviluppi futuri di sé stesso, dell'ambiente circostante o di processi ed eventi che potrebbero accadere, ed operare, in anticipo, una serie di funzioni necessarie per prepararsi ad esse e saperle gestire se e quando si avvereranno tali previsioni. È una proprietà tipica dell'adattamento anche se è molto poco chiaro come essa veramente avvenga.

Ci sono tuttavia ricerche nelle quali sono state osservate sperimentalmente gli effetti di anticipazione in CAS reali. Un esempio è la capacità di un formicaio di prevedere le sue necessità invernali d'estate, quando le necessità estive del presente sono totalmente diverse da quelle che avrà tra mesi. Ovviamente nessuna formica da sola sa di anticipare i processi che avverranno d'inverno, ma è la collettività, quindi il formicaio, che è un CASS, a decidere, principalmente per regole bottom-up, di anticipare le attività che porteranno il formicaio in uno stato migliore quando ce ne sarà bisogno. L'anticipazione è fortemente collegata ai processi di apprendimento e di evoluzione di un sistema complesso; quindi, collegata al macro-concetto di adattabilità di un CAS seppure sia una proprietà talmente unica e particolare ed ancora poco compresa da parte della comunità scientifica che forse è meglio considerare ancora a parte dalle altre.

## ***Non ottimalità***

Discutiamo brevemente cosa intendiamo allora per *stato* di un CAS e per *stato ottimale*. Uno stato di un CAS risiede in un'istantanea di un momento specifico nel tempo delle condizioni di un CAS. È l'insieme di informazioni, che si possono raccogliere e codificare, che un CAS ha in un istante preciso e le informazioni su come un CAS è in quell'istante. Ad esempio, sono informazioni che codificano uno stato il numero di agenti comunicanti del sistema, i loro collegamenti e la loro configurazione, o i processi che sono attualmente in atto. Lo stato di un sistema è quindi un concetto astratto, il cui valore dipende dall'osservatore, non è una proprietà intrinseca. Uno stato ottimale è quindi quello stato che ha l'insieme di valori perfetti secondo una scala di valori stabilita dall'osservatore.

Ogni CAS, se vengono codificati al meglio i suoi stati, non dovrebbe mai raggiungere uno stato ottimo. Questo perché raggiungere l'ottimo significa aver ottimizzato tutti i suoi valori e quindi non evolvere più per raggiungere stati migliori, se non evolve non si adatta, quindi perde di interesse. In caso di raggiungimento apparente di stati ottimali è probabile che essi siano stati codificati in maniera imprecisa, questo vuol dire che non corrispondono a veri stati ottimali che il CAS potrebbe raggiungere.

Questo errore di valutazione è del tutto normale che accada a causa dell'imprevedibilità a priori del sistema.

Può invece accadere che un CAS, nel suo scopo di migliorare continuamente il proprio stato arrivi e si stabilizzi su uno stato ottimo. Arrivare all'ottimo è raro ma non impossibile e non deleterio per il sistema. I CAS però sono sistemi altamente dinamici e tipicamente vivono in un ambiente esso stesso dinamico ed in continua evoluzione. Questo implica che è ancora più raro che uno stato ottimo lo sia perennemente e non cambi nel tempo, provocando nel sistema la ricerca di una nuova strategia adattiva per raggiungere il nuovo stato ottimo. Se il CAS rimane fermo in uno stato diventando statico e non adattandosi più a nuovi cambiamenti di stato interni o del suo ambiente, significa che ha perso le sue proprietà di adattabilità o semplicemente è morto, comunque sia non è più un CAS.

Vedremo nei prossimi capitoli come l'approccio alla modellazione più adatto per i CAS non sia trovare delle soluzioni ai suoi modelli, potrebbero anche non esistere soluzioni, o sul trovarne un ottimo locale, secondo una terminologia tipica dell'AI; ma sullo studiarne il "*process of becoming*" (John Holland), ovvero il processo di divenire, il percorso di vita del sistema. In questa disciplina il viaggio è ben più importante della meta. Il focus non è quindi negli obiettivi del CAS ma tutto il suo processo evolutivo, la sequenza di stati attraversati, la sua storia ed il suo futuro, sperando che essa non si arresti mai in un ottimo locale o globale.

## **Riproduzione**

Nessun agente ha una visione globale sul sistema, ognuno ha solo una porzione di conoscenza e informazioni, ma è essenziale per partecipare ad uno degli effetti globali del sistema. Queste informazioni necessitano di muoversi in un ambiente dinamico, e ciò avviene principalmente in due modalità: per comunicazione e per riproduzione. Ci occuperemo di comunicazione al prossimo paragrafo. Entrambe le modalità avvengono continuamente, contribuiscono a non far morire una parte di informazioni ma bensì a farle proliferare e contribuiscono all'insieme di informazioni che il sistema ha bisogno per vivere e per adattarsi al meglio.

Ogni essere vivente può essere accomunato da un istinto di sopravvivenza e dalla capacità di *riprodursi*. Un CAS composto da agenti vivi ha bisogno di riprodursi, anche se è più di un bisogno, è infatti una fase di vita essenziale. La riproduzione di un CAS è la conseguenza principale del suo processo evolutivo.

Può avvenire in varie forme e modalità, come ci insegna la biologia. Non ci occuperemo di sapere come avviene precisamente ma più quali sono i suoi effetti, come si ripercuote nel sistema, che emergence avviene.

Uno degli aspetti fondamentali e più studiati è la capacità di trasmettere *conoscenza* dai genitori ai figli attraverso la riproduzione. Qui intendiamo genitori qualunque agente del sistema che partecipa alla nascita di un nuovo agente nel sistema. È infatti per riproduzione che la conoscenza di una generazione passa a quella successiva, è la componente di eredità più preziosa. È ciò che permette al sistema di operare il suo infinito processo di adattamento.

Quel che accade è che in genere i genitori passano poche e locali informazioni ai suoi figli durante la riproduzione, e durante la crescita della prole per alcuni tipi di CAS. L'insieme di tutte queste informazioni fa emergere la capacità del sistema di trasmettere le proprie informazioni globali tra una generazione e l'altra garantendo la sopravvivenza del sistema e assicurando che il sistema rimanga nel suo percorso di raggiungimento dei suoi obiettivi.

Affascinante è osservare un CAS che cambia totalmente o parzialmente i suoi agenti costituenti per riproduzione (nuove nascite e morti fra i suoi agenti), eppure, rimane fondamentalmente lo stesso, con gli stessi obiettivi e processi talvolta. Il paradosso della *nave di Teseo* esprime proprio il dubbio metafisico sul problema di un'entità composta da più elementi: se cambiando ogni sua componente costitutiva nel tempo essa rimane fondamentalmente la stessa. Basti pensare al corpo umano fatto di miliardi di cellule che continuamente nascono e muoiono eppure nel breve tempo noi rimaniamo gli stessi senza notare nessuna differenza. Eppure, nell'arco di vita di un essere umano il continuo morire e nascere di nuove cellule è ciò che stabilisce le fasi di vita del CAS, mantiene i suoi obiettivi sempre aggiornati, regola il passaggio di stati, spinge il sistema verso stati sempre migliori anche in risposta ad un ambiente sempre in cambiamento.

## **Comunicazione**

Un CAS è caratterizzato da una moltitudine di agenti interconnessi. L'*interconnessione* non è solo logica, o fisica, o temporale, è molto di più. L'interconnessione stessa è all'origine della sua complessità, è ciò che genera comportamenti emergenti. Ma cosa c'è alla base di questa rete di connessioni? La *comunicazione*. Gli agenti del sistema comunicano continuamente tra loro e questo è veramente il carburante che scorre nella rete di connessioni e quindi ciò che causa la complessità e l'emergence.

La comunicazione tra agenti del sistema avviene in modi diversi per ogni CAS. In generale si tratta di uno scambio di informazioni tra agenti vicini. Ribadiamo il concetto di vicinanza sempre inteso nelle 4 dimensioni in cui siamo abituati a vivere, ovvero le 3 spaziali e quella temporale; quindi, due agenti sono vicini nello spazio o nel tempo o in entrambi. Tipicamente nessun agente comunica con tutti gli altri agenti del sistema, lo fa solo con i suoi vicini. Tuttavia, la comunicazione locale tra agenti vicini, ancora una volta, ha effetti globali. Questo perché ogni comunicazione avviene in un ambiente dinamico non lineare animato da agenti interdipendenti. Una informazione

passa facilmente da un agente a tutti, o quasi, i suoi vicini; essi avranno altri vicini e ritrasmetteranno tale informazione, magari appena modificata con la conoscenza dell'agente ricevitore, ai suoi diversi vicini, e così via a cascata una informazione può attraversare tutto il sistema passando tra un agente ed il suo vicino locale, ripercuotendosi globalmente.

Ancora una volta le leggi di comunicazione sono bottom-up. Nessuno ha stabilito la forma, la modalità o i tempi in cui essa debba avvenire. Ogni agente ha le sue piccole regole di comunicazione. Eppure, vivendo in un sistema complesso questo provoca effetti non lineari nel sistema. È la non linearità delle comunicazioni a provocare effetti di intelligenza emergente in CAS, a trasmettere conoscenza all'interno del sistema, a stabilire le regole di evoluzione e scegliere come passare dallo stato presente a quello successivo, sperabilmente migliore. Queste scelte avvengono in modo globale nel sistema attraverso questa complessa rete di interconnessione di agenti comunicanti, e le informazioni che si passano sono di vari tipi.

Ogni comunicazione è quindi essenziale al sistema, perdersi anche una sola informazione può avere effetti a cascata esponenziali ed imprevedibili dato che ogni piccolo pezzo di informazione che si trasmette confluisce nell'insieme di informazioni che attraversano il sistema e collabora a creare intelligenza emergente.

## ***Feedback***

Ci manca descrivere un aspetto della comunicazione di agenti interconnessi: i *feedback*. Ogni agente non comunica solo per dare informazioni ma anche per riceverne. Questo è il feedback, ricevere un riscontro dalle comunicazioni che causa una reazione in funzione di esse. Abbiamo appena visto come ogni agente comunica con i suoi vicini, ciò che accade spesso è il formarsi di pattern di comunicazioni cicliche definiti "*feedback loops*". Un feedback loop può crearsi tra due o più agenti. Questo accade quando una informazione data da un agente ad un suo vicino viene ritrasmessa tra agenti vicini comunicanti fino a tornare all'agente originale che ha trasmesso per primo quell'informazione, si forma così un loop di feedback.

Ogni agente quando riceve un'informazione la rielabora e la ritrasmette secondo la propria natura e conoscenze. Quando essa capita di ritornare all'agente che l'ha trasmessa per primo è tipicamente evoluta nel loop e cambiata rispetto all'informazione originale. Ora questi loop possono essere di due tipi: positivi o negativi.

Un "*positive feedback*" o "*feedback rinforzante*" è un loop di feedback in cui un messaggio o un'informazione amplifica il messaggio e l'informazione originale, secondo certi valori o parametri. È un feedback positivo quando la risposta segue l'andamento di amplificazione o diminuzione aumentando o diminuendo rispettivamente i valori o gli effetti del messaggio di feedback. Positivo è proprio

perché mantiene il segno dell'operazione precedente sommando nuovi effetti. Presi due agenti A e B, A comunica a B un messaggio, B lo amplifica in qualche modo e lo ritrasmette ad A che riceve il messaggio amplificato e lo amplifica ulteriormente per poi re-inoltrarlo a B. Un esempio sono le oscillazioni di un ponte in seguito a traffico o terremoti, se tali oscillazioni entrano in fase, in un loop di feedback positivi, possono portare a ben noti effetti collaterali. I feedback positivi contribuiscono quindi all'instabilità del sistema secondo legami di causa-effetto aventi risultati esponenziali nel sistema, possono portare il sistema in stati caotici e progressivamente più lontani da stati di equilibrio. Sono fortemente presenti nei sistemi caotici.

Un "*negative feedback*" o "*feedback smorzante*" è il suo opposto, ovvero la diminuzione degli effetti di un messaggio ricevuto. Dati due agenti A e B essi sono in un loop di feedback negativo se A invia un messaggio a B che lo riceve lo interpreta lo modifica e risponde rinviandolo ad A, il quale in base al contenuto del messaggio di feedback se esso è aumentato, secondo un certo parametro, lo diminuirà in intensità o in valori, se invece è diminuito lo amplifica. È negativo nel senso che cambia il segno del messaggio di feedback rispetto ai suoi valori o effetti. Un esempio è la regolazione dello zucchero nel sangue con la secrezione di insulina che ne regola le quantità, oppure il funzionamento di condizionatori che in funzione della temperatura ambientale e quella richiesta immettono aria fredda o calda in base alla differenza tra le due temperature. I feedback negativi portano quindi il sistema verso uno stato di equilibrio e di stabilità, o minimizzano la differenza tra lo stato di un sistema ed uno stato obiettivo.

Loop di feedback avvengono in tanti tipi di sistemi non necessariamente complessi. Tuttavia, ogni CS ha loop di feedback, ma di quale tipo? Entrambi.

L'*equilibrio* dei due tipi di loop è necessario alla sopravvivenza di qualsiasi CS. La presenza di un solo tipo di feedback loop è indicativa di una perdita di proprietà intrinseche dei sistemi complessi. Un tipo serve a mantenerne la complessità o la sua natura caotica e contribuisce all'instabilità ed alla imprevedibilità del sistema, portandolo a non raggiungere mai stati ottimali. L'altro serve a contrastare il caos e mitigarlo, serve a spingere il sistema verso un continuo miglioramento, verso il processo di stabilizzazione e scelta delle minime risorse e processi necessari ad evolvere il sistema dallo stato presente ad uno stato futuro migliore, contribuendo alla stabilità del sistema al fine di mantenere un minimo grado di equilibrio interno.

### ***Cooperazione vs Competizione***

Il comportamento di un agente può assumere due fondamentali stati distinti nel tempo o nello spazio in relazione agli altri agenti del sistema: lo stato *cooperativo* o lo stato *competitivo*. Si assume uno dei due comportamenti in base alle regole interne dell'agente, in funzione di una comunicazione o di un feedback, oppure in risposta ad un nuovo input o un cambiamento dell'ambiente, oppure per adattarsi al meglio.

Spesso vengono a formarsi nel sistema pattern formati da gruppi di agenti legati dallo stesso comportamento cooperativo o competitivo. Questo può avvenire ad esempio perché è emersa una necessità di aggregazione per portare il sistema in uno stato migliore. Inoltre, può anche capitare che in un gruppo siano presenti anche agenti in comportamenti opposti ma che, per qualche regola emersa, tale unione di agenti cooperativi e competitivi serve al benessere del sistema. Infine, sono da considerare fondamentali anche le unioni e le comunicazioni tra gruppi di agenti in stati uguali, opposti o misti, salendo quindi a livello globale. Come sempre le unioni e le scelte stesse di comportamenti adottati, da un singolo agente o da un gruppo di essi, al fine di migliorare la qualità della vita del sistema, sono stabilite da regole bottom-up.

Può venire naturale chiedersi perché sia necessaria la presenza di entrambi gli stati in uno stesso sistema, o perché non conviene avere tutti gli agenti in stato cooperativo. La risposta non è affatto ovvia, dato che la scelta di uno stato è dettata da regole bottom-up; quindi, una visione del sistema dall'alto non ci aiuta a capire quale sia la necessità di avere agenti in competizione fra loro. Eppure, ciò avviene, tipicamente perché al sistema conviene, magari per raggiungere uno stato migliore. Nei CAS, è affascinante osservare come gli agenti non scelgono uno stato per il bene del sistema globale, ma solo perché localmente conviene così. La distribuzione e l'unione e il numero di caratteri diversi sono caratteristiche emergenti, dettate da necessità implicite nel sistema. Si pensi all'equilibrio tra prede e predatori in un ecosistema, il numero di entrambi serve essere in equilibrio, la presenza di uno solo dei due provoca gravi e talvolta irreversibili sconvolgimenti al sistema. È quello che sta accadendo in molti ecosistemi nei quali l'influenza dell'uomo ha portato a una diminuzione drastica di un tipo di agenti (in uno dei due stati) causando cambiamenti radicali e dannosi.

La scelta di un comportamento determina anche il tipo di feedback loop che provoca. Entrambi i due tipi di feedback possono essere causati da entrambi i tipi di atteggiamenti (cooperativi o competitivi). Ad esempio, un feedback positivo può presentarsi in conseguenza a gruppi di agenti in cooperazione quando decidono di comune accordo di aumentare progressivamente una risorsa, o un processo, o spingere il sistema in una direzione, grazie alla forza combinata dei suoi agenti. Invece, si possono creare feedback negativi da agenti in competizione quando entrambi o anche solo uno dei due agenti in comunicazione vuole produrre un effetto opposto e contrario a quello del suo agente in competizione. Oppure in modo inverso un feedback loop negativo può anche essere dovuto ad una cooperazione, ad esempio cooperando nel mantenere uno stato, una risorsa o un processo in equilibrio. Invece, magari, per competizione si genera un feedback loop positivo per andare sempre a peggiorare od amplificare un processo, causando instabilità per l'altro agente o per indurlo a adottare un comportamento desiderato.

I motivi di una singola scelta locale o globale sono talvolta oscuri all'osservatore, questo è tipico dei CS. In senso figurato bisogna "*allontanarsi*" dalla figura e vederla



nel suo insieme per capire, come avviene nell'ammirare un quadro impressionistico (Emergence - John Holland).

### ***Aggregazione e Ricombinazione***

Abbiamo accennato prima al fenomeno di aggregazione tra agenti, vediamo cosa intendiamo nel dettaglio. Un agente da solo in un CAS ha un minimo effetto sul sistema, anche se mai nullo, apprende poco ed evolve poco in maniera solitaria. Ogni agente ha bisogno di altri agenti per una serie di funzioni base, dal comunicare per apprendere, dal ricevere feedback dei suoi messaggi, all'adattarsi ad un ambiente circostante sempre in cambiamento. Quello che spesso succede è il formarsi di pattern, di dimensioni e forme tutte differenti, di agenti aggregati fra loro. Ovviamente le dinamiche del come e quando esse si formino variano enormemente da sistema a sistema, e nello spazio-tempo.

Questi "*cluster*" di agenti sono necessari per suddividere un CAS in sottosistemi complessi più semplici, più focalizzati su meno scopi e più specifici nello svolgere funzioni chiave del sistema. Si prenda per esempio i tessuti del corpo umano, ognuno di essi è un CAS sottoinsieme del CAS più grande che è il corpo umano. Ognuno svolge funzioni specifiche ed ha obiettivi di minore entità di quelli del sovra sistema.

Eppure, la semplificazione e la specializzazione non sono l'unico motivo. Aggregati di agenti si formano anche per compatibilità di regole, di atteggiamenti o comportamenti affini, per tipologia di messaggi mandati, per età o per una varietà di altri motivi. Si possono riassumere sotto il termine di comodità, o di affinità, o di necessità. Aggregarsi con agenti affini per qualche parametro ha il desiderato effetto di migliorare la condizione dell'agente o di un gruppo di agenti, l'aggregazione vale infatti anche tra gruppi, non solo tra singoli.

Tuttavia nulla è immutabile in un CAS, ogni secondo avvengono eventi che portano a piccole continue modifiche del sistema. Questo causa la *ricombinazione*. Ovvero la separazione di un agente o di un gruppo da un cluster per ricombinarsi in un altro modo o con un altro cluster. Se accade continuamente è sintomo della vivacità di un CAS. Il continuo aggregarsi, sciogliersi e ricombinarsi in modo diverso, viene spesso visto come se il sistema "*respirasse*", e questo continuo respiro produce talvolta pattern semi globali o globali e peculiari comportamenti emergenti.

## ***Self organization***

Tutte le caratteristiche finora descritte si accomunano sotto il termine ombrello di "*self organization*", che traduciamo come auto organizzazione. Rappresenta la capacità di un CAS di organizzarsi in maniera autonoma, decentralizzata, auto condivisa, tendente all'ottimo e adattiva. È quindi una caratteristica che possiamo definire riassuntiva di tutte le proprietà dei CAS, in essa raccogliamo tutte le loro proprietà distintive.

I ricercatori affermano come questa sia una delle chiavi per capire profondamente un CAS ed è strettamente legato al concetto di bottom-up behavior. Infatti, un CAS si auto organizza sulla base di un insieme di regole nate "dal basso". La globalità delle regole locali degli agenti del sistema è la diretta responsabile di questo comportamento emergente di auto organizzazione e adattamento.

In un CAS tutto ciò che accade è perché risponde alla unica regola condivisa di auto organizzarsi, ma qui accade la magia: in realtà questa stessa regola si *auto produce*. Non è stata preimpostata nel sistema, o scelta da qualcuno o qualcosa, o nemmeno dagli agenti. Come direbbero i ricercatori "*it just happens*" (succede e basta). Emerge dal sistema anche se è lei stessa la causa dell'emersione. Sembra un paradosso ma è la natura complessa propria del sistema a creare questo loop, sempre presente fin dalla nascita di un nuovo CAS: far emergere regole di auto organizzazione auto prodotte. Ogni altra peculiarità e proprietà del sistema parte da un naturale e istintivo senso di auto organizzazione da parte del sistema, e quindi dei suoi componenti costitutivi.

Degli esempi sono le risposte condivise ad una emergenza nel sistema o nell'ambiente circostante, le risposte condivise ad una necessità di evoluzione e di adattamento, oppure lo stabilire quando, come e dove trovare le risorse necessarie al sostentamento del sistema e infine quali sono i suoi obiettivi, come raggiungerli passando da uno ad un altro, sperabilmente migliore. Tutto ciò il sistema è in grado di auto produrlo, si organizza in modo autonomo e decentralizzato per soddisfare uno qualsiasi dei suoi bisogni.

Ne esistono tanti di tipi diversi di auto organizzazione e appaiono in molteplici forme e modalità. Ogni CAS si può dire si caratterizzi proprio dal modo in cui esprime la sua facoltà di auto organizzarsi, quali regole auto produce, quali proprietà fa emergere, che intelligenza emerge dal sistema e in ultima analisi che pattern si possono distinguere nel sistema.

## 6. Un esempio di riferimento

Introduciamo uno dei CASS più studiati in natura: il formicaio. Questo CASS è uno dei più ricchi di studi sulla complessità e quello a cui si fa riferimento principalmente in *Emergence* di Steven Johnson a cui dobbiamo questo paragrafo. Il formicaio è un CASS interessante sotto molteplici aspetti e ci risulterà molto utile nella comprensione della teoria per CAS applicata ad un esempio pratico presente in natura.

Si tratta di un sistema complesso completo di tutte le caratteristiche analizzate precedentemente. Questo ci permette quindi di sfruttarlo come terreno di studi per la correttezza e completezza della teoria costruita finora, e infine come base di riferimento per la modellazione di un CAS.

Le formiche presentano migliaia di specie differenti, ognuna con le sue peculiarità. Ci limitiamo quindi a descriverne solo gli aspetti che generalmente si applicano a tutte loro o altri aspetti tipici di una sola specie ma che si legano profondamente ad argomenti di complessità. Una formica è un invertebrato a sei zampe, tre principali parti del corpo (capo, torace e addome) caratterizzati da un sistema nervoso piuttosto semplice.

La colonia rappresenta il gruppo di formiche che vive insieme in società. Mentre per formicaio si intende sia la struttura dove esse vivono sia la colonia che ci vive dentro. La maggioranza delle specie vive sottoterra dentro una rete di sale collegate da gallerie, costruite da loro stesse.

Esse formano un sistema sociale piuttosto complesso data la relativa semplicità dei suoi elementi. In una colonia sono spesso presenti delle gerarchie e dei ruoli, chiamate caste, è composta da formiche della stessa specie e talvolta formiche parassite anche di altre specie. In molte specie è presente una formica regina che ha il solo compito di riprodursi e deporre le uova. Ci sono poi le operaie, sempre femmine, che si distinguono in interne ed esterne. Le operaie interne si occupano di accudire le larve, di generare i maschi e nuove regine e di mantenere la struttura del formicaio. Le operaie esterne vanno in cerca di cibo nell'ambiente esterno al formicaio. Infine sono spesso presenti le formiche soldato, le quali si occupano della difesa della colonia, dell'attacco verso altre colonie, e dell'identificazione ed eliminazione dei parassiti nella colonia.

Dove risiede la complessità di un formicaio? Nella sua complessa rete di formiche comunicanti che lo popolano. Un formicaio segue un sistema di regole bottom-up, manifesta una serie di fenomeni emergenti dal sistema sociale, è fortemente adattivo e capace di auto organizzarsi.

Ad esempio, la scelta della divisione in caste è principalmente in mano alle operaie che si occupano della prole. Esse sanno che un tipo di alimentazione o un metodo specifico di supporto alla crescita delle larve produce un tipo specifico di forma fisica che stabilisce la casta della futura formica adulta. La scelta (dell'insieme di operazioni di

crescita della prole che causa la selezione delle caste) spetta ad ogni operaia da sola. Nessuna riceve ordini da altre. Eppure, il sistema si governa autonomamente e sa bilanciare –*quasi*– perfettamente il numero di maschi, di operaie, di soldato e la presenza o meno della regina fecondata. Come avviene questo? Grazie ai loro meccanismi di comunicazione, primo fra tutti per via dei feromoni. Le formiche hanno uno sviluppato senso dell'olfatto e sono altamente sensibili ai feromoni. Ogni comunicazione viene cifrata in una sequenza precisa di feromoni. Basta quindi secernere un certo tipo e quantità di feromoni per comunicare tanti tipi di informazioni. Esempi di informazioni "codificabili" sono l'età e la fecondità della regina, il numero di operaie incontrate, la distanza da una fonte di cibo, la presenza di un parassita o di un agente patogeno o di un predatore. Ogni formica rilascia feromoni specifici per il tipo di informazioni che vuole passare al formicaio. Ognuna di loro dà e riceve continuamente feedback delle informazioni che essa sparge nel formicaio ed all'esterno di esso. Dall'insieme di informazioni ricevute è in grado di avere notizie ed informazioni da altre formiche e poterle quindi ritrasmettere ad altre. Così ogni formica è in grado di elaborare le informazioni ricevute, imparare da esse e ritrasmetterle a sua volta per il bene della colonia. L'insieme di queste informazioni locali che viaggiano nel formicaio stabilisce tutte le regole sotto le quali esso vive. Regole che sono quindi auto prodotte in modo condiviso e distribuito da tutte le formiche.

Che comportamenti emergenti sono stati osservati nelle ricerche fatte? Si potrebbero fare molti esempi. S. Johnson descrive nel suo libro un caso di studio di un formicaio in laboratorio, confinato in una teca di vetro della dimensione necessaria al formicaio, con risorse di cibo a sufficienza per il sostentamento della colonia. Si è potuto osservare, tra le molteplici scoperte, la capacità del formicaio di sistemarsi in modo sempre più ottimale allo scorrere del tempo. Nel percorso evolutivo del formicaio si è notato come esse si siano organizzate per disporre in punti precisi e ottimali la locazione del "cimitero" e del "centro rifiuti". Esse hanno disposto in luoghi differenti le due zone. In una portavano le formiche morte, nell'altro i rifiuti e gli scarti del formicaio. È stata quindi calcolata la distanza tra le due zone e l'entrata al formicaio. Il pattern sorprendente che è emerso da questa scelta è che i tre punti siano molto prossimi ai vertici di un triangolo equilatero. Ovvero la distanza tra cimitero, centro raccolta rifiuti ed ingresso formicaio era quasi perfettamente la stessa. È come se le formiche siano state in grado di risolvere semplici problemi di geometria. Eppure, nessuna di loro sa farlo autonomamente, ma il sistema ne è in grado. Si è intuito e verificato come la rete fitta di comunicazioni dinamiche e non lineari tra formiche sia stata determinante nel far sì che una informazione attraversasse tutto il formicaio. Quest'ultimo, come fosse un sistema composto da un unico componente, nel tempo, si è adattato al meglio al suo ambiente ed ha imparato come la disposizione dei tre luoghi in modo equidistante sia ottimale. Non è tutto. I tre punti non solo formano un triangolo equilatero, sono anche posti ai limiti della teca di vetro, che rappresenta lo spazio di sviluppo del sistema. Questo vuol dire che la colonia non ha solo ottimizzato un problema geometrico astratto, ma è stata in grado di ottimizzarlo nel suo specifico ambiente di sviluppo prefissato. Tale comportamento ha permesso di comprendere il

grande senso di adattabilità. Non è ancora finito qui. Perché come se non bastasse la scelta delle tre posizioni nello spazio non è avvenuta da un giorno all'altro. È una conformazione, un pattern emerso, che ha attraversato varie generazioni di formiche per crearsi. Quel che è successo è che il sistema si evolve anche in funzione del suo ambiente e delle informazioni ricevute. Quest'ultime riescono a sopravvivere al passaggio generazionale. È come se il sistema avesse una memoria accessibile a prescindere dalla vita o morte delle sue singole formiche. E questa memoria permette la creazione di uno storico che risulta essenziale per la colonia nelle scelte che essa prende, scelte collettive e decentralizzate. Grazie a questa storia memorizzata ogni singola formica, agente del sistema, sa trarne informazioni, compiere scelte migliori, dare feedback alle sue vicine o quelle che incontra nel suo percorso, e contribuire indirettamente alla scelta finale del posizionamento ottimale dei tre luoghi. Osservando una singola formica sarebbe impossibile avere questa visione d'insieme e scorgere questi pattern e altri comportamenti emergenti. Una singola formica compie scelte locali in funzione della sua casta, delle informazioni che ha e che riceve. Non fa calcoli, non impone scelte alle altre. Non ci sono direttori o capi.

Sono stati poi osservati comportamenti di "tutoraggio" di formiche anziane verso quelle più giovani: formiche che insegnano alle altre a raggiungere la fonte di cibo trovata e poter quindi insegnare alle altre come raggiungerlo. Tuttavia, anche questo rapporto di ruoli maestro-allievo è un processo stabilito localmente ed internamente alla colonia. Non esiste una scuola, un governo che stabilisce tali ruoli. In questo caso si tratta di una scelta tra due singole formiche. Eppure, questa piccola scelta locale di ruoli in una singola coppia permette l'effetto non lineare di garantire il sostentamento e la sopravvivenza dell'intera colonia, che è l'approvvigionamento. La formica "allievo" diventerà successivamente "maestro" per poter insegnare ad altre a raggiungere il cibo, l'informazione si propaga e la colonia continua a vivere.

Nonostante l'apparente ottimalità del formicaio osservato in laboratorio, esso rimane un caso speciale perché confinato in un ambiente statico. Nella realtà l'ambiente è altamente dinamico, come lo è il formicaio. In natura si è osservato, infatti, come le forze che mette in gioco quest'ultimo per raggiungere l'ottimo sono continue. Non c'è fine al processo adattivo e di ricerca dello stato ottimo da parte del formicaio. Il motivo risiede nella natura dinamica del suo ambiente. Lo stato ottimo presente, non lo è più dopo un certo intervallo di tempo. Il formicaio impara allora a prevedere l'evoluzione del suo ambiente, ed è qui che avviene il mistero dell'anticipazione. Rimane ancora non chiaro ai ricercatori come sia in grado il sistema formicaio di apprendere come anticipare al meglio avvenimenti futuri e prepararsi in anticipo a adattarsi ad essi quando e se avverranno.

Esistono alcune specie di formiche in grado di aggregarsi in gruppi funzionali ad uno scopo ben preciso come creare delle forme a ponte tra un punto ed un altro usando i loro stessi corpi, o creare delle "barchette", formate aggregandosi tra di loro per formare specifiche forme, per poter attraversare piccoli corsi d'acqua. Tutto ciò

funziona e avviene senza ingegneri o capi cantiere, ogni singola formica comunica le proprie scelte alle altre e di comune accordo si stabilisce la forma e la modalità dell'aggregazione per svolgere al meglio un bisogno comune. Questo comportamento si è riscontrato in pochissime altre specie animali, le api ad esempio.

Altre specie di formiche sono altamente aggressive ed entrano facilmente in competizione con formicai limitrofi. Sono state osservate semplici strategie di guerra, di razzie tra colonie diverse e addirittura schiavismo di formiche catturate in formicai nemici limitrofi. Questi comportamenti permettono a tali specie la loro sopravvivenza, fanno parte della strategia a lungo termine di raggiungere degli obiettivi auto prodotti dalla colonia.

L'insieme di esempi, di domande e risposte e conseguenze tratte dallo studio e dalla ricerca di formicai riportati finora, crediamo sia sufficiente per rafforzare la teoria costruita affiancandola ad un esempio valido in natura di CASS. Sarebbe possibile portare ulteriori esempi a rinforzo della tesi dei comportamenti tipici da sistema complesso adattivo e sociale nei formicai, ma ci dilungheremo in trattazioni di biologia e zoologia estranee agli argomenti di complessità che si sta trattando.

## 7. Modellazione

### ***Incipit alla Modellazione***

Modellare un CAS è un'operazione ardua a causa della loro natura instabile e mutevole nel tempo e nello spazio. La loro tendenza evolutiva e di adattamento rende impossibile o impraticabile modellarli per via classiche o approcci tipici per tutti gli altri sistemi per i quali esiste sempre una soluzione.

Il primo scoglio che si incontra è quindi creare un modello che simuli la complessità del sistema modellato. Il modello non dovrebbe avere una unica soluzione fissa nel tempo, non deve avere un unico punto di equilibrio ottimale in ogni situazione, non può esserci uno stato ottimale costante nel tempo. Se ci fosse molto probabilmente il modello sarebbe troppo semplice, oppure non modella correttamente la realtà, o non rappresenta un sistema complesso. È il primo segnale che siamo fuori strada. Come fare ad evitare che il modello si areni su uno stato ottimo nel tempo od un unico punto di equilibrio? Adotteremo a proposito diverse tecniche per garantire il rispetto di questa proprietà che garantisce un livello minimo di qualità.

Un'altra difficoltà risiede nella unicità sostanziale di ogni CAS da ogni altro. Seppure abbiano tutti caratteristiche simili per natura e funzione, sono sistemi altamente variabili e mutevoli. Approcciarsi ad essi e tentare di modellarli deve quindi seguire un

comportamento ad hoc per ogni tipo diverso, nessuno è totalmente uguale all'altro. Per risolvere questo problema non tenteremo di modellare un CAS qualsiasi ma si adotteranno scelte ben precise sulla sua natura.

Un breve sommario su quale sia l'approccio consigliato dai ricercatori nello studio della Teoria della Complessità, ma ancor di più nello specifico di CAS, è di costruire modelli computazionali sulla base della teoria studiata. Modelli che siano quindi digeribili per un computer ed orientati alla computazione, preferibilmente altamente paralleli e interagibili, composti da un alto numero di agenti, governati da semplici regole che hanno effetto locale sul sistema e poi far evolvere il sistema autonomamente o come direbbero gli scienziati del settore: "just run it and see what happens" (J. Holland – S. Johnson – Miller and Page).

Finora abbiamo analizzato in maniera estensiva e dettagliata tutte le caratteristiche principali di CAS da un punto di vista prettamente scientifico, non necessariamente indirizzato alla modellazione, anche se è sempre stato il nostro scopo fin dall'inizio. Ci sono tuttavia altri aspetti dei CAS di cui non si è ancora trattato ma essendo delle peculiarità orientate propriamente alla loro modellazione si è ritenuto fosse più adatto trattarne solo ora. Naturalmente esse si appoggiano sulla base teorica fin qui costruita, la quale risulterà sempre fondamentale per qualsiasi riferimento e consulto durante la modellazione.

Per quanto la modellazione computazionale di CAS segue metodologie ad hoc e non standard è comunque necessario stabilire un insieme minimale di proprietà che il modello ha bisogno di avere per poter essere valido, ma ancor più per essere scientificamente interessante e fonte di studi.

Successivamente esponiamo le caratteristiche desiderabili in un modello di CAS. Vige il principio d'oro dell'equilibrio. Troppe regole e proprietà da rispettare e si confina il modello a rappresentare solo quello che gli si chiede e nulla di più. Si impedisce l'esplorazione e la variabilità, che sono invece estremamente importanti per modelli rivolti a sistemi complessi. Viceversa, troppe poche regole e troppa libertà conferita al modello ed esso è in grado di divergere enormemente dai casi di studio e dai risultati attesi, il caos e la casualità sarebbero talmente elevati nel produrre un nulla di fatto. La difficoltà è quindi trovare il giusto equilibrio, consci che la ricerca di tale punto di equilibrio è un processo lungo e richiede una grande quantità di prove ed errori per affinare sempre più il modello alla realtà, alla natura, ed agli studi raccolti.

### ***Modellare la complessità***

Se volessimo fare un sunto delle proprietà intrinseche di un CAS diremo che esso è caratterizzato da un insieme di elementi interconnessi, interdipendenti e comunicanti. È dinamico, imprevedibile e talvolta caotico. È governato da regole bottom-up e da relazioni di causa-effetto di tipo dal basso verso l'alto e viceversa. È in grado di auto

organizzarsi, adattarsi, riprodursi, ricordare il proprio passato e attuare strategie per il conseguimento di obiettivi futuri. Soprattutto manifesta Emergenza delle modalità più disparate, tra le quali l'intelligenza collettiva o l'affioramento di pattern.

La complessità non è data solamente dalla natura dei suoi agenti, come sappiamo, ma molto più dalle modalità delle loro interazioni reciproche.

Modellare un CAS è assai complesso a sua volta. È veramente difficile tentare di simulare tutti gli aspetti che li caratterizzano, un qualche tipo di cernita ad alcune loro proprietà o di astrazione di alcuni processi specifici risultano metodologie necessarie.

Purtroppo emergono seri problemi quando si tenta di semplificare un CAS. La domanda principe è: il modello rispecchia con fedeltà la complessità del sistema? Quanto posso semplificare il problema prima di romperlo e distanziarmi irrimediabilmente da esso. Ad esempio potremmo porci il seguente quesito a proposito un meccanismo di semplificazione: cosa succede se tolgo un agente in un sistema complesso?

Un sistema complesso è caratterizzato da agenti interdipendenti e influenzanti. Rimuovere un elemento dal sistema non lo rende meno complesso, il sistema rimane comunque complesso ma può cambiare profondamente la sua struttura. Esistono CS molto fragili nei quali la separazione di un solo suo agente può compromettere tutto il sistema. La rete di dipendenze, quando privata di un suo elemento, provoca effetti a cascata non lineari in grado di rompere definitivamente il sistema. Esistono invece CS più robusti nei quali la perdita di un suo agente non ne compromette la sua sopravvivenza o la sua integrità. Tuttavia, la separazione produce effetti che si propagano nel sistema da un elemento al vicino successivo. Il sistema può mutare profondamente la sua natura anche in risposta di un minimo evento. Più in generale si mettono in moto una serie di processi adattivi per compensare la perdita, e per riorganizzare autonomamente il sistema in modo che sia in grado di mantenere la sua natura il più possibile. In particolare varia da sistema a sistema la risposta a meccanismi di semplificazione, alcuni sono più sensibili di altri.

Risulta quindi difficile stabilire sempre con certezza se un modello che semplifica il sistema ne cattura profondamente la sua complessità. Eppure una qualche astrazione bisogna farla altrimenti sarebbero necessari dei super computer per modellare nel dettaglio alcuni CAS, come stanno facendo alcune aziende.

Modellare la complessità è quindi un'operazione ardua che si occupa di trovare degli equilibri, dei compromessi attraverso molte prove ed errori e raffinamenti continui.



## **Regole**

Un primo aspetto cruciale nella modellazione di CS è quale debba essere la struttura delle regole che lo governano. L'obiettivo è quello di modellare un sistema governato da regole bottom-up. Quindi l'approccio corretto è quello di dare un minimo insieme di regole agli agenti del sistema e poche o nulle regole generali top-down sul suo comportamento globale.

L'ambiente esterno del sistema può essere progettato secondo un approccio top-down, semplificando le modalità di interazione del sistema con esso. Tuttavia, tutto ciò che concerne il sistema necessita una modellazione originale e bottom-up. Ad ogni agente gli viene conferito un minimo insieme di regole, tra le quali le sue modalità di comunicazione, di ricevere feedback, magari di riconoscere semplici pattern, avere un certo grado di scelta e di libertà, permettergli una piccola memoria.

Si sono usate coscientemente parole imprecise come *minimo* e *piccolo* per descrivere quantità di regole. La ragione risiede nella difficoltà intrinseca alla modellazione per CS di stabilire a priori, per ogni diverso sistema, qual è la minima quantità di regole che un suo modello debba avere per simulare al meglio la sua natura complessa. Difficile è anche sapere con precisione i valori ottimali delle variabili del modello. Essi verranno stabiliti nel tempo grazie a continui raffinamenti. Inoltre, dipende enormemente che sistema si vuole modellare. È ben possibile creare modelli di sistemi con agenti molto poco intelligenti, si pensi al famoso Gioco della vita di Conway, governati da regole molto semplici. Come è anche possibile modellare sistemi molto complessi, ad esempio CASS nei quali gli agenti sono esseri umani. Modelli i quali agenti sono quindi molto intelligenti e complessi a loro volta, e le regole che li governano sono copiose.

In ogni caso governa l'equilibrio. Ed esso non si ottiene semplicemente risolvendo delle equazioni che ottimizzino tali parametri, per quanto sia possibile approssimarli. I valori ottimi di quantità e complessità di regole che governano ogni agente vanno migliorati progressivamente per far convergere il più possibile il modello al sistema atteso.

Da notare come la qualità di essere costruito in modalità bottom-up viene resa, quindi, dotando ogni agente di un insieme minimale di regole, tra le quali quelle di interazione con altri agenti. Si lascia poi eseguire la simulazione e lasciare che il sistema modellato si sviluppi, si auto organizzi, si adatti autonomamente e sperare di generare fenomeni emergenti. Sperare perché non si hanno garanzie sulla riuscita del modello e ancor meno dell'affioramento di comportamenti emergenti. Se ci fosse tale garanzia, non si potrebbe chiamare Emergence.

## ***Casualità***

Un approccio largamente usato nella ricerca di modelli per CAS è ricorrere ad una astrazione di casualità. Invece di far sì che il sistema presenti esattamente delle caratteristiche tipiche di CS, è più praticabile la via aleatoria. Alcuni processi e meccanismi vengono quindi simulati usando una certa quantità di componente aleatoria.

La scelta di semplificare alcuni meccanismi complessi, assumendo che essi siano governati da funzioni stocastiche non deve spaventare. Nella sperimentazione scientifica, si è notato come l'assunzione di astrarre e semplificare certi processi dotandoli di un grado di casualità, risulta un'idea vincente. Si è positivi che sia possibile comunque rendere il modello in grado di comportarsi in modo coerente al sistema studiato e rappresentato. Il motivo risiede nell'impossibilità di conoscere in modo deterministico e preciso ogni aspetto di sistemi in cui regna la complessità. Anche solo nello studio, ancor prima della modellazione o della simulazione, si assume che alcuni meccanismi, alcune funzioni o processi avvengano a caso, o in un certo intervallo di probabilità, anche quando non sono casuali.

In modelli computazionali applicati a CAS, l'uso di generatori di numeri pseudo casuali risulta di fondamentale importanza, per produrre alcuni aspetti celati nella complessità di questi sistemi. La scelta di quali generatori usare non è banale e anzi risulta quindi un punto critico nella modellazione.

Un'altra scelta importante da compiere da parte di chi modella è come sempre dove porre l'ago della bilancia. Stabilire il punto di equilibrio. Non si può lasciare tutto al caso, il sistema non rappresenterebbe nulla fedele alla realtà, sarebbe semplicemente un grande gioco di lancio dei dadi e raccolta di risultati sconnessi senza significato. Non è possibile nemmeno quantificare tutto, stabilire ogni valore, parametro, funzione, processo in modo deterministico e perfettamente accurato sempre. In questo estremo non staremmo rappresentando veramente un sistema complesso.

La difficoltà è allora nella scelta, derivata da un accurato studio della realtà di interesse, del CAS che si vuole modellare, dell'insieme minimale di elementi lasciati al caso. Tale insieme deve essere sufficientemente grande, ma non di più di quello, a far convergere il più possibile il modello alla realtà e cogliere il più possibile la intrinseca complessità studiata.

Infine, si ricorre a statistiche nella raccolta dei risultati sperimentali. L'approccio statistico ai risultati è necessario se alla base del modello numerosi elementi sono stati lasciati al caso. Viene naturale porsi domande del tipo: con quanta probabilità avviene questo comportamento, dati questi valori iniziali? Qual è il valore atteso di questa variabile aleatoria e la sua devianza, ad un dato istante di simulazione? Con quale

probabilità si manifesta un pattern o emerge dal sistema un comportamento o una intelligenza globale?

### ***More is better***

Per “more is better” (più sono meglio è) si intende dotare il sistema di un numero sufficientemente grande di agenti affinché si possa sperare di osservare un qualche tipo di Emergence. I CAS sono sistemi multi-agenti e nella rete di interconnessioni e dipendenze risiede parte della sua complessità. Come si può intuire più questa rete è densa o composta da più nodi-agenti, e più è facile che emergano proprietà di complessità. Meno agenti sono presenti e meno interconnessioni ci sono e meno interessante appare il sistema, o semplicemente più raramente si manifestano comportamenti emergenti.

Anche qui l'equilibrio ha la meglio. Cercare e trovare il numero adatto di agenti nel sistema è uno degli obiettivi primari di chi sviluppa modelli computazionali per CS. Rispetto ad altri punti di equilibrio prima affrontati questo è il più flessibile. Difatti non è veramente cruciale il numero esatto di agenti presenti nel sistema e che tale valore sia ottimale. Quel che veramente importa è trovare il numero sufficientemente grande affinché il modello abbia qualità, sia conforme alla teoria, rappresenti veramente il CAS modellato. “*Melius abundare quam deficere*”. Meglio abbondare il numero di agenti nel sistema e sopravvalutare tale valore che sottovalutarlo.

Il limite superiore a tale valore è dato dalla potenza computazionale a disposizione e dalla memoria del computer sul quale il modello computazionale viene eseguito. Una buona stima di questo numero “sufficientemente grande” può quindi essere vicino al numero massimo di agenti che il computer sul quale viene eseguito il modello sia in grado di calcolare, evitando di affollare la memoria o sovraccaricare la CPU.

Maggior potenza computazionale, maggiore sarà la capacità di modellare sistemi maggiormente complessi. In ambito scientifico e di ricerca i modelli più all'avanguardia fanno uso estensivo di cloud computing, calcolo distribuito e super computer per reggere il carico computazionale necessario allo sviluppo di nuove teorie e scoperte scientifiche.

### ***Parallelismo***

Una qualità ricercata in modelli computazionali per CAS è il loro grado di parallelismo. Tale qualità risulta necessaria se si vogliono modellare sistemi “vivi”, nei quali ogni suo agente pensa, comunica, sceglie e vive in modo autonomo. Un approccio potrebbe essere quindi quello di modellare ogni agente come governato da un processo che viene eseguito parallelamente a tutti gli altri. Questo aumenterebbe il livello di dinamismo del sistema e favorirebbe imprevedibilità e comportamenti emergenti. Di

contro un modello così altamente parallelo richiede una grande potenza computazionale e risorse di memoria e di energia. Un'altra soluzione sarebbe quella di rendere paralleli dei macro processi e non i singoli agenti. Questi ultimi interagirebbero in sequenza. Questa soluzione è più leggera in termini di potenza computazionale richiesta e meno energivora se sviluppata al meglio. Tuttavia potrebbe non assumere completamente la filosofia vera di un CAS in cui ogni agente dovrebbe avere vita propria ed agire sì in modo interdipendente ma autonomo.

Altre soluzioni sono possibili. Comunque sia il concetto è di cercare di bilanciare la complessità computazionale con la complessità del modello sviluppato, cercando di utilizzare al meglio paradigmi di programmazione parallela e distribuita, simulando ciò che avviene in natura in veri CAS.

## 8. Il nostro modello di CAS

Descrizione del software sviluppato, del nostro modello di CAS, della conformità alla teoria, dei suoi comportamenti emergenti e dei suoi pattern...

## Bibliografia

A proposito di Sistemi Complessi Adattivi:

- Emergence - Steven Johnson
- Complex Adaptive Systems - Miller and Page
- Complex Adaptive Systems - Serena Chan
- Complex Adaptive Systems - John Holland

A proposito di sistemi complessi e pattern in natura:

- Knowledge Management, Organizational Intelligence and Learning, and Complexity - L. Douglas Kiel
- La Teoria del Tutto – Stephen Hawking
- Sezione aurea – Mario Livio

## Sitografia

Doppio pendolo:

- <https://www.mypysicslab.com/pendulum/double-pendulum-en.html>

Chaos Theory:

- [https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-09-classical-mechanics-iii-fall-2014/lecture-notes/MIT8\\_09F14\\_Chapter\\_7.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-09-classical-mechanics-iii-fall-2014/lecture-notes/MIT8_09F14_Chapter_7.pdf)

A proposito del Physarum polycephalum:

- <https://www.pnas.org/content/109/43/17490>
- <http://social.mbl.edu/how-can-a-slime-mold-solve-a-maze-the-physiology-course-is-finding-out>

Formiche e api:

- <https://www.britannica.com/animal/ant>
- <https://www.britannica.com/animal/hymenopteran/Features-of-immature-stages>
- <https://misfitanimals.com/ants/ant-pheromones>

Emergence:

- <https://www.youtube.com/watch?v=16W7c0mb-rE>

Vita:

- <https://www.youtube.com/watch?v=QImCld9YubE>

Intelligenza:

- <https://www.youtube.com/watch?v=ck4RGeoHFko>

Coscienza:

- <https://www.youtube.com/watch?v=H6u0VBqNBQ8>