

Le sfide globali dell'era odierna come coordinate generali

1. Le sfide

Il numero delle sfide globali di fronte all'Umanità può variare a seconda del punto di vista adottato: il World Economic Forum (Hutt 2016) ne individua 10, l'ONU ne approfondisce 21 (UN, "Global Issues Overview") e successivamente indica 17 Sustainable Development Goals (Agenda for 2030), The Millennium Project analizza e rappresenta 15 Global Challenges ("The Millennium Project"). L'Unione Europea ha avviato iniziative strategiche incentrate sui 5 pilastri di Europa 2020, sulle 7 *societal challenges* (Horizon 2020) e le *Focus Areas*.

Vi sono ovviamente sovrapposizioni e ampliamenti, ma tutti i temi discussi sono di grande interesse e rilevanza, perché riguardano il futuro del Pianeta e dell'Umanità, i cui destini sono ritenuti unanimemente intrecciati. Ai fini del nostro contributo, cioè tentare di proporre solide fondamenta teoriche e pratiche alle politiche per l'innovazione, selezioniamo quelli che è ragionevole considerare grandi problemi o sfide con cui misurarsi fin dall'immediato. Riteniamo che tali sfide debbano essere affrontate alla luce dello schema concettuale proposto e degli orientamenti di metodo suggeriti nelle prossime pagine. Dal nostro punto di vista le sfide costituiscono delle vere e proprie *coordinate generali*, da tenere sempre presenti nell'elaborare spunti per riflettere sui modelli di produzione e consumo oppure, per usare un'espressione onnicomprensiva, nel cercare di orientare la dinamica delle configurazioni sociali e i comportamenti individuali nell'ottica dei micro- meso e macro-allineamenti (Rip 1995, 425), cioè di

coordinamento di processi e fattori sociali, giuridici, istituzionali, culturali. Per questa via si potrà perseguire, pur tra inevitabili difficoltà e contraddizioni, la congruenza tra intelligenza individuale e intelligenza collettiva (Mulgan 2014; Saunders, Mulgan 2017) in un mondo dove le asimmetrie si producono continuamente, a causa delle profonde trasformazioni che lo stanno investendo. Bisogna allora cambiare il nostro mindset: le sfide non devono essere interpretate come vincoli, bensì in termini di *triggering conditions* per potenzialità *explorative*, il cui approfondimento può portare a soluzioni di maggiore benessere per tutti, qualora vengano effettuate le scelte più appropriate di breve e medio-lungo termine sullo sviluppo del potenziale tecnico-scientifico esistente.

L'enorme potenza computazionale delle tecnologie dell'informazione consente, infatti, al tempo stesso di vedere e modificare l'infinitamente piccolo¹ e l'infinitamente grande². È quindi possibile modificare elementi basilari del codice della vita, nonostante le preoccupazioni che sorgono, ed elaborare la rappresentazione digitale di tutto il ciclo di vita di un prodotto (*digital twin*, ingrediente essenziale di 'Industria 4.0', d'ora in poi I4.0), potendo così controllare la dinamica evolutiva di ogni componente: input e output, materiali impiegati, possibile reimpiego di ogni tipo di input.

Le capacità manipolatorie non si limitano alle componenti fisiche dei processi, perché Internet e i meccanismi pervasivi di *information processing*, che sono ormai dappertutto, diffondono una conoscenza quasi completa di noi stessi, dal DNA ai comportamenti e ai modi di pensare.

Oggi è doveroso ampliare la nostra immaginazione sviluppando intelligenza individuale e collettiva, proprio perché vi sono molti segnali che inducono a pensare di essere vicini ad un possibile punto critico nella storia della Terra, che potrebbe essere davvero vista come una 'navicella' sospesa nello spazio:

the future might similarly be called the "spaceman" economy, in which the earth has become a single spaceship, without unlimited reservoirs of anything, either for extraction or for pollution, and in which, therefore, man must find his place in a cyclical ecological system which is capable of continuous reproduction of material form even though it cannot escape having inputs of energy (Boulding 1966, 4).

Il dibattito di politica internazionale sviluppatosi negli ultimi decenni, insieme alla riflessione teorica (Bardi 2011) e alle analisi tecnico-manageriali, hanno portato alla ribalta, infatti, temi relativi alla limitatezza delle risorse naturali, al tendenziale esaurimento dei combustibili fossili e quindi alla necessità di superare una crescita economica basata essenzialmente su petrolio, carbone e altre sostanze non riproducibili in tempi non geologici. Motivi ricorrenti della riflessione e della ricerca tecnico-scientifica sono diventati la riduzione dell'intensità

¹ Ci riferiamo all'editing genetico mediante la tecnica CRISPR_Cas9, che consente di modificare il DNA (Anzalone et al. 2019). Recentemente stanno emergendo dubbi circa mutazioni inintenzionali e dannose che potrebbero essere innescate (Schaefer et al. 2017).

² Il telescopio Hubble ha ricostruito l'immagine dell'Universo di 13.300 miliardi di anni or sono (Technology Review, 13-5-2019).

energetica delle attività produttive, insieme all'uso efficiente delle risorse, a partire da apparati logistici 'intelligenti', perché i flussi possono essere razionalizzati e resi meno produttori di sostanze inquinanti grazie all'impiego di strumenti di IA. La richiesta di efficienza energetica (risparmio e al tempo stesso impiego di energia da fonti rinnovabili) permeano tutte le sfere della vita sociale: 1) *home and building automation*, per innalzare e controllare il rendimento energetico degli edifici con dispositivi di controllo e l'utilizzo di nuovi materiali; 2) *Smart-Intelligent-Living Cities*, approcci per progettare sistemi urbani concepiti al tempo stesso come sistemi idraulici, energetici, logistici da gestire mediante agenti artificiali (sistemi di software), strategie collettive e coerenti comportamenti individuali (microgrid, comportamenti individuali consapevoli); 3) bio-edilizia, architettura e progettazione bioclimatica di case, aree residenziali e industriali, mediante l'analisi dell'intensità di consumo energetico dei materiali, dell'adattamento dei modelli abitativi al contesto ambientale naturale e dell'impronta ecologica di materiali e forme costruttive.

In breve, si tratta di sfide tali da indurre traiettorie di mutamento a livello sistemico e individuale, che configurano l'avvio di una vera e propria *transizione energetica e ambientale*, che investe a tutti i livelli le società, intese come *sistemi socio-tecnici evolutivi*³.

Come si è arrivati a tutto questo? Quali azioni possono intraprendere le autorità istituzionali? Quali le strategie appropriate da parte di operatori pubblici e privati? Quale cultura tecnico-manageriale è oggi necessaria per qualsiasi attore socio-economico nel fronteggiare le sfide e favorire i micro- meso- e macro- allineamenti prima ricordati?

Nelle pagine successive si cercherà di rispondere a questa serie di interrogativi, mettendo al centro dell'attenzione i meccanismi basilari, sui quali si sono maggiormente sviluppate le riflessioni e le analisi di importanti Centri di Ricerca e Organismi Internazionali.

Il punto di partenza può essere uno dei temi più discussi nell'ultimo decennio, al centro di una delle iniziative strategiche dell'Unione Europea, la *Smart Specialisation* (d'ora in poi S³), la quale ha innescato l'elaborazione di 120 progetti negli Stati membri (Prieto et al. 2019). Il processo di transizione socio-tecnica deve avere un fondamentale *key driver* endogeno: la digitalizzazione di processi e prodotti dalla nano-scala alla scala globale, assunta a fondamento dell'iniziativa europea S³. Le elaborazioni di studiosi come Foray, David e Hall (2009) sono state basilari per l'elaborazione delle strategie dell'Europa. In uno dei documenti del Work Group europeo in tema essi infatti affermano: «L'idea della Smart specialisation non è un esercizio di technological foresight di una società di consulenza». Al contrario, «We are suggesting an *entrepreneurial process of discovery* that can reveal

³ Il concetto di *sistema socio-tecnico* appare fondamentale per comprendere l'evoluzione delle società odierne, perché esso indica «the interlinked mix of technologies, infrastructures, organizations, markets, regulations, and user practices that together deliver societal functions such as personal mobility» (Geels et al. 2017, 1242).

what a country or region does best in terms of science and technology. That is, we are suggesting a learning process to discover the research and innovation domains in which a region can hope to excel. In this learning process, *entrepreneurial actors are likely to play leading roles* in discovering promising areas of future specialization [...]» (Foray, David e Hall 2009, 2-3, corsivo nostro).

Nei prossimi decenni le iniziative strategiche europee devono quindi misurarsi con uno scenario in cui prevarranno Smart Specialisation, I4.0, Reconfigurable Systems (Andersen et al. 2016; Bortolini et al. 2019), che compongono un quadro dinamico, destinato a cambiare profondamente i meccanismi e le modalità manipolative dei materiali nei processi di produzione e nelle maggior parte delle attività umane. Le società sono di fronte ad un salto qualitativo per quanto concerne le funzioni svolte finora dagli umani su due piani fondamentali: 1) si svilupperanno soprattutto funzioni di progettazione, supervisione, controllo e manutenzione di sistemi fisico-cibernetici in grado di svolgere un enorme numero di lavori finora svolti dagli umani; 2) nei prossimi anni sarà necessario realizzare un generale e radicale cambiamento dei contenuti tecnico-culturali della popolazione.

Bisogna quindi comprendere nelle linee generali e al più alto grado di precisione possibile come la diffusione di sistemi fisico-cibernetici condizionerà funzioni e task lavorativi ad ogni livello. L'orizzonte entro cui i sistemi socio-economici evolvono sarà caratterizzato dal venire meno dei confini tra settori e tra imprese, dal momento che è cambiata la natura dei prodotti e con essi delle sequenze economico-produttive, generando così sfide rilevanti per le aziende e il lavoro, la cui qualità e quantità diverranno del tutto differenti da quelle odierne. È chiaro che una discontinuità così profonda e diffusa non può essere catturata da previsioni quantitative, che richiedono fundamentalmente regolarità dei processi ed evoluzioni sistemiche non così complesse da essere intrattabili dal punto di vista computazionale.

Al fine di comprendere direttrici future, illustriamo tre aspetti cruciali.

2. I processi produttivi nell'odierno scenario tecno-economico

Come abbiamo anticipato nel primo paragrafo, i beni tendono sempre più ad assumere «natura multidisciplinare» (Tomiyama et al. 2007), in quanto esiti delle intersezioni tra una pluralità di domini conoscitivi, la cui composizione e intensità di impiego variano a seconda della tipologia dei prodotti stessi. La multidisciplinarietà implica una 'intrinseca complessità' dei processi di progettazione e realizzazione: il processo di sviluppo di un nuovo prodotto, ma anche le attività di reingegnerizzazione di quelli esistenti, richiedono infatti *cross-functional teams* e *cross-functional expertise*.

Nello scenario odierno la generazione di nuove idee e i processi di adattamento a dinamiche innovative esogene sono inestricabilmente connessi a processi multi-dimensionali, nel senso che deve essere preso in considerazione un numero rilevante di set di variabili: tecnico-scientifiche, economiche, sociali, computazionali, funzionali (ElMaraghy et al. 2012).

Multidisciplinarietà e *complessità* sono proprietà emergenti dei processi di design e produzione, oltre che di sistemi tecno-economici, cioè degli insiemi di in-

terdipendenze e complementarità in cui i primi sono inseriti. Queste proprietà emergenti sono rinvenibili, sia pure con differenti gradazioni, in tutte le tipologie di prodotto. A fini dell'illustrazione del frame teorico di riferimento adottato per l'implementazione del processo di ricerca, riprendiamo i concetti di multidisciplinarietà e complessità in relazione allo *smart manufacturing*.

2.1 Verso lo smart manufacturing e la dinamica innovativa intersettoriale

«In the future, smart process plants will be conceived, designed, and operated using “molecularly informed” engineering. Smart plants will be robust, proactive and seamlessly integrated» (SPM 2009, 2).

La traiettoria tecnico-produttiva incentrata sullo smart manufacturing comporta l'impiego di tecnologie soggette ad una intensa e continua evoluzione: *networks sensor, data interoperability, multi-scale dynamic modelling, intelligent automation, scalabilità, multilevel cyber security* (SMLC 2011).

Da qui deriva il concetto di Advanced Manufacturing, che «[...] improves existing or creates entirely new materials, products, and processes via the use of science, engineering, and information technologies; high-precision tools and methods; a high-performance workforce; and innovative business or organizational models» (IDA 2012, 14).

In tale orizzonte i processi d'innovazione manifatturiera devono necessariamente misurarsi con gli sviluppi in molti domini di ricerca: «1) Mecha-ma-tronics [the integration of mechanical systems smart materials, and electronics], 2) Wireless integrated micro-systems, 3) Optimized, agile, real-time manufacturing systems, 4) Digital manufacturing, 5) Intelligent machine-to-machine systems, 6), cradle-to-cradle design» (Olson 2012a, 7).

2.2 Processi di upgrading dei prodotti e cambiamenti dei processi di creazione del valore

Data la complessità e la multidisciplinarietà dei prodotti, nei cicli di produzione tende a diventare sempre più importante lo sviluppo di competenze atte ad integrare componenti separate, in modo tale da ottenere un «output system» (AlGeddawy, ElMaraghy 2011). L'integrazione tra processo produttivo multidimensionale, design e innovazione costituisce, dunque, un fattore cruciale ai fini del successo competitivo in un'economia globalizzata (Olson 2012b), come viene rappresentato in figura 1.

La dinamica innovativa è così intensa ed estesa, infatti, da indurre un nuovo 'paradigma manifatturiero', basato su nuovi mix di proprietà: specializzazione, flessibilità, riconfigurabilità. Cambiano incessantemente, dunque, la natura dei prodotti e la configurazione delle attività necessarie a definire e ottenere precise caratteristiche degli output da collocare sul mercato, con cui si interagisce continuamente grazie a Internet delle cose (IoT) e ai social network. Ciò logicamente implica l'esistenza di strutture interattive multi-livello, interaziendali e intersettoriali, come è esemplificato in figura 2.



Figura 1 – Creare valore implica creare output coniugando istanze dei clienti, Ricerca e Sviluppo, progettazione, progettazione ed erogazione di servizi. [Fonte: Olson 2012b, Fig. 1-2]; © National Academy Press

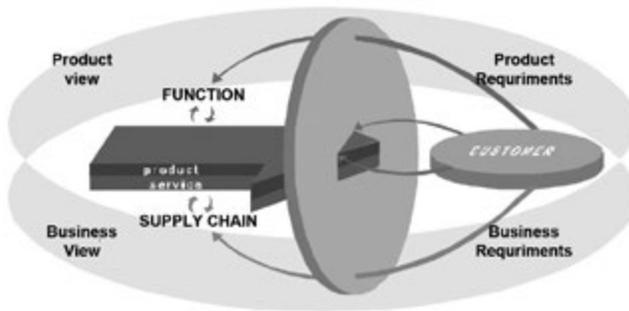


Figura 2 – Il processo di sviluppo del prodotto(N.B. In altri termini, si tratta di realizzare la congruenza tra parametri rappresentativi di vari domini di conoscenza). [Fonte: Sahlin 2000, Fig. 1]

Da esso si evince un ulteriore aspetto fondamentale: il processo di sviluppo di un nuovo prodotto, oppure quello di *upgrading* dell'esistente, è sempre più il frutto imprevedibile di interazioni tra unità economico-produttive ed entità di ricerca, che attingono informazioni e conoscenze da molteplici domini conoscitivi e dai mercati, generando una sintesi sistemica (la cosiddetta *methodology of emergent synthesis*, diffusa nel campo dell'engineering (Ueda et al. 2001)). Il processo di sviluppo dei prodotti (PDP) e di nuovi prodotti (NPDP) richiede pertanto dinamiche interattive tra team multidisciplinari e *cross-functional teams* (interni ed esterni alle imprese), che elaborano input conoscitivi riferiti a set eterogenei, ma tra i quali deve essere realizzata la congruenza, come si vede in figura 3, che sintetizza uno degli approcci noti a livello internazionale, il cosiddetto *Axiomatic Design*.

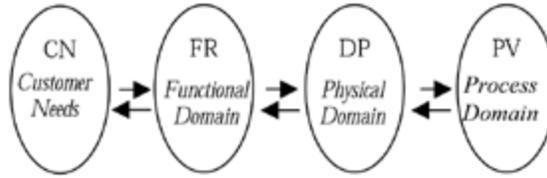


Figura 3 – I domini sono correlati in modo tale che il dominio sul lato sinistro rappresenta ‘ciò che vogliamo raggiungere’ e il dominio sul lato destro rappresenta ‘come possiamo soddisfare’ i requisiti del dominio di sinistra. [Fonte: Sahlin 2000, Fig. 5]

L’insieme delle interazioni può assumere configurazioni molto complesse, ad esempio quelle raffigurate in figura 4, che si complica enormemente – come vedremo successivamente – nell’odierno mondo iperconnesso.

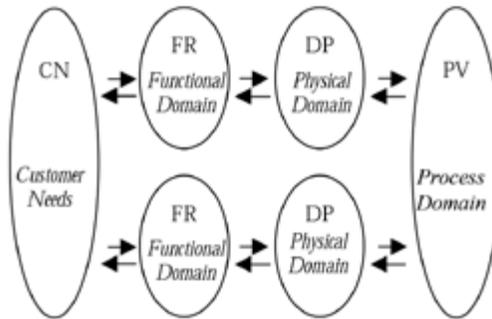


Figura 4 – Progettazione concorrente scomposta in 2 set di moduli disgiunti: produzione e supply-chain. [Fonte: Sahlin 2000, Fig. 7]

Le analisi a cui si è fatto riferimento sono alla base dei modelli di rappresentazione della dinamica evolutiva di prodotti e settori in termini di entità economico-produttive, che interagiscono al fine di ottenere famiglie di prodotti contraddistinti da *short life cycle*, elevata adattabilità a cambiamenti di parametri tecnico-scientifici, culturali, socio-economici. Ciò avviene soprattutto in ambienti ‘iper-competitivi’ come quelli odierni (D’Aveni 2007), caratterizzati da incertezza e continui cambiamenti in variabili fondamentali: fattori di domanda, tipologia di input, tecnologie, parametri progettuali.

2.3 Processo di design e realizzazione dei prodotti: incessante attività multi-dimensionale di problem solving

Nel quadro generale, descritto nei tratti essenziali, il design e la realizzazione di prodotti divengono insieme di attività dirette alla soluzione di problemi in micro-universi tecnico-produttivi attraversati da flussi, endogeni ed esogeni, di informazioni e conoscenze, come rappresentato in figura 5.

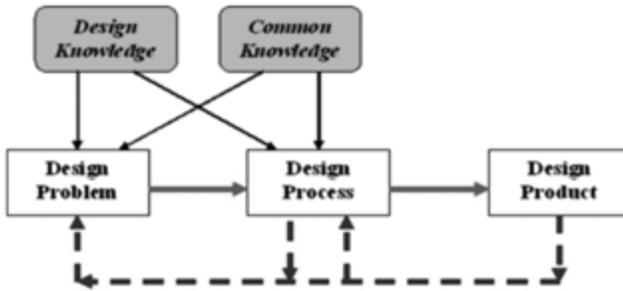


Figura 5 – Flussi informativi multipli tra domini di conoscenza relativi a: problema, processo e prodotto. [Fonte: Summers, Shah 2010, Fig. 1]

Tutto ciò comporta che sia la creazione di nuovi prodotti sia l'*upgrading* di quelli esistenti impongano alle imprese, sempre più spesso inserite in contesti ecosistemici tendenzialmente globali, di misurarsi con problemi multi-dimensionali e complessi, così definiti nella letteratura internazionale: fonte di vantaggio competitivo diviene la creazione di eco-sistemi di imprese e prodotti come «sistemi modulari» (Adner, Kapoor 2016). Essi emergono, evolvono e possono anche fallire: il successo dipende da come si sviluppano complementarità e interdipendenze nel dispiegarsi di attività dirette alla soluzione di problemi tecnico-produttivi e tecno-economici, al fine di ottenere prodotti appropriati, ovvero con proprietà tali da far sì che si realizzi un *matching* soddisfacente tra il vettore dei parametri di prodotti (caratteristiche identificative tecnico-scientifiche) e quello della domanda (*customer requirements*). Viviamo infatti in un'epoca contraddistinta da «increasing complexity and uncertainty that arises from factors such as the diversification of culture, the individualisation of lifestyle, the globalisation of industrial activities, and growing consideration toward our natural environment» (Ueda et al. 2001, 535). In questo scenario generale l'impresa è al tempo stesso un sistema e «a network of processes for high adding value. Nearly all industrial companies are parts of manufacturing networks» (Westkämper 2007, 419) (Fig. 6).

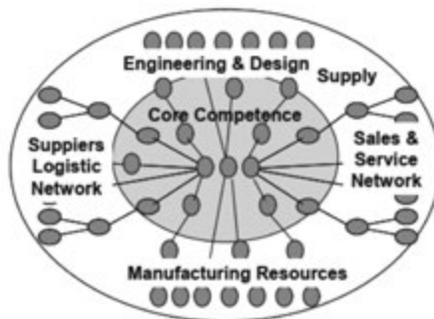


Figura 6 – Configurazioni reticolari nell'industria manifatturiera. [Fonte: Westkämper 2007]

La necessità di una visione sistemica emerge nettamente, dato il numero di variabili interdipendenti da prendere in considerazione (Fig. 7).

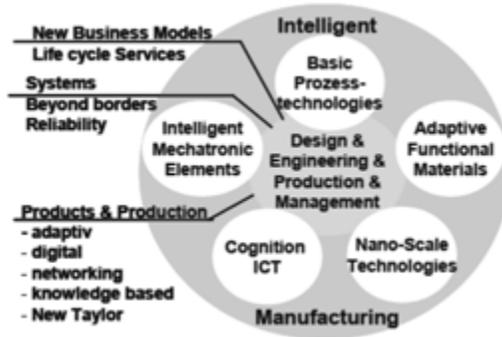


Figura 7 – Tecnologie emergenti nelle attività manifatturiere. [Fonte: Westkämper 2007]

2.4 Cambiamenti nei processi di creazione del valore e nelle sequenze economico-produttive globali

Sulla base delle considerazioni svolte è logico che le attività manifatturiere assumano configurazioni mutevoli, all'interno delle quali tende ad essere meno cogente la distinzione tra funzioni terziarie e quelle strettamente manifatturiere, mentre sono nel complesso molto differenti da quelle del passato e soprattutto intrinsecamente connesse a processi multidimensionali di apprendimento, come viene esemplificato dalla definizione di *learning factory* (Fig. 8).



Figura 8 – L'impresa che apprende. [Fonte: Jovane, Westkämper, e Williams 2008: Fig. 6.7]; © Springer

Se si pensa che tutto questo è inserito in un quadro globale di interazioni (Fig. 9), si comprende come la complessità e i processi multi-scala siano due elementi cruciali della dinamica tecno-economica odierna.



Figura 9 – Modello di riferimento per il Progetto EMIRA (European Management Innovation and Research Arra). [Fonte: Jovane, Westkämper, e Williams 2008: Fig. 6.1]; © Springer

Il quadro diviene potenzialmente caotico, come di fatto sta purtroppo accadendo, quando si prende in considerazione l'intreccio dinamico tra i gli aspetti delineati e l'impatto ambientale in ogni sistema socio-tecnico (Fig. 10).

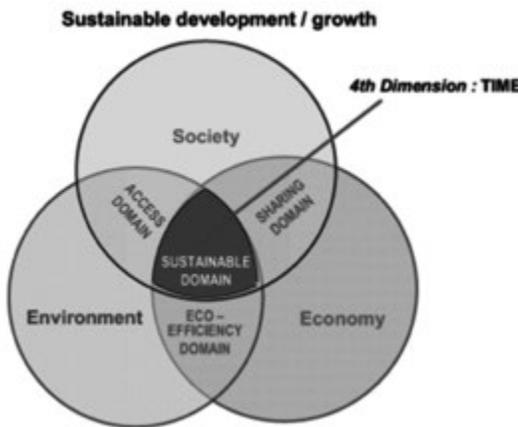


Figura 10 – Componenti fondamentali dello sviluppo sostenibile. [Fonte: Jovane et al. 2008: Fig. 13]

Cicli di vita dei prodotti più brevi, variabilità della domanda, personalizzazione di prodotti e servizi (*customization*), accelerata dinamica tecnico-scientifica, mutamenti socio-tecnici si traducono in flessibilità dei processi produttivi, capa-

cità di adattamento delle sequenze (ristrutturazione di funzioni generali e di task operativi), per cui le sequenze economico-produttive sono soggette a frequenti mutamenti, che possono portare a riconfigurazioni delle stesse sequenze. In sintesi, diviene importante la riconfigurabilità, l'agilità e la scalabilità dei processi, che potremmo assimilare a linee di assemblaggio, applicando quindi ad esse gli stessi principi individuati per le *assembly line* dell'industria nel percorso verso I4.0 (Cohen et al. 2017): connettività, generazione di informazioni e conoscenze contestuali, infine la *smartness*, intesa come capacità di realizzare processi decisionali con proprietà anticipatorie, reattività, attitudine all'adattamento strutturale (Fig. 11).

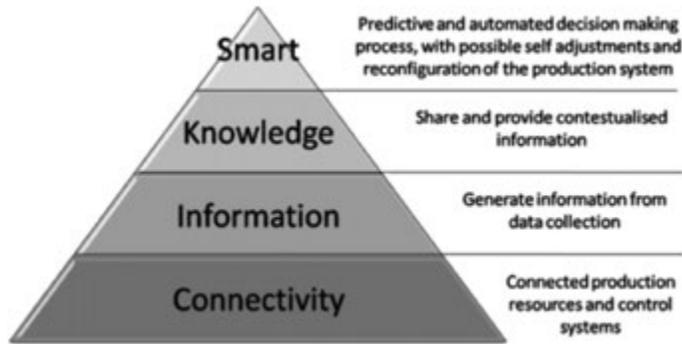


Figura 11 – Principi fondamentali di Industria 4.0. [Fonte: Cohen et al. 2017: Fig. 2]

Le descritte linee evolutive implicano che una serie di tecnologie convergano (Cohen et al. 2019): 3D, AR (*Augmented Reality*), Cobot, macchine autonome per movimentazione dei materiali, sensori-parti-macchine e sistemi in grado di auto-diagnosi e di 'auto-consapevolezza' (*self-awareness*) rispetto ai flussi informativi provenienti dall'ambiente operativo, che può essere a scala globale. Tutto ciò richiede una capacità di integrazione conoscitiva e di coordinamento che solo un management strategico all'altezza delle sfide può assicurare.

Le riflessioni svolte in questo paragrafo inducono a formulare *due proposizioni finali*: 1) le linee strategiche verso la *smart specialization* coinvolgono processi e attività intersettoriali, cambiando al tempo stesso il focus dell'analisi dall'impresa alla sequenza di operazioni economico-produttive (Buenstorf 2005), che portano ad un output; 2) emerge con forza la trasversalità delle competenze e dei *task*, cioè il fatto che attività e conoscenze in evoluzione possono essere impiegate in più sequenze, dato il cambiamento della natura dei prodotti, diventati *multi-technology* e *multi-knowledge domain*.

3. Water-Energy-Food Nexus

C'è una convergenza generale sulla tesi che siamo vicini al limite nell'utilizzazione delle risorse naturali, il cui stock è stato accumulato nei milioni di anni

di evoluzione della Natura. Lo scenario di risorse limitate è sintetizzato con l'espressione *Water-Energy-Food-Nexus*, a cui vanno aggiunte le materie rare (*Rare Earth Elements*, REE) impiegate per smartphone, computer, attrezzature medicali e ogni dispositivo che elabora informazioni. Le miniere di REE potrebbero esaurirsi nell'arco di pochi anni e già il loro possesso garantisce un potente fattore di condizionamento strategico per i Paesi che ne sono possessori in misura preponderante. Questi problemi esulano dalle finalità del presente capitolo, per cui approfondiremo il tema del *Water-Energy-Food-Nexus*. La letteratura tecnico-scientifica e l'elaborazione delle strategie politiche sul tema del *Water-Energy Food Nexus* si è enormemente ampliata negli ultimi anni (Keairns et al. 2016), in considerazione della crescente consapevolezza delle interconnessioni e interdipendenze tra sistemi idraulici, energetici e alimentari (Albrecht 2018, per una rassegna degli studi in tema).

Il lavoro di Beddington (2009) può in un certo senso aver creato i presupposti per un salto di qualità nell'affrontare i temi, perché ha posto all'attenzione degli studiosi gli effetti dei cambiamenti climatici sulla disponibilità di acqua, cibo ed energia, come si evince dalla figura 12, sostenendo la tesi di una eventuale 'tempesta perfetta' intorno al 2030.

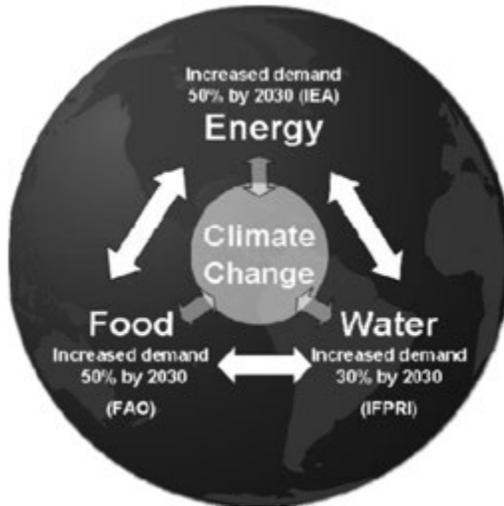


Figura 12 – Lo scenario della tempesta perfetta. [Fonte: Beddington 2009, Fig. 7]

Questo e altri studi hanno indubbiamente stimolato l'acquisizione di consapevolezza della necessità di approfondire l'approccio sistemico con la formalizzazione dell'espressione *Water-Energy-Food Nexus*.

Proprio l'approccio sistemico è stato ulteriormente ampliato dal World Economic Forum (2011) e da Hoff (2011), che ha elaborato una rappresentazione sintetica e molto efficace del *Water-Energy-Food-Nexus*, ampliato con l'inclusione del *Climate Change* (Fig. 13).

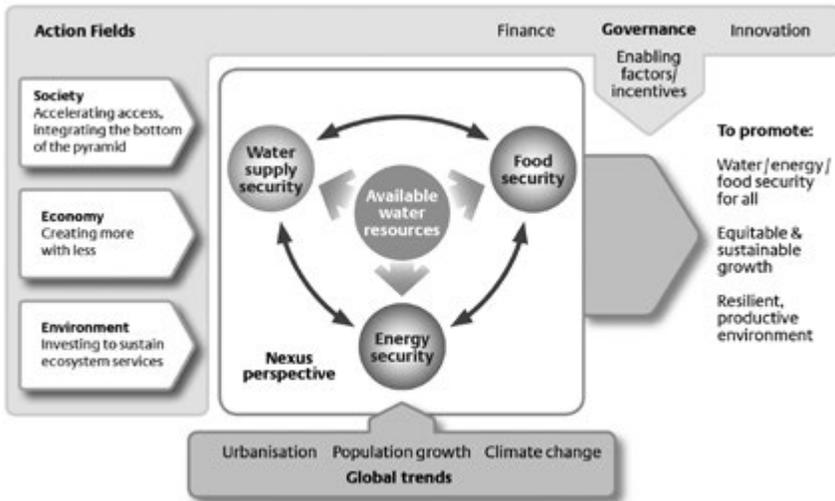


Figura 13 – Water-Energy-Food-Nexus. [Fonte: Hoff 2011, Fig. 2]

Dalla figura risultano evidenti le interdipendenze e le interazioni tra una serie di sistemi e sotto-sistemi, che costituiscono vere e proprie entità autonome interattive, rendendo chiaro e concreto il concetto di sistema complesso adattativo, precedentemente introdotto.

I nessi tra acqua ed energia, per i problemi che derivano alla seconda dalla scarsità della prima in conseguenza delle variazioni climatiche in atto e previste in ampie zone della Terra, sono stati posti al centro di gruppi di lavoro della Banca Mondiale all'inizio di questo decennio (Rodriguez et al. 2013; Aboelnaga et al. 2018). In realtà le interrelazioni fra i tre settori sono studiate in modo formale solo verso la fine del primo decennio del XXI secolo, ma in precedenza una peculiare visione globale dei problemi si sviluppa mettendo a fuoco solo le relazioni tra i primi due. Naturalmente il dibattito sulla definizione di Nexus è stato ampio ed è tuttora aperto (Simpson, Jewitt 2019); appare comunque fondata la tesi che la visione sistemica e multi-livello, insieme alla centralità dello studio delle interrelazioni, sono diventate lo schema concettuale prevalente, con un linguaggio e una metodologia ampiamente condivisi nel mondo tecnico-scientifico e manageriale, come si evince dalla figura 14.

Bisogna mettere in evidenza, infatti, che le peculiarità dell'insieme di problemi sul tappeto coinvolgono una molteplicità di attori privati e pubblici a differente scala di azione. In sostanza, quindi, la *governance* di contesti complessi e «multicentrici» (Simpson, Jewitt 2019) diviene una questione cruciale, che riguarda l'intera 'navicella spaziale' (la *spaceshift* di Boulding), sulla quale si addensano tempeste climatiche e geopolitiche per il controllo di risorse strategiche.

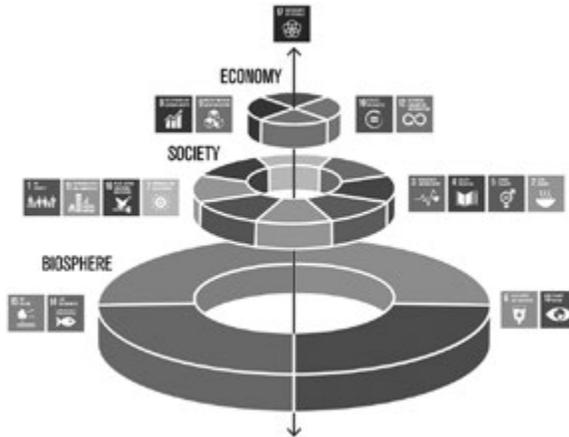


Figura 14 – Rappresentazione dei possibili collegamenti, diretti e indiretti, tra obiettivi di sviluppo sostenibile e cibo. [Fonte: Simpson, Jewitt 2019, Fig. 1]

Nel corso degli anni matura comunque, anche se lentamente, la consapevolezza che la crescita economica può essere messa a repentaglio dalle attività umane svolte senza alcuna valutazione relativa agli effetti sistemici su scala locale e globale. Il World Economic Forum, la World Bank e altre Organizzazioni Internazionali riprendono e approfondiscono la tematica con studi specifici, alcuni dei quali saranno esaminati subito dopo aver ricordato che il 21 Ottobre 2015 l'ONU (UN 2015) ha adottato una risoluzione per lo sviluppo sostenibile al 2030. Intanto si sono svolte analisi molto significative, che cercano di stimare l'impatto negativo delle alterazioni sistemiche del Water-Energy-Food Nexus. Nel 1994 l'International Agency's World Energy Outlook (citato in Rodriguez et al. 2013, VI) indica un futuro di possibile limitazione dell'acqua disponibile per produrre energia in Paesi già sviluppati e in quelli non industrializzati. Nel Water Report dell'ONU 2012, da un'indagine presso 128 Paesi emerge che nel 48% di essi la disponibilità di acqua per la produzione energetica è un problema cruciale e una delle priorità più importanti per il futuro. Analoghe considerazioni sono svolte riguardo a Cina, India e Asia orientale. Sempre nel 2012 l'IEA World Energy Outlook sottolinea come nel Water-Energy Nexus le risorse di acqua siano «increasingly stressed and more contentious», dalle conseguenze geopolitiche inimmaginabili (IEA 2012). Il secondo decennio del XXI secolo è caratterizzato dalla *thirsty emergence*, anche perché negli ultimi due decenni vi è un altro fattore decisivo, che 'stressa' ulteriormente il settore dell'energia, cioè la domanda generata dallo sviluppo esponenziale dell'informazione e in particolare dell'IA.

4. I costi energetici dell'Era digitale

Internet, l'iperconnettività globale, il crescente e inarrestabile impiego delle tecnologie di IA hanno un segreto 'vergognoso' («dirty secret», Xu Elegant

2019). Le stime del consumo di elettricità dovuto ad Internet sono eloquenti (IEA 2020) come mostra la figura 15.

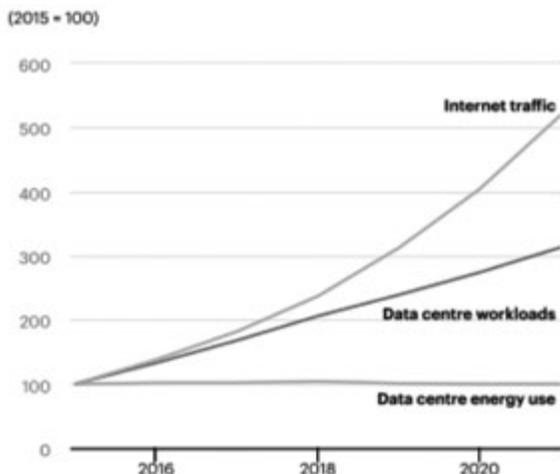


Figura 15 – Andamento globale del traffico Internet, del carico e del consumo di energia dei data center (anni 2015-2021). [Fonte: IEA 2020]

Il quadro è chiaro: vi è una crescita tendenzialmente esponenziale del traffico di Internet, una crescita quasi lineare del workload dei Centri di Elaborazione dati, a cui si unisce un andamento quasi costante del consumo di energia. In realtà dovrebbero preoccupare tutti e tre gli andamenti, se esaminiamo altre elaborazioni, anche se già la dinamica del traffico Internet dovrebbe indurre a qualche riflessione. Un recente studio (Strubell et al. 2019) misura il consumo energetico dell'addestramento di quattro modelli neurali – molto usati – di NLP (Natural Language Processing, cioè Transformer, ELMo, BERT, GPT-2). La comparazione delle quantità di CO₂ equivalente emessa comparativamente a stili di consumo ordinario è impressionante: 5 volte il consumo medio annuale di un'auto americana (Tab. 1).

Sempre Strubell et al. (2019, 4) stimano che l'addestramento del solo BERT su una GPU «is roughly equivalent to a trans American flight» (il termine GPU è chiarito tra poco). Gli autori in questione concludono il loro contributo con una serie di raccomandazioni, tra cui è fondamentale quella di effettuare stime e calcoli della sensibilità delle tecnologie impiegate rispetto ad un nutrito set di parametri, dando il dovuto rilievo all'efficienza computazionale di hardware e software. Le valutazioni della sensibilità multi-parametro possono far emergere costi insostenibili su diversi piani. Nel valutare gli investimenti, l'analisi dei costi finanziari e computazionali di addestramento e sviluppo dei modelli di elaborazione dati non può prescindere dai costi ambientali che essi necessariamente comportano. Gli effetti su ampia scala di procedure di calco-

lo parziali e incomplete possono infatti essere sorprendenti e deleteri. Un altro esempio del ‘segreto oscuro’ di Internet è il seguente: solo con 2 miliardi di accessi su Youtube al video musical *Despacito* si è consumata energia pari a quella di 40.000 case americane in un anno, perché ogni click alla ricerca del video Google mette in moto una quantità imprecisata di server in 6-8 dei suoi data centers, distribuiti nel mondo (Xu Elegant 2019).

Tabella 1 – Confronto delle emissioni stimate di quattro modelli neurali di NLP con il consumo familiare ordinario. [Fonte: Strubell et al. 2019]

Consumption	CO ₂ e (lbs)
Air travel, 1 passenger, NY↔SF	1984
Human life, avg, 1 year	11,023
American life, avg, 1 year	36,156
Car, avg incl. fuel, 1 lifetime	126,000
Training one model (GPU)	
NLP pipeline (parsing, SRL) w/tuning & experimentation	39 78,468
Transformer (big) w/neural architecture search	192 626,155

Un laboratorio di ricerca in IA di San Francisco (Open AI and Compute, 2019, <<https://openai.com/blog/ai-and-compute/>>, <<https://openai.com/blog/ai-and-compute/#addendum>>) ha pubblicato nel novembre 2019 un’analisi dell’evoluzione della potenza computazionale richiesta dagli sviluppi del Machine Learning da quelli ritenuti gli inizi (1959) ad oggi (Fig. 16).

Emergono due fasi distinte: fino al 2012, per quanto concerne la potenza computazionale necessaria per il *training* di un metodo di ML, è prevalso un trend speculare alla famosa legge di Moore (raddoppio ogni 2 anni). Dal 2012 in poi l’andamento è diventato esponenziale (raddoppio ogni 3-4 mesi) senza mostrare alcuna alternanza di fasi (*boom and bust*), che l’IA ha invece mostrato negli ultimi decenni. Tutto ciò non avviene in modo indolore dal punto di vista energetico. Un esempio fornito da Naughton (2019) lo mostra chiaramente: NVIDIA, società specializzata nella produzione di GPU (Graphic Processing Unit, processori impiegati in modo considerevole nei sistemi di apprendimento per NLP), ha elaborato un modello di NLP 24 volte più grande di quello precedente e solo il 34% migliore nell’apprendimento. Il suo addestramento richiede 512 GU di nuovo tipo in funzionamento continuo per 9,2 giorni. Il consumo di energia subisce un’impennata considerevole: «Given the power requirements per card,» wrote one expert, «a back of the envelope estimate put the amount of energy used to train this model at over 3x the yearly energy consumption of the average American» (Naughton 2019).

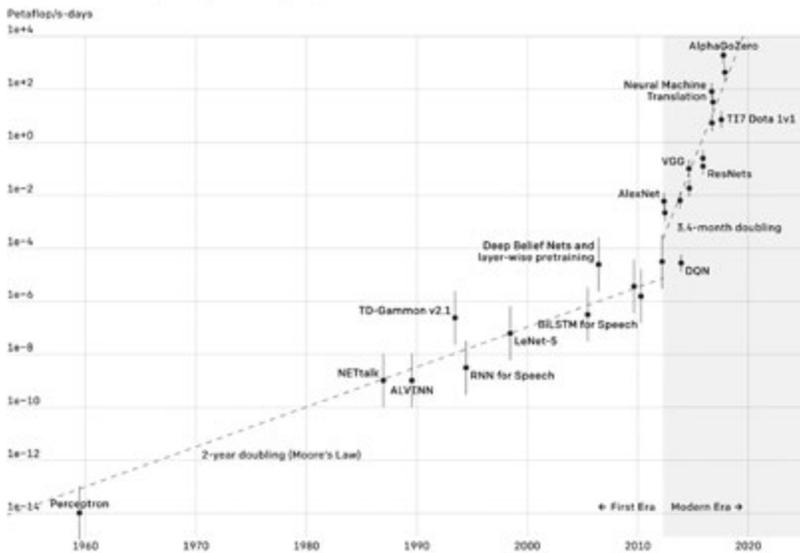


Figura 16 – Crescita esponenziale dell’impiego di potenza computazionale da parte dei maggiori sistemi di Intelligenza Artificiale. [OpenAI 2019]

Per arricchire ulteriormente la riflessione effettuiamo un semplice calcolo, con l’aiuto di Pogančić (2019). Prendiamo un normale personal computer, con cui programmiamo una rete neurale per Deep Learning con una CPU Intel i7, che dissipa 95 W di energia per un output standard, corrispondente a 2.28 KWh ed immaginiamo di farlo funzionare per addestrare una rete neurale per 24 ore. Se aumentiamo in misura significativa la potenza computazionale, usando un processore grafico (ad esempio GPU di NVIDIA), sono al massimo dissipati 250W, corrispondente a 25 volte la quantità dissipata da Ii7. Nell’arco di 24 ore diventano 6KWh, che può andare bene per un PC da casa. Se ampliamo lo sguardo e pensiamo ai data center, il quadro diviene inquietante. Alcuni data center impiegano circa 5000 GPU in funzione per 24 ore continue, cui vanno aggiunti almeno un numero 8 volte superiore ai GPU *cores* (cosiddetti nuclei informatici di elaborazione, nel gergo dell’informatica), che consumano 10.000 volte i processori Ii7. Un semplice calcolo mostra il balzo enorme nell’assorbimento energetico: $(5.000 \times 6Kwh) + (2.28 \times 10.000) = 30MWh + 22.8MWh$ (conversione in megawatt), cioè 52,8MWh. Si tratta di un’enorme quantità.

Da dove può venire l’energia necessaria per far ‘macinare numeri’ ad un data center? Una turbina eolica in condizioni favorevoli può produrre fino a 6 milioni di KWh l’anno, ma le statistiche trovate da Pogančić arrivano a 4500 MWh l’anno, che significano 12,32 MWh al giorno, energia che può alimentare 400-500 case, ma non un data center, il cui funzionamento richiede almeno 5 turbine eoliche. In questa stima non è inclusa l’energia necessaria per il raffreddamento

e la funzionalità dell'hardware, il che porta ad un incremento notevole del fabbisogno. Estendiamo ancora l'analisi e prendiamo in considerazione il numero di data center esistenti nel mondo, almeno 500.000, per i quali occorrerebbero 2,5 milioni di turbine eoliche. Gli Stati Uniti ne posseggono 56.000, ma hanno anche il 40% dei data center, mentre la Germania ne ha 25.000. Siamo quindi al di sotto dei 100.000 solo per Usa e Germania.

Questo piccolo esempio deve indurci a pensare ed agire in modo del tutto differente, sia sul piano strategico che nel breve periodo.

Bisogna tenere presente, però, che a fronte di questi aspetti problematici vi sono lati positivi⁴, quali il fatto che l'IA può fornire strumenti fondamentali per la riduzione dei consumi energetici di case, trasporti e insediamenti urbani. Al tempo stesso sistemi di software possono essere decisivi per la produzione e distribuzione decentralizzata di energia da una molteplicità di fonti (*smart grid*), oltre al perseguimento di una maggiore efficienza e un migliore controllo delle centrali da fonti tradizionali. Si può anzi affermare con un certo fondamento che l'IA sarà decisiva nella transizione energetica e ambientale, purché si tenga presente anche la dinamica complessa: può ridurre la domanda di energia da parte di tutta una serie di entità (case, imprese, città, trasporti) e contemporaneamente aumentarla se non viene effettuata un'analisi multi-dimensionale di processi complessi e fonti di incertezza, come ricorda la Brookings Institution (Victor 2019).

Non solo l'IA merita la dovuta attenzione. Anche la tecnologia blockchain e le criptomonete su di essa basate hanno un consumo di energia di tutto rispetto. Il Cambridge Center for Alternative Finance (<<https://www.jbs.cam.ac.uk/faculty-research/centres/alternative-finance/>>) stima in tempo reale, con intervalli di 30 secondi, l'assorbimento energetico dovuto a Bitcoin (<<https://www.cbeci.org/>>): alle ore 16,52 del 21.3.2020 è pari a 6,49 GWh, corrispondenti a 63,34 TWh annuali, 8 TWh più di quello che consuma la Svizzera in un anno (Naughton 2019).

L'impatto ambientale (*environmental footprint*) è quindi considerevole e il fabbisogno è in continua crescita, grazie all'impiego generalizzato di potenza computazionale a livello individuale e collettivo, mentre si susseguono innovazioni che possono modificare i tradizionali modelli di consumo, come appunto la tecnologia blockchain, molto interessanti dal punto di vista tecnico-scientifico e con risvolti di molteplice valenza: economico, giuridico, etico-morale, politico, istituzionale. Senza approfondire ulteriormente la questione, blockchain può essere utile per la certificazione di prodotti e filiere, la regolazione dei rapporti tra privati senza intermediazioni (riduzione dei costi), il mantenimento di ambiti di riservatezza e la garanzia di margini di sicurezza contrattuale in una sequenza di transazioni anche sul mercato dell'energia (Li et al. 2019). Al tempo stesso il costo ambientale, però, può assumere dimensioni ragguardevoli ed essere a carico della collettività, oltre che del Pianeta, a meno che non si trovino

⁴ Esula dai fini del presente capitolo una dettagliata analisi delle implicazioni di varia natura degli sviluppi dell'IA. In questa sede ci siamo limitati a motivare l'importanza di effettuare valutazioni sistemiche.

strumenti e meccanismi innovativi tali da ridurre il fabbisogno di energia. Non è comunque solo Bitcoin ad essere energivoro, perché anche Ethereum nel 2018 è riuscito a consumare energia come l'intera Islanda (Fairley 2019), pur consumando da un quarto a metà del consumo di Bitcoin, perché una transazione in Ethereum assorbe energia pari a quella di una casa americana in un giorno. Il problema risiede nel *mining*, cioè nella competizione computazionale all'interno della comunità degli utilizzatori della tecnologia nel crittografare transazioni sicure, che devono essere racchiuse in 'blocchi' di dati tra loro connessi ('catena' di blocchi che racchiudono transazioni precedenti, *blockchain* appunto). Un'analisi ampia e interessante della blockchain e dei suoi molteplici impieghi, tra cui il campo dell'energia, è svolta da Andoni et al. (2019), che analizzano 140 progetti di ricerca e startup, fornendo così molti elementi di riflessione. Gli autori dello studio in questione sottolineano, per quanto riguarda l'energia, l'utilità per il *matching billing* e la *security*, lo stimolo alla creazione di mini-grid e comunità progettuali, la certificazione green e il management distribuito ed efficiente della produzione e distribuzione decentralizzata di energia.

5. Implicazioni degli sviluppi dell'Intelligenza Artificiale

Nel delineare le sfide del XXI secolo non possiamo trascurare gli sviluppi dell'IA, ormai entrata letteralmente nelle nostre vite, non dall'esterno, bensì in quanto alta espressione della capacità della mente umana che, nel percorso plurisecolare verso la liberazione da quello che una volta veniva chiamato il 'regno della necessità', cioè dalle attività faticose e dense di pericoli, ma necessarie per la nostra sopravvivenza, ha da secoli inseguito l'aspirazione umana a superare i propri limiti. La sostituzione dell'energia animale con quella meccanica e i combustibili fossili (il carbone della Prima rivoluzione industriale) ha costituito un salto qualitativo nel rapporto tra scienza, tecnica e attività produttive. La Seconda rivoluzione industriale – basata su chimica, petrolio ed energia elettrica – ha consentito un ulteriore balzo in avanti verso il superamento dei limiti, come si può vedere dal profilo demografico dell'Umanità negli ultimi due secoli (Fig. 17).

Se le prime due rivoluzioni industriali hanno modificato sia le infrastrutture materiali (navigazione e motorizzazione su ferro e strada), sia quelle immateriali (codice Morse) nella prima, mentre nella seconda i cambiamenti hanno interessato il motore a scoppio, il telegrafo e il telefono⁵, la terza e soprattutto la imminente quarta trasformano radicalmente le priorità. È l'infrastruttura immateriale a cambiare profondamente e a divenire il meccanismo propulsore, mentre quella materiale è significativa, ma è alimentata costantemente dalla prima. Il motore di questa sorta di inversione di priorità è presto individuato: con l'incorporazione nei beni e nei processi di produzione dei sistemi di algoritmi, la conoscenza umana 'oggettivata' interagisce continuamente con quella 'vivente' nelle menti degli attori e nei loro

⁵ Ovviamente riportiamo qui solo alcune delle più importanti innovazioni, senza pretese di esaustività.

comportamenti, creando così un universo fisico-cibernetico, al cui interno processi fisici e informativi interagiscono senza sosta, anzi si creano frequentemente feedback cumulativi che possono dare origine a dinamiche non lineari in ogni ambito della vita umana a scala globale. Il sogno/mito dell'uomo sembra quasi potersi realizzare quando agenti artificiali saranno in grado di ragionare come gli umani e ciò appare ad autorevoli scienziati e studiosi prossimo alla realizzazione oggi, a oltre 60 anni dal 1956, data della Conferenza di Dortmund, nel corso della quale fu coniata l'espressione Intelligenza Artificiale da uno degli organizzatori (John McCarthy), alla presenza di dieci grandi personaggi protagonisti dell'IA di prima generazione: Marvin Minsky, Herbert Simon, Claude Shannon, Alan Newell, Nathan Rochester, Ray Solomonoff, Oliver Selfridge, Trenchard More, Arthur Samuel, James More. Nasce in quel workshop l'IA 'forte', o simbolica, incentrata sull'idea che il ragionamento nella risoluzione dei problemi sia basato su sistemi simbolici e regole di calcolo formalizzate. L'idea centrale dell'incontro di Dortmund e dei contributi fondamentali nei decenni successivi fino agli anni '80 è «the conjecture that every aspect of learning or any other feature of intelligence can in principle be so precisely described that a machine can be made to simulate it» (McCarthy et al. 1955). Sono seguiti decenni caratterizzati dalla creazione di euristiche di ricerca, sistemi esperti, modelli di rappresentazione della conoscenza e di organizzazione di reti concettuali ad albero, sempre sulla base della concezione dell'intelligenza simbolica.

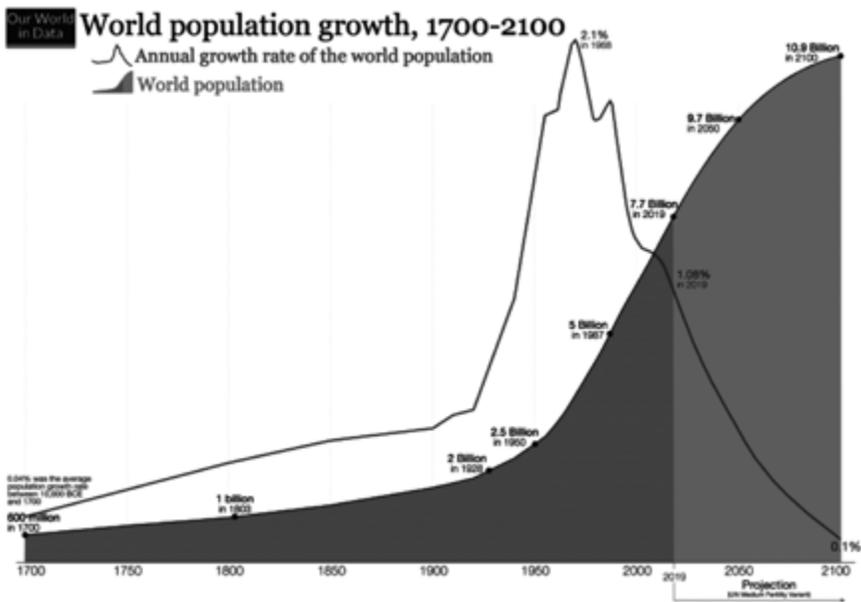


Figura 17 – Crescita della popolazione mondiale, 1700-2100. Due secoli di rapida crescita della popolazione stanno per finire. Un segnale ulteriore di questo trend è il dato reso noto da STATISTA (McCarthy, 2021) circa il crollo del tasso di crescita della popolazione in Cina. [Fonte: <<https://ourworldindata.org/world-population-growth-past-future>>]

Nel corso degli anni '80, dopo un lungo e tormentato processo di elaborazione teorica, iniziato con la teoria degli automi di von Neumann verso la fine degli anni '40 (Von Neumann 1966), si afferma anche una differente visione, quella dell'IA sub-simbolica. Con la pubblicazione del libro di Rumelhart, McClelland e il PDP Group (1986, *Parallel Distributed Processing*, MIT Press) si verifica una svolta, incentrata sulle reti neurali e sull'idea che insiemunità di elaborazione, 'modellate' sui neuroni e raggruppate in tre strati, potessero produrre conoscenze (riconoscere lettere, parole, immagini) e apprendere regole senza ricorrere a simboli elaborati secondo regole ben definite da programmi predefiniti, bensì mediante una rappresentazione distribuita, risultante dalle connessioni ponderate tra neuroni. Di qui il concetto di intelligenza distribuita, che ha avuto un grande successo nella seconda metà degli anni '80, fino agli inizi del decennio successivo, quando emergono i limiti delle reti nell'affrontare problemi conoscitivi più ampi e complessi del riconoscimento di lettere, parole e particolari di immagini. La potenza computazionale allora disponibile, infatti, non consentiva di ampliare la popolazione di neuroni e quindi le variazioni dei pesi delle connessioni tra di essi. Inizia così il cosiddetto 'inverno dell'IA', con perdita di interesse da parte dell'industria e della *computer science*, quindi con riduzione dei finanziamenti ai progetti di ricerca. L'aumento della potenza di calcolo, cresciuta a ritmi esponenziali nell'ultimo decennio del XX secolo e nei primi del XXI, ma continua ancor oggi, porta ad una nuova fase di ininterrotta espansione delle reti neurali, che sono ora composte di centinaia di strati e migliaia di neuroni con miliardi di connessioni. Siamo quindi arrivati al periodo attuale con la fioritura del Deep Learning (reti con un numero enorme di strati e connessioni) e vari modelli di reti: dal Machine Learning al Deep Learning, alle Reti Neurali ricorrenti (RNNs,) alle Reti Neurali Convolute (CNNs), alle recenti Capsule Networks di Geoffrey Hinton, ai Treelets di Gary Marcus.

La nuova fioritura delle reti neurali ha indubbiamente ottenuto successi clamorosi nel riconoscimento di immagini, nel NLP, nel vincere a scacchi, Jeopardy, GO, contro le persone ritenute campioni ineguagliabili nei rispettivi giochi⁶. Il Deep Learning nelle sue varie forme consente di elaborare quantità imponenti di dati, individuare pattern e correlazioni, delineare trend e suggerire opzioni da valutare, per esempio nella manutenzione predittiva, nel controllo del traffico stradale e telefonico, nel controllo del trasporto multimodale e delle centrali elettriche, e così via.

Dalla descrizione appena effettuata si potrebbe evincere che siamo di fronte ad uno scenario apportatore solo di potenziali grandi benefici. In realtà l'IA sta assumendo sempre più i contorni di una sfida, perché la posta in gioco è il controllo dei flussi informativi a livello globale. Poiché l'Umanità tutta ormai vive

⁶ 1996: Deep Blue (computer) batte per la prima volta il campione mondiale di scacchi Kasparov. 2011: il supercomputer IBM Watson vince al gioco televisivo americano Jeopardy, altra (discussa) pietra miliare della capacità di un agente artificiale di competere con umani. 2016: AlphaGo, nuovo supercomputer IBM, batte nell'antico gioco cinese GO il coreano Sedol, ritenuto il più grande giocatore di tutti i tempi.

in un universo fisico-cibernetico, dove il secondo aggettivo intende ampliare il senso delle affermazioni di Wiener (1948)⁷ alla luce dell'evoluzione tecno-economica e socio-tecnica dei sistemi di produzione e diffusione delle informazioni, si pongono grandi interrogativi: 1) chi organizza e controlla i flussi informativi, gestisce i dati personali e aggregati, ottenuti automaticamente attraverso la rete? 2) Si profila il rischio che il «codice divenga la legge» (Lessig 2006)? Lessig, che analizza lo spazio cibernetico (*cyberspace*), argomenta come esso diventi lo spazio delle interazioni, che conferisce molto più potere e controllo sulle interazioni umane trasformando tutto in dati attraverso la codifica e i sistemi di algoritmi che strutturano lo stesso spazio. Il *cyberspace* è molto più dello spazio reale, che diviene un suo sotto-insieme, di cui il primo amplia le possibilità di interazioni fino a configurarsi come «a massively multiple online game» (Lessig 2006, 11). La tecnologia struttura lo spazio cibernetico e le interazioni, che vanno ben al di là delle relazioni che si sviluppano in un ambiente fisico limitato. Emerge allora un rilevante problema di regolazione: «This regulator is code – the software and hardware that make cyberspace as it is. This code, or architecture, sets the terms on which life in cyberspace is experienced. It determines how easy it is to protect privacy, or how easy it is to censor speech» (Lessig, “Code is Law”).

A ciò si aggiunge che non esistono dati ‘grezzi’ (Gitelman 2013) e quindi la loro raccolta ed elaborazione è sempre orientata da valori, come si evince dai casi, verificatisi negli USA e in altri paesi⁸, di profili criminali o semplicemente sociali, creati da sistemi di algoritmi con evidenti bias verso il colore della pelle, la localizzazione territoriale e lo status sociale. 3) I processi decisionali, sia individuali che collettivi, possono essere influenzati dai sistemi algoritmici che inducono a determinate conclusioni, facendo leva su meccanismi percettivi e fattori emozionali, ovvero attraverso l’innescò su ampia scala di componenti subliminali della mente umana (Mlodinov 2012). 4) Siamo proprio sicuri che Internet sia il mondo della libertà e della democrazia, ovvero la realizzazione di un mondo utopico dove la mente umana può solo elevarsi (Morozov 2015)? 5) Come garantire cybersecurity e sicurezza dei dati senza ledere le libertà individuali e collettive?

6) Chi e come può decidere gli sviluppi dell’IA, in modo che sia perseguito il benessere sociale e non finalità meramente private, anche a danno del primo?

Come si vede, si tratta di interrogativi da cui dipende il futuro delle società così come si sono strutturate negli ultimi secoli e al loro interno il ruolo dei soggetti individuali e collettivi, delle loro responsabilità rispetto alle decisioni e alle azioni intraprese, nonché della possibilità di sviluppare un’intelligenza collettiva di lungo periodo.

⁷ «Any organism is held together in this action by the possession of means for the acquisition, use, retention, and transmission of information. In a society too large from the direct contact of its members, these means are the press, both as it concerns books and as it concerns newspapers, the radio, the telephone system, the telegraph, the posts, the theater, the movies, the schools, and the church» (Wiener 1948, 161).

⁸ Si pensi al *citizen score*, sistema di assegnazione di *social credit* ai cittadini cinesi (Storm 2015; Kobie, 2019).

6. Le trasformazioni del mondo del lavoro

6.1 Lo spazio del lavoro nell'era dell'IA e dei robot: la via per salvare l'intelligenza umana

L'accelerazione tecnico-scientifica e tecno-economica, unitamente agli effetti dell'evento pandemico in atto, è destinata a cambiare i parametri del lavoro validi per l'epoca precedente. Nello scenario complessivo, delineato nei capitoli precedenti, si staglia la questione del possibile conflitto tra dinamica accentuata dell'IA e la riduzione dello spazio del lavoro umano.

Il futuro del lavoro è ormai un tema sempre più all'ordine del giorno di innumerevoli studi con previsioni quantitative e qualitative, visioni utopiche e distopiche, che alimentano disorientamento, senso di incertezza e ansietà (vedi Cap. 2), nonché timori sulla stessa sopravvivenza della forza lavoro nell'era dell'IA.

Dal noto saggio di Frey e Osborne (2013) alla recente (e critica) analisi della RSA (2019), non ha certo giovato alla chiarezza e al rigore l'enfaticizzazione degli ultimi sviluppi tecnico-scientifici ad opera degli autori (il che è comprensibile) e della stampa specializzata, che non di rado ha funzionato da amplificatore di novità spesso ritenute *disruptive*.

Non desta meraviglia, quindi, che in uno spazio connettivo globale, dove le fonti dei flussi informativi si moltiplicano a ritmi esponenziali, si diffondano rapidamente il disorientamento, il senso di incertezza e frustrazione. Se a tutto questo si aggiunge sia l'evento pandemico sia la turbolenza geo-politica mondiale, generata dal passaggio da un mondo bipolare (competizione USA-URSS) a uno multipolare⁹, si comprende come la dinamica tecno-economica e l'evoluzione del panorama geo-politico siano processi generatori di fattori incontrollabili.

In un sistema economico già globalizzato sul piano tecnico-scientifico, la creazione di reti produttive globali e circuiti economico-finanziari tendenti a sovrastare le sfere di azione del potere statale ha creato un mondo nuovo senza apparenti coordinate stabili. Di qui derivano le difficoltà dei processi decisionali individuali e collettivi, per i quali i punti di riferimento strategico sono sempre meno attendibili, mentre la diffusa instabilità, connaturata alla fase di transizione critica come quella odierna, offusca gli orizzonti e la scala delle azioni degli attori.

È proprio in un momento come quello attuale che diviene importante il richiamo ad uno dei fondamentali concetti elaborati da Herbert Simon, Premio Nobel per l'Economia e grande esponente dell'IA 'di prima generazione'. Ci riferiamo in particolare al concetto di razionalità limitata, ovvero all'inevitabile *divario tra le capacità umane di formulare e risolvere problemi*, da un lato, e dall'altro l'*ampiezza dei problemi posti dal contesto della decisione* (Simon 1957).

Tale gap non deve tradursi in paralisi decisionale, bensì al contrario in spinta per una intensificazione dell'attività di ricerca ed elaborazione di informazioni,

⁹ Sullo scenario in evoluzione di un mondo multipolare si vedano: World Bank 2011; Dee 2015; Flockhart 2016; Sachs 2016; Rosenberg 2019; Ten Brinke Martill 2019; Franklin 2020.

il che paradossalmente implica l'impiego di un maggiore input di razionalità, da sviluppare escogitando strategie cognitive efficaci al fine di ottenere elementi rilevanti per prendere decisioni (razionalità procedurale ed euristiche di ricerca nei termini di Simon).

Sono passati decenni dall'elaborazione di Simon e ovviamente gli sviluppi dell'IA e delle scienze cognitive, insieme all'enorme espansione delle neuroscienze, sono andati molto oltre alcune componenti del suo *Models of man*. Non è un gusto *retro* che spinge a ritenere ancora valide, specie nelle fasi di intensa trasformazione, le sue intuizioni sulla necessità di tentativi incessanti per colmare, attraverso appropriate analisi e riflessioni, i divari che si susseguono tra i nostri modelli del mondo e i processi reali.

Affrontiamo allora il problema dell'intelligenza umana e del futuro del lavoro di fronte alle 'macchine che pensano'.

È da settant'anni che si discute di «macchine che pensano» (Walter 1951) con ondate di entusiasmo, seguite da periodi di disillusione. Si pensi ad esempio alla prima fioritura, dopo studi pionieristici negli anni '60, delle reti neurali tra la fine del decennio e i primi anni '80, quando viene pubblicato il volume di Rumelhart e McLelland (1986), innesco di sommovimento positivo a livello internazionale, a cui è poi seguita una certa disillusione, perché le iniziali reti a tre strati (*input, hidden, output*) erano costose dal punto di vista computazionale e invalicabili limiti fisici rendevano le performance ottenute significative, ma non comparabili con quelle umane.

Solo in seguito a progressi tecnico-scientifici in termini di potenza computazionale, realizzatisi alla fine degli anni '80 e nel successivo decennio, negli anni 2000 si è avuta l'«esplosione» del Deep Learning, reti con molti strati (più di un migliaio nel 2017, Sze et al. 2017), milioni di neuroni e miliardi di connessioni tra nodi. Le prestazioni hanno mostrato un salto enorme rispetto alle reti degli anni '80 nel riconoscimento del linguaggio naturale scritto, del parlato e delle immagini. Parallelamente ai successi ottenuti su scala mondiale, come nel caso Watson, agente artificiale di IBM in grado di battere Lee Sedol, campione mondiale coreano di Go (vedi nota 6), si sono ampliati a dismisura gli ambiti di applicazione dei nuovi sistemi di software.

È diventato evidente ai più, esperti e non, che l'IA sembra essere entrata nella sfera pressoché infinita delle funzioni cognitive, realizzando così una discontinuità significativa, nonostante qualche analista esprima ironici dubbi in proposito (Markoff 2012). Si è dunque aperto un nuovo scenario per il mondo del lavoro, perché sembrano diventate attività sostituibili anche quelle funzioni che si sono sviluppate più tardi nell'evoluzione dell'Umanità, cioè quelle frutto dei cambiamenti della morfologia cerebrale (Mlodinov 2015).

6.2 Il paradosso fisico-cibernetico

Emerge un notevole paradosso: proprio mentre l'Umanità sta raggiungendo conquiste tecnico-scientifiche auspiccate da secoli e gli strumenti a disposizione consentirebbero – almeno teoricamente – il superamento di problemi fonda-

mentali per la sopravvivenza, si moltiplicano gli studi che delineano scenari foschi per il mondo del lavoro umano, quasi scatenando in modo distorto quella che l'antropologo francese Leroi-Gourhan (1977, cap. XV) ha definito «libertà immaginaria». Quest'ultima è stata l'ingrediente basilare dell'evoluzione umana, grazie all'enorme capacità di espressione simbolica, che ha raggiunto il culmine con l'invenzione della scrittura, la quale ha favorito e dinamizzato uno sviluppo equilibrato tra sfera fisica e mentale. Peccato che Leroi-Gourhan non sia qui con noi a riflettere ulteriormente su questi temi perché, se nell'ultimo capitolo del suo libro pone interrogativi sulla vera natura dell'uomo e sulla sua possibile evoluzione, sarebbero certamente interessanti le sue riflessioni sul fatto che gli sviluppi dell'IA sembrano implicare una rottura dell'equilibrio tra dimensione fisica e psichica dell'agire umano.

Perché mettiamo in evidenza un aspetto così rilevante? Cerchiamo di esplicitare il fondamento di questa affermazione con degli esempi. Come abbiamo già precedentemente affermato, grazie a dispositivi che elaborano informazioni dalla progettazione a livello atomico e molecolare di nuovi materiali al funzionamento di questi ultimi in motori di auto da corsa, i parametri relativi all'evoluzione delle performance affluiscono in tempo reale da tutti i circuiti del mondo al centro di ricerca, collocato in una remota area industriale, da cui poi originano flussi di feedback altrettanto veloci. Analogamente accade nel caso dei motori di aerei, delle turbine per centrali e così via: eventuali anomalie, individuate a distanza mediante dispositivi a realtà aumentata sono corrette da località remote simultaneamente su tutte quelle tipologie di prodotti.

Processi simili di rappresentazione dinamiche multi-scala possono essere realizzati in qualsiasi attività umana. Siamo infatti entrati in un universo fisico-cibernetico (*vedi* Cap. 1), dove le funzioni di progettazione, esecuzione e controllo tendono ad essere esercitate sempre meno da umani, con effetti specifici imprevedibili, anche se è però possibile delineare tendenze generali: auto-organizzazione dei processi, polarizzazione cognitiva e di potere tra un numero ristretto di persone e reti globali, che posseggono le 'leve di controllo' strategico, e un volume crescente di popolazione per la quale si amplia la divaricazione tra le conoscenze possedute e il potenziale tecnico-scientifico esistente.

Alla luce di queste considerazioni è fondato ipotizzare gli effetti del grande paradosso prima indicato: molte attività lavorative spariranno, come è già accaduto tante volte, altre saranno create e altre ancora inevitabilmente trasformate. Non è certo possibile individuare con precisione quali e in che misura, quindi concentrarsi su questi tentativi di calcolo può essere fuorviante da un punto di vista cognitivo e strategico.

6.3 Linee strategiche e traiettorie per ripensare il lavoro

L'attenzione dovrebbe essere concentrata su una questione di fondo, che ha risvolti operativi di grande rilievo nel lungo periodo. Riprendendo gli spunti di riflessione di Leroi-Gourhan, possiamo arguire che, nell'universo fisico-cibernetico apertosi dinanzi a noi, è destinato a cambiare profondamente uno dei cardini

dell'evoluzione umana, cioè il lavoro come attività progettuale e pratico-manipolativa, fondamento dell'identità personale e sociale. È l'equilibrio dinamico psico-fisico degli esseri umani, realizzatosi faticosamente nel corso di migliaia di anni, ad essere messo in discussione. Non a caso nella vulgata corrente lavoro e realizzazione personale sono strettamente connessi, nel bene e nel male. Si può sollevare un'obiezione immediata: non è certo un fenomeno nuovo il fatto che molte persone perdano il lavoro e siano insoddisfatte. Uno dei motori della tormentata transizione dall'era pre-industriale a quella industriale può essere infatti individuato nel «cambiamento culturale dell'idea di lavoro» (Schwartz et al. 2019), nel passaggio dal lavoro visto in termini di maestria artigianale, con una visione integrata della prestazione lavorativa dall'ideazione alla realizzazione dell'output finale, alla scomposizione del lavoro stesso in conseguenza di una nuova visione di quest'ultimo, ritenuto scomponibile in atomi tendenzialmente ripetibili (atomizzazione) e quindi un aggregato definito a priori di compiti (collezione di *task*) 'meccanizzabili'.

Per contro, nell'odierno scenario di espansione della sfera immateriale, che interagisce con processi fisici ed entità animate e non, l'essenza stessa del lavoro cambia profondamente: balza in primo piano la capacità di immaginazione, quindi di modellare le situazioni e i processi partendo dall'individuare e formalizzare i problemi, in modo che essi siano 'trattabili' da dispositivi in grado di svolgere anche funzioni cognitive, oltre che le tradizionali attività meccanico-ripetitive di prestazioni atomizzate. L'intervento umano, quindi, richiede nuovi ingredienti fondamentali: *design thinking*, *problem finding*, *problems solving*, collaborazioni a vari livelli e trasversali, in quanto non può esistere una conoscenza totale per la realizzazione di qualsiasi output, risultato di flussi informativi multi-dimensionali e globalizzati.

Cercheremo ora di sviluppare questi spunti in traiettorie operative, che riteniamo essenziali per innescare e sostenere processi di trasformazione del lavoro appropriati per le sfide globali con cui misurarsi.

I traiettoria per ripensare il lavoro: Mutamento di *mindset* e competenze

L'interazione collaborativa è la chiave di volta di una dinamica economico-produttiva che si espande senza apparenti limiti in un universo fisico-cibernetico, che trasfigura completamente il rapporto tra gli esseri umani e tra l'uomo e la macchina. Uno dei punti cruciali è infatti la pervasività di circuiti di feedback, grazie a flussi e scambi di informazioni, generate da ogni entità, vivente o inanimata che sia. In uno scenario simile è chiaro che 'ricostruire' il lavoro come un insieme compatto di competenze e sapere accumulato in modo irrevocabile non è realistico, né è di conseguenza ipotizzabile che l'identità personale possa ancorarsi ad un set ben definito ed univoco di compiti e funzioni.

Le basi cognitive del lavoro delle rivoluzioni industriali del passato sono tendenzialmente erose da quella che a prima vista è l'introduzione di macchine in grado di svolgere funzioni cognitive, quali la scoperta di regolarità in masse di dati, l'estrapolazione di tendenze e quindi il suggerimento di azioni da intra-

prendere per rimediare ad anomalie emergenti oppure necessità di nuovi orientamenti strategici.

L'orizzonte così delineato può apparire quello di una completa sostituzione dell'intervento umano, sollevato da lavori faticosi e alienanti, resi obsoleti da agenti artificiali che non si annoiano e sono dotati di capacità di *information processing* superiori a quelle umane. La percezione del rischio di perdere il lavoro e dell'incertezza sul proprio futuro non è certo ridimensionata né dalla diffusa esaltazione dei nuovi strumenti di IA, né dalla sistematica distorsione delle analisi e del modo di presentare i risultati.

Cerchiamo di chiarire questa affermazione: l'immaginario collettivo tende ad essere deformato da studi e previsioni che accentuano costantemente il termine intelligenza, mentre si lascia in una sorta di penombra indefinita il secondo termine, cioè artificiale, la cui etimologia rinvia a qualcosa prodotto dall'opera umana, di cui non può che risentire i limiti, dovuti ad un essere imperfetto per natura. Queste considerazioni non sono dirette a sminuire la potenza dell'IA, anche se dubbi su di essa sono espressi proprio da autorevoli esponenti del mondo dell'IA.

In realtà le riflessioni svolte sono dirette a porre l'attenzione sulla necessità che il lavoro sia ridefinito sulla base di un riorientamento generale del rapporto uomo-macchina a partire dallo sviluppo della consapevolezza individuale e collettiva che l'intelligenza incorporata nelle macchine è conoscenza umana e la sua dinamica dipende da decisioni umane in relazione a contesti evolutivi.

Si tratta di un rovesciamento di prospettiva che non dovrebbe in realtà essere tale, ma è così per gli effetti distorcenti che l'odierna dinamica tecnico-produttiva sta esercitando nelle società e nel mondo del lavoro. Se l'assunto di fondo è condiviso e diffuso, cioè che l'intelligenza artificiale è intelligenza umana oggettivata e arricchita da strumenti che consentono interazioni conoscitive senza sosta, il passaggio logico successivo non può che essere il seguente: il rapporto uomo-macchina deve essere visto non in termini di conflitto, bensì di collaborazione reciproca e di feedback ripetuti, capaci di generare creatività.

In altri termini, l'assunzione di fondo da cui partire è che esiste una *complementarità* tra intelligenza umana e artificiale, che si alimentano reciprocamente, ma sta agli umani decidere le direzioni, i meccanismi di incremento e variazione conoscitiva. Com'è possibile realizzare questo obiettivo apparentemente utopico, dato il prevalente scenario di rischio e incertezza di fondo per il futuro del lavoro?

Il traiettoria: progettare per creare una *augmented human intelligence*

Le riflessioni iniziali potrebbero aiutare a definire una potenziale traiettoria vantaggiosa per entrambi, uomini e tecnologie. Il superamento dell'era basata sulla scomposizione del lavoro in compiti atomizzati e la diffusione delle nuove tecnologie devono indurre a 'ricostruire il lavoro' (Evans-Greenwood et al. 2017) sulla base di tre direttrici: 1) *Focalizzazione* né sul prodotto (I Rivoluzione industriale) né sul processo (II Rivoluzione industriale),

bensi sui problemi da risolvere. 2) È necessario che si affermi la visione delle sequenze di fasi produttive come insiemi di problemi da risolvere, la cui soluzione dipende da processi di apprendimento distribuiti e incessanti. 3) *Complementarità* tra intelligenza umana e artificiale, perché affrontano lo stesso problema da differenti prospettive. Le macchine adattabili, che apprendono, sono necessariamente complementari alle capacità umane, perché possono potenziare queste ultime nell'indagine di nuovi filoni di ricerca, nel formulare e verificare ipotesi, nel validare soluzioni alternative mediante la modellazione computazionale.

Per andare verso uno scenario di *augmented human intelligence* non bastano, però, le esortazioni. Occorre comprendere quali sono le peculiarità del pensiero umano e far leva su di esse, in modo che possano essere valorizzate le potenzialità di integrazione con le specificità dell'IA. Innanzitutto, una delle prerogative della nostra mente è quella di porsi interrogativi, cercare spiegazioni, tentare continuamente nuove strade, spostando continuamente la frontiera delle conoscenze. Si tratta allora di sviluppare queste caratteristiche, in modo tale da farle interagire con l'*information processing* artificiale della miriade dei dispositivi esistenti attraverso strategie dirette ad ampliare queste capacità di intercettare flussi informativi di varia natura¹⁰.

III traiettoria operativa: 5 tappe per ricostruire il lavoro

Per raggiungere queste finalità è importante, senza cadere nella trappola cognitiva dell'ottimismo versus pessimismo, 'ricostruire' il lavoro, per dirla con Evans-Greenwood et al. (2017), potenziando delle capacità umane a tutti i livelli dei processi formativi attraverso l'adozione di approcci teorici ed operativi di *problem finding, problems solving, systems thinking*.

Su questi temi esiste già un'evidenza teorica e pratica in ambito internazionale (si veda la rivista *Tech Trends*, Springer). Una serie di notevoli contributi da parte delle scienze cognitive, delle neuroscienze e delle teorie manageriali illustrano l'importanza – per il lavoro del futuro – di processi formativi incentrati sulle seguenti direttrici.

1. *Sviluppo di attitudini* a rappresentare problemi complessi, estraendo gli elementi essenziali, per poi modellarli in modo dinamico, cercando di comprenderli attraverso l'analisi delle interdipendenze multiscale.
2. *Modellazione di processi e output* come attività di rappresentazione concettuale, mediante multidisciplinarietà, interdisciplinarietà e trans-disciplinarietà, dal momento che pensare processi e prodotti significa intercettare molteplici flussi di informazioni e conoscenze che, in assenza di particolari mindset aperti e recettivi, sono percepiti solo come 'rumore' e non come potenzialità.

¹⁰ L'evento pandemico dovrebbe essere concepito come un processo di creazione di nuova occupazione legata al perseguimento di obiettivi di sostenibilità globale (MGI 2020d).

3. *Realizzazione della congruenza* tra diversi domini conoscitivi, rendendo la conoscenza uno spazio combinatoriale, dove dai problemi individuati scaturisce la necessità di sperimentare facendo interagire saperi, tecnologie e conoscenze in contesti mutevoli, che generano incessantemente il gap computazionale al centro della riflessione di Simon. In tale quadro la capacità computazionale delle macchine deve interagire con l'intuizione e la tendenza umana all'esplorazione di nuovi ambiti di indagine. La nostra evoluzione è la dimostrazione lampante di ciò che ci distingue da altri esseri intelligenti che esistono in natura.
4. *Perseguimento di interazioni tra discipline* per alimentare processi creativi individuali e collettivi, che nella modellazione concettuale dei problemi sviluppino competenze innovative, metodi originali di risolvere problemi e scoprirne di nuovi.
5. *Sviluppo del pensiero analitico* nella validazione delle conoscenze, il cui stadio preparatorio si basa sulle capacità di visione e sull'intuizione, seguito poi dalla sintesi finale e dalle verifiche operative. L'universo conoscitivo che genera processi e prodotti non può essere il frutto di un'intelligenza dicotomizzata, cioè IA versus intelligenza umana.

LeCun, insignito nel 2019 del Premio Turing insieme a Yoshua Bengio e Geoffrey Hinton, ha affermato (citato da Bergstein 2017, 78): siamo ancora lontani da macchine che abbiano «the essence of intelligence» e che siano comunque in grado di sostituire gli umani in compiti non molto difficili, come è emerso durante il 2015 Defense Advanced Research Project Agency Robotics Challenges (citato in Pham et al. 2018). La strada da percorrere potrebbe pertanto essere quella di «augmented collaborative workforce» (Pham et al. 2018). Intravedere la traiettoria non implica che si affermi necessariamente: grandi ostacoli possono essere costituiti dalla concentrazione di potere in oligopoli nell'universo fisico-digitale, dal prevalere di concezioni distorcenti, che influenzano la sfera subliminale degli umani, e dall'arretramento dell'intelligenza umana per scelte strategiche suicide, quali l'impovertimento concettuale auto-perpetrato. Un esempio di questo trend involutivo è dato dallo spazio che sta acquisendo l'idea che il *coding* sia il nuovo linguaggio da insegnare ai cosiddetti *post-millennials*. In altri termini si postula la necessità di insegnare a tutti il linguaggio dei computer, cioè la programmazione. Si tratta di un evidente salto mortale all'indietro con scarsa preparazione fisica: dalle riflessioni svolte si deduce che non si deve dialogare con le macchine per pensare, bensì all'opposto bisogna sviluppare autonoma capacità di pensare per dialogare con esse. Il vero problema è, quindi, il non arretramento dell'intelligenza umana e lo sviluppo di una strategia individuale e collettiva secondo le linee descritte. La posta in gioco è forse più alta della perdita del lavoro: la strada da percorrere consiste nell'accrescere la conoscenza e l'attitudine strategica degli umani. Altrimenti il potenziale tecnico-scientifico e produttivo potrebbe essere elevato, ma larga parte della popolazione sarebbe in condizioni di povertà cognitiva e materiale. Tutto dipende dalle decisioni strategiche che noi umani sapremo prendere.

Bibliografia

- Aboelnga, H.T. et al. 2018. *The Water-Energy_Food Security Nexus*. Bonn: GIZ.
- Adner, R., e R. Kapoor. 2016. "Right Tech Wrong Time." *Harvard Business Review*, November.
- Albrecht, T.R. 2017. "The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment." *Environ. Res. Lett.* 13.
- AlGeddawy, T. e H. ElMaraghy. 2011. "Manufacturing systems synthesis using knowledge discovery." *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 60: 437-40.
- Andersen, A.L. et al. 2016. "Reconfigurable Manufacturing – An Enabler for a Production System Portfolio Approach." *Procedia CIRP* 52: 139-44.
- Andoni, M. et al. 2019. "Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities." *Renewable and Sustainable Energy Review* 100: 143-74.
- Anzalone et al. 2019. "Search-and-replace genome editing without double-strand breaks or donor DNA." *Nature* December 5, 576: 149-178.
- Bardi, U. 2011. *The Limits to Growth Revisited*. New York: Springer.
- Beddington, J. 2009. *Food, Energy, Water and the Climate Change: A Perfect Storm of Global Events?*. London: Government Office for Science.
- Bergstein, B. 2017. "The Great AI Paradox." *Technology Review* <<https://www.technologyreview.com/2017/12/15/146836/the-great-ai-paradox/>> (2021-03-10).
- Bortolini, M. et al. 2019. "Implementation of Reconfigurable Manufacturing in the Italian Context: State-of-the-Art and Trends." *Procedia Manufacturing* 39: 591-98.
- Boulding, K.E. 1966. "The Economics of the Coming Spaceship Earth." <<http://www.ub.edu/prometheus21/articulos/obsprometheus/BOULDING.pdf>> (2021-10-03).
- Buenstorf, G. 2005. "Sequential production, modularity and technological change." *Structural Change and Economic Dynamics* 16: 221-41.
- Cohen, Y. et al. 2017. "Assembly system configuration through Industry 4.0 principles: the expected change in the actual paradigms." *IFAC Papers OnLine* 50: 14958-963.
- Cohen, Y. et al. 2019. "Design and management of digital manufacturing and assembly systems in the Industry 4.0 era." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 105: 3565-77. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04595-0>.
- D'Aveni, R. 2007. "Mapping your competitive position." *Harvard Business Review*, November: 110-20.
- Dee, M., ed. by. 2015, *The European Union in a Multipolar World – World Trade, Global Governance and the Case of the WTO*. New York: Palgrave Macmillan.
- ElMaraghy, H. et al. 2012. "Complexity in engineering design and manufacturing." *CIRP Annals* 61 (2): 793-814.
- Evans-Greenwood, P., Lewis, H. e J. Guszczka. 2017. "Automation, artificial intelligence, and the essential role of humans." *Deloitte Review* 21: 127-145.
- Fairley, P. 2019. "Ethereum Plans to Cut Its Absurd Energy Consumption by 99 Percent." *IEEE Spectrum*» January 2.
- Flockhart, T. 2016. "The coming multi-order world." *Contemporary Security Policy* 37 (1): 3-30. <https://doi.org/10.1080/13523260.2016.1150053>
- Foray, D., David, P.A., e B. Hall. 2009. "Smart Specialization – The Concept." *Knowledge Economists Policy Brief* 9, June.
- Franklin, D. 2020. "America needs to invest more in diplomacy." *The Economist*, 17 November, 2020.
- Frey, C.B., e M.A. Osborne. 2013. *The Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation?* Oxford: Oxford Martin School.
- Geels, F.W. et al. 2017. "Sociotechnical transitions for deep decarbonization." *Science*, 22 September.

- Hoff, H. 2011. *Understanding the nexus. Background paper for the Bonn2011 Conference: the Water*. Stockholm: Energy and Food Security Nexus, Stockholm Environment Institute <<https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/SEI-Paper-Hoff-UnderstandingTheNexus-2011.pdf>> (2021-10-03).
- Hutt, R. 2016. *What are the 10 biggest global challenges?* <<https://www.weforum.org/agenda/2016/01/what-are-the-10-biggest-global-challenges/>>, WEF, January 21 (2021-10-03).
- Gitelman, L., ed. by. 2013. *Raw Data is an Oxymoron*. New York: The MIT Press.
- Keairns, D.L. et al. 2016. "The Energy-Water-Food Nexus." *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering* 7: 239-62.
- Kobie, N. 2019. "The complicated truth about China's social credit system." *Wired*, June, 2019.
- IDA. 2012. *Emerging global trends in Advanced Manufacturing*. USA.
- IEA. 2012. "World Energy Outlook." <<https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2012-2>> (2021-03-10).
- IEA. 2020. "Global trends in internet traffic, data centre workloads and data centre energy use, 2015-2021." <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-trends-in-internet-traffic-data-centre-workloads-and-data-centre-energy-use-2015-2021>> (2021-03-10).
- Jovane, F., Westkamper, E., e D. Williams. 2008. "The ManuFuture Road to High-Adding-Value Competitive Sustainable Manufacturing." In *The Manufuture Road: towards Competitive and Sustainable High Adding-Value Manufacturing*, ed. by F. Jovane, E. Westkamper, e D. Williams, Cap. 6. New York: Springer.
- Jovane, F. et al. 2008. "The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing." *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 57: 641-59.
- Leroi-Gourhan, A., 1977. *Il Gesto e la Parola*. Torino: Einaudi.
- Lessig, L. 2006. *Code is Law*. Version 2.0. New York: Basic Books.
- Lessig, L. "Code is Law." <<https://harvardmagazine.com/2000/01/code-is-law-html>> (2021-03-10).
- Li, Z. et al. 2019. "Blockchain for decentralized transactive energy management system in networked microgrids." *The Electric Journal* 32: 58-72.
- Markoff, J. 2012. "How Many Computers to Identify a Cat? 16,000." *The New York Times*, June 25.
- McCarthy, J. et al. 1955. "A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence." *AI Magazine* 27 (4).
- McCarrthy, N. 2021. "Births Plummet In China As Population Growth Stalls." <<https://www.statista.com/chart/24838/annual-number-of-births-in-china/>> (2021-10-03).
- MGI. 2020. *How a post-pandemic stimulus can both create jobs and help the climate*, May.
- Mlodinov, L. 2012. *Subliminal: The New Unconscious and What it Teaches Us*. New York: Pantheon Books.
- Mlodinov, L. 2015. *The Upright Thinkers. The Human Journey from Living in Trees to Understanding the Cosmos*. New York: Pantheon Books.
- Morozov, E. 2015. "Socialize The Data Centre!" *New Left Review* 91, January-February, 2015.
- Mulgan, G. 2014. "Innovation in the Public Sector. How can Public Organizations better create, improve and adapt?" *Nesta* 5 (1).
- Naughton, J. 2019. "Can the planet really afford the exorbitant power demands of machine learning?" *The Guardian*, November 16.

- Olson, S. 2012a. *Making Things: 21st Century Manufacturing and Design*. Summary of a Forum.
- Olson S. 2012b. *Making Value: Integrating Manufacturing, Design, and Innovation to Thrive in the Changing Global Economy*. Washington, DC: National Academy Press.
- OpenAI. 2019. "AI and Compute." <<https://openai.com/blog/ai-and-compute/#addendum>> (2021-10-03).
- Pham, G.C., Madhavan, R., Righetti, I., Smart, W., e R. Chatila. 2018. "The Impact of Robotics and Automation on Working Conditions and Employment." *IEEE Robotics & Automation Magazine* 125-128.
- Pogančić, M.V. 2019. "The Carbon Footprint of AI Research." *Towards Data Science*, October 1.
- Prieto, G.J. et al. 2019. *Smart Specialisation in the world, an EU policy approach helping to discover innovation globally*. JRC Science for Policy Report.
- Rip, A. 1995. "Introduction of New Technology: Making Use of Recent Insights from Sociology and Economics of Technology." *Technology Analysis & Strategic Management* 7 (4): 417-431.
- Rodriguez, D.J. et al. 2013. *Thirsty Energy, Water Partnership Program*. Washington, DC: World Bank.
- Rosenberg, M.Y. 2019. "Experts Get Multipolarity All Wrong." *Foreign Affairs*, June 24, 2019.
- RSA. 2019. The "Four Futures of Work Coping with uncertainty in an age of radical technologies." <<https://www.thersa.org/>> (2021-03-10).
- Rumelhart, D.E., e J.L. McLelland. 1986. *Parallel Distributed Processing*. New York: The MIT Press.
- Sachs, J.D. 2016. "Learning to Love a Multipolar World." Project Syndicate, 29 December, 2016.
- Sahlin, M. 2000. *A systematic approach for decision making in a concurrent design, Proceedings of ICAD2000 First International Conference on Axiomatic Design* <https://axiomaticdesign.com/technology/icad/icad2000/icad2000_048.pdf> (2021-03-10).
- Saunders, T., e G. Mulgan. 2017. "Governing with Collective Intelligence." *Nesta*, January <https://media.nesta.org.uk/documents/governing_with_collective_intelligence.pdf> (2010-10-03).
- Schaefer, K.A. et al. 2017. "Unintended mutations after CRISPR_Cas9 editing in vivo." *Nature Methods*, 14 (6): 547-551.
- Schwartz, J. et al. 2019. "What is the future of work. Redefining work, workforces, and workplaces." *Deloitte Insights* <<https://hoodiebooks.com/wp-content/uploads/2020/12/us-what-is-the-future-of-work.pdf>> (2021-03-10).
- Simon H.A. 1957. *Models of Man*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Simpson, G.B., e G.P.W. Jewitt. 2019. "The Development of the Water-Energy-Food Nexus as a Framework for Achieving Resource Security: A Review." *Frontiers in Environmental Science*, February 8: 1-9.
- SMLC. 2011. *Implementing 21st Century Smart Manufacturing*. Workshop Summary Report. Paper read at 21st Century Smart Manufacturing Workshop, at Washington, DC.
- SPM. 2009. *Operations & Technology Roadmap Full Report*. Section 2.0 Smart Process Manufacturing and the Business Transformation v4 (11 I 24 I 2009).
- Storm, D. 2015. "ACLU: Orwellian Citizen Score, China's credit score system, is a warning for Americans." *Computer World*, 27 October, 2015.

- Strubell, E. et al. 2019. "Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP." arXiv:1906.02243v1 [cs.CL], June 5.
- Summers, J.D., e J.J. Shah. 2010. "Mechanical Engineering Design Complexity Metrics: Size, Coupling, and Solvability." *Journal of Mechanical Design* 132, February.
- Sze, V. et al. 2017. "Efficient Processing of Deep Neural Networks: A Tutorial and Survey." *Proceedings of the IEEE* 105 (12).
- Ten Brinke, L., e B. Martill. 2019. "Coping with Multipolarity: EU Values and the Stability of International Order." Dahrendorf Forum IV Working Paper No. 11, August.
- The Millenium Project – Global Futures Studies and Researches, "The Millenium Project.", <<http://www.millennium-project.org/about-us/>> (2021-03-10).
- Tomiyama, T. et al. 2007. "Complexity of Multi-Disciplinary Design." *Annals of the CIRP* 56 (1): 185-88.
- Ueda, K. et al. 2001, "Emergent Synthesis Methodologies for Manufacturing." *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 50 (2): 535-51.
- UN. 2015. "Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development." <<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>> (2021-03-10).
- UN, "Global Issues Overview." <<https://www.un.org/en/global-issues/>> (2021-03-10).
- Victor, D.G. 2019. *How Artificial Intelligence can affect the future of energy and climate*, Brookings Institutions, January 10, contributo nell'ambito di A Blueprint for the Future of AI: 2018-2019.
- Von Neumann, J. 1966. *Theory of Self-Reproducing Automata*, edited and completed by A.W. Burks. Champaign: University of Illinois Press.
- Xu Elegant, N. 2019. "The Internet Cloud has a Dirty Secret." *Fortune.com*, September 18.
- Westkämper, B. 2007. "Strategic Development of Factories under the Influence of Emergent Technologies." *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 56 (1): 419-22.
- Walter, W.G. 1951. "A Machine That Learns." *Scientific American* May, 1951: 60-63.
- Wiener, N. 1948. *Cybernetics-or-the Art of-Control-and-Communication-in-the Animal and the Machine*. New York: The MIT Press.
- World Bank. 2011. "Global Development Horizon: Multipolarity – The New Global Economy." <<https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/597691468150580088/global-development-horizons-2011-multipolarity-the-new-global-economy>> (2021-03-10).