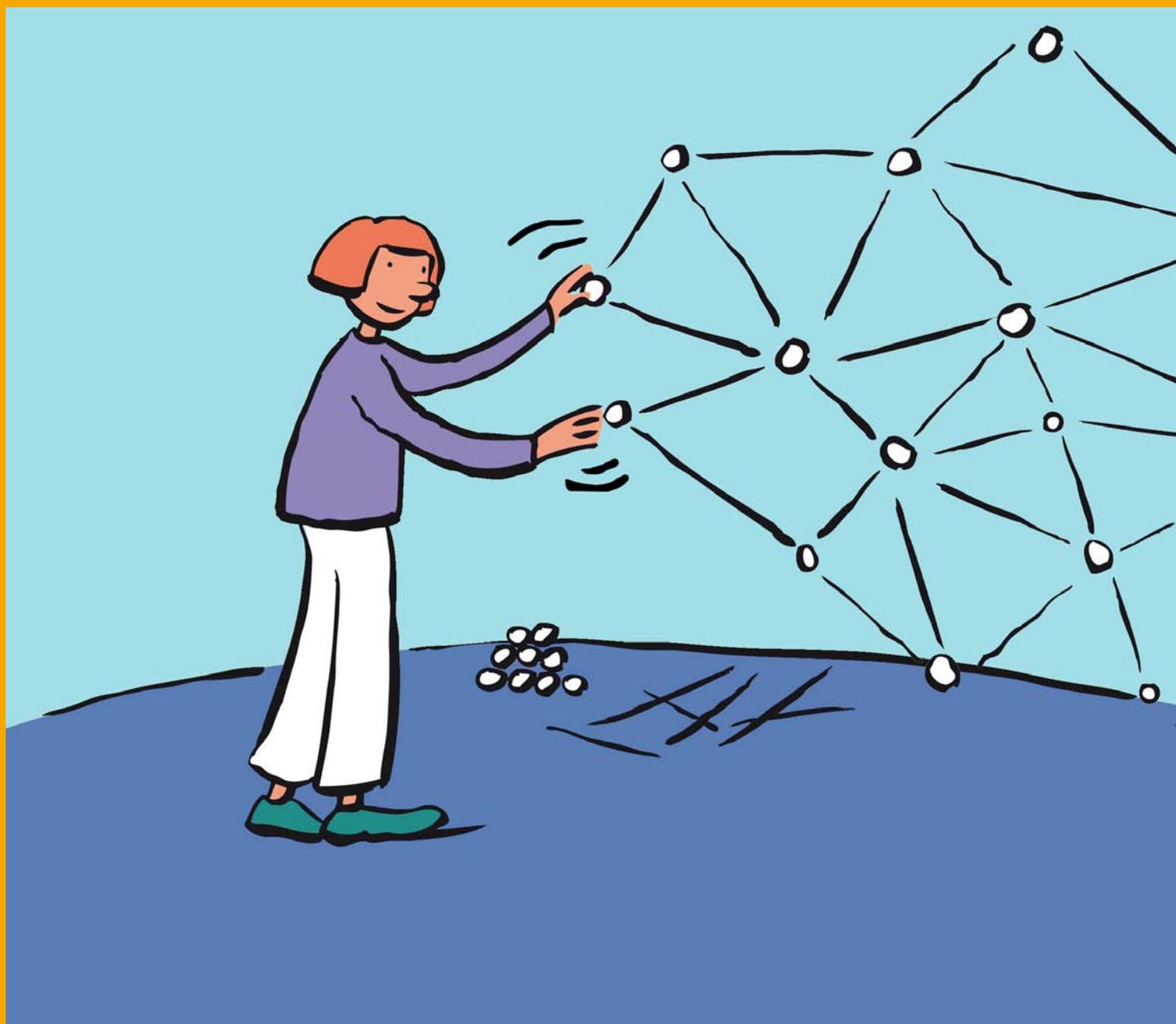


SEMPLIFICARE LE RETI DI DOMANI

Antonio Manzalini



Lo sviluppo tecnologico dei terminali e la progressiva introduzione di capacità di comunicazione in un crescente numero di dispositivi sta determinando la nascita di reti con miriadi di nodi interagenti. Queste reti saranno caratterizzate (soprattutto ai bordi) da un modello di interazione dinamico, molto articolato e costituiranno un vero e proprio ambiente di comunicazione, con continui auto-adattamenti locali. L'introduzione di capacità autonome nei nodi di queste reti diventerà un importante abilitatore, non solo per semplificarne la gestione ma anche per trasformare la rete da un sistema di interconnessione ad un potente attrattore su cui creare servizi e valore. L'Operatore sarà tanto più in grado di cogliere queste opportunità di business, quanto più saprà dominare la complessità delle reti future, agendo sia livello micro (attraverso introduzione di comportamenti autonomi locali), sia a livello macro (attraverso la comprensione matematica delle proprietà emergenti che determinano vantaggi competitivi).

1 Introduzione

Le reti di domani saranno simili alle reti degli ecosistemi in Natura, cioè basate su principi autonomi. Gli ecosistemi della biosfera infatti esistono e si sono evoluti per milioni di anni: sono esempi di sistemi complessi capaci di auto-organizzarsi, (anche in assenza di un controllo centralizzato) e di auto-adattarsi al variare delle condizioni al contorno. L'esempio che viene subito in mente è quando ci compriamo un PC: sarebbe bello se il PC fosse in grado di scoprire, da solo, cosa c'è in casa e si auto-configurasse in modo opportuno, magari ogni volta che cambia qualcosa nell'ambiente domestico. Questo è un comportamento di tipo autonomo.

Torniamo agli ecosistemi in Natura, in particolare prendiamo l'esempio delle colonie di termiti. La società di questi

insetti ha avuto uno straordinario successo evolutivo: è una delle più antiche del pianeta, conservandosi ed adattandosi per oltre 100 milioni di anni. Il comportamento di questi insetti è tra i più studiati, non solo in sociologia o biologia ma anche in ingegneria. Il comportamento di una termite è per sua natura semplice, ma dall'interazione di centinaio di migliaia di individui emerge la straordinaria organizzazione del termitaio. Cosa abbiamo imparato ad oggi dall'osservare in queste colonie?

Prima di tutto che i singoli individui hanno dei modelli di comportamento molto semplici: alcuni sono rapidissimi, automatici, altri, elaborati dal sistema nervoso, sono reazioni autonome a situazioni impreviste. Questi comportamenti sono basati su informazioni acquisite localmente (ad es. ottenute attraverso lo spazio fisico locale e attraverso l'interazione con i

vicini). La seconda cosa che abbiamo imparato è l'esistenza di una fitta (apparente) rete di "comunicazioni" che permette alle termiti di interagire in modo semplice ma efficace. In questo caso la rete è una creazione della nostra immaginazione, un modello che ci serve per spiegare i fenomeni emergenti. Un altro esempio di rete è quella energetica: tutti gli individui, di ogni casta e funzione, comunicano e sono legati agli altri attraverso continui scambi di cibo. Tutta la società è informata dello stato energetico del termitaio: quanto cibo (e di quale qualità) è a disposizione e quindi organizza ed indirizza nuove ricerche in base alle esigenze dinamiche.

In sintesi possiamo concludere che, per quanto comportamento della singola termite, nella sua semplicità, abbia (apparentemente) uno scarso significato, il comportamento complessivo di una colonia di termiti ha

come risultato l'emergere di una straordinaria organizzazione, con proprietà prevedibili. Questa plasticità consente alle termiti di adattarsi e superare in modo creativo i momenti di difficoltà: un'inondazione, un attacco di formiche predatrici o la distruzione di parte del termitaio.

Non abbiamo tuttavia bisogno di gestire il comportamento delle singole termiti per avere un termitaio ben organizzato, indipendente e capace di auto-adattarsi. La metafora è quindi immediata: lo studio degli ecosistemi ci fornisce gli strumenti per capire e sviluppare le reti di domani, costituite da una miriade di semplici nodi ed oggetti "ingestibili".

Il biologo Francisco Varela, per spiegare il comportamento delle termiti, ha formulato la teoria dell'enazione, secondo la quale ogni atto cognitivo di un singolo insetto è legato alla sua esperienza di "essere nel corpo"; questa esperienza corporea è autonoma e auto-riferita, nel senso che non dipende dall'ambiente esterno, ma dalla dinamica interna dell'individuo.

Ogni singola termite infatti non sa cosa sta facendo o deve fare. Non ha una idea di sé o del suo ambiente. Semplicemente vive della prospettiva del suo corpo accoppiato con l'ambiente per mezzo di cicli automatici di percezione-azione, accoppiati con il suo sistema nervoso (in grado di apprendere e quindi di creare nuovi cicli automatici di percezione-azione) e con l'ambien-

te (attraverso le informazioni ottenute attraverso lo spazio locale e interagen- do con i vicini). L'auto-organizzazione del termitaio dunque emerge da questi tre anelli funzionali di causalità circolare (Figura 1).

I cicli percezione-azione sono normalmente rapidissimi e inafferrabili, ma possono lasciare qualche traccia a livello del sistema nervoso negli istanti di breakdown, momenti di rottura dell'agire automatico. Per fare un esempio, quando una termite incontra una galleria distrutta e si ferma il suo sistema nervoso si deve riorganizzare, deve produrre nuovi cicli senso-motori adeguati alla situazione.

La teoria enattiva sostiene anche l'accoppiamento globale dei cicli di percezione-azione locali: è come se un gruppo di termiti possa sincronizzarsi (pensate anche al lampeggiare delle lucciole). Nel seguito, a tal proposito, parleremo del modello matematico di Kuramoto. Non si sa esattamente cosa possa produrre questo sincronismo. Le attività della colonia seguono la vibrazione di questo "campo" che ha zone di amplificazione ed attenuazione: solo dove e quando l'ampiezza supera determinate soglie, il campo "manifesta" un'azione collettiva, una transizione di fase.

Ho insistito sull'esempio del termitaio in quanto si presta bene quando si pensa alle reti di domani: i nodi, ma anche i terminali e gli oggetti (quasi come termiti) potranno attuare, sulla

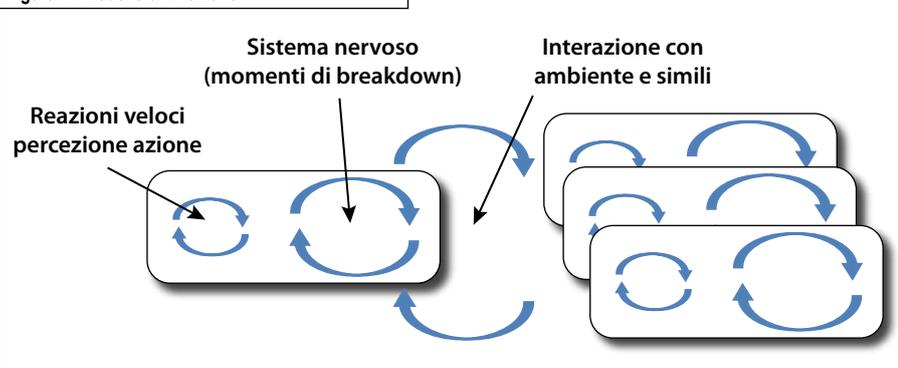
base della percezione del contenuto locale, delle decisioni elementari autonome e dall'interazione di questa miriade di micro-comportamenti potranno emergere dinamiche di auto-organizzazione, senza la necessità di un controllo centralizzato.

Nelle reti di domani ogni terminale oggetto diventerà come un nodo: potrà collegarsi alla rete e fruire di qualunque servizio e informazione ed interagire anche con altri terminali ed oggetti. La distinzione tra nodo di rete, terminale ed oggetto scomparirà: tutte queste entità saranno sensibili al contesto, riceveranno dati e informazioni e decideranno in modo autonomo cosa fare.

In questo modo la rete (autonomica) diventerà dunque l'elemento "embedded" alla base di nuovi ecosistemi, sui quali attrarre il sempre nuovo valore, attori e industria, anche in contesti apparentemente "lontani".

Consideriamo l'esempio dei libri elettronici che contengono la capacità di accesso ad Internet tramite la rete dell'Operatore. In molti casi la rete non è percepita da chi acquista il libro, in quanto è fornita in modo trasparente. Questo succederà sempre più spesso nel futuro: l'introduzione di "embedded communications" nei prodotti permetterà all'Utente di fruire di tutta una serie di servizi senza percepire un costo della connettività. Questa infatti è parte integrante del prodotto, dell'oggetto. Questa situazione si diffonderà ulteriormente con il Cloud Computing grazie anche al diffondere dell'Internet delle Cose e con le Cose.

Figura 1 - Modello di Enazione



2 Come realizzare le reti autonome

Abbiamo visto come i comportamenti autonomi siano alla base degli ecosistemi in Natura. In questa sezione entreremo nel dettaglio di come si possono realizzare nei nodi, terminali e og-

getti in rete dei comportamenti autonomi, o addirittura come la rete emerge dall'interazione di queste entità.

Le reti degli ecosistemi servizi di domani saranno inevitabilmente caratterizzate da alta pervasività e dinamismo: ai bordi, ogni terminale ed oggetto si comporterà come un vero e proprio nodo, sarà cioè in grado di collegarsi ad altri nodi per fruire di qualunque servizio e informazione o semplicemente di inoltrare dati. La prima cosa che vogliamo è che questi nodi (dotati di capacità di comunicazione-networking, processing e storage) siano sensibili al contesto locale (ad es. attraverso raccolta e scambio dati) e siano capaci di auto-adattarsi dinamicamente (ad es. attraverso l'attuazione automatica di configurazioni). Insomma che si "comportino" quasi come delle termiti! Non possiamo ovviamente aspettare milioni di anni di evoluzione per creare degli ecosistemi completamente indipendenti ed in grado di auto-organizzarsi ed auto-adattarsi, per cui gli Operatori dovranno dettare delle regole di alto livello (policy) per indirizzare l'emergere di determinate proprietà (di auto-organizzazione). Questo significa che l'Operatore dovrà quindi saper dominare la complessità delle reti future, agendo sia a livello micro (attraverso introduzione di comportamenti autonomi locali) sia a livello macro (attraverso la comprensione delle proprietà emergenti).

L'introduzione di capacità autonome nei nodi di una rete ha dunque il principale obiettivo di "semplificare" gli aspetti di gestione-controllo ed utilizzo delle risorse. Infatti, da un lato si ha il vantaggio di limitare l'intervento (e gli errori) degli operatori umani (ad es. per configurazioni di basso livello dei router), dall'altro si automatizza l'ottimizzazione nell'utilizzo delle risorse di rete (ad es. banda, spettro, energia, ...).

Per un esempio, ricorriamo ancora alla metafora degli ecosistemi. Il consumo

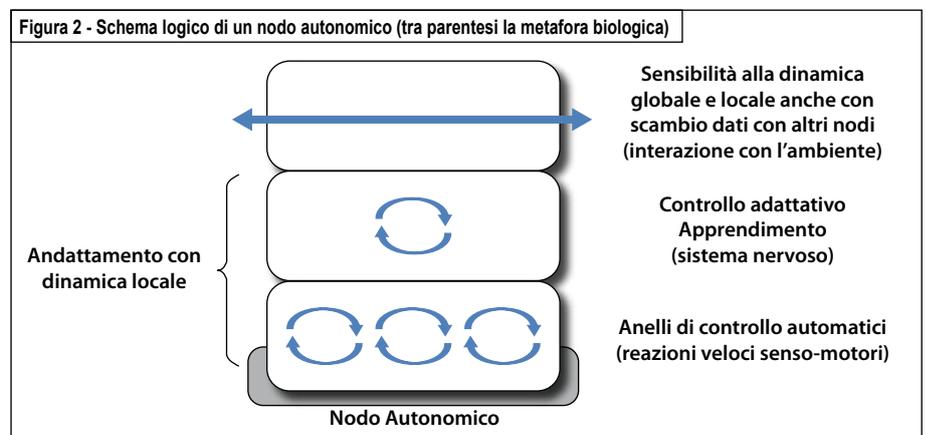
di energia è un elemento chiave in tutte le evoluzioni degli ecosistemi. La maggior parte dei collassi di ecosistemi sono dipesi da crisi energetiche. In una rete, il consumo energetico deve considerarsi come un complesso di fattori che possiamo ricondurre al costo totale di acquisizione, installazione ed esercizio (ad es. gestione). L'introduzione di capacità autonome in una rete incide in maniera determinante nell'abbattimento dei costi, e quindi dei consumi di energia degli ecosistemi associati.

Abbiamo probabilmente già intuito dalla teoria dell'Enazione che ciò che rende un nodo autonomo è l'introduzione funzionale "di anelli di controllo automatici e di capacità di apprendimento" (Figura 2). Tali meccanismi, pur variando un base al contesto di applicazione, possono essere implementati, già oggi, con diverse tecnologie e soluzioni. Gli elementi costitutivi di base comprendono le seguenti capacità:

- rilevazione del contesto: ad es. raccolta (sensori, sonde, ...) e scambio dati con ambiente e altri nodi;
- elaborazione dati e apprendimento: ad es. tecniche e metodi di data mining, controllo adattativo (adaptive control) [1] e apprendimento (reinforcement learning [2], [3]^{1,2});
- attuazione rapida (ad es. con attuatori nei controllori di nodo): ad es. metodi di decisione automatica (ad es. a soglia, o if-then-else).

Come si diceva, lo sviluppo dei sistemi e delle reti autonome ha una forte ispirazione biologica. In Natura, sia a livello del singolo organismo vivente sia a livello di ecosistemi, i principi autonomi governano le dinamiche comportamentali e le proprietà emergenti [7], [8], [9]. Attualmente sono già disponibili alcuni prototipi per la sperimentazione di piattaforme autonome di rete e servizi. Ad esempio l'Autonomic Computing Toolkit di IBM [10] costituisce un set aperto di librerie Java, plug-in e tool creati per l'ambiente di sviluppo Eclipse. Secondo questa architettura (di tipo gerarchico), ogni risorsa è dotata di un autonomic manager (Figura 3) che implementa autonomamente alcune funzioni di auto-gestione secondo il modello MAPE-K (Monitor, Analyze, Plan, Execute - Knowledge). Gli autonomic manager, inoltre, interagiscono tra loro e comunicano con gli orchestrating autonomic manager (del livello gerarchico superiore), che condividono la visione d'insieme e agiscono da coordinatori.

Nell'ambito del progetto europeo CA-SCADAS è stato sviluppato un tool kit [11] di componenti autonomi per l'astrazione delle risorse di elaborazione. In particolare, il tool kit si basa su un'architettura decentralizzata di unità elementari (componenti) che interagiscono tra di loro e mutano il loro comportamento e le loro relazioni in



1 Adaptive Control comprende delle tecniche di stima e predizione matematica dei parametri caratteristici del sistema controllato al fine di adattare le dinamiche di controllo. Reinforcement learning comprende una serie di tecniche e metodi (tipici della Computer Science) volti al problema dell'apprendimento (trial-and-error) di un sistema in un ambiente dinamico.

2 Un interessante campo di applicazione delle tecnologie autonome è quello dei piloti automatici [4], un insieme di sistemi s/w e h/w capaci di guidare un veicolo (ad es. aereo, nave, vettura) senza assistenza da parte di un essere umano. Altri esempi di applicazione sono le flotte di Unmanned Aerial Vehicle [5] sviluppati nel settore militare e gli swarm di robot [6].

base a regole codificate al loro interno. Il componente autonomico sviluppato nel progetto CASCADAS può essere schematizzato attraverso due cicli di controllo (Figura 4): il ciclo interno ha la funzione di garantire la gestione interna del componente (come la riconfigurazione in caso di guasto, l'ottimizzazione dei parametri di configurazione, ecc); il ciclo esterno abilita l'interazione con l'ambiente esterno, garantendo l'adattamento al contesto. Inoltre un componente autonomico ha anche capacità di apprendimento e ragionamento che gli permettono di aggiornare i propri piani di comportamento in base all'evoluzione delle variabili di contesto interne ed esterne.

Un componente autonomico diventa dunque come un organismo capace di raccogliere eventi ed auto-adattare il proprio comportamento secondo le variazioni del proprio stato interno, del contesto e delle interazioni con altri componenti.

L'esperienza sui sistemi autonomici acquisita da Telecom Italia in CASCADAS, confluisce attualmente nella partecipazione ad un altro progetto europeo UNIVERSELF [12]. In particolare questo progetto si propone di integrare le conoscenze acquisite a livello internazionale per progettare e sviluppare - in ottica industriale - un prototipo di sistema di gestione di rete, autonomico e parzialmente distribuito, chiamato UMF (Unified Management Framework). L'idea di base è sviluppare algoritmi e metodi che possano rendere in certa misura nodi autonomici (con comportamenti locali auto-adattativi) e poi attuare delle capacità di orchestrazione attraverso l'UMF (Figura 5), in grado di recepire e tradurre le policy (di alto livello) dell'Operatore in configurazioni locali.

Queste attività di ricerca internazionali stanno anche maturando in ambito standardizzazione. Ad esempio in ETSI (Industry Specification Group (ISG) "Autonomic Network Engineering for

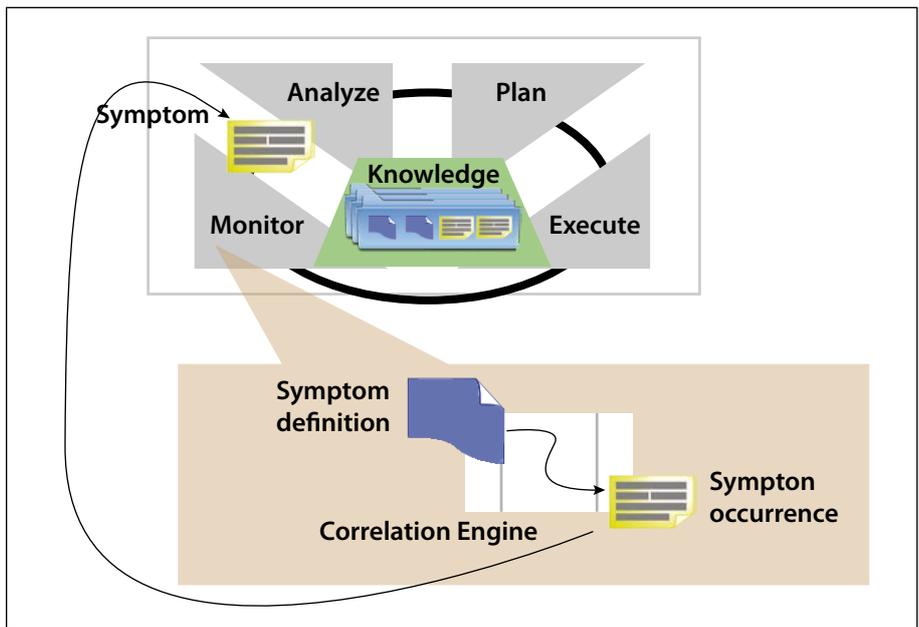


Figura 3 - Schema logico di un componente autonomico (IBM tool kit [7])

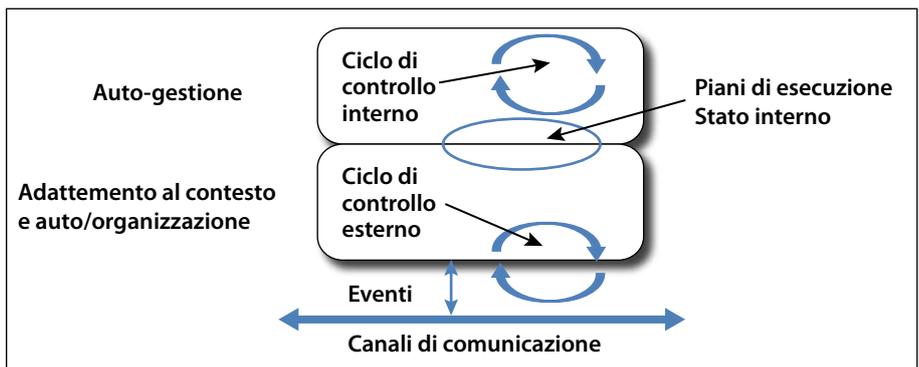


Figura 4 - Schema logico di un componente autonomico (CASCADAS tool kit [11])

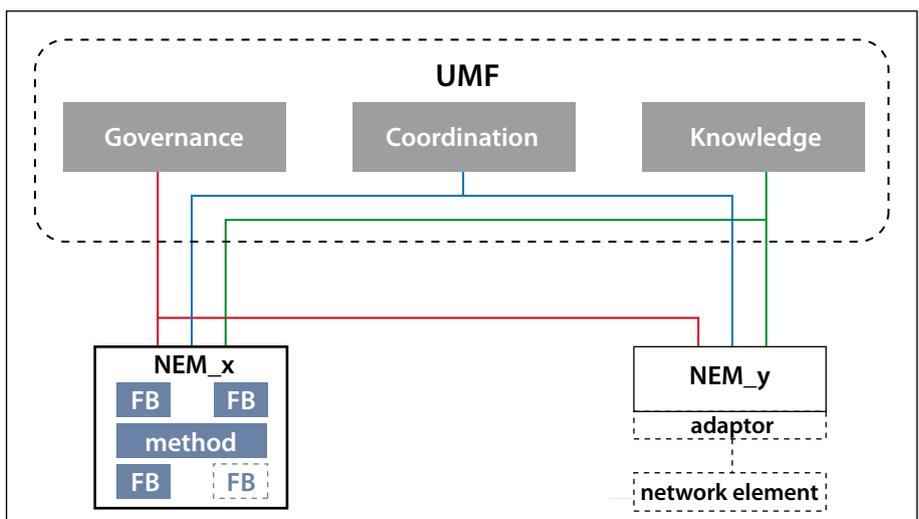


Figura 5 - UMF del progetto europeo UNIVERSELF [12]

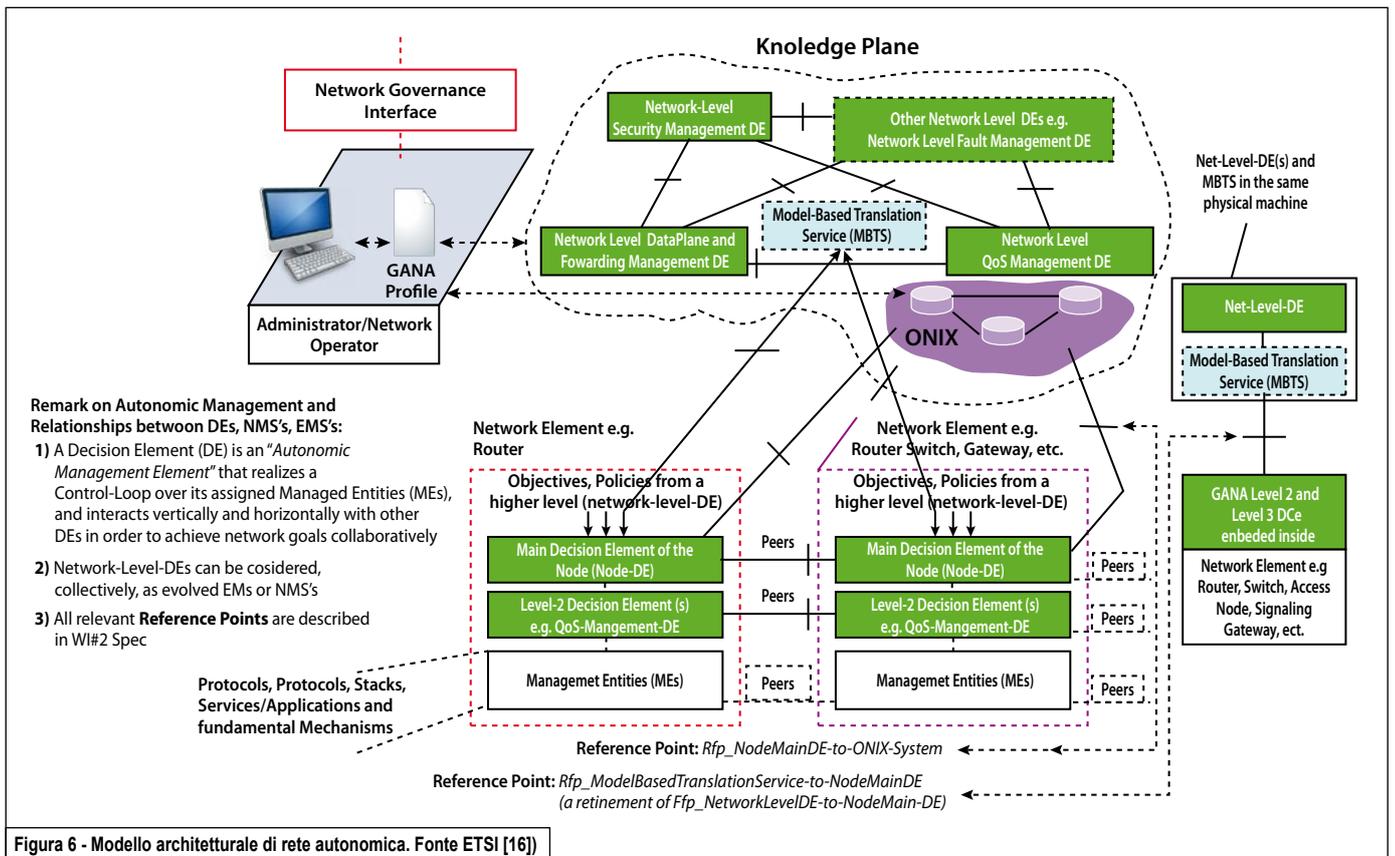


Figura 6 - Modello architetturale di rete autonoma. Fonte ETSI [16]

the Self-Managing Future Internet") [16] è in corso definizione un modello architetturale di rete autonoma. Gli elementi costituenti di base di questa architettura sono riportati in Figura 6.

3 La matematica delle reti

Introdurre comportamenti autonomi nei nodi di una rete non basta: occorre saper indirizzare le dinamiche emergenti. Qui interviene la matematica delle reti con gli strumenti di Industrial Mathematics (come ad es. Piccoli Mondi, Teoria dei Giochi, del Chaos, della Percolazione).. Il messaggio principale è che il successo dell'Operatore dipenderà dalla capacità di semplificare la rete del futuro, fino a farla "scompare". In tal senso dobbiamo saper sfruttare la capacità del nostro cervello di cogliere

l'esistenza di strutture semplificate, facili da catturare matematicamente. Ad esempio, se pensiamo al fiocco di neve, nonostante la sua forma complessa, dal punto di vista percettivo cogliamo la sua simmetria che ci dà un senso di semplicità: i fiocchi di neve sono delle forme matematiche (frattali) che vengono generate a partire da una relazione in cui, al variare dei parametri, si creano sottostrutture, ciascuna diversa dalle precedenti ma straordinariamente simile al nostro occhio. La scoperta di queste "regolarità", e della matematica che la governa, ha lo straordinario effetto di semplificare, in quanto bastano poche informazioni per descrivere sistemi enormemente complessi. Dovremmo saper applicare lo stesso principio per le reti di domani. L'organizzazione delle formiche nasconde un ordine complesso governato da poche variabili locali, che, per quanto difficile da modellizza-

re, è chiaramente evidente. Quando una formica trova una fonte di cibo, lascia delle tracce di "feromoni" per aiutare le altre formiche a percorrere la stessa strada e rintracciare più velocemente il cibo: il tasso di diffusione e di evaporazione dei feromoni (variabili) emessi dalle formiche condiziona il raggiungimento e la rapidità di esaurimento delle scorte di cibo situate nei paraggi. Di nuovo la scoperta di poche variabili e della matematica che la governa, semplifica drammaticamente la complessità. Ma c'è di più: non c'è un'effettiva rete di comunicazione tra le formiche, ma solo il loro comportamento locale (rilascio di ormoni e reazioni al contesto): la rete (dotata apparentemente di un ottimo algoritmo di routing) è una proprietà emergente. Questo significa che se saremo bravi a "semplificare", domani potremmo avere delle reti a zero costi.

4 Piccoli Mondi

È stato osservato come la maggior parte dei sistemi complessi evolva spontaneamente in reti di tipo Piccolo Mondo, le cui caratteristiche salienti sono l'alto livello di aggregazione e il basso grado di separazione. Ogni elemento della rete tende ad avere relazioni prevalentemente con pochi altri (alta aggregazione), ma questo non impedisce di ottenere comunque una sua "vicinanza", tramite pochi intermediari (hop), con qualsiasi altro elemento della rete (basso grado di separazione). E' come dire che le reti Piccolo Mondo sono caratterizzate da legami forti e legami deboli. I legami forti rappresentano interconnessioni o aggregazioni locali, mentre i legami deboli forniscono la connettività complessiva. Le reti Piccolo Mondo garantiscono una maggiore efficienza nella circolazione della informazione, inoltre sono più robuste, ossia hanno una più alta tolleranza agli errori casuali che impedisce la frammentazione del sistema.

Anche osservando il Web, la rete di interconnessioni esistenti tra le diverse pagine, ovvero i link per passare da una pagina all'altra pagina, si scopre che è di tipo Piccolo Mondo. Anche le reti funzionali di neuroni nel cervello mostrano queste caratteristiche. Queste reti hanno anche l'interessante peculiarità di essere invarianti rispetto alla scala. Questo significa che se anche aggiungiamo molti nuovi elementi, in generale il numero di passi che occorrerà fare, per passare da un elemento all'altro, non varierà in modo significativo. In altre parole queste reti mantengono basso il livello della complessità comunicativa anche quando le dimensioni aumentano. È grazie a queste caratteristiche che abbiamo in natura ecosistemi così complessi: quello che tiene insieme il tutto è la comunicazione tra le sue parti e questa sarebbe inefficace, se la sua complessi-

tà crescesse con la complessità dell'organismo.

5 Il ruolo del Chaos

Contrariamente all'accezione comune, in termine Chaos non significa disordine, assenza di ogni struttura ordinata: il Chaos matematico è un ordine complesso, nascosto, difficile da individuare che rende difficile azzardare "previsioni". Un sistema viene definito caotico, se la sua dinamica è fortemente condizionata dalle variazioni di alcuni parametri, le cui variazioni possono produrre effetti molto diversi. Di solito questi sistemi hanno comportamenti non-lineari che non cambiano gradualmente, ma attraversano delle soglie critiche dopo le quali la loro struttura (nello spazio) e/o il loro comportamento (nel tempo) possono cambiare drasticamente (il cosiddetto fenomeno delle transizioni di fase). Questi concetti si applicano bene alle reti di domani, ad esempio quelle principalmente basate su comunicazioni locali. Ad esempio la Figura 7 è riportata la transizione di fase della probabilità che una rete di nodi mobili (con comunicazioni locali) sia interamente connessa (in funzione del raggio di comunicazione medio).

Figura 7 - Esempio di transizione di fase

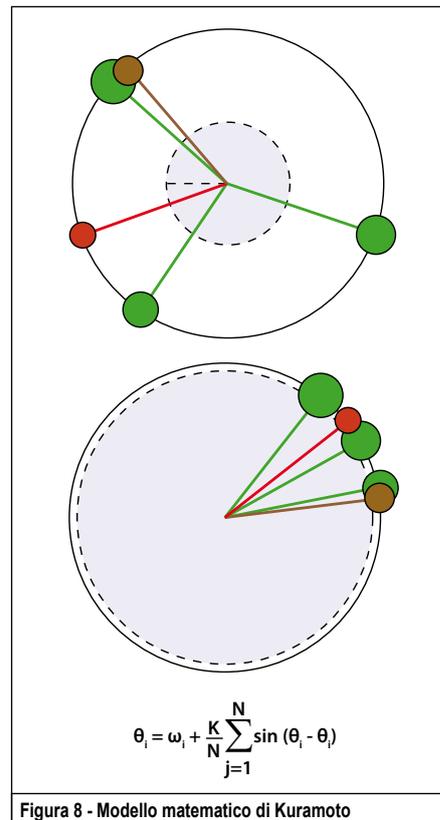
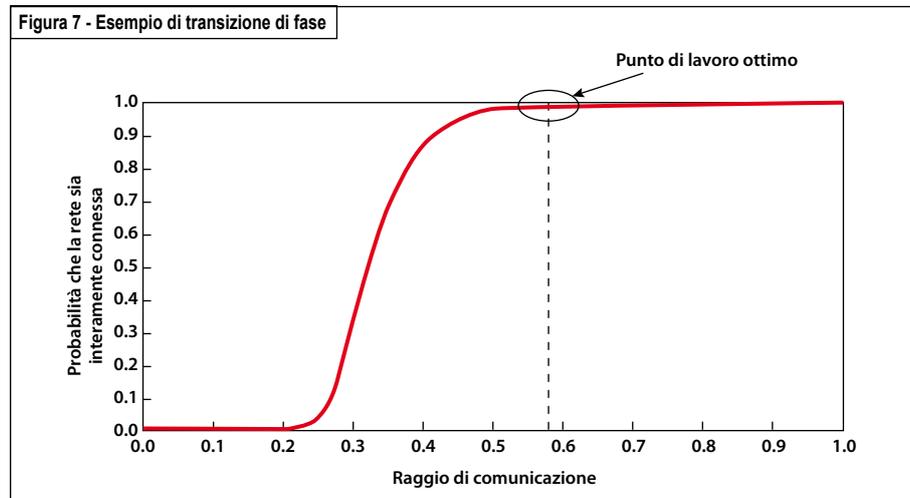


Figura 8 - Modello matematico di Kuramoto

Un'altra caratteristica di molti sistemi caotici è la straordinaria proprietà di sincronizzare spontaneamente i propri elementi. Nel regno animale troviamo parecchi esempi, dal lampeggiare delle lucciole al canto dei grilli, dagli stormi di uccelli ai branchi di pesci. L'interesse di questi sistemi risiede nel loro comportamento collettivo (di

sincronizzarsi), ossia di raggiungere, dopo una fase transitoria, la stessa frequenza finale, pur avendo frequenze proprie distinte. L'obiettivo è capire come.

Il modello matematico di Kuramoto, ad esempio, (Figura 8), sviluppato per un sistema di oscillatori accoppiati, dimostra come al di sotto di un valore di soglia gli oscillatori siano incoerenti, poiché le forze esercitate si elidono a vicenda, ma come, all'improvviso, una volta oltrepassato il limite, la sincronia appaia.

Il modello di Kuramoto è stato utilizzato in molti scenari, anche nel settore di telecomunicazioni (per esempio nello studio delle ad hoc network) o in ambito sociale.

6 Teoria dei Giochi

Le reti del futuro saranno caratterizzate da un modello di interazione dinamico, non lineare, molto articolato, e costituiranno un vero e proprio ambiente di comunicazione, con possibili transizioni di stato causate da situazioni spesso caotiche, con continui auto-adattamenti. Dietro il palcoscenico di queste reti ci sarà una molteplicità di Player (non solo Operatori, OTT, ma anche fornitori di elettronica di consumo, o comunità locali), che collaborano e competono, secondo diverse strategie di business. Qui può aiutarci la Teoria dei Giochi. B.B. de Mesquita, ha dimostrato la semplicità ed i vantaggi dell'applicazione della teoria dei giochi nei più disparati contesti: dalla possibilità di predire un attacco militare, all'acquisto di un autoveicolo a condizioni vantaggiose, all'anticipazione di certe dinamiche di mercato. Altre ben note applicazioni nel contesto delle telecomunicazioni riguardano dalla condivisione delle risorse trasmissive in una rete ad-hoc wireless (quindi senza controllo cen-

tralizzato) ai meccanismi di incentivazione in reti peer-to-peer.

La Teoria dei Giochi si occupa infatti dello studio di situazioni di conflitto, competizione tra un certo numero di individui e ne ricerca soluzioni cooperative e non cooperative tramite l'analisi delle decisioni individuali in situazioni in cui vi sono interazioni tra i diversi soggetti.

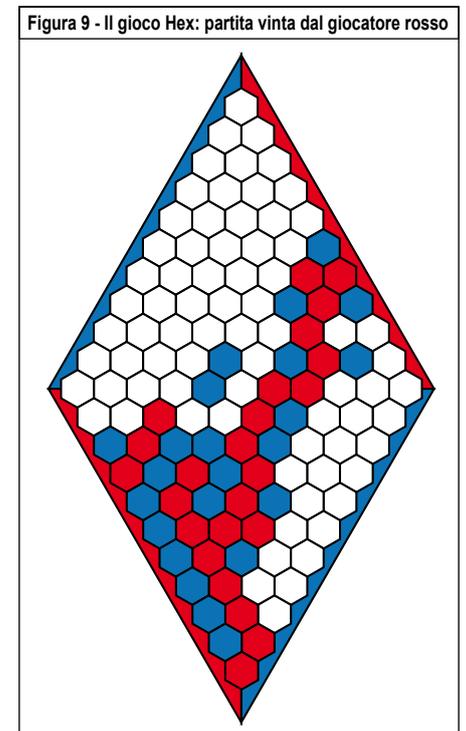
La moderna Teoria dei Giochi fornisce dunque strumenti matematici applicabili, in modo interdisciplinare, a tutte le situazioni di interazione strategica, di ogni scienza sociale, comprendendo la presenza di giocatori sia umani, sia non umani.

Un esempio di concetto largamente utilizzato nella soluzione di giochi (non cooperativi) è quello noto come equilibrio di Nash: in estrema sintesi, un insieme di strategie adottate dai giocatori costituisce un equilibrio di Nash se nessuno di essi, preso singolarmente (ovvero se gli altri giocatori non mutano strategia), può, cambiando strategia, migliorare il suo guadagno, payoff. Dunque, in corrispondenza di un equilibrio di Nash, per ogni giocatore la strategia adottata costituisce la sua migliore risposta alle strategie adottate dagli altri giocatori.

Il gioco Hex (figura 9), inventato da Nash, è uno straordinario esempio di analisi del rapporto "semplicità - complessità" e delle "strategie sottese". Le regole del gioco si imparano in pochi secondi, dimostrando come a fronte di un'apparente semplicità, Hex abbia una dinamica estremamente ricca e complessa. Un giocatore ha a disposizione un certo numero di pedine blu e l'altro di pedine rosse. Vince chi riesce per primo a creare con le sue pedine una catena ininterrotta che colleghi i lati opposti dello stesso colore. Il gioco Hex (gioco finito a informazione perfetta) non può finire con un pareggio. Ogni mossa può solo migliorare la posizione, quindi se il secondo giocatore avesse una strategia vincente, il primo

giocatore potrebbe eseguire una mossa a caso e quindi seguire la strategia che avrebbe seguito il secondo. Questo "furto di strategia" porta a dedurre che il primo giocatore vince sempre. In realtà già con la scacchiera 11x11 il numero di mosse è così elevato che non è possibile dare una dimostrazione costruttiva della vittoria del primo giocatore.

Ci sono anche giochi che implicano un processo dinamico di decisione che evolve nel tempo, con più decisori, ognuno dei quali, con la propria funzione di utilità, è in grado di accedere a diversa informazione. In questo caso si parla di giochi dinamici e differenziali. Il ruolo dell'informazione - cosa conosce un giocatore rispetto agli altri - è cruciale nell'esito di questi problemi. Sono evidenti gli incroci con la teoria del Controllo Ottimo, il cui scopo è ottenere soluzioni ottimali (massimizzando o minimizzando) e sviluppare algoritmi numerici per problemi dinamici di decisione. Come detto, questi principi sono già stati applicati a problemi di Trasporti, di Micro e Macro-



conomia. E' immediato intuirne anche l'applicabilità ai problemi delle future reti di telecomunicazioni dove le strategie del gioco dinamico di diversi attori possono determinare nascita ed successo di ecosistemi servizi.

7 Reti Virtuali e Percolazione

Abbiamo visto come la struttura (architettura, topologia) di una rete in evoluzione è importante tanto quanto la dinamica dei singoli nodi: ovvero la struttura della rete fa evolvere il sistema in maniere diverse a seconda della sua natura, determinandone l'adattabilità all'ambiente, e soprattutto la resistenza agli attacchi esterni. Diventa quindi interessante considerare l'applicabilità per le reti future dei mo-

delli studiati per la diffusione di virus o epidemie. In genere, la dinamica di diffusione è funzione sia la probabilità di "infezione" sia di quella di "guarigione" dei singoli nodi, ma anche dalla scelta i nodi di partenza dell'epidemia. Questi modelli di prestano bene per studiare le reti dinamiche generate dalle interazioni ad esempio con Twitter. La Figura 10 indica un esempio: ogni nodo corrisponde ad un utente, i tratti in blu sono dei re-tweet (servono a condividere i Tweet con chi ci segue), mentre quelli in arancio sono mention (un qualsiasi aggiornamento Twitter che contiene @nomeutente all'interno del tweet). Dall'analisi si osserva come la comunicazione tra le due community utilizzi principalmente mention, mentre all'interno di ciascun gruppo normalmente viene usato il re-tweet. Si tratta di un esempio di co-evoluzio-

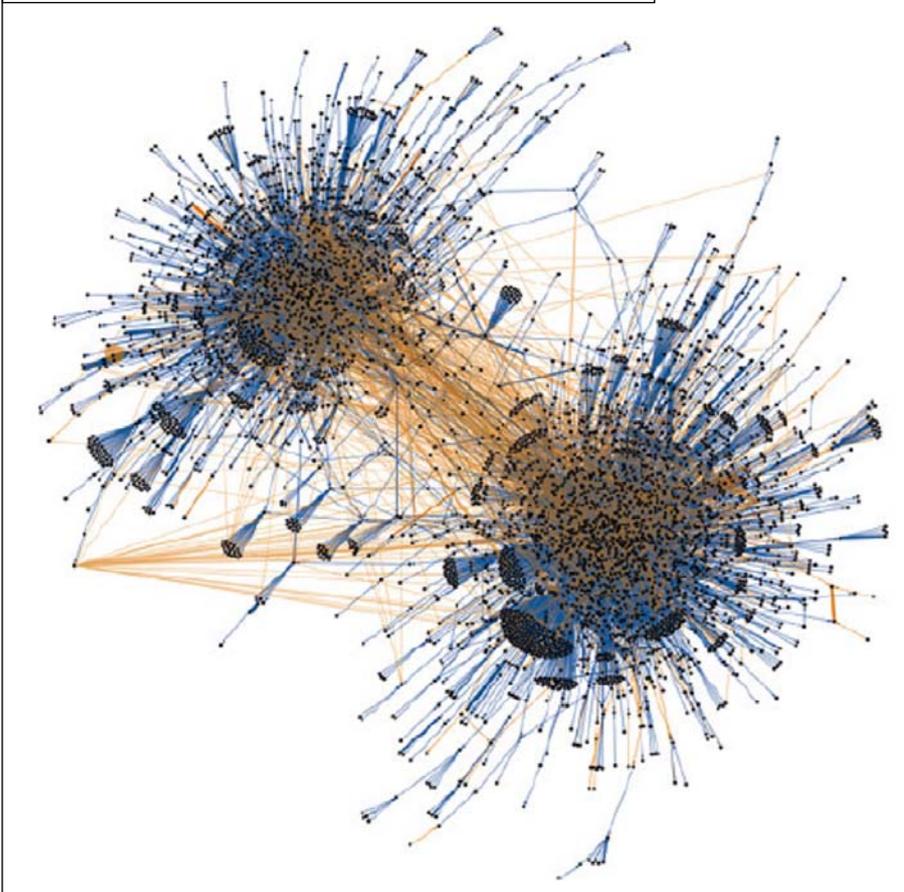
ne di una rete di comunicazione e di un processo di diffusione.

Un altro esempio di applicazione riguarda lo sviluppo di reti "opportunistiche" dove i nodi entrano ed escono dinamicamente e comunicano (ad es. wireless) fra di loro localmente al fine di distribuire (e memorizzare) il più rapidamente possibile dei dati o informazioni (gossiping).

Anche la teoria matematica della percolazione ha interessanti applicazioni per lo sviluppo delle reti del futuro. La teoria si basa sull'idea di trattare la percolazione come il passaggio di un fluido attraverso un mezzo poroso rappresentato da un reticolo cubico. Il passaggio del fluido tra le facce opposte di un cubo, o di una sequenza di cubo, viene considerato un fenomeno aleatorio e pertanto il modello può essere esteso a tutti quei problemi in cui si è interessati alle proprietà di connessione globale di un sistema macroscopico, le cui connessioni sono realizzate a livello microscopico in modo stocastico.

Nel box è riportato un approfondimento sull'applicazione della teoria della percolazione nello studio dell'emergere (come una transizione di fase) di un nucleo di connettività di rete (Giant Component).

Figura 10 - Visualizzazione della rete dinamica generata dalle interazioni su Twitter



8 Scenari di applicazione

Vediamo ora alcuni possibili scenari di introduzione delle capacità autonome in rete. I possibili contesti di applicazione riguardano tutti i segmenti di rete (Home Network, Accesso-Edge, Metro-Core), sia fissa sia radio, e le piattaforme di Cloud Computing. In particolare, già oggi si osservano iniziative relative ai seguenti contesti:

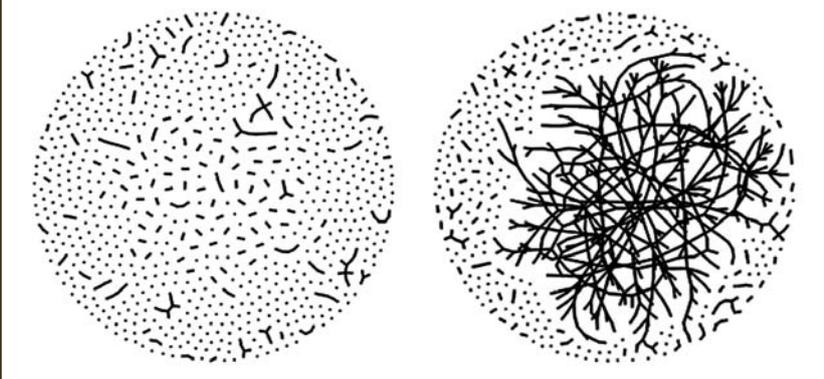
- Home Network: al fine di attuare capacità di auto-discovery ed auto-configurazione per sistemi ed apparati che costituiscono le Home Network.

Un po' di più sulla percolazione

La teoria della percolazione ci permette di studiare l'evolvere delle proprietà di connessione globale di una rete, le cui connessioni sono realizzate a livello microscopico in modo stocastico. Una delle principali domande a cui può rispondere la teoria è la determinazione del parametro di controllo (ad es. la densità' di siti in site-percolation o la probabilità di legame in bond-percola-

tion) per il quale la rete raggiunge una configurazione, percolante, cioè tale da includere un cluster di nodi (Giant Component) di dimensioni confrontabili a quelle della rete stessa (Figura A). Altrettanto importante è predire il comportamento di parametri osservabili che risentono delle proprietà di connettività nei pressi della cosiddetta soglia di percolazione.

Figura A - Emergere della connettività un cluster di nodi (giant component)



- **Accesso-Edge:** per sviluppare capacità di auto-gestione ai bordi della rete allo scopo di semplificare il progressivo aumento di pervasività, eterogeneità e dinamismo legato anche a terminali, sempre più simili a nodi di rete, M2M e all'Internet delle Cose. In questo contesto, le tecnologie autonome diventano uno strumento indispensabile per garantire stabilità e prestazioni di rete (anche a fronte del possibile emergere degli scenari anche particolarmente disruptive, nei quali occorre identificare un nuovo ruolo dell'Operatore).
- **Metro-Core:** al fine di sviluppare capacità di auto-discovery ed auto-configurazione (dei router) grazie l'introduzione di capacità autonome nei piani di controllo nei sistemi di gestione.
- **Cloud Computing:** per semplificare gli aspetti di gestione ed ottimizzazione dell'infrastruttura IT. Inoltre, un'introduzione cross-layer dell'autonomia consentirebbe anche di attuare una semplificazione nell'integrazione delle risorse di Rete e di Cloud (ad es. la rete è capace da sola di auto-adattarsi dinamicamente alle richieste applicative del Cloud, di bilanciare il traffico ed il carico). Esaminiamo alcuni esempi concreti di scenari di applicazione. Le tecnologie autonome permettono lo sviluppo di architetture di rete (anche disruptive) a controllo distribuito (parziale o totale). L'esempio tipico è quello di una rete con un grande numero di nodi (ad es. anche di tipo commodity, a basso costo), embedded systems e terminali

con capacità di processing, storage e networking (Enactive Cells Networks). I nodi, connessi tra loro con collegamenti di tipo wireless, sono liberi di muoversi casualmente e di auto organizzarsi (in base al contesto rilevato localmente), garantendo la connessione di ogni nodo con qualunque altro, sebbene la topologia vari rapidamente ed in modo imprevedibile. La rete consente lo scambio dati e la comunicazione locale tra gli Utenti senza far ricorso alla rete dell'Operatore, se non per comunicazioni su più lungo raggio (tra isole) e accesso ad Internet.

E' possibile dimostrare (matematicamente, teoria delle transizioni di fase) che esiste una soglia critica (legata al numero di nodi autonomici in una area geografica ed al raggio di comunicazione) per cui la rete è in grado di garantire una copertura di servizio (nell'area e con una determinata affidabilità) con un ottimo utilizzo di risorse (Figura 11).

In questo scenario, le tecnologie autonome potrebbero consentire di superare le attuali limitazioni delle MANET (Mobile Ad-Hoc NET, basate su WiFi, IEEE 802.11), quali routing dinamico scalabile che si adatta ai cambi di topologia, definizione dell'ottimo operating point della rete a seconda delle applicazioni e delle prestazioni richieste, abilitare architetture layerless (per dettagli si veda [13]).

Un altro esempio di scenario applicazione delle tecnologie autonome riguarda l'abilitazione delle comunicazioni dirette Device to Device (quando in prossimità) [14], [15] anche in reti cellulari 3G-4G, con conseguenti vantaggi di riduzione consumi di energia e ottimizzazione delle prestazioni (ad es. riduzione carico nelle base station eNB). Il controllo delle comunicazioni D2D potrebbe essere in parte locale in parte espletato dalle base station (eNB) (potenza, interferenza, riuso spettro,...).

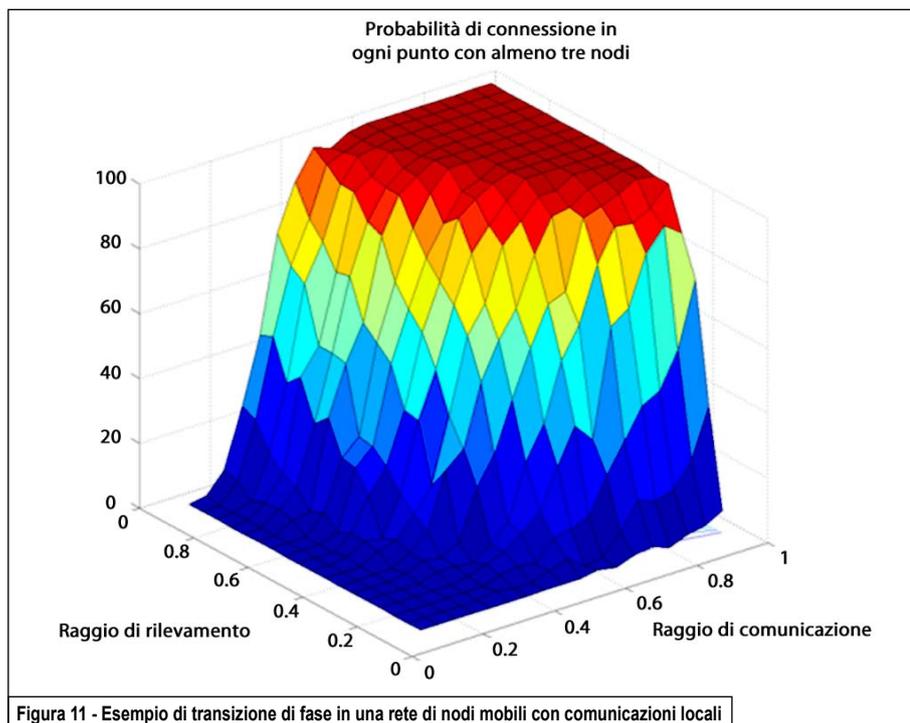


Figura 11 - Esempio di transizione di fase in una rete di nodi mobili con comunicazioni locali

Un ulteriore scenario (la cui fattibilità è in via di dimostrazione) è l'abilitazione delle soluzioni di rete wireless del tipo Distributed Input Distributed Output (DIDO), ovvero basate su un grande numero di "minitorri" distribuite in maniera pervasiva. Il sistema DIDO (combinando controllo locale sui dispositivi e il processing su server, e.g. Cloud) crea una sorta di "bolla di ricezione" intorno a un utente - o meglio a un dispositivo - che interagisce con altre bolle, minimizzando le interferenze.

In generale, dal momento che in futuro ci sarà certamente sempre più bisogno di larga banda wireless, il solo approccio possibile è tramite l'utilizzo di celle più piccole. Dimensioni diverse della cella portano a scegliere sistemi di codifica diversi e quindi anche a tecnologie diverse, ciascuna più adatta ad una certa tipologia di cella. Possiamo quindi attenderci una moltiplicazione di celle, di dimensioni diverse e che usano diverse tecnologie radio. Se fino ad oggi il problema è stato nell'assicurare un "handover" automatico e senza

discontinuità tra celle, in futuro sarà sempre più importante essere in grado di assicurare l'handover anche tra strati diversi. Questo genera un ulteriore livello di complessità a cui le tecnologie autonome possono anche dare una valida risposta (già oggi si parla di Self Organising Networks).

Conclusioni

Lo sviluppo tecnologico di terminali, prodotti ed oggetti (ad es. della Consumer Electronics) dotati di "embedded communications" sta portando allo sviluppo di reti di reti con miriadi di nodi (reali e virtuali) capaci di interagire tra di loro e collegarsi alla rete per fruire di servizi ed informazioni. Questa evoluzione comporterà una crescente distribuzione e complessità della rete, ma anche importanti opportunità di business per l'Operatore. La rete, da sistema di interconnessione, diventerà un abilitatore di nuovi ecosistemi servizi, sui quali attrarre il

valore, attori e partner industriali, anche da contesti apparentemente "lontani". In questo senso, gli ecosistemi in Natura ci danno un prezioso insegnamento: anche a fronte di crescenti complessità, la loro gestione ha continuato ad essere effettuata in modo (relativamente) semplice, tramite comportamenti autonomi e interazioni lasche. Dunque, l'introduzione di capacità autonome nei nodi di queste reti diventerà un passo importante, non solo per semplificarne la gestione, ma anche per trasformare la rete stessa in un potente attrattore su cui creare servizi e valore. A tal fine, occorrerà anche saper ben indirizzare le dinamiche di rete emergenti grazie alla loro comprensione matematica con gli strumenti di Industrial Mathematics (come ad es. Piccoli Mondi, Teoria dei Giochi, del Chaos, della Percolazione). Carpire e dominare la semplicità nascosta dentro la complessità apparente delle reti di domani è una sfida che porterà ad un nuovo modo di concepire il business dell'Operatore, in ottica di ecosistemi. Questo percorso di trasformazione dovrà guardare all'introduzione graduale (anche a fronte di un processo di standardizzazione) dei principi autonomi in rete, a partire da quelle aree dove il vantaggio strategico per l'Operatore è massimo. Questo permetterà agli Operatori più attivi in questo settore di cogliere per primi le ricadute di una tecnologia che si annuncia ricca di innovazione e, per molti aspetti, rivoluzionaria [17] ■



Bibliografia

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Adaptive_control
- [2] <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/jair/pub/volume4/kaelbling96a.pdf>
- [3] <http://opencog.org/>
- [4] S. Kumpati S. Narendra, P. Kannanm, "Identification and Control of Dynamic

Systems Using Neural Networks. IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 1, No. 1, pp. 4-27, 1990;

- [5] <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA436214>
- [6] http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4684993
- [7] F. Varela, *"The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience"*, Cambridge: MIT Press 97;
- [8] R. Saracco, *"Dalle catene del valore agli ecosistemi: nuove opportunità e nuove sfide per la Gestione di Reti e Servizi"* NOTIZIARIO TECNICO TELECOM ITALIA, Anno 17 n. 2 - Agosto 2008;
- [9] A. Manzalini, *"Towards Enactive Networks"*, invited talk at *ECOC 2011 Workshop "Next Level of Convergence"* 18th September, 2011;
- [10] Tool kit autonomico di IBM
<http://www.redbooks.ibm.com/abstracts/sg246635.html?Open>
- [11] Tool kit autonomico del progetto ICT CASCADAS <http://sourceforge.net/projects/acetoolkit/>
- [12] Progetto ICT UNIVERSELF
<http://www.univerself-project.eu/>
- [13] A. Goldsmith et alii, *"Beyond Shannon: The Quest for Fundamental Performance Limits of Wireless Ad Hoc Networks"* - IEEE Communications Magazine, May 2011;
- [14] http://www.rearden.com/DIDO/DIDO_White_Paper_110727.pdf
- [15] <http://www.electronista.com/articles/11/02/08/qualcomm.flashlinq.tech.works.up.to.a.1km.radius/>
- [16] ETSI AFI <http://portal.etsi.org/afi>
- [17] Per approfondimenti <http://www.blog.telecomfuturecentre.it/>



Antonio Manzalini

ingegnere con certificazione PMI, è entrato in Telecom Italia nel 1990 ed ha partecipato a diversi progetti di ricerca riguardanti reti di trasporto ottico e GMPLS, occupando varie posizioni di responsabilità. Ha inoltre partecipato a molte attività di standardizzazione. Attualmente fa parte del Future Centre di Telecom Italia dove si occupa di tecnologie e architetture per reti auto-adattative e capaci di auto-gestione (quali Autonomic-Cognitive Networking) abilitanti ecosistemi servizi e Future Internet. È autore di decine di pubblicazioni, di un libro sulla sincronizzazione delle reti di telecomunicazioni e di cinque brevetti internazionali.

antonio.manzalini@telecomitalia.it