

XXI secolo: l'universo fisico-cibernetico e le grandi sfide emergenti

1. Un mondo pervaso di sistemi fisico-cibernetici

Siamo entrati in un universo fisico-cibernetico, cioè in un mondo in cui i processi e i beni (materiali e immateriali) elaborano e scambiano informazioni, sulla base di una serie innumerevole di dispositivi in grado di generare continuamente flussi informativi. L'intero pianeta è avvolto e permeato da un 'sfera informativa', che influisce e talvolta orienta in modo determinante le nostre decisioni. Il pensiero va alla cibernetica, termine coniato settant'anni or sono dal matematico Norbert Wiener per indicare l'arte/scienza del controllo dei processi attraverso la capacità di governo dei flussi di informazione. Le tecnologie dell'informazione costituiscono, infatti, un grande potenziale tecnico-scientifico, che potrebbe essere impiegato per risolvere grandi problemi dell'Umanità, ma ciò non avviene se si pensa che, a fronte di questo potenziale, una percentuale rilevante degli esseri umani soffre la fame e l'Umanità intera è alle prese con la terza pandemia (ben tre dall'inizio del XXI secolo, Sars, Mers, Covid-19) e altre grandi calamità.

Siamo quindi di fronte ad una delle più rilevanti contraddizioni di questa epoca eccezionale della storia umana, iniziata con un vero e proprio evento 'spartiacque' nel 1930, quando a Königsberg si svolge la seconda Conferenza sull'Epistemologia delle Scienze Esatte a cui partecipano fisici, matematici, logici e filosofi (tra gli altri, Carnap, Gödel, Reichenback, Frank, von Neuman, Heisenberg). Nelle varie sessioni e negli incontri informali si discute di mecca-

nica quantistica e dei problemi inerenti ai fondamenti della matematica, posti da Hilbert. Ivi von Neumann rende noto di avere raggiunto per proprio conto una dimostrazione della tesi che Gödel espone ai presenti e quindi pubblica nei due famosi teoremi di incompletezza dell'aritmetica (1930-1931). All'importanza enorme dei risultati ottenuti da Gödel sul piano logico ed epistemologico contribuisce il metodo da lui impiegato, cioè una procedura logica che formalizzava «the same issues that those designing programming languages and those writing programs in those languages would be facing» (Davis 2000, 120). Siamo insomma in presenza di un vero e proprio software embrionale e la procedura algoritmica di Gödel viene successivamente arricchita dal processo computazionale ideato da Turing nel 1931 (la cosiddetta 'Turing-machine') e dopo ancora con l'architettura di von Neumann, che consiste in particolari modalità di inserimento nell'hardware di modelli computazionali alla Turing (Lombardi, Vannuccini, *under review*).

Nasce così quella che Castells ha chiamato 'tecnologia intellettuale di produzione', ovvero la codificazione della conoscenza teorica attraverso la creazione di sistemi di algoritmi che, inseriti in dispositivi fisici di qualsiasi natura, consentono di elaborare senza sosta informazioni e conoscenze¹. Tutto ciò è reso possibile dal fatto che le tecnologie digitali costituiscono una sorta di 'DNA digitale' (Cowney, Aronson 2017), che consentono una completa digitalizzazione di processi e prodotti dalla nano-scala alla scala e ordinaria² e a quella globale, grazie agli ulteriori sviluppi delle tecnologie dell'informazione. La pervasività di dispositivi che elaborano senza sosta informazioni (*Ubiquitous computing*) e l'estensione globale di infrastrutture di comunicazione (*Ubiquitous Connectivity*) hanno favorito la generazione di una sfera informativa in continua espansione, data la crescente miriade di fonti produttrici di informazioni. Siamo così entrati in un'era caratterizzata dall'interazione continua tra oggetti, persone, processi e flussi informativi, il che inevitabilmente condiziona i processi decisionali individuali collettivi. Le interazioni tra processi fisici e processi computazionali tendono infatti ad essere senza soluzione di continuità (*seamless*), fino a costituire sistemi integrati fisico-cibernetici (*cyber-physical systems*, CPS, termine coniato da Helen Gill della US National Science Foundation: Lee, Seshia 2011). Tutto ciò è possibile grazie all'integrazione dinamica tra software, reti di entità (animate e non), processi fisici: la scienza dei nuovi materiali (US Department of Energy 2010; Deymier et al. 2016), l'editing genomico CRISPR_Cas9 (Crow

¹ Il meccanismo propulsivo fondamentale dell'era post-industriale, infatti, «is not the centrality of knowledge and information” but the “application of such knowledge and information to knowledge-generation and information processing/communication devices, in a cumulative feedback between innovation and the uses of innovation» (Castells 2010, 31).

² «Integrated computational materials engineering (ICME) is an emerging discipline that aims to integrate computational materials science tools into a holistic system that can accelerate materials development, transform the engineering design optimization process, and unify design and manufacturing» (National Research Council 2008, VIII). Si veda anche Mason et al. 2017.

2020) e la chimica computazionale (Lewars 2016), l'*additive Manufacturing* (3D, Acatech 2017) e la pervasività del *computational thinking* (Bundy 2007; Ming 2008)³. L'integrazione dinamica tra hardware e software trasforma radicalmente la sequenza progettazione-produzione-distribuzione, al tempo stesso aumentando le potenzialità di crearne continuamente di nuove e proiettandole poi su scala globale.

Tale integrazione consente, infatti, che si realizzino sequenze ininterrotte di circuiti di feedback multiscala tra componenti interne ed esterne, modificando sia l'ambiente interno ad un sistema, sia le modalità di adattamento alle variabili esogene al sistema stesso. Il dinamismo è intrinseco a questo orizzonte ed è l'esito dello sviluppo congiunto di dispositivi computazionali pervasivi, software, configurazioni reticolari, entità interattive, competenze e capacità che evolvono.

Le connessioni tra mondo fisico e mondo virtuale costituiscono un enorme potenziale, la cui esplorazione-utilizzazione dipende dalla tipologia e dalla varietà dei processi coinvolti. Tali sistemi diffusi di *embedded hardware and software* (Acatech 2001, 5) aprono un enorme campo di possibilità per affrontare in modo creativo i problemi fondamentali per il futuro dei sistemi socio-economici. Il potenziale creativo dei CPS deriva dal fatto che attraverso di essi una miriade di processi ed entità possono auto-organizzarsi per rispondere a esigenze emergenti a molti livelli della sfera economico-sociale. Non deve quindi sorprendere che dinamiche continue *bottom-up* e *top-down* siano una peculiarità del nuovo scenario tecno-economico.

2. Nuove tipologie di processi e prodotti

I sistemi fisico-cibernetici si auto-organizzano sulla base della possibilità di elaborare una rappresentazione digitale di processi e prodotti dalla nano-scala alla scala ordinaria e globale. Ciò significa che la sfera fisica del Pianeta è strettamente compenetrata da una sfera digitale, che può influire e controllare, almeno parzialmente, le dinamiche dei processi interni alla prima. In questo scenario i *cyber-physical systems* divengono *smart embedded systems*, progettati e utilizzati per costituire reti di reti gerarchiche e annidate, dalla nano-scala a quella urbana, nazionale e globale realizzando una fitta trama di interazioni trasversali (Fig. 1).

L'effetto di questi sviluppi è la progressiva e accelerata modificazione delle attività umane, come vedremo successivamente, generando una interconnessione dinamica tra sistema biofisico terrestre e quello che, nei termini conati nel 1924 durante un colloquio avvenuto a Parigi nel 1924 tra Vernadsk, Le Roi e Teilhard de Chardin, è la 'Noosfera', cioè «the world of thought, knowledge society, to

³ Una precisa definizione di *computational thinking* come processo di risoluzione di problemi mediante concettualizzazioni da implementare in dispositivi computazionali è contenuta in *Operational Definition of Computational Thinking for K-12 Education*, a cura di The International Society for Technology in Education (ISTE) and the Computer Science Teachers Association (CSTA).

mark the growing role played by humankind's brainpower and technological talents in shaping its own future and environment» (Steffen et al. 2007, 615)⁴.



Figura 1 – Reti di componenti e attori in uno scenario di mobilità assistita da servizi con CPS (Cyber-Physical Systems. [Fonte: Geisberger, Broy 2015: fig. 2.2]

È così avvenuto che, alla fine del XX secolo e soprattutto nei primi due decenni del XXI, processi e prodotti siano divenuti *multi-technology* (Pavitt, 1998: 435), cioè l'esito di combinazioni variabili di campi di conoscenze differenti e in continua evoluzione in meccanica, elettronica, fisica, chimica, biologia, *computing science*. Su questa base non esistono più le associazioni *one-to-one* tra prodotto e tecnologia, mentre divengono sempre più frequenti le associazioni *one-to-many*, alle quali si

⁴ Nel colloquio, avvenuto a Parigi, i tre pensatori definirono il concetto, ma successivamente i loro itinerari teorici si divisero: il geologo russo Vernadsky, autore del concetto di bio-sfera, elaborò un'interpretazione materialistica; Le Roy e Teilhard de Chardin svilupparono una concezione 'vitalistica' sotto l'influsso di Bergson e della sua visione dell'«Èlan vital» (si veda su questo (Christian 2017).

aggiungono sempre più frequentemente le potenzialità connesse al *many-to-many*, cioè incremento della varietà di interazioni tra campi di conoscenza molto differenti, con l'esito di ottenere combinazioni tecno-produttive funzionali del tutto impensabili solo poco tempo fa. Siamo quindi in uno scenario dove è possibile immaginare la completa scomponibilità dei processi economico-produttivi, tenendo presente che tra questo e l'altro estremo (piramide compatta) vi possono essere molte variazioni possibili nei gradi di scomponibilità, ovvero di modelli organizzativi delle imprese, a seconda delle funzioni che esse aggregano in forma più o meno compatta per governare la sequenza di produzione di un bene o servizio.

Si viene così a creare un ambiente globale in cui le tecnologie digitali, il software e gli algoritmi strutturano e regolano le interazioni tra gli agenti, le attività umane in continua ridefinizione sulla base degli incessanti flussi informativi, come afferma Mitchell (1996, 44): «Increasingly the architectures of physical space and cyberspace⁵ – of the specifically situated body and of its fluid electronic extensions are superimposed, intertwined, and hybridized in complex ways». In altri termini, siamo entrati in un'era in cui le interazioni sono 'de-spazializzate' e il 'codice è la legge' (Mitchell 1996, 111; Lessig 2006, 5), nel senso che il codice definisce l'architettura e le modalità interattive tra entità economico-sociali. In questo scenario assume un ruolo cruciale la creazione di piattaforme, definite come *algorithm-enabled cyberspaces*, dove insieme variabili di agenti possono agire, interagire e effettuare transazioni: «platforms provide a set of shared techniques, technologies, and interfaces to a broad set of users who can build what they want on a stable substrate»⁶.

Una delle implicazioni dei mutamenti indicati è che «We are entering an era of electronically extended bodies living at the intersection points of the physical and virtual worlds [...]» e «[...] [An] unprecedented, hyperextended habitat will transcend national boundaries; the increasingly dense and widespread connectivity that it supplies will quickly create opportunities the first in the history of humankind – for planning and designing truly worldwide communities» (Mitchell 1996, 167).

In questo scenario la rappresentazione digitale genera l'omogeneizzazione (in bit) dei dati proveniente da qualsiasi fonte ed apre un enorme spazio potenziale per possibili variazioni delle funzionalità che è possibile aggiungere a processi ed output grazie alla riprogrammabilità dei meccanismi di *information processing* e di *storage* dei dati. Un'altra importante caratteristica dell'innovazione digitale è, infatti, la creazione di un nuovo tipo di architettura di prodotto: *the layered modular architecture* (Yoo, et al. 2010): la digitalizzazione fa sì che le sequenze di fasi economico-produttive e gli output di queste ultime possono as-

⁵ Il termine *cyberspace* è stato coniato da Williams Gibson nel romanzo *Neuromancer* (1984) con una precisa finalità: «I wanted that sense of other realm, a sense of agency within my daily life, looking for bits and pieces of reality that could be cobbled together into the arena I needed» (dichiarazione riportata in Popova 2014).

⁶ Definizione di piattaforma data da Zysman e Kenney (2018) e da Stuart Feldman, pioniere della *computer science* in Fortrand e Unix.

sumere una configurazione modulare, stratificata e variabile. I cicli produttivi sono scomponibili in unità discrete (i moduli) (Baldwin, Clark 2000), che nel nuovo scenario tecnico-scientifico possono derivare da domini di conoscenza caratterizzati da ritmi evolutivi differenti. Le varie componenti del sistema-prodotto sono poi 'annidate' le une nelle altre e possono interagire con unità discrete appartenenti ad altre sequenze, realizzando di fatto dinamiche multi-filiera e processi multiscala, che tendono ad esplicitarsi a scala globale. In tale panorama le caratteristiche delle tecnologie digitali fanno assumere ad esse la funzione di infrastrutture, così definite da Braa et al. (2007, 3): «technological and human components, networks, systems and processes that contribute to its functioning». L'infrastruttura digitale con le caratteristiche indicate è all'origine di una peculiarità decisiva: la generatività, intesa come «a technology's overall capacity to produce unprompted change driven by large, varied, and uncoordinated audiences» (Zittrain 2006, 1980). Le tecnologie dell'informazione e della comunicazione costituiscono, pertanto, il sostrato per l'innescarsi di processi di formazione di *hyperstructures*, cioè strutture globali di interconnessione tra sistemi, sotto-sistemi, processi auto-organizzati di agenti socio-economici o tecnico-scientifici. In questo scenario possono coesistere dinamiche top-down e bottom-up, che si sostengono autonomamente con *self-reinforcing processes*, alimentati da meccanismi ben studiati da una rilevante letteratura: 1) effetti di rete (più utilizzatori adottano una tecnologia, maggiori sono la sua rilevanza e il valore, quindi la capacità attrattiva); 2) sviluppo di interdipendenze e complementarità tra domini conoscitivi e interessi consolidati (economici, politico-strategici); 3) intraprendenza imprenditoriale e propensione incessante verso la ricerca di soluzioni a problemi tecno-economici.

Le risorse digitali generano, quindi, un «open-ended value landscape» (Henfridsson et al. 2018, 28), in quanto lo spazio generativo costituisce uno spazio combinatoriale di itinerari di ricerca, idee, progetti, costituiti in forma di gerarchie variabili di sfere di conoscenza e processi/output, che si sviluppano secondo un *hierarchy-of-parts frame*, ovvero un modello concettuale che vede i processi di progettazione «as acts of decomposition and aggregation to achieve architectures that preserve and enhance a hierarchy of loosely coupled parts» (Henfridsson et al. 2014).

Scomposizione e ricomposizione di task operativi, fasi, intere sequenze economico-produttive e direttrici socio-economiche possono dispiegarsi per l'esistenza di un universo fisico-digitale dove, per riprendere la metafora di Cowhey e Aronson, il DNA digitale può assumere forme fenotipiche estremamente variabili, sulla base di interazioni a scala globale.

Per questa via si è realizzata la compenetrazione dinamica tra il *Thinking Layer* (interpretazione della Noosfera da parte di Teilhard de Chardin) e i processi biofisici planetari. Le interconnessioni trasversali tra attività umane e componenti biofisiche hanno così dato origine ad una dinamica esponenziale dei processi in ogni ambito della vita sociale, mentre si sviluppavano feedback cumulativi con dinamiche fisiche ed energetiche.

3. Grande sfida. La 'mappa cibernetica' del mondo per risolvere i problemi?

Data l'iperconnessione globale, balza in primo piano la questione del controllo del *cyberspace* e delle entità più e meno potenti che in esso operano. La simultanea presenza di differenti tipologie di crisi e la questione del cyberspace rafforzano la convinzione che potremmo essere in una forma peculiare di 'transizione critica', com'è accaduto più volte nella storia umana (Schaefer et al. 2012). Cerchiamo di motivare ulteriormente questa tesi. È chiaro che stiamo vivendo una crisi del sistema globale, dato che le reti di interdipendenze a scala planetaria non solo favoriscono rapide dinamiche di propagazione di eventi critici, ma sono anche esse stesse fonte di eventi. Il motivo è presto detto: un mondo iperconnesso costituisce un unico sistema di interdipendenze, composto a sua volta di sotto-sistemi interdipendenti, anch'essi scomponibili in ulteriori sotto-sistemi, analogamente a quanto accade nelle procedure ricorsive in linguistica e matematica, ovvero scomponibilità delle reti sulla base di regole tecnico-scientifiche e tecno-economiche, le quali strutturano anche le relazioni tra gli attori. Per sviluppare questo punto vale la pena riflettere sul famoso paradosso descritto da Jorge Luis Borges attraverso il tentativo infruttuoso di costruire la mappa 1:1 dell'Impero, nonostante la perfezione raggiunta dall'Arte della Cartografia (Borges 1998, 100). L'immaginario mondo di Borges viene in mente se si pensa all'odierna compenetrazione tra sfera fisica terrestre e sfera digitale, che a loro volta costituiscono un sottoinsieme fisico-cibernetico dell'intero universo fisico digitale. Siamo sempre più immersi in enormi e crescenti volumi di dati (Fig. 2) e coinvolti nelle operazioni dei Techno-Giants, che sono in grado di organizzare ed elaborare quello che è stato definito *data-rich world* (Mayer-Schönberger, Ramge 2018).

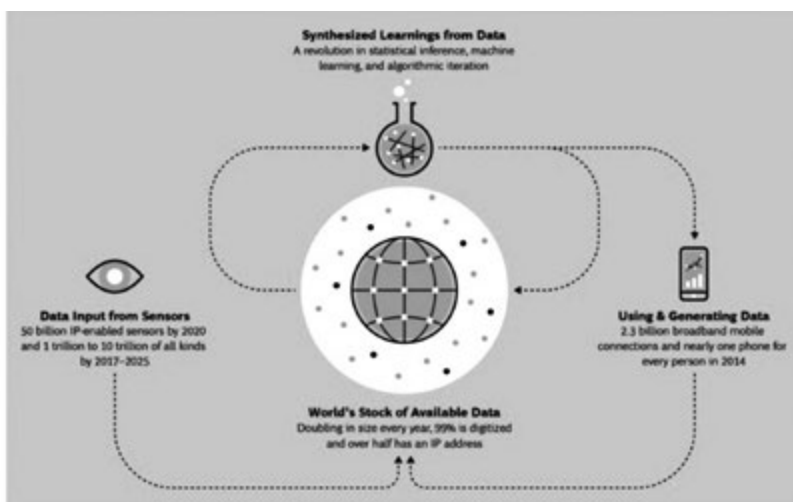


Figura 2 – Ecosistema digitale come proprietà emergenti di Ubiquitous computing e Ubiquitous connectivity. [Fonte: BCG 2015, 10]; © The Boston Consulting Group, Inc. 2015

Prendiamo ad esempio Amazon, ma il discorso vale per GAF A, acronimo per Google, Amazon, Facebook, Apple. Jeff Bezos, presidente amministratore delegato di Amazon ha intuito immediatamente anni or sono che «Business Architecture is a strategic variable not a given» (BCG 2015).

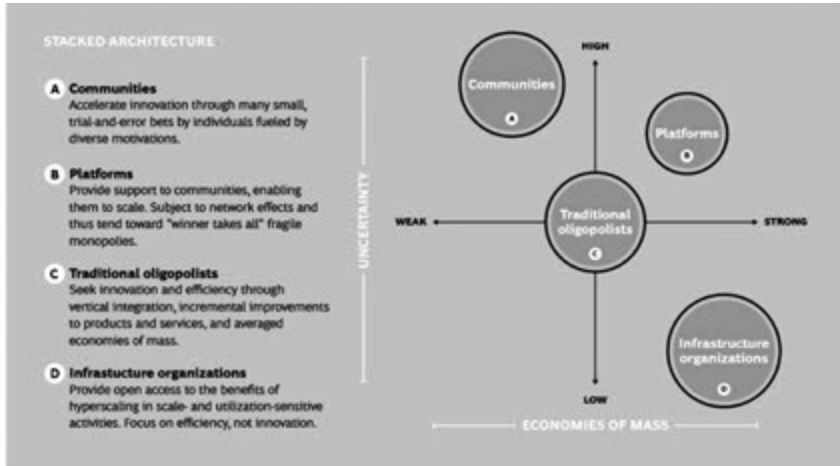


Figura 3 – La rivoluzione digitale ha consentito nuove opzioni istituzionali in scenari economici variabili. [Fonte: BCG 2015]; © The Boston Consulting Group, Inc. 2015

I dati sono trattati da 'strati di software modulari e interoperabili'. L'interazione dinamica tra evoluzione del software (IA) e dell'hardware (crescente potenza computazionale) accelera i processi innovativi, riducendo il ciclo di vita dei prodotti e servizi, praticamente nel tempo sempre più breve di aggiornamento del software, laddove «The asymptote is where sensing, connectivity, and data merge into a single system» (BCG, Henderson Institute 2015, 5). I dati diventano l'infrastruttura di questo unito mondo asintotico, in cui le strutture organizzative e inferenziali su volumi imponenti di dati si polarizzano: è il mondo dell'*hyperscale* informativa e delle *hyperstructures*⁷. Il problema del controllo del cyberspace sta emergendo in tutta la sua rilevanza, come si evince anche dalle recenti audizioni presso il Congresso Usa dei massimi esponenti di Apple, Microsoft, Amazon, Alphabet e Facebook (Henderson 2020).

Occorre porre l'attenzione su un aspetto peculiare: mappa 1:1 non implica in questo caso perfetta omogeneità tra sfera fisica e digitale. Se nella seconda emergono *hyperstructures*, nella prima il sistema di interconnessioni distribuite genera situazioni variabili tra un numero imprecisato di sotto-insiemi e sottosistemi, determinando così una configurazione che nella letteratura scientifica

⁷ Discusse in un contributo apparso su Agenda digitale: <<https://www.agendadigitale.eu/cultura-digitale/oligopoli-dei-big-data-ci-salvera-solo-una-nuova-cultura-antitrust/>> (2021-03-10).

è denominata *complex adaptive system*, così definita da Holland (1992, IX): «a collective designation for non linear systems defined by the interaction of large numbers of adaptive agents (economies, political systems, ecologies, immune systems, developing embryos, brains, and the like».

«Economies, ecologies, immune systems, developing embryos, and the brain are all examples of complex adaptive systems [d'ora in poi CAS]» (Holland 1992, 184; Holland 2006), che presentano caratteristiche comuni: 1) sono composti da un gran numero di componenti, che possono interagire simultaneamente a più livelli, nell'ambito di processi multi-scala; 2) l'impatto nelle vicende umane si sviluppa a livello aggregato, sistemico; 3) le interazioni evolvono nel corso del tempo, in parte grazie ad adattamenti ad un ambiente costituito da ciò che fanno le altre componenti.

Il concetto di CAS è stato arricchito dalla considerazione del Premio Nobel per la Fisica Murray Gell-Mann, secondo cui le componenti possono essere a loro volta sistemi complessi adattativi, dando per questa via origine a configurazioni/pattern di livelli intermedi (Gell-Mann 1995). Il concetto è stato inoltre applicato in molti campi disciplinari, ad esempio nelle scienze sociali e nel *computational modeling*, dove si assume che i CAS siano composti da «interacting, thoughtful (but perhaps not brilliant) agents», le cui interazioni generano proprietà globali del sistema stesso (Miller, Page 2007, 97).

In breve, «Macroscopic patterns emerge from the dynamic and nonlinear interactions of the systems low-level (microscopic) adaptive agents» (Brownlee 2007, 3). Il frame teorico ed applicato, incentrato sui CAS, è stato progressivamente impiegato negli studi degli eco-sistemi a livello locale e globale. Per esempio Janssen associa il concetto di sviluppo sostenibile, definito «as sustaining the ability of systems to adapt to a changing environment», con quello di CAS applicato all'intera biosfera, perché «its components adapt and reorganize themselves in response to interventions. Complex adaptive systems research provides us with modeling tools that enable us to study the co-evolutionary development of humankind and our environment» (Janssen 1998). La biosfera come CAS è al centro dei lavori di Simon Levin, direttore del Center for Bio-complexity di Princeton (Levin 1998). Nel suo libro (1999) Levin riprende e sviluppa elementi teorici e applicativi introdotti da Holland (1995). Di particolare importanza sono le peculiarità distintive dei CAS: eterogeneità delle componenti, interazioni non lineari tra di esse (più che proporzionali relazioni causa-effetto), organizzazione gerarchica di sistemi e flussi (materiali, energetici, informativi). In realtà nel corso degli ultimi decenni sono diventati sempre più evidenti le molteplici connessioni tra sistemi naturali e sistemi umani, fino a costituire *social ecological systems* (Folke et al. 1998), i quali evolvono «in never-ending adaptive cycles of growth, accumulation, restructuring, and renewal. These transformational cycles take place in nested sets at scales ranging from a leaf to the biosphere over periods from days to geologic epochs, and from the scales of a family to a sociopolitical region over periods from years to centuries» (Holling 2001, 392).

I concetti chiave sono sistemi scomponibili in unità discrete, insieme annidati di dati e cicli adattativi, che descrivono la fenomenologia dei processi dinamici

multi-scala. I cicli adattativi si basano sull'evoluzione dei potenziali di azione possibili, cioè degli spazi di azione da poter attivare, quindi dei futuri accessibili ai sistemi e sotto-sistemi e dalla capacità di questi ultimi di controllare variabili di processo, in modo tale da elaborare risposte flessibili alle variazioni dell'ambiente. Gli aspetti appena indicati sono alla base della capacità adattativa, intesa come misura della vulnerabilità rispetto a shock inattesi e imprevedibili. Bisogna tenere presente che si possono avere shock prevedibili, ma non attesi, come è accaduto per l'evento pandemico in corso. Potenziale di azione, controllabilità e capacità adattativa sono le proprietà generali, che influenzano le risposte alla crisi da parte di eco-sistemi organismi naturali e sociali, popolazioni.

In un mondo iperconnesso come l'attuale, acquista una pregnanza indiscutibile la visione del Premio Nobel per l'Economia Elinor Ostrom (2009, 420), secondo la quale «All humanly used resources are embedded in complex social-ecological systems (SESs). SESs are composed of multiple subsystems and internal variables within these subsystems at multiple levels analogous to organisms composed of organs, organs of tissues, tissues of cells, cells of proteins, etc.». La complessità dei processi e delle interazioni *cross-scale* tra componenti 'annidate' è ben illustrata dalla figura 4 in cui Ostrom (2009) rappresenta le sue argomentazioni circa i sotto-insieme e le variabili rilevanti per ciascuno di essi.

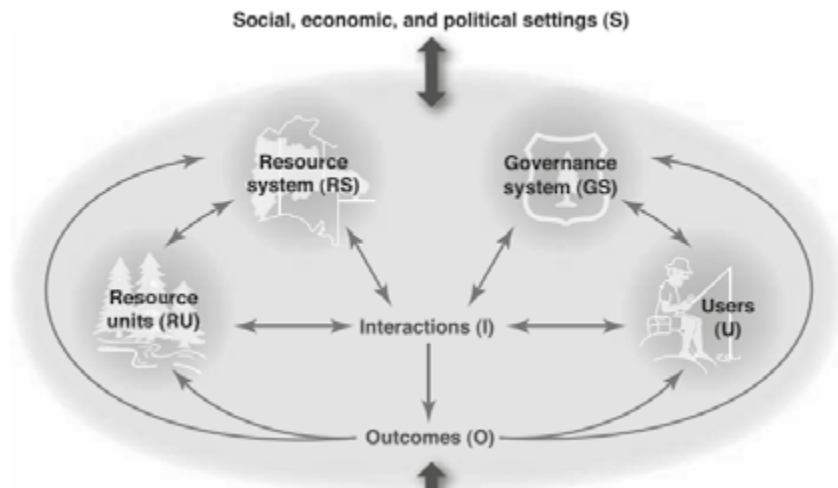


Figura 4 – I sotto-sistemi centrali nel framework per l'analisi dei sistemi socio-ecologici. [Ostrom 2009]; © American Association for the Advancement of Science

La complessità dei processi e delle interazioni multi-scala tra componenti annidate fa sì che non esistano 'panacee', soluzioni valide una volta per tutte (Ostrom 2007). Non esistono soluzioni semplici per sistemi socio-ecologici com-

pleSSI, tanto meno sono efficaci piani strategici top-down. Occorre invece adottare metodologie che coniughino un approccio sistemico multi-livello, sviluppo di capacità cumulative di diagnosi dei problemi e delle potenzialità in sistemi anidati, insieme all'accettazione dell'incertezza e l'imprevedibilità (le sorprese), cioè shock dovuti a feedback cumulativi interni e di origine esterna. In breve, è necessario adottare un frame strategico adattativo sul piano strategico ed operativo (Walter 1986). *L'Adaptive management* si basa, quindi, su apprendimento, sperimentazione, test e verifiche, analisi sistematica e visione sistemica, tenendo presente un'assunzione fondamentale: i *complex social ecological systems* possono misurarsi con problemi più e meno grandi solo se si adotta il principio della cooperazione tra molti stakeholder, entità interessate alla vitalità del sistema. Ciò vale ancor di più nella fase storica odierna, caratterizzata dalla simultanea presenza di crisi, che investono aspetti basilari del Pianeta Terra e del gran numero di sotto-sistemi che lo compongono e ne condizionano l'evoluzione attraverso l'estrema varietà delle strutture interattive, le quali evolvono senza sosta.

La dinamica tecno-economica sempre più intensa, i circuiti di feedback positivi tra gli inestricabili nessi tra biosfera e Noosfera, la pressione crescente e vicina all'insostenibilità con cui si svolgono le attività umane configurano necessariamente un orizzonte di grande incertezza. I sistemi socio-economici sono quindi di fronte a grandi scelte in contesti di volumi crescenti di flussi di informazione, tanto da determinare un autentico *overload informativo* a livello individuale e collettivo, che può paradossalmente favorire un aumento dell'ignoranza a causa della limitata possibilità di conoscere preventivamente gli esiti delle interazioni tra la miriade dei sistemi complessi adattativi che compongono il sistema Terra. Le riflessioni proposte inducono a porre in evidenza alcuni aspetti rilevanti della situazione odierna.

Bibliografia

- Acatech 2011. *Cyber-Physical Systems Driving force for innovation in mobility, health, energy and production*. Munich-Berlin: National Academy of Science and Engineering.
- Acatech 2017. *Additive Manufacturing*. Leopoldina, acatech, Akadmiunion.
- Baldwin, C.Y, e K.B. Clark. 2020. *Design Rule Vol 1s: The Power of Modularity*. New York: The Mit Press.
- BCG. 2015. *Borges' Map. Navigating a World of Digital Disruption*. <https://image-src.bcg.com/Images/BCG-Borges-Map-Jun-2015_tcm26-72331.pdf> (2021-03-10)
- Borges, J.L. 1998. "On Exactitude in Science." In Borges, J.L. *Collected Fictions*. New York: Penguin Books.
- Braa, J. et al. 2007. "Developing Health Information in Developing Countries: The Flexible Standards Strategy." *MIS Quarterly* vol. 31, Special Issue/August: 1-22.
- Brownlee, J. 2007. *Complex Adaptive Systems*. CIS Technical Report 070302, March.
- Bundy, A. 2007. *Computational Thinking is Pervasive*. <<http://www.inf.ed.ac.uk/research/programmes/comp-think/>> (2021-03-10)
- Castells, M. 2010. *The Rise of Network Society*. vol. 1, Oxford: Basic-Balckwell.
- Christian, D. 2017. "What Scientific term or concept ought to be more widely known?" *Edge. Org*. August 30.

- Cowney, P.E., e J.D. Aronson. 2017. *Digital DNA disruption and the challenges for global governance*. Oxford: Oxford University Press.
- Crow, D. 2020. "The next virus pandemic is not far away." *Financial Times*, 6 August, 2020.
- Davis, M. 2000. *The Universal Computer*. New York: Norton & Company.
- Deymier, P.A. et al. 2016. *Multiscale Paradigms in Integrated Computational Materials Science and Engineering*. New York: Springer.
- Folke, C. et al. 1998. *Ecological practices and social mechanisms for building resilience and sustainability*. In: *Linking Social and Ecological Systems: management Practices and Social Mechanisms for building Resilience*. ed. by F. Berkes, e C. Folke. Cambridge: Cambridge University Press.
- Geisberger, E., e M. Broy. 2015. *Living in a networked world. Integrated research agenda Cyber-Physical Systems (agendaCPS) (acatech STUDY)*. Munich: Herbert Utz Verlag.
- Gell-Mann, M. 1995. *The Quark and the Jaguar. Adventures in the Simple and the Complex*. London: Freeman and Company.
- Henderson, R. 2020. "Big tech presents a problem for investors as well as Congress." *Financial Times*, August 1.
- Henfridsson, O. et al. 2014. "Managing technological change in the digital age: the role of architectural frames." *Journal of Information Technology* 29: 27-43.
- Henfridsson, O. et al. 2018. "Recombination in the open-ended value landscape of digital innovation." *Information and Organization* 28: 89-100.
- Holland, J.H. 1992. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Cambridge: The Mit Press.
- Holland, J.H. 1995. *Hidden Order. How Adaptation Builds Complexity*, New York: Basic Books.
- Holland, J.H. 2006. "Studying Complex Adaptive Systems." *Journal of Systems Science and Complexity* 19: 1-8.
- Holling, C.S. 2001. "Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems." *Ecosystems* 4.
- Janssen, M. 1998. "Use of Complex Adaptive Systems for Modeling Global Change." *Ecosystems* 1: 457-463.
- Lee, E.A., e S.A. Seshia. 2011. *Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach*. <<http://LeeSeshia.org>>.
- Lessig, L. 2006. *Code is Law*. Version 2.0. New York: Basic Books.
- Levin, S.A. 1998. "Ecosystems and the Biosphere as Complex Adaptive Systems." *Ecosystems* 1: 431-436.
- Levin, S.A. 1999. *Fragile Dominion. Complexity and the Commons*. New York: Perseus Publishing.
- Lewars, E.G. 2016. *Computational Chemistry*. New York: Springer.
- Lombardi, M., e S. Vannuccini. *Paradigm shift for decision-making in an era of deep and extended changes*. Under review.
- Mason P., et al., eds. 2017. *Proceedings of the 4th World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME 2017)*. New York: Springer.
- Mayer Schönberger, V., e T. Ramge. 2018. *Reinventare il Capitalismo nell'era dei Big Data*. Milano: Egea.
- Miller, J.H., e S.E. Page. 2007. *Complex Adaptive Systems. An introduction to computational modes of social life*. Princeton: Princeton University Press.
- Ming, J.M. 2008. "Computational thinking and thinking about computing." *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 366: 3717-3725.

- Mitchell, W.M. 1996, *CITY OF BITS*. Cambridge: The Mit Press.
- National Research Council. 2008. *Integrated Computational Materials Engineering: A Transformational Discipline for Improved Competitiveness and National Security*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12199>
- Ostrom, E. 2009. "A general framework for Analyzing Sustainability of Social-ecological Systems." *Science*, July, 419-422.
- Popova, M. 2014. "How William Gibson Coined 'Cyberspace'". *Brain Pickings*, August 26, <<https://www.brainpickings.org/2014/08/26/how-william-gibson-coined-cyberspace/>> (2021-03-10)
- Schaefer, K.A. et al. 2017. "Unintended mutations after CRISPR_Cas9 editing in vivo." *Nature Methods*, 14 (6): 547-551.
- Steffen, W. et al. 2007. "The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature." *A Journal of the Human Environment* 36 (8): 614-621.
- US Department of Energy. 2010. Critical Materials Strategy. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf> (2021-03-10).
- Walter, C. 1986. *Adaptive Management of Renewable Resources*. New York: MacMillan.
- Yoo, Y. et al. 2010. "The Next Wave of Digital Innovation: Opportunities and Challenges: A Report on the Research Workshop 'Digital Challenges in Innovation Research' (June 8, 2010)." <<https://ssrn.com/abstract=1622170>> (2021-03-10).
- Zittrain, J.L. 2006. "The Generative Internet." *Harvard Law Review* 119 (7): 1974-2040.
- Zysman, J., e M. Kelley. 2018. *The Next Phase in the Digital Revolution: Intelligent Tools, Platforms, Growth, Employment*. Communications of the ACM, vol. 61: 54-63.