



IRPET Istituto Regionale
Programmazione
Economica
della Toscana

**Fabbrica 4.0:
concetti base e le metodologie
operative. I modelli manageriali,
le potenzialità e le sfide per le PMI**

**Fabbrica 4.0:
I processi innovativi
nel "multiverso"
fisico-digitale**

a cura di
Mauro Lombardi

Firenze, 2017

RICONOSCIMENTI

Questo studio è stato commissionato all'IRPET dal Settore Promozione economica della Direzione Attività produttive di Regione Toscana.

La ricerca è stata svolta nell'ambito dell'Area Sviluppo locale, settori produttivi e imprese dell'IRPET coordinata da Simone Bertini.

Autore del rapporto è il Prof. Mauro Lombardi.

Editing a cura di Chiara Coccheri.

Indice

PROLOGO	5
1. LO SCENARIO DELLA FABBRICA INTELLIGENTE: SPAZIO CONNETTIVO GLOBALE, <i>DIGITAL UBIQUITY</i> , MULTIVERSO	9
2. INDUSTRIA 4.0 E FABBRICA INTELLIGENTE: L'INDUSTRIA MANIFATTURIERA MOTORE PROPULSIVO DELL'UNIVERSO FISICO-DIGITALE	21
2.1 Fabbrica intelligente: dal modello fordista allo spazio aperto del "Multiverso"	21
2.2 Mutamenti ontologici e modelli ingegneristici	25
2.3 Paradigmi di progettazione ingegneristica: dal paradigma classico all'evolutionay engineering	26
2.4 La progettazione di processi e prodotti alla luce di sfide globali	30
2.5 Modelli di organizzazione delle imprese: l'emergente varietà morfologica	37
2.6 Proprietà delle imprese nell'Industria 4.0 e Modelli di business	66
2.7 L'universo fisico-digitale e il modello toscano	75
3. COMPLETA DIGITALIZZAZIONE DELLO SPAZIO TECNO-ECONOMICO. SFIDE TECNO-ECONOMICHE E NUOVI MODELLI MANAGERIALI	83
3.1 Dalla digital ubiquity al platform thinking	83
3.2 Big Data, data science	89
3.3 Machine Learning, Intelligenza Artificiale, Augmented reality	100
4. POTENZIALITÀ, SFIDE E PERICOLI DI INDUSTRIA 4.0 NELL'“ERA DEI PETABYTES”	113
5. LA DIGITALIZZAZIONE E IL LAVORO. VERSO LA “GIG ECONOMY”?	127
6. STRATEGIE DI POLITICA INDUSTRIALE PER “LA FABBRICA INTELLIGENTE” NELL'ERA DELLA TRANSIZIONE SOCIO-TECNICA	147
6.1 Fabbrica intelligente negli scenari della transizione alla post-fuel economy. Problemi e sfide globali nella traiettoria verso l'Energiewende (transizione energetica) (Europa Usa, Cina)	147
6.2 Una visione strategica per le sfide del XXI secolo	160
6.3 Una politica industriale per il XXI secolo?	168
7. I4.0. IPOTESI DI LAVORO PER AZIONI STRATEGICHE COORDINATE E IL MANAGEMENT DI SISTEMI PRODUTTIVI COMPLESSI IN FASE DI TRANSIZIONE SOCIO-TECNICA	181
BIBLIOGRAFIA	185

PROLOGO

Gli obiettivi di questo contributo sono molteplici. Il primo è quello di effettuare una ricognizione sistematica degli studi concernenti l'insieme dei processi innovativi, sintetizzati in ambito internazionale con espressioni sostanzialmente equivalenti: Industrie 4.0 (Germania), Industrial Internet e Advanced Manufacturing (Usa), L'Usine du Futur (Francia), High Value Manufacturing (Inghilterra), Fabbrica Intelligente (Italia).

L'analisi è stata quindi in primo luogo finalizzata a delineare un quadro esauriente degli schemi concettuali spesso impiegati da una letteratura molto ampia sia di carattere teorico che più propriamente empirica. Ciò è reso necessario dal fatto che la digitalizzazione di processi e prodotti, di cui si tratterà ampiamente nei vari capitoli, implica la combinazione di conoscenze molto differenti: strutturate, non strutturate, testuali, visive, sonore, attinenti al linguaggio naturale. Tutto ciò significa che si verificheranno cambiamenti profondi e a molti livelli: lungo la sequenza di fasi economico-produttive, dalla ideazione di un prodotto o un servizio alla sua diffusione sui mercati e alle interazioni con i consumatori, con la possibilità di monitorare e intervenire su tutto il ciclo di vita di un bene e delle sue componenti, in un orizzonte di continui e imprevedibili mutamenti.

L'era della variabilità e dell'incertezza, come viene definita quella odierna, trae alimento da una frontiera tecnico-scientifica in accelerazione: *shifting frontier* e *exponential trends* sono tra i termini maggiormente diffusi nelle analisi e negli studi della dinamica innovativa.

Intento del presente lavoro è allora anche quello di coniugare l'esame degli scenari strategici e progettuali degli agenti protagonisti della rivoluzione tecnico-economica con il rigore necessario per definire con precisione concetti teorici e strumenti operativi. Ciò è ancor più necessario nell'era attuale, contraddistinta da quello che costituisce un po' il filo conduttore di tutti i capitoli: lo scenario del XXI secolo è sempre più caratterizzato dalle interazioni tra mondo fisico e mondo virtuale, che è creato ed evolve grazie alla pervasività di dispositivi computazionali progressivamente più potenti e in grado di mostrare capacità ormai prossime a quelle umane: apprendimento, adattabilità, abilità previsive basate su qualcosa di simile al senso comune. È a nostro avviso un vero e proprio "universo fisico-digitale" entro cui le società oggi evolvono sulla base di un'incessante evoluzione delle conoscenze di varia natura e tipologia.

In un'era in cui esiste una pluralità di traiettorie tecnico-scientifiche fortemente accelerate e "punteggiate" da discontinuità, la ridefinizione di framework teorici e schemi operativi costituisce quasi un imperativo per operatori privati e pubblici. In particolare per questi ultimi, inoltre, non si tratta solo di intervenire nei casi di "fallimento del mercato", bensì di sviluppare interazioni strategiche con altri partner (pubblici e privati) a livello internazionale per escogitare strategie appropriate nell'affrontare le sfide globali che si ergono di fronte alle economie.

Un'era caratterizzata da incertezza, variabilità e turbolenza tecnico-scientifica non implica l'abbandono dell'orizzonte strategico, bensì esattamente l'opposto, ovvero lo sviluppo di nuove capacità di elaborazione di strategie in condizioni di incertezza, come vedremo nel capitolo 2. Ecco perché l'analisi empirico-operativa non può prescindere dal perseguimento del rigore teorico, che deve essere anche reso accessibile al maggior numero possibile di lettori, come cercheremo di fare.

Un terzo obiettivo del contributo è in un certo senso ancora più ambizioso, ma collegato a quanto appena sostenuto: esporre dei concetti innovativi, elaborati sulla base di una letteratura multidisciplinare, che comprende economia, teoria manageriale, ingegneria, informatica, intelligenza artificiale. Il concetto più importante che proporremo è quello di *Multiverso*

(Cap. 1), che in estrema sintesi significa questo: nell'epoca odierna caratterizzata dalle interazioni tra una miriade di agenti nell'universo fisico-digitale, il ciclo economico-produttivo di un prodotto o un servizio deve essere concepito come un insieme tendenzialmente infinito di sequenze potenziali, tra le quali scegliere quella ritenuta migliore o più appropriata. Le scelte possono -e in molti casi devono- essere continuamente sviluppate in relazione al panorama tecno-economico in continua evoluzione.

Direttamente connessa a questa riflessione è il secondo concetto innovativo qui proposto per comprendere lo scenario sintetizzato con l'espressione Industria 4.0, ovvero quello di *potenziale di variazione*, di cui vengono spiegati gli elementi basilari e le proprietà dinamiche.

Multiverso e potenziale di variazione consentono di precisare un altro concetto, che è cruciale per gli agenti del XXI secolo: lo *spazio generativo*, in cui tutti siamo immersi, individualmente e in qualsiasi dimensione collettiva organizzata. Si tratta del fatto che le caratteristiche dell'epoca attuale comportano necessariamente interazioni e intersezioni tra più domini di conoscenze, rendendo l'interdisciplinarietà e la multidisciplinarietà, quindi la creazione di strutture interattive a molteplice scala ("multiscala"), un ingrediente fondamentale di uno spazio della conoscenza tale da poter generare esiti non prevedibili a priori.

Alla luce di tutto questo si comprende l'importanza del quarto concetto innovativo, già presente in letteratura ma qui presentato sotto una differente luce, cioè l'*intrinseca connessione tra cicli decisionali e innovativi* per qualsiasi agente tecno-economico, perché essi dovranno operare in un universo fisico-digitale in continua trasformazione. La conseguenza è, quindi, che occorre pensare non solo con nuovi strumenti concettuali e operativi, ma anche sviluppare una tensione strategico-progettuale con al centro la propensione al cambiamento incessante.

L'esposizione di questi apporti innovativi, resi ineludibili dallo scenario odierno, viene realizzata partendo sempre da esempi e esperienze concrete.

La trattazione si svilupperà seguendo una precisa struttura logica.

Nel capitolo 1 si parte dalla descrizione degli aspetti basilari dello scenario sintetizzato con l'espressione "Fabbrica Intelligente" per arrivare a comprendere come economie e società evolvano ormai in un universo fisico-digitale, qui denominato Multiverso.

Il capitolo 2 tratta in modo sistematico e a vari livelli l'evoluzione dei processi produttivi dal punto di vista tecno-economico e morfologico (trasformazione dei modelli organizzativi). L'analisi è molto dettagliata e inizia con l'esame delle configurazioni micro, per così dire molecolari, delle sequenze economico-produttive, per spingersi fino alle forme organizzative congruenti con l'odierna dinamica tecnico-scientifica e produttiva, cioè gli eco-sistemi digitali e le piattaforme, dove possono dispiegarsi le potenzialità del Multiverso.

Una parte importante del capitolo 2 concerne la descrizione delle proprietà dell'Industria 4.0 con le implicazioni in termini di modelli di business e l'analisi del posizionamento del "modello toscano" in relazione alle grandi trasformazioni in atto.

Il capitolo 3 approfondisce le caratteristiche del nuovo spazio tecno-economico e le sfide che incombono sui modelli manageriali, prendendo in esame le realizzazioni concrete di grandi innovazioni tecnico-scientifiche e la frontiera attuale -al Novembre 2016-, che probabilmente rivoluzionerà ulteriormente lo scenario competitivo e l'evoluzione dei mercati: Big Data, Data Science, Machine Learning e Intelligenza Artificiale. I capitoli 4 e 5 approfondiscono rilevanti potenzialità insite nell'era dei "petabyte", cioè dei grandi e crescenti volumi di informazioni (Cap. 4) sia per i modelli organizzativi delle imprese che per il mercato del lavoro e le trasformazioni di quest'ultimo (polarizzazione, trend verso la "Gig Economy", Cap. 5).

Il capitolo 6, infine, sviluppa temi di *policy* in relazione alle sfide globali e tecno-economiche odierne, che sono sintetizzate nell'espressione "transizione socio-tecnica". In particolare viene poi effettuata una disamina delle strategie di politica industriale attuate in

Paesi molto importanti (Usa, Cina, Germania, Francia, Inghilterra), oltre a quelle avviate a livello europeo. Non manca ovviamente un esame del recente “Piano Industria 4.0”, presentato dal Governo italiano.

Il contributo si conclude con spunti di riflessione su temi e interrogativi al centro di un ampio dibattito a livello internazionale: se e quale politica industriale per il XXI secolo?

1.

LO SCENARIO DELLA FABBRICA INTELLIGENTE:
SPAZIO CONNETTIVO GLOBALE, *DIGITAL UBIQUITY*, MULTIVERSO

Iniziamo un'esplorazione intellettuale dello scenario incentrato sulla "Fabbrica Intelligente" considerando, insieme a Beinhocker (2006), due tribù di umani: 1) gli Yanomomö, cacciatori-raccoglitori che vivono lungo il fiume Orinoco, al confine tra Venezuela e Brasile, e utilizzano strumenti di pietra. 2) I New Yorkers, che parlano attraverso smartphone e bevono caffelatte sulle rive del fiume Hudson.

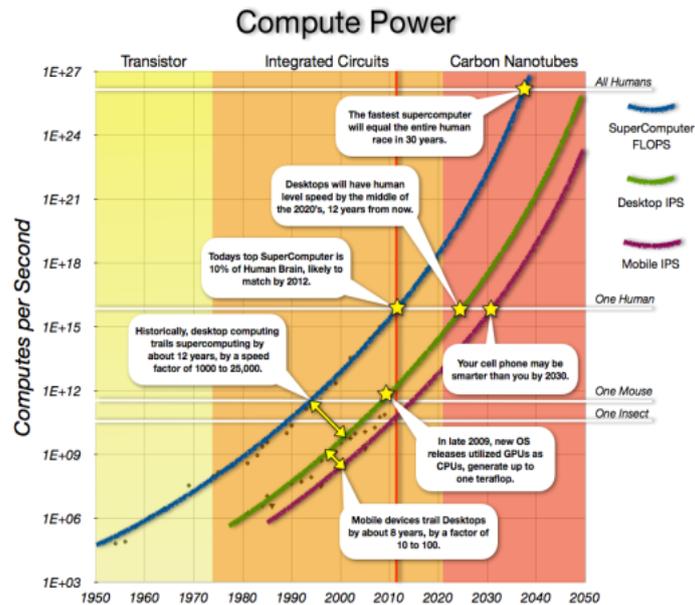
Le due tribù hanno gli stessi geni e sono quindi assolutamente identici sul piano della biologia e delle capacità umane. I primi vivono in gruppi di 40-50 persone, commerciano in prodotti presi dalla foresta (frutta, vegetali), costruiscono canestri, amache, armi. Il loro reddito annuale è di 90 dollari (calcolo teorico, perché non usano moneta), mentre quello dei New Yorkers è di 36.000 dollari. Anche l'aspettativa di vita e le possibilità di fronteggiare malattie e minacce dell'ambiente sono tra i primi più basse. Non si tratta però di esprimere una valutazione morale e tecnico-scientifica su "chi è più felice" oppure in sintonia con l'ambiente in cui vive. Il dato saliente secondo Beinhocker e interessante ai nostri fini è un altro: quello che caratterizza i New Yorkers non è il livello del reddito in termini assoluti, bensì l'incredibile varietà di scelte che il loro reddito consente di acquistare: "il numero delle scelte economiche a cui il New Yorker medio può attingere è sbalorditivo". Misurato in *stock keeping units* (SKUs), misura impiegata dai venditori al dettaglio americani per calcolare il numero dei tipi di prodotto venduti nei negozi, il New Yorker si confronta con un ammontare di possibili opzioni comprese tra 10^6 e 10^{10} (10 miliardi), mentre gli Yanomomö hanno una gamma di scelte intorno a qualche centinaio.

Ancor più stupefacente di quello appena indicato è un altro aspetto: il percorso dell'umanità dalla società di cacciatori-raccoglitori al mondo moderno è durato 15000 anni ed ha mostrato un'accelerazione esponenziale negli ultimi 250 anni. Secondo le stime di Bradford DeLong ci sono voluti 12000 anni per passare dai 90 dollari pro-capite dei cacciatori-raccoglitori ai 150 degli antichi Greci nel 1000 AC. Nel 1750 DC si sono raggiunti i 180 dollari pro-capite; da metà dell'800 ad oggi il PIL pro-capite è cresciuto 37 volte fino all'attuale livello di 6600 dollari.

Accelerazione e aumento del potenziale di scelta sono quindi due aspetti da cui partire per comprendere la traiettoria verso la Fabbrica Intelligente.

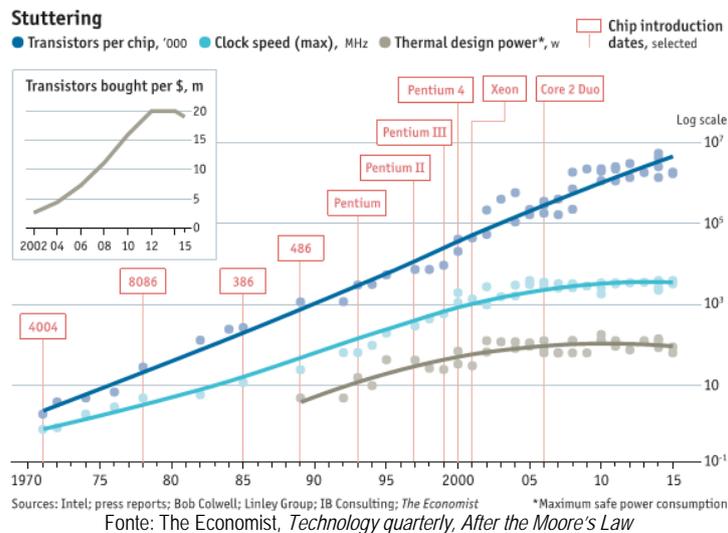
Aggiungiamo ad essi altri due fattori quali l'aumento della potenza computazionale negli ultimi cinquanta anni (Fig. 1) e la conferma (finora) della cosiddetta "legge di Moore": la potenza dei computer raddoppia ogni due anni allo stesso costo (Fig. 2).

Figura 1
AUMENTO ESPONENZIALE DELLA POTENZA COMPUTAZIONALE



Fonte: <https://thinkexponential.com/2013/04/08/exponential-technology/>

Figura 2
LEGGE DI MOORE

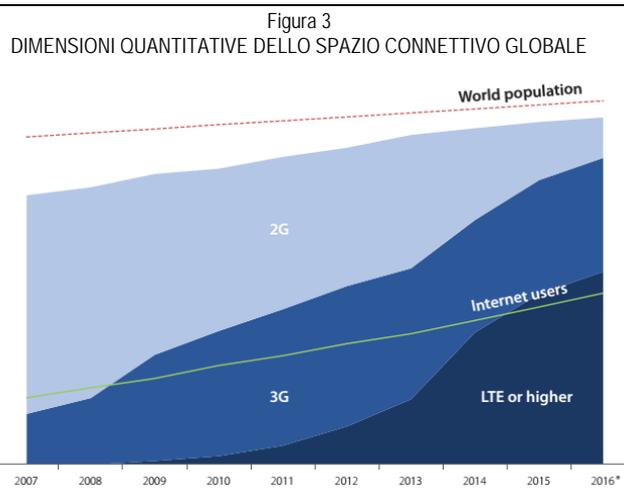


Bisogna anche tenere presente che la “frontiera computazionale”, per così dire, è in continuo avanzamento, dati i passi in avanti che la ricerca scientifica sta compiendo in alcune direttrici (The Economist, 2016, *Technology Quarterly*, n. 1):

- *Optical communication*, cioè uso della luce anziché dell’elettricità nella comunicazione tra dispositivi computazionali.
- *Better memory technologies*, nuovi tipi di memoria più veloci, dense e meno costose per superare “colli di bottiglia” nelle performance dei computer.

- *Quantum-well transistors*, transistor che usano il “pozzo quantico”, ovvero un fenomeno quantistico che altera il comportamento di “portatore” di cariche elettriche nei transistor, migliorandone così estremamente la performance nel senso della “legge di Moore”.
- *Developing new chips and new software*, per automatizzare la scrittura dei codici-macchina mediante cluster di chip specializzati.
- *Approximate computing*, che consiste nel creare rappresentazioni meno precise dei numeri interne ai computer, in modo da ridurre la quantità di bit necessari per eseguire i calcoli e quindi risparmiare energia.
- *Neuromorphic computing*, basato su dispositivi modellati sui meccanismi connettivi tra neuroni che elaborano informazioni nei cervelli degli animali, le cui abilità di riconoscimento dei pattern (configurazioni ordinate dell’ambiente) sono ancora irraggiungibili per i dispositivi artificiali, rispetto a cui mostrano un’efficienza molto maggiore attraverso i consumi energetici molto minori proprio nelle attività di information processing (vedi citazione di Bruno Michel).
- *Carbon nanotube transistor*, grazie all’impiego di rotoli di grafene dello spessore di un atomo, che consentono un “minor consumo di energia e alta velocità di elaborazione” (Bourzac, 2013)¹.

A tutto questo bisogna poi aggiungere un altro fattore di grande importanza: la progressiva creazione di uno spazio connettivo globale ad alta intensità di flussi informativi (Fig. 3). Dalla figura 3 si evince che il 95% della popolazione mondiale (7 miliardi) vive in aree coperte da reti di telefonia cellulare, mentre prosegue l’espansione a ritmi esponenziali delle connessioni ad ampiezza di banda sempre più elevata (3G, LTE)². In tale quadro il numero degli utenti Internet nel mondo cresce continuamente: 3.485,142.260 alle 17,44 del 24.10.2016 (Fonte real time: Internet Live Stats, <http://www.internetlivestats.com/>) (Fig. 4).

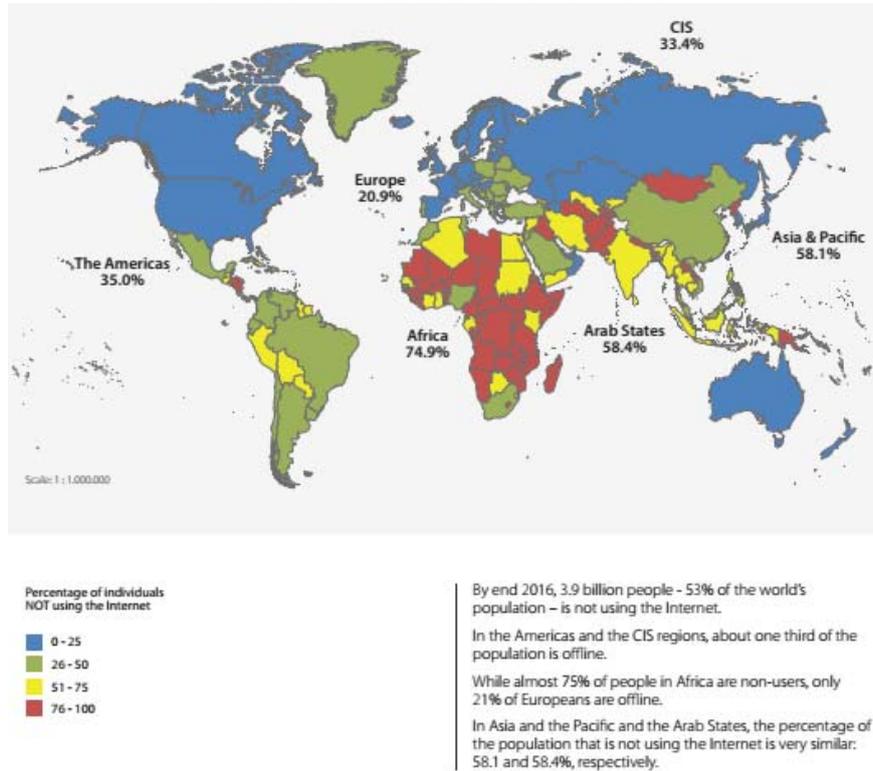


Fonte: ITU (2016)

¹ Per una descrizione tecnica delle proprietà e del funzionamento di dispositivi computazionali con circuiti basati su transistor di nanotubi di carbonio si veda Shulaker *et al.* (2013).

² LTE (*Long Term Evolution*) indica la più recente evoluzione degli standard di telefonia mobile cellulare (GSM/UMTS, CDMA2000 e TD-SCDMA). L’ITU (*International Telecommunication Union*, organizzazione internazionale che definisce gli standard nelle telecomunicazioni e nelle frequenze radio) ha deciso di applicare il 4G anche all’LTE. Fonte: http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/40.aspx#.WD_oNNXhCpo.

Figura 4
DISTRIBUZIONE MONDIALE DEGLI UTENTI DI INTERNET



Fonte: ITU (2016)

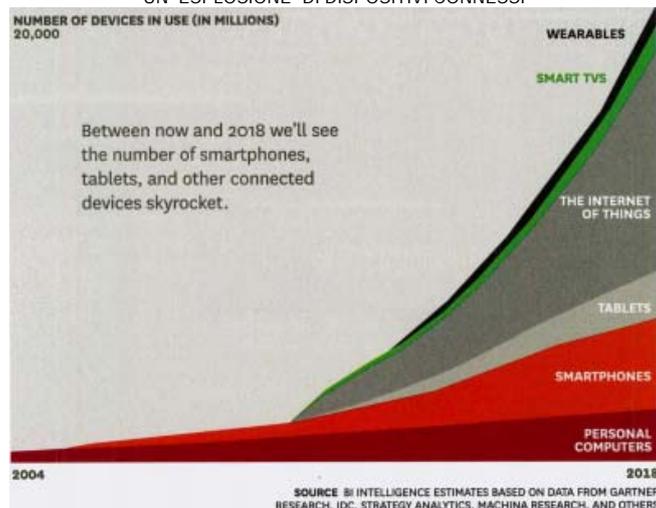
Gli elementi indicati definiscono innanzitutto uno scenario caratterizzato da un'intensa dinamica evolutiva, i cui meccanismi propulsori sono indubbiamente la connettività digitale e l'aumento esponenziale delle potenza computazionale a disposizione degli agenti individuali e collettivi.

Immaginiamo ora che in questo panorama tecnico-scientifico si inseriscano nuovi elementi quali la pervasività di dispositivi che elaborano informazioni, miniaturizzati e inseriti tendenzialmente dappertutto: nelle materie prime e in tutti gli altri input dei processi produttivi, nei prodotti. Questi dispositivi (sensori, attuatori, effettori, ecc.) sono in grado di rappresentare in forma digitale tutti gli eventi e le variabili ambientali che possono influenzare gli oggetti in cui sono inseriti. Siamo di fronte alla *digital ubiquity* (Iansiti e Lakhani, 2014), conseguente alla diffusione dei *cyber physical systems* (CPS)³, cioè sistemi di "*embedded hardware and software*" (Acatech, 2011: 20) che permettono la creazione e lo sviluppo di flussi informativi incessanti, i quali sono generati dalle interazioni che si sviluppano tra la miriade di processi e output esistenti in uno spazio connettivo globale (Fig. 5).

³ I CPS sono trattati in maniera più estesa in Lombardi e Macchi (2016, cap. 1, specialmente i paragrafi 1.2, 1.3, 1.4).

Figura 5

UN'ESPLOSIONE DI DISPOSITIVI CONNESSI



Fonte: Iansiti e Lakhani (2014)

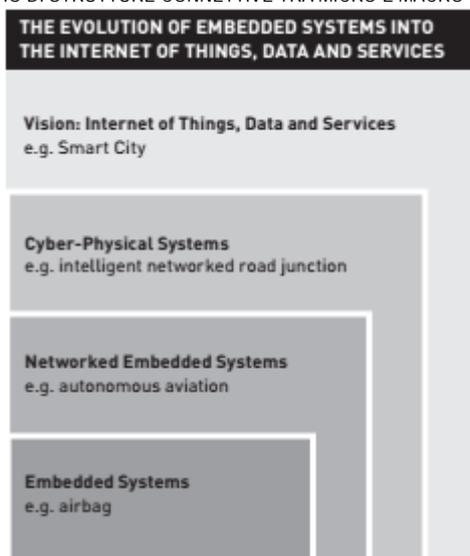
Connessioni attive tra entità che processano informazione indipendentemente dall'intervento umano aprono nuovi orizzonti di progettazione e creatività non predeterminabili per una ragione evidente: sorgono strutture interattive flessibili, correlate a scambi informativi, i quali possono creare le condizioni per generare nuove conoscenze attraverso la combinazione di più domini conoscitivi, la riformulazione di quelle già possedute, la scoperta di nuove direttrici di creatività sulla base di input della più varia provenienza. Siamo quindi entrati nell'era dei *cyber-physical systems*, che rendono i prodotti e i processi "intelligenti", perché incorporano -grazie alla *digital ubiquity*- la capacità di interagire con l'ambiente, come vedremo nei capitoli seguenti, a molteplici scale: nano-, micro-, meso-, macro. Il fatto che sia possibile rappresentare processi e output in configurazioni di bit, a loro volta modificabili in base all'arrivo di segnali, dati e informazioni crea un territorio inesplorato di inventività e sperimentazione. Lo spazio digitale che si viene a creare si auto-alimenta, infatti, grazie ai feedback cumulativi che si possono innescare, alla *cross-fertilization* tra ricerche ed esperienze più diverse, cambiando così nel profondo le attività di progettazione e realizzazione di beni e servizi.

Interazioni e scambi informativi *real time* a livello globale tra una molteplicità di agenti (consumatori, produttori, fornitori, progettisti, scienziati, ricercatori) cambia radicalmente la natura e le modalità di sviluppo delle attività economiche. È innanzitutto chiaro che l'industria manifatturiera si baserà su input completamente diversi da quelli del passato. Consideriamo in primo luogo il dato che essa avrà come componente essenziale una trama connettiva peculiare, che consisterà in una tendenzialmente completa rappresentazione digitale dell'esistente. Ciò implica che la manifattura è destinata a diventare attività ad alta intensità di conoscenza, pienamente inserita, per non dire al centro, in processi molto dinamici di apprendimento senza fine, perché diverrà ambito di convergenza dei flussi informativi a scala globale. Essa dovrà infatti competere e quindi svilupparsi in quello che possiamo definire *universo fisico-digitale*, dove emergono geometrie connettive variabili e interazioni tra elementi reali e rappresentazioni digitali. Per tale via mondo reale e mondo digitale si influenzeranno reciprocamente producendo continue pressioni evolutive verso forme funzionali di apprendimento. Il risultato sono le imprese come *learning factories* (ESB Reutlingen e Fraunhofer Institute Austria, 2015; Schuh *et al.*, 2014; Schuh *et al.*, 2015): le imprese, viste come *cyber-physical production systems* (CPPS), devono integrare l'intelligenza computazionale e una sistematica *business-technology*

intelligence, mentre occorre sviluppare migliori strumenti per la collaborazione in reti trasversali alle attività, alle tecnologie, ai confini disciplinari e organizzativi.

L'industria manifatturiera diviene un ambito fondamentale per generare spinte propulsive nell'universo fisico-digitale e al tempo stesso popolato da entità produttive "decentralizzate, autonome" (GTAI, 2015), in grado di sviluppare elevate capacità adattative *real time* grazie alla realizzazione di variabili geometrie connettive tra attività, processi, funzioni, imprese (Fig. 6).

Figura 6
ESEMPIO DI STRUTTURE CONNETTIVE TRA MICRO E MACRO-SISTEMI



Fonte: GTAI (2015)

I maggiori Centri di Ricerca e importanti società di consulenza a livello internazionale delineano un quadro evolutivo estremamente dinamico, al cui interno le attività manifatturiere assumono un ruolo cruciale. Roland Berger (2015) sottolinea la multidimensionalità e la complessità delle trasformazioni implicite nella prospettiva di Industria 4.0 (Fig. 7), insieme all'emergere di una realtà socio-tecnica su cui ci soffermeremo nel capitolo 5, ovvero gli ecosistemi dinamici ad alta intensità di conoscenza, basati su funzioni distribuite a scala internazionale (Fig. 8).

Nella figura 7 si vede come una pluralità di processi tecnico-scientifici e produttivi interagiscono, pur essendo a differenti stadi di maturità e quindi sottoposti a ritmi evolutivi di varia intensità. Nella figura 8 è rappresentata in modo particolare l'"esplosione" teorica di attività, funzioni e processi in sottosistemi dinamici, che sono connessi dalla trama dei flussi informativi generati da un insieme molto diversificato di tecnologie.

Figura 7

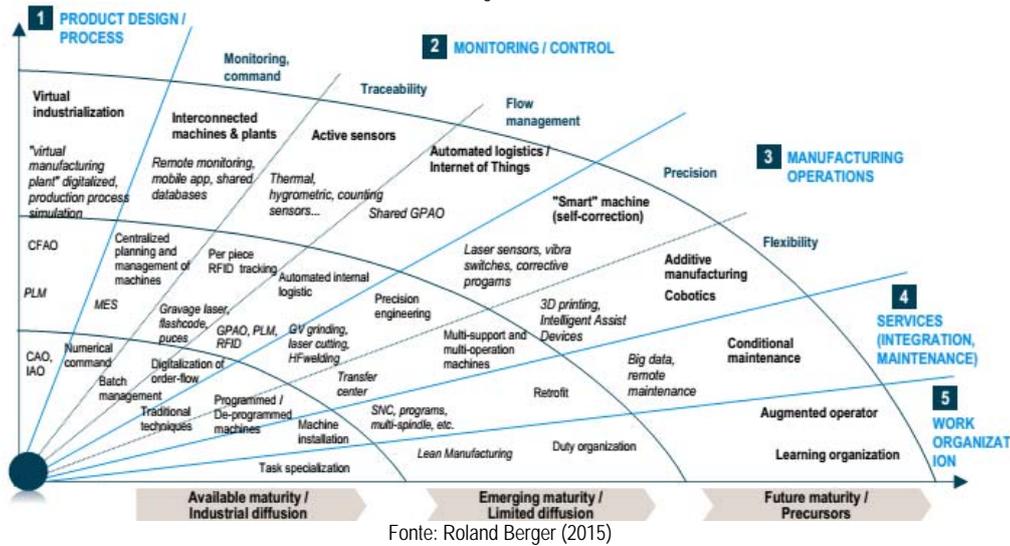
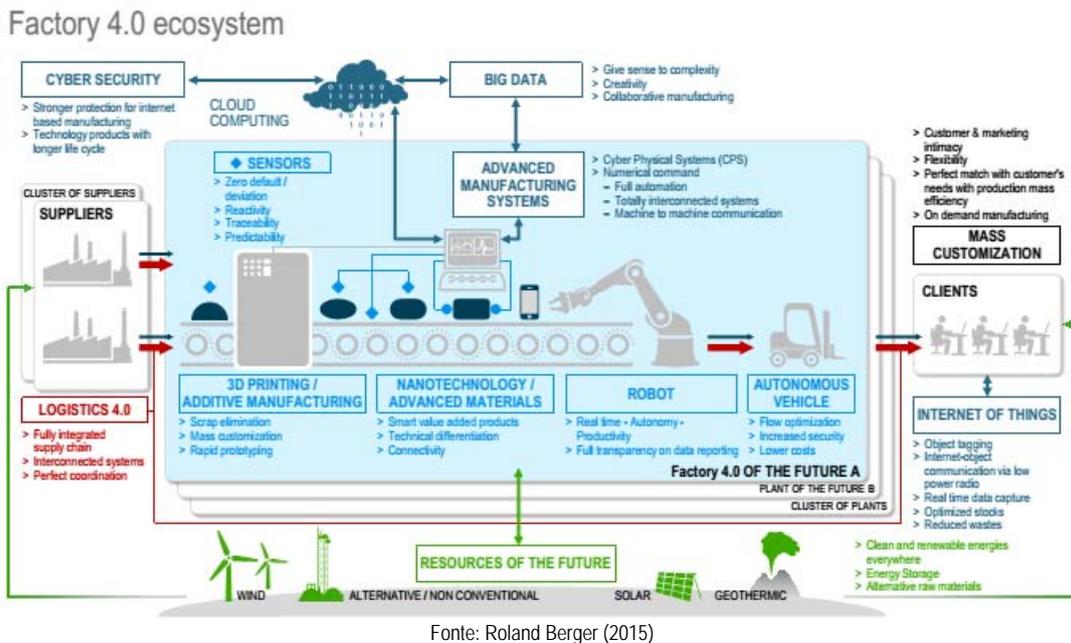


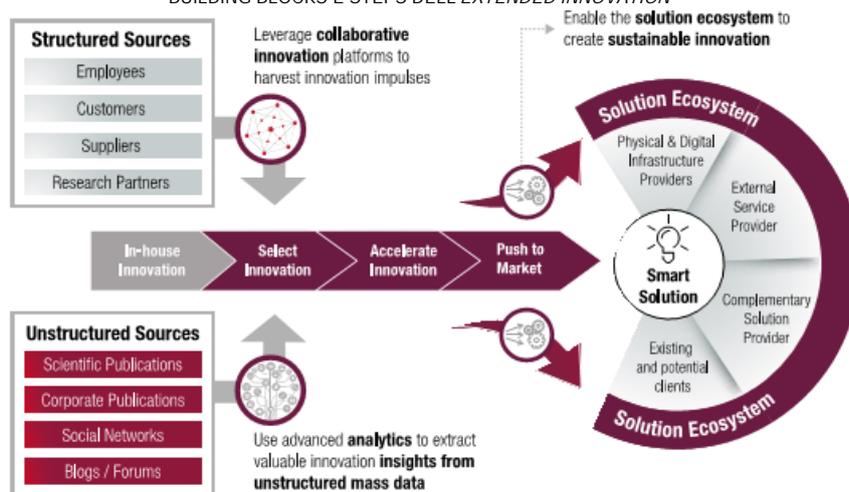
Figura 8



Nell'universo fisico-digitale che stiamo descrivendo nei tratti generali si dispiegano alcune innovazioni "dirompenti" (cfr. cap. 5), le quali hanno origini in campi di conoscenze molto eterogenei, ma interagiscono in modo tale da favorire la "creazione e distribuzione di idee al di là dei confini organizzativi" (Capgemini Consulting, 2014). Non solo quindi "open innovation" à la Chesbrough (2003), bensì "Extended Innovation" ad indicare che comunicazione e connettività favoriscono scambi tra una molteplicità di flussi informativi, scaturiti da una varietà imprevedibile di impulsi. È in questo scenario che hanno luogo più processi "outside-in" e "inside-out" con l'intervento di un insieme non predeterminabile di partecipanti, se non nelle tipologie generali (Fig. 9).

Figura 9

BUILDING BLOCKS E STEPS DELL'EXTENDED INNOVATION



Fonte: Caggemini Consulting (2015), Fig. 4

La *Smart Factory* significa allora strutture connettive variabili in cui sono inserite funzioni e fasi delle sequenze economico-produttive: dalla proposta di un'idea iniziale alla progettazione, produzione, *supply chain* e via via fino all'interazione continua con le variabili tipologie di domanda sui mercati mondiali. La pervasività dei *cyber-physical systems* e l'ubiquità digitale permettono all'*Extended Innovation* di esplorare un enorme potenziale di soluzioni alternative e quindi di realizzare sequenze economico-produttive mutevoli a seconda dell'ambiente competitivo e del contesto di riferimento, cercando soluzioni a problemi tecnico-produttivi correlati alle risorse dei territori e dei settori merceologici: India, Medio Oriente, Africa, Nord Europa (ABB Contact, 2014).

A partire dall'industria manifatturiera, dunque, la digitalizzazione di processi e prodotti crea di fatto uno spazio concettuale potenzialmente infinito di possibili combinazioni ideative e realizzative, che possono estrinsecarsi in una miriade di sperimentazioni per cercare soluzioni a problemi tecnico-produttivi. L'universo fisico-digitale che si sta aprendo davanti ai sistemi economici comporta allora la necessità di esplorare continuamente l'ignoto, nella consapevolezza che gli obiettivi possono essere raggiunti con percorsi diversificati e le soluzioni escogitate non sono necessariamente univoche.

Alla luce delle considerazioni svolte finora riteniamo suggestivo e proficuo proporre la metafora del "Multiverso". La controversa teoria degli "universi paralleli" e del Multiverso, avanzata tra gli altri da fisici importanti come Deutsch (1997) e Brown (2000), afferma che "la realtà fisica è assai più estesa di quanto possa sembrare, e per gran parte è invisibile" (Deutsch, 1997: 43); "il nostro universo è immerso in una struttura infinitamente più grande e più complessa, detta *Multiverso* che con buona approssimazione si può considerare come un sistema di universi paralleli" (Brown, 2000: 108) e "il Multiverso è illimitato nella sua diversità" (p. 109). Tralasciando ovviamente in questa sede il dibattito su questa teoria sconcertante, nella nostra analisi successiva impiegheremo la metafora del "Multiverso" per indicare che l'universo fisico-digitale contiene in realtà un potenziale teoricamente infinito di soluzioni a problemi tecnico-produttivi. Di conseguenza esiste un insieme ignoto di potenziali processi economico-produttivi, sequenze di fasi o step per raggiungere un determinato output; solo alcune di esse vengono realizzate, ma sono continuamente cambiate grazie a flussi informativi che attingono a domini conoscitivi ignoti e solo parzialmente noti, a cui si aggiunge la possibilità che da un

grande numero di combinazioni possibili tra di essi possano scaturire idee e ipotesi di lavoro creative. La *digital ubiquity*, l'aumento esponenziale della potenza computazionale e lo spazio connettivo globale arricchiscono in misura stupefacente gli strumenti a disposizione degli agenti economici per la concretizzazione delle loro scelte, tratte da uno spazio concettuale praticamente infinito.

Le economie sono immerse nel Multiverso e gli agenti individuali e collettivi non possono prescindere, ma anzi devono acquisirne la consapevolezza e quindi dotarsi delle risorse materiali e immateriali per misurarsi con nuove sfide.

Non è sorprendente che tutto questo abbia al centro l'industria manifatturiera, perché le trasformazioni dei processi di lavoro e del lavoro stesso sono al centro della storia dell'intera umanità nel suo incessante tentativo di liberarsi uscendo dal "regno della necessità" (Marx, *Il Capitale*, Libro III, cap. 48) oppure superare il "regno della Natura" per entrare nel "Regno dei Finiti" (Kant, *Fondazione della metafisica dei costumi*), cioè dove gli esseri dotati di ragione possono realizzare la loro libertà.

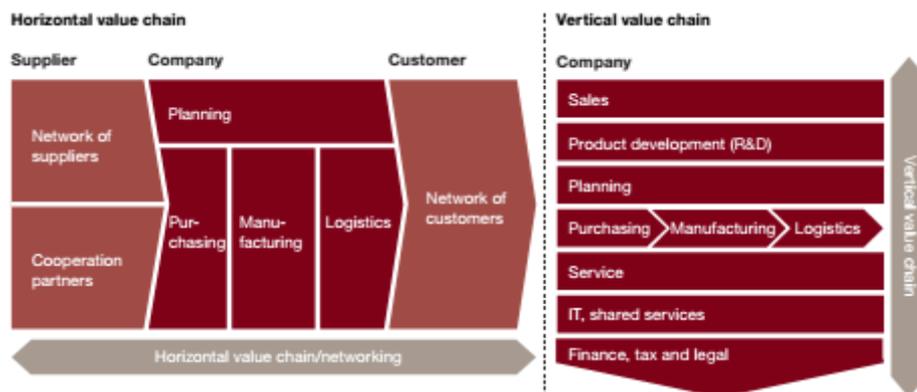
La metafora del Multiverso è meno arbitraria di quanto potrebbe apparire se riflettiamo su alcuni elementi generali dello scenario che si profila e sarà analizzato in modo più sistematico nei prossimi capitoli.

Innanzitutto, l'universo fisico-digitale costituito da prodotti e sistemi produttivi "intelligenti" implica la simbiosi tra informatica, scienze ingegneristiche e manageriali. Ciò rende possibile una incessante scomposizione e ricomposizione dei processi-sequenze di produzione alla scoperta di nuove funzioni, per raggiungere nuovi obiettivi, soddisfare esigenze non previste, risolvere problemi via via emergenti. L'universo fisico-digitale in continua espansione amplia quindi il potenziale creativo a cui gli agenti possono attingere per lo sviluppo di conoscenze, mentre la dinamica tecnologica porta alla disponibilità di strumenti sempre più potenti: dall'Intelligenza Artificiale alla robotica, ai nuovi materiali, all'elaborazione di grandi volumi di informazioni (*Big Data*) (§ capitoli 4-5). In breve la digitalizzazione dell'industria manifatturiera significa che "la rivoluzione sarà virtualizzata (trad. nostra di Hartmann *et al.*, 2015) in tutte le attività produttive, soprattutto perché permette di aumentare enormemente la capacità di soddisfare bisogni e necessità ben oltre le esigenze materiali". Come vedremo nel terzo capitolo, nel processo di sostituzione del lavoro umano con entità artificiali, alcune tecnologie (Intelligenza Artificiale, robotica avanzata) hanno ormai largamente oltrepassato la soglia del lavoro faticoso, ripetitivo e pericoloso, arrivando a svolgere anche attività e funzioni prossime a quelle ritenute più propriamente umane (analitiche e cognitive).

Un secondo aspetto da tenere presente è che il panorama di continui e imprevedibili cambiamenti connessi a flussi informativi globali implica prodotti e sistemi produttivi intrinsecamente adattativi, robusti, predittivi (OWL, 2014). Occorre quindi sviluppare l'abilità di sperimentare, mobilitare risorse materiali e immateriali per raccogliere sempre nuove sfide, coordinare sistemi complessi di molte entità che interagiscono (Reeves e Deimler, 2011). L'adattatività è una proprietà essenziale per un terzo aspetto rilevante: la digitalizzazione delle catene del valore "orizzontali e verticali" permetterà di percepire, oltre produrre direttamente, segnali di cambiamento a varia scala (Fig. 10).

Figura 10

INDUSTRIA 4.0: COMPLETADIGITALIZZAZIONE DELLE CATENE DEL VALORE ORIZZONTALI E VERTICALI



Fonte: PWC (2014), Fig. 8

In questo scenario non è un abuso logico pensare che il “regno dei fini” kantiano sia costituito dal Multiverso, popolato da sistemi, ciascuno dei quali “*pensa autonomamente, apprende e si adatta*” mentre “*le macchine intelligenti comprendono le persone*” (trad. nostra di OWL, 2014) e l’interazione uomo-macchina dischiude inimmaginabili potenzialità⁴.

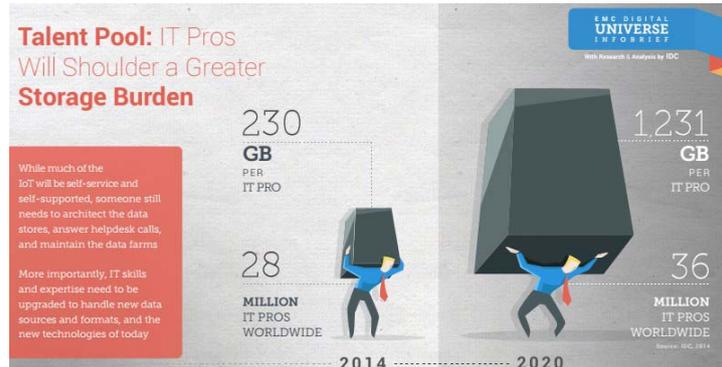
Un ultimo punto da mettere in risalto discende logicamente dai precedenti. L’adattatività dei sistemi e la continua generazione di nuove conoscenze in uno spazio connettivo globale comporta il superamento del concetto di efficienza statica, ovvero la massimizzazione nell’impiego delle risorse esistenti in un dato momento, per porre invece al centro quello di efficienza dinamica, incentrata sull’idea di sistemi in grado di apprendere ed evolvere sulla base di orientamenti strategici, che affrontano le sfide originate da una frontiera tecnico-scientifica mobile e da un Multiverso dove l’insieme di funzionalità e di sequenze economico-produttive da realizzare è un potenziale tutto da esplorare e da scoprire con strategie sistematicamente aggiornate.

Sulla base di queste considerazioni i flussi informativi sono in perenne aumento, dando così origine ai *Big Data* (Cap. 3), la cui analisi, attuata con strumenti sempre più sofisticati e potenti, è ingrediente essenziale dei processi decisionali pubblici e privati. L’abbondanza crescente di informazioni, che alcuni studiosi ritengono soverchiante, può consentire di elaborare decisioni su basi più solide e al tempo stesso dinamiche, con un impatto che Erik Brynjolfsson in una intervista al *New York Time* del 2012 ha paragonato all’invenzione del microscopio: “*Il microscopio, inventato quattrocento anni fa, ha permesso alle persone di vedere e misurare cose impensabili prima di allora, a livello cellulare. È stata una rivoluzione nella misurazione*”. Nel capitolo 3 si vedrà come nella scienza, nell’ingegneria, nel management la ricchezza dei dati sta enormemente ampliando gli orizzonti dell’indagine, della conoscenza e delle decisioni.

Certo bisogna anche tenere presene, però, che “stiamo affogando nell’informazione, affamati di conoscenza” (Naisbitt, *Megatrends*, 1982), perché i processi elaborazione delle informazioni pongono problemi e questioni non irrilevanti, a cui accenneremo nel prosieguo e sui quali c’è un crescente numero di contributi e riflessioni critiche. È comunque certo che anche i tecnici più esperti e gli scienziati dell’informazione devono misurarsi con sfide tecnico-scientifiche di grande portata, come viene efficacemente rappresentato nella figura 11.

⁴ Nel capitolo 3 accenneremo al fatto che alle potenzialità si accompagnano grandi rischi, come è sempre accaduto nell’evoluzione techno-economica dell’umanità.

Figura 11
L'“ONERE” INFORMATIVO CHE INCOMBE SU ESPERTI E SCIENZIATI DELL'INFORMAZIONE



Fonte: IDC (2014)

In questo capitolo introduttivo abbiamo cercato di delineare alcuni aspetti fondamentali della dinamica tecno-economica che ha al centro l'evoluzione dell'industria manifatturiera. Questi aspetti fondano la visione dell'“Industria 4.0” o della “Fabbrica Intelligente” come universo fisico-digitale in continua espansione, che abbiamo chiamato Multiverso per metterne in evidenza la natura di potenziale sconosciuto, il quale si arricchisce grazie alle attività di esplorazione degli agenti nella ricerca di soluzioni a problemi tecnico-produttivi e alle strutture interattive globali che essi stessi costruiscono.

Nei prossimi capitoli effettueremo un esame sistematico delle componenti del Multiverso, cercando di chiarire soprattutto ruoli, funzioni e strumenti alla portata degli agenti (pubblici e privati).

Questa sorta di esplorazione intellettuale, ancorata a numerosi esempi applicati, si chiude con l'analisi degli spazi per l'elaborazione strategica e gli interventi operativi che i soggetti pubblici possono sviluppare, perché una delle caratteristiche fondamentali dell'universo fisico-digitale in cui stiamo entrando è un paradosso solo apparente: viviamo nell'era dell'incertezza e della variabilità, ma proprio queste ultime arricchiscono il potenziale strategico ed operativo degli agenti. Tutto questo perché, parafrasando il titolo del famoso libro di Deutsch, la dinamica della conoscenza è la “trama della realtà” tecno-economica.

2. INDUSTRIA 4.0 E FABBRICA INTELLIGENTE: L'INDUSTRIA MANIFATTURIERA MOTORE PROPULSIVO DELL'UNIVERSO FISICO-DIGITALE

2.1 Fabbrica intelligente: dal modello fordista allo spazio aperto del "Multiverso"

Cosa può accomunare locomotive ferroviarie, racchette da tennis, e orologi da polso? La risposta è semplice: l'esistenza di componenti fisiche e virtuali coordinate assomiglia agli oggetti indicati (e migliaia di altri) all'interno di una traiettoria di trasformazione tecnico-produttiva, che mostra segnali crescenti di uno spazio tendenzialmente senza limiti, emergente nel futuro prossimo dell'umanità.

Questo spazio è il risultato di processi di continua e accelerata creazione di nuove conoscenze, possibili grazie a strumenti molto potenti a nostra disposizione, i quali possono consentire l'esplorazione di domini conoscitivi ancora ignoti, ma al tempo stesso densi di incognite e rischi di cui occorre acquisire consapevolezza. Per cercare di comprendere cosa tutto ciò significhi e quali sono le potenziali sfide, opportunità e minacce per la dinamica socio-economica e produttiva, riprendiamo il quesito posto all'inizio, al fine di enucleare un concetto che diverrà centrale in tutta l'analisi che svolgeremo, il *digital thread*:

"Molte grandi imprese stanno reagendo alla pressione competitiva "digitalizzando" la propria filiera di fornitura, i processi manifatturieri, i componenti, i dati aziendali. I dati sono catturati durante tutto il ciclo di vita del prodotto e analizzati alla ricerca di opportunità per diminuire i costi di produzione e i tempi di risposta, mentre aumentano efficienza e innovazione. La frase "Digital Thread" è comunemente utilizzata per descrivere questo processo. (Mies *et al.* 2016: 2)⁵.

Grandi machine da 220 tonnellate tendono ad essere molto più simili a computer iperattivi: un'enorme quantità di sensori e di dispositivi, che raccolgono dati sulle varie componenti della locomotiva, conferiscono ad una sorta di "mastodonte" un'adattabilità al contesto in cui si muove. Può così accadere che un giornalista si ritrovi "mano sull'acceleratore, occhi sull'orizzonte, alla guida di un treno merci di un km e mezzo lungo il percorso che va da Kansas City ad Amarillo Texas". In realtà il giornalista in questione è a Niskayna, 4 ore da New York City, in una stanza attrezzata, dove l'esercizio di guida avviene grazie ad un modello computazionale di ottimizzazione del viaggio ("*GETrip optimizer*") (Gertner, 2014). Si tratta di un modello per il controllo "superintelligente" del percorso di viaggio, in grado di calcolare la velocità appropriata del treno in ogni momento, suggerendo al guidatore il comportamento più adatto (in salita, nelle curve, in collina, in discesa), in modo da ridurre il consumo di carburante. Sham Chotai, il Chief Technology Officer della *GE Transport Division*, nel 2014 sosteneva che entro breve tempo la GE sarebbe stata in grado di avere sotto controllo a distanza ogni locomotiva, ciascuna delle quali è composta da 200.000 parti dotate di sensori e altri dispositivi di trasmissione dati⁶.

⁵ "The Government has led several independent initiatives addressing technologies both on and above the factory floor with the goal of maximizing the use of digital data across the life cycle of products. This "digital thread" captures information generated from concept development and design to analysis, planning, manufacturing, assembly, maintainability, and through to disposal." (US Army, 2014: 3).

⁶ Per un descrizione più dettagliata e completa si veda Gertner (2014).

Vediamo ora la racchetta da tennis, che nell'impugnatura contiene sensori e strumenti di connettività tali per cui, tramite apposite App (con algoritmi e software dedicati) è possibile calcolare e trasmettere al giocatore e al suo allenatore le traiettorie della pallina, la sua velocità, l'angolo di rotazione e le forze dell'impatto. Il tutto può essere ovviamente memorizzato su smartphone e altri dispositivi per consentire di elaborare strategie di miglioramento continuo delle capacità e delle prestazioni del giocatore, oltre che fornire spunti per differenti strategie di gioco.

Il terzo esempio è il cinturino da polso che, oltre a misurare il tempo, può stimare una serie di aspetti della vita quotidiana delle persone: intensità dell'attività fisica svolta, consumo di calorie, interazione tra piano alimentare e tipologia di comportamento adottato, altri parametri corporei, con la possibilità di delineare un quadro programmato/desiderato e poi valutare il divario tra obiettivi stabiliti e risultati ottenuti. In sostanza, quindi, una rappresentazione statica e dinamica della condotta di vita, soggetta a considerevoli variabili, previste e non programmate, unite ad un'attenta e sistematica analisi delle performance ottenute da un sistema complesso come il nostro organismo, di cui è anche possibile scoprire in tempo reale anomalie e fattori di rischio, che possono essere a loro volta comunicati all'interessato e al medico o centro sanitario di fiducia.

Cerchiamo ora di enucleare dagli esempi cinque fondamentali aspetti comuni.

1. *Gli oggetti divengono al tempo stesso processi.* Essi non sono più qualcosa di definito che, una volta ottenuto, viene immesso sul mercato e la sua evoluzione avviene esclusivamente nell'orbita di azione dell'utilizzatore. A contrario, c'è un filo continuo (il *digital thread*), che consente un'incessante comunicazione tra la miriade di componenti, costituiti sempre più da materiali compositi, ovvero insiemi variabili e multiformi di differenti materiali: (polimeri, metalli ceramici dotati di particolari proprietà fisico-chimiche a varia scala, dalla nano e micro scala fino a quelle macroscopiche strutturali, verificabili con la fisica dei nostri sensi).

Dall'aeronautica ai mezzi di trasporto su strada, dalle nuove medicine e sistemi di cura alle racchette da tennis, da strumenti di produzione dell'energia alla vasta serie di prodotti per la casa con nuove proprietà meccaniche, masse volumiche (densità) sempre più contenute, sostanze composte a partire da frammenti molecolari "programmati", siamo di fronte ad un universo di potenziali prodotti che assicurano performance sempre più importanti: resistenza agli stress, flessibilità, leggerezza, duttilità, capacità di *targeting* sul problema (sanitario, energetico, chimico-fisico, ingegneristico). In breve, siamo in presenza di output che, grazie all'analisi dei dati multi-scala, sono progettati e scoperti, partendo dall'identificazione di relazioni critiche tra strutture chimico-fisiche e proprietà (Broderick e Rajan, 2015).

2. *Flussi informativi di varia provenienza e destinazione sono continuamente generati in tempo reale e trasmessi senza sosta*, per essere combinati tra loro, al fine di individuare anomalie, necessità di aggiustamenti, possibilità di miglioramento.

3. Valutazione e verifica senza sosta tra set di parametri prefissati e quelli rilevati nell'interazione tra gli impulsi e le mutevoli contingenze del mondo reale. Tutto questo genera spinte ad adattamenti continui, connessi ai divari tra stato di cose desiderato e stati reali variabili.

4. *Oggetti e processi con simili comportamenti sono intrinsecamente "propensi" a fronteggiare gli imprevisti*, nel senso che raccolgono immediatamente segnali "premonitori" e possono quindi delineare, seppure in termini generali, sfide, minacce, opportunità.

Il lettore di queste note può esercitare la propria fantasia, in relazione ai tre esempi iniziali, nell'immaginare le situazioni più disparate e le modalità con cui possono innescarsi comportamenti di risposta.

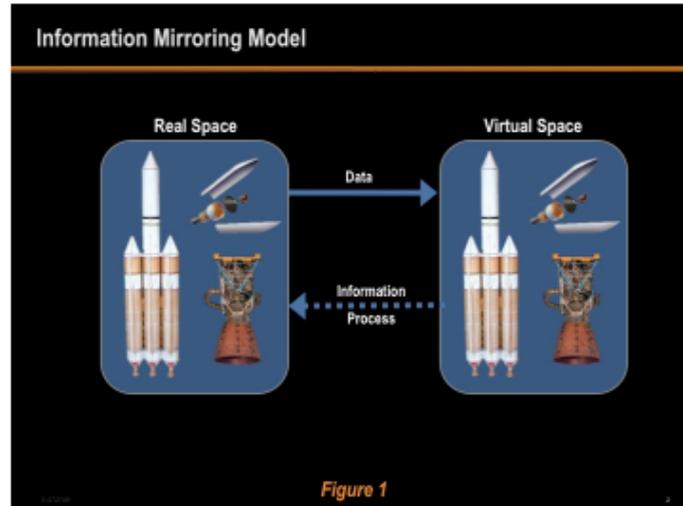
In sostanza, quindi, ciò che abbiamo messo in evidenza finora porta a concepire oggetti e processi non come oggetti auto-contenuti, bensì sistemi di unità adattative correlate a flussi informativi, generati sia da esse stesse che dal contesto multi-dimensionale con cui interagiscono, cioè sistemi analoghi e variabili ambientali solo in parte note, talvolta anzi del tutto ignote.

5. Tali sistemi adattativi svolgono funzioni ed evolvono senza sosta in ambienti molto diversi:

1) situazioni di certezza, che corrispondono a fattori e variabili conformi ai parametri di funzionamento previsti. 2) Condizioni di incertezza che variano da un'incertezza debole, che definisce contesti in cui c'è una variabilità dei fattori ambientali con cui si interagisce, senza che il quadro di fondo sia radicalmente modificato, ad un'incertezza sostanziale, che si ha quando i mutamenti di variabili fondamentali del contesto sono tali da indurre la probabilità di eventi catastrofici, di vulnerabilità strutturale del sistema (*system failure*).

Tutto ciò è possibile perché vi sono micro- mondi fisici e loro copie digitali, che sono aperte a interazioni con altri "micro-mondi". L'esistenza di feedback ricorrenti e diffusi tra di essi consente di rilevare sia condizioni previste che fattori di contesto imprevisi. Tale reattività è resa possibile dai risultati di una lunga e complessa dinamica tecnologica, che ha prodotto una svolta importante: mentre fino alla fine del secolo scorso era necessario ispezionare direttamente ("fisicamente") un'attrezzatura e un qualsiasi oggetto realizzato per ottenere informazioni sul suo funzionamento, dai primi anni del XXI secolo viene creata una rappresentazione digitale di un sistema (processo e output), un "*digital twin*" o gemello digitale"⁷. La figura 12 è la prima rappresentazione del concetto di *digital twin*.

Figura 12



Fonte: Grieves (2014), Fig. 1

L'idea di fondo è quella di uno spazio fisico reale, costituito da prodotti, e di uno virtuale. Sensori inseriti nel "gemello reale" consentono di connettere il "gemello virtuale" grazie alla trasmissione di dati e informazioni del proprio funzionamento e dell'ambiente circostante. Nel

⁷ L'espressione coniata da Michael Grieves dell'Università del Michigan nel 2003 e da lui attribuita a John Vickers della NASA.

decennio intercorso dall'introduzione sono stati compiuti passi in avanti enormi nell'accuratezza, nel grado di corrispondenza tra reale e virtuale, nell'accelerazione della potenza computazionale dei dispositivi di elaborazione dell'informazione. Il *digital twin* non è un modello generico, bensì “una collezione di modelli basati sulla fisica che riflettono esattamente le condizioni operative del mondo reale” (GE, The Economist post, 2015). In questo modo viene costruito il modello computazionale, che si alimenta di flussi ininterrotti di dati relativi ai materiali, ai parametri di processo e all'intero ciclo di vita del prodotto. Grazie al modello computazionale, che riflette e analizza puntualmente ciò che accade nel mondo reale, il processo di digitalizzazione dei flussi e la loro interpretazione consentono il miglioramento continuo e il perseguimento dell'efficienza nell'impiego delle risorse. Il *digital twin* e il *digital thread* richiedono un'infrastruttura software appropriata per catturare i dati, renderli disponibili e quindi scoprire nuove informazioni e conoscenze. *Data mining*, strumenti di simulazione basati sulla fisica, algoritmi che mettono in grado di studiare e selezionare nuove geometrie e caratteristiche di prodotti e materiali partendo da descrittori di micro-spazi anche a livello atomico, per poi generare a livello computazionale “un ampio numero di combinazioni chimiche e micro-strutture, sulle quali calcoli ed esperimenti mediante strutture elettroniche possono essere impiegati per approfondire le questioni mediante il ricorso a predizioni” (Broderick e Rajan, 2014: 2).

Il *computational modeling* multi-scala, incentrato su *digital twin e digital thread*, è la base dell'analisi di ciò che accade durante tutto il ciclo di vita del prodotti e proprio il secondo consente esperimenti “in silico”⁸ per individuare potenziali anomalie, identificare l'approssimarsi di eventi negativi (*defaillances* temporanee, vere e proprie *failures* di sistema), in sostanza perseguendo livelli di ottimizzazione dinamica lungo tutto il ciclo di vita del prodotto.

Dall'analisi effettuata si evince chiaramente che siamo di fronte ad un incessante *matching* multi-dimensionale tra spazio fisico e spazio virtuale, entro ciascuno dei quali micro e macro-processi di varia intensità e natura evolvono senza sosta.

Prima di trarre alcune rilevanti implicazioni di questa affermazione è necessario mettere in luce il ruolo di alcuni dispositivi, che costituiscono per così dire il sostrato su cui tutto ciò si erge e sostengono una dinamica tendenzialmente senza fine. È difatti in corso una profonda trasformazione della struttura economico-produttiva, perché stanno radicalmente cambiando gli ingredienti fondamentali delle attività di produzione. I feedback continui, l'adattamento a contingenze previste e inattese, il coinvolgimento di tanti fattori nel processo di interazione tra spazio fisico e quello virtuale sono resi possibili dall'esistenza e dalla pervasività di *cyber-physical systems* (CPS), cioè “l'integrazione di processi computazionali e fisici. Computer e reti integrate monitorano e controllano i processi fisici, normalmente utilizzando cicli di feedback laddove i processi fisici influenzano quelli computazionali e viceversa” (trad. nostra di Lee, 2008: 363).

Questi dispositivi in grado di integrare hardware e software, di svolgere funzioni multiple di monitoraggio, controllo e segnalazione sono a loro volta l'esito dell'evoluzione di tre generazioni di CPS. Le prime tecnologie erano di identificazione come i tag RFID, mentre l'accumulo e l'analisi delle informazioni erano fornite da un servizio centralizzato. La seconda generazione era basata su CPS dotati di sensori e attuatori, meccanismi in grado di agire in un ambiente di riferimento con un set limitato di funzioni. La terza generazione riguarda CPS che hanno la capacità di memorizzare e analizzare dati e “sono dotati di sensori e attuatori multipli, connessi in rete tra loro e con altri esterni” (Hermann *et al.*, 2015: 9). Lo sviluppo dei CPS,

⁸ Fenomeni di natura chimico-biologica vengono riprodotti con simulatori informatici anziché in provetta o con test su esseri viventi.

insieme alla creazione di uno spazio connettivo globale, che permette lo scambio di flussi di informazioni tra un'ampia gamma di dispositivi operanti a varia scala, è dovuto al convergere di numerose tecnologie ed è l'esito di itinerari di ricerca che sono riusciti a combinare logiche computazionali (discrete) con le funzioni di controllo e monitoraggio delle dinamiche continue di sistemi fisici e ingegnerizzati (Rajkumar *et al.*, 2010: 731). I CPS coniugano la precisione computazionale con l'incertezza e il "rumore" ineliminabili nell'ambiente fisico.

CPS e spazio connettivo globale implicano che occorre affrontare la dinamica dei sistemi a molte scale temporali, da cui deriva la sfida di controllare la crescita di complessità sistemica e computazionale. Di qui deriva la necessità di pensare alla creazione di innovativi fondamenti scientifici e principi ingegneristici: nel progettare sistemi organizzati bisogna superare logiche di *trial and error* iterati, cioè metodi di ricerca basati su tentativi casuali, e adottare invece "metodi rigorosi, sistemi certificati e potenti strumenti di modellazione computazionale" (Rajkumar *et al.*, 2010: 731-732).

In definitiva, quindi, un set di tecnologie convergenti è alla base dei CPS, che sostanzialmente combinano tre livelli: oggetti fisici; i loro modelli computazionali connessi mediante un'infrastruttura connettiva multi-scala e globale; servizi che si possono immaginare sulla base della interazione tra mondo fisico e mondo virtuale.

In questo scenario alcuni elementi vengono necessariamente alla ribalta. I set di sensori e attuatori, gli stock di informazione accumulate, i sistemi operativi e le infrastrutture di connessione permettono ai CPS di comunicare tra loro autonomamente (*Machine to Machine communication*, M2M) come nel caso della locomotiva del Missouri, delle racchette da tennis e di tanti dispositivi bio-medicali già sul mercato, delle auto, e così via. Le interazioni possono svilupparsi dal "*nanoworld to large wide area systems and bio-systems*" (Rajkumar *et al.*, 2010: 731), come si è precedentemente affermato.

È molto proficuo riflettere sul fatto che aumentano al tempo stesso sia la "granularità", cioè il "livello di dettaglio o grado risoluzione" con cui si organizzano le attività, che la loro complessità, dato il numero di dimensioni variabili e interdipendenti che occorre prendere in considerazione, con un incremento esponenziale dei dati e delle informazioni da raccogliere, sistematizzare, analizzare e tradurre in strategie e modelli operativi. Siamo pertanto entrati nell'era della variabilità e dell'incertezza, che inducono a ripensare consolidati modelli mentali, quindi a esplorare nuove modalità e strumenti di analisi per la progettazione delle attività e dei sistemi di produzione.

2.2

Mutamenti ontologici e modelli ingegneristici

Il *matching* dinamico tra lo spazio fisico e quello digitale, tra i processi reali e i modelli computazionali che ne rappresentano la dinamica evolutiva è possibile perché la realtà dei sistemi socio-economici è costituita dal silenzioso formarsi, accanto ai processi apparenti, di una "seconda economia", che consiste di tutti i "processi di impresa digitalizzati che conversano tra loro, eseguono e innescano ulteriori azioni e che in maniera silenziosa si sviluppano contemporaneamente all'economia "fisica". (trad. nostra di Arthur, 2011: 3). Nella "seconda economia" "ogni cosa succede in parallelo e si auto-configura, cioè si riconfigura incessantemente, e sempre di più si auto-organizza, si riprogetta e si auto-ripara" (ivi). Sotto la superficie dell'economia fisica si dirama una sorta di "enorme Sistema di radici interconnesse, molto simile al Sistema delle radici dei pioppi" (ivi: 4).

La metafora di Brian Arthur ci sembra molto suggestiva e utile per comprendere come la diffusione di *digital twin*, l'intersezione e sovrapposizione di flussi informativi di varia natura e provenienza modifichino profondamente i modelli di progettazione ingegneristica, i modelli di business e di elaborazione strategica di individui, imprese, interi sistemi socio-economici.

2.3

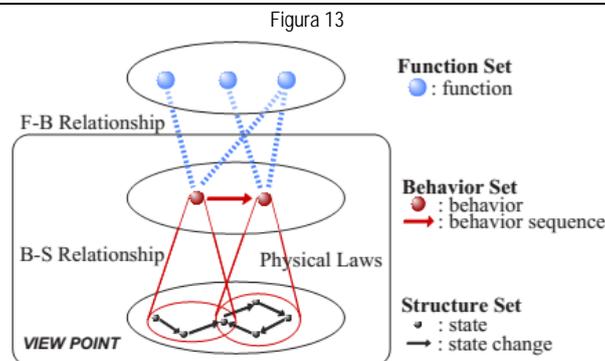
Paradigmi di progettazione ingegneristica: dal paradigma classico all'*evolutionay engineering*

L'incessante *matching* dinamico tra spazio fisico e virtuale muta radicalmente le basi concettuali e operative dei paradigmi di progettazione di beni e processi. L'esistenza di tecnologie di interconnessione basate sull'informazione (Davis, 2011) genera, come abbiamo visto, una crescente complessità delle attività e dei sistemi produttivi, unita alla variabilità dei parametri decisionali nel consumo e nella produzione. L'enorme aumento delle interazioni e interdipendenze può infatti produrre continuamente idee e soluzioni innovative, grazie alla combinazione tra domini di conoscenze e sfere esperienziali sempre più ampie e diversificate. Un siffatto orizzonte evolutivo delle conoscenze tecnico-produttive rende sempre meno appropriati i presupposti del "pensiero ingegneristico classico" (Braha *et al.*, 2006). Quest'ultimo è infatti essenzialmente un processo "orientato agli obiettivi", che cerca di raggiungere determinati obiettivi, noti e ben specificati. Su questa base il modello classico di progettazione ingegneristica può essere sintetizzato in alcuni step: 1) specificazione funzionale, ovvero chiara enunciazione di ciò che ci si aspetta dal sistema. 2) Progetto, che consiste nella definizione precisa delle componenti e delle relazioni tra di esse con un approccio fondamentalmente *top-down*. 3) Test e validazione del progetto stesso, nello svolgimento delle funzioni nel conseguire gli obiettivi prestabiliti. Naturalmente tutto questo presuppone che le specificazioni e l'ambiente operativo dell'output del progetto siano ben compresi e il secondo sufficientemente stabile da ritenere attendibili i risultati dei test. 4) Produzione manifatturiera. Una volta che tutte le prove e le verifiche hanno avuto esito positivo, "copie esatte" dell'output sono prodotte nel numero ritenuto necessario *da I a n*. La competenza e l'abilità dei progettisti dovrebbero essere tali da garantire che, dopo i test svolti, vi sia corrispondenza tra le performance funzionali del prodotto e le ipotizzate esigenze degli acquirenti finali. Una frase sintetica, ma efficace, definisce il "modello delle regole" del paradigma ingegneristico classico: "Dato un problema da risolvere, si comprende come risolverlo la prima volta e la soluzione viene riproposta allo stesso modo ogni volta che insorge lo stesso problema" (trad. nostra di Minai *et al.*, 2006: 6).

In tale quadro i temi dominanti sono: stabilità, prevedibilità, affidabilità, precisione. È chiaro, infatti, che la sequenza di 4 step richiede una sostanziale invarianza dell'ambiente tecnico-economico di riferimento, che può essere tutt'al più soggetto a perturbazioni, ma devono essere di natura tale da non modificare il quadro di fondo tecnico-scientifico e produttivo, rendendo così possibile l'assorbimento di variazioni e turbolenze "fenomeniche". Premesso che l'attività produttiva di un qualsiasi output (bene o servizio) va concepita come insieme di attività stratificate, dirette alla ricerca di soluzioni per problemi tecnico-produttivi mediante la scomposizione dei problemi in sotto-problemi e quindi ricomponendo successivamente le soluzioni specifiche per la risoluzione del problema iniziale. Come ha ben spiegato Nightingale (1998), nel paradigma classico il ciclo di progettazione innovativa avviene partendo da un tradizionale e ben consolidato paradigma tecnologico di riferimento. Sulla base di esso ingegneri e progettisti procedono cercando di comprendere se i problemi che affrontano siano assimilabili a situazioni problematiche già risolte. Questo iniziale e "tacito senso di similarità"

consente poi ad essi di analizzare e scomporre il problema generale in sotto-problemi, così che alla gerarchia di sotto-problemi corrispondono sotto-insiemi di attività di ricerca di soluzioni specifiche, che devono rispettare i vincoli/parametri stabiliti ai livelli gerarchici più elevati. La sequenza vincolata di step può essere poi iterata più volte fino alla fase di test e validazione, che deve includere anche la verifica della congruenza complessiva tra le differenti soluzioni assegnate ai problemi e sotto-problemi. La sequenza lineare del ciclo di progettazione, basato sul “senso di similarità”, può assumere varie forme concrete, a seconda del tipo di cultura prevalente nell’impresa o nel centro di ricerca, ma è nondimeno possibile individuare uno schema logico di fondo, presente nella letteratura sulla progettazione ingegneristica. Intendiamo riferirci allo schema concettuale *Function-Behavior-Structure* [FBS dall’acronimo inglese] (Umeda e Tomiyama, 1995; Shimomura e Takeda, 1995; Gero, 1990; Gero e Kannengiesser, 2003)⁹.

Nel modello FBS lo stato di un output progettuale è costituito dalle entità che compongono il progetto, le caratteristiche di tali entità, le relazioni tra di esse. Dati riferiti alle caratteristiche definiscono lo *stato*, mentre i rapporti tra di esse compongono le strutture. “Variazioni sequenziali degli stati” sono i cambiamenti dei parametri rappresentativi degli attributi delle entità, cioè il comportamento secondo un *frame* logico basato su un *mapping* dinamico tra i vari sotto-insiemi del modello (Fig. 13).



Nel framework teorico ed operativo classico, date le assunzioni di stabilità, prevedibilità, affidabilità e precisione, la ricerca della configurazione ottima dei parametri, nell’esplorazione dei sotto-spazi, è spinta verso una progettazione di sequenze ideali di step per la realizzazione di un output. In breve, prevale la ricerca di sequenze lineari, essenzialmente algoritmi ben definiti, facilmente traducibili in programmazione produttiva con tecniche standard di pianificazione, controllo qualità e governo della *supply chain*.

Dalla riflessione svolta si deduce che decisioni razionali e l’ideale dell’ottimalità sono strettamente connessi ad ambienti tecno-economici caratterizzati da bassi livelli di complessità e incertezza, ovvero da mutamenti regolari e in qualche misura prevedibili.

Lo scenario descritto nel paragrafo precedente, cioè il *matching* dinamico multi-dimensionale tra lo spazio fisico e quello virtuale, l’enorme estensione di interdipendenze che si genera imprevedibilmente, delineano un quadro completamente diverso. Nel panorama tecnico-produttivo odierno, la ricerca di una soluzione ottimale diviene molto difficile, dal momento che

⁹ In questa sede trattiamo soprattutto temi proposti da Umeda, Takeda e Shimomura, anche se questioni e spunti di riflessione sollevati dal contributo di Gero (1990) hanno dato origine ad un interessante dibattito nel corso del decennio successivo (Vermaas e Dorst, 2007; Galle, 2009).

l'intersezione e la sovrapposizione di processi a molti livelli e in diversi ambiti produce un numero elevato di contingenze, molte delle quali del tutto o in parte imprevedibili.

La crescente varietà e complessità dei prodotti, insieme alla necessità di fronteggiare eventi ignoti, rendono fondamentale un cambiamento del paradigma ingegneristico, in modo che sia incentrato sulla ricerca di soluzioni quasi ottimali e sempre soggette a revisioni sulla base dei segnali e delle informazioni in arrivo, opportunamente captate. Avendo a che fare con ambienti e situazioni dense di incognite e problemi da risolvere, il paradigma classico lineare si rivela una strategia debole, perché non è in grado di scoprire e selezionare insiemi di soluzioni a problemi tecnico-produttivi. Ciò accade appunto quando output e processi diventano insiemi di componenti connessi e interagenti a varia scala (Simon, 1962; Alexander, 1973; Bar-Yam, 1997, 2003; INCOSE, 2015). In simili contesti è necessario adottare un paradigma di progettazione e un modello di razionalità differente da quello tradizionale, affinché ci si possa misurare con la varietà dei processi di coordinamento multi-scala e la numerosità delle variabili interdipendenti da prendere in considerazione.

Il *Complex Engineering Paradigm* (Minai *et al.*, 2006) propone un'alternativa, che si fonda su principi logici del tutto diversi da quelli del paradigma tradizionale: 1) al centro dell'analisi sono i sistemi complessi, alla ricerca di connessioni tra fenomeni e reazioni "locali", specifiche, ed effetti globali (nell'intero sistema). 2) Approccio *open-ended* e aspettative costanti dell'inatteso, nel senso che i sistemi devono essere intrinsecamente dinamici, modificandosi in base ai flussi informativi provenienti da un ambiente esterno incerto e continuamente rappresentato al suo stesso interno. Tutto ciò significa che il sistema complesso ha uno spazio delle funzioni, dei comportamenti e delle strutture in continua evoluzione. 3) I sistemi, pur presentando alcune invarianti di fondo, mostrano necessariamente fattori di unicità, perché in ambienti complessi e mutevoli i comportamenti sistemici adattativi inducono la produzione di comportamenti e strategie correlati alle particolarità dei processi multi-dimensionali e dinamici in cui essi sono inseriti.

Per fronteggiare ambienti dinamici con eventi e processi imprevedibili diventano fondamentali altri due principi logico-funzionali: la ridondanza, ovvero la duplicazione di componenti per ridurre gli effetti negativi di *failures* parziali, e la *degeneracy*, cioè la molteplicità di strumenti e processi che, pur se appartenenti a diverse topologie strutturali, sono in grado di svolgere una stessa funzione¹⁰. In presenza di varietà, complessità ed elevata dimensionalità emerge la cosiddetta "maledizione della dimensionalità" (*curse of dimensionality*) o "esplosione combinatoriale", cioè lo spazio decisionale, nel nostro caso della progettazione e quindi dello sviluppo dei processi produttivi, deve prendere in considerazione un numero così elevato di elementi da rendere il problema di trovare una soluzione ottimale eccedente la potenza computazionale a disposizione oppure risolubile in un tempo che aumenta in modo esponenziale. "I sistemi complessi" non cercano soluzioni ottimali, ma beneficiano dell'esplosione combinatoriale" (Minai *et al.*, 2006), perché la diversificazione interna e il funzionamento in parallelo delle sue componenti consente di esplorare spazi e sotto-spazi di soluzioni FBS molto più ampi del tradizionale paradigma lineare. In un orizzonte di questo tipo altri studiosi (Bar-Yam e il II Centro di Ricerca NECSI, New England Complex Systems Institute) si spingono fino a proporre l'*Evolutionary Engineering* e la *Multiscale Analysis* (Bar-Yam, 1997, 2004, 2006), alternativi allo standard "*iterative and incremental engineering*". Questo approccio implica un orizzonte concettuale e metodologico del tutto diverso, basato su nuovi principi fondativi: 1) esplorazione in parallelo di molteplici spazi e domini conoscitivi, per es. in tentativi di miglioramento dei prodotti esistenti e contemporaneamente alla ricerca di

¹⁰ Il nostro cervello è proprio caratterizzato da elevata *redundancy* e *degeneracy*, come è ampiamente dimostrato in Tononi *et al.*, 1996, 1999; Edelman e Gally, 2001).

nuovi. 2) Verifiche multiple dirette delle soluzioni, con un processo di approfondimento realizzato grazie a continui feedback con l'ambiente di riferimento. 3) Generazione di varietà, da sottoporre poi a dinamiche selettive del contesto tecno-economico, soggetto a gradi variabili di intensità evolutiva.

Su queste basi sono enunciate le seguenti "pratiche ingegneristiche" innovative:

- "Il focus è sulla creazione di un ambiente e dei processi più che sulla realizzazione di un prodotto"
- "Costruire continuamente su qualcosa che già esiste"
- "Componenti operative sono modificabili direttamente *in situ*"
- "Utilizzo di processi di sviluppo paralleli multipli"
- "Valutazione sperimentale *in situ*"
- "Aumento graduale nell'utilizzo di componenti più efficaci"
- "Soluzioni efficaci per problemi specifici non possono essere previste"
- "Sistemi ingegneristici convenzionali dovrebbero essere utilizzati per componenti non troppo complesse" (trad. nostra di Bar-Yam, 2006: 34-35).

Il punto fondamentale da tenere presente è che il processo di sviluppo di un nuovo prodotto consiste in "un insieme di attività di elaborazione delle informazioni e di risoluzione di problemi" (Lenfle e Baldwin, 2007) all'interno di una dinamica tecnologica che consiste in "una sistematica attività di risoluzione di gerarchie di problemi" (*hierarchical problem solving*): ciò avviene lungo traiettorie interrotte da discontinuità o rivoluzioni, che modificano gli elementi basilari di un paradigma tecno-economico (Perez, 2010, 2013; Mazzucato e Penna, 2015)¹¹.

Un lungo filone di ricerca (Marples, 1961; Alexander, 1973; Clark, 1985) ha inoltre concepito la stessa attività di progettazione essenzialmente come una forma di risoluzione gerarchica di problemi, in quanto consiste in una sequenza di decisioni, che vanno da formulazioni generali a specificazioni sempre più dettagliate, con quella che in un linguaggio più attuale potremmo definire maggior livello di "granularità". Clark (1985: 243) porta qualche esempio in proposito: decisioni di alto livello, quali il principio di trasformazione energetica e la scelta del carburante da impiegare (vapore, elettricità, benzina) creano l'agenda per la sequenza di problemi da risolvere mediante l'"esplorazione gerarchica di soluzioni alternative". L'organizzazione di qualsiasi oggetto fisico complesso è gerarchico e da ciò deriva la gerarchia nell'attività di progettazione, evidentemente connessa alla natura dell'oggetto.

Le riflessioni svolte in questo paragrafo aiutano a comprendere come l'innovazione sia essenzialmente l'esito di una creativa risoluzione di problemi nell'ambito di quello che può essere definito lo "spazio della progettazione" (*design space*) (Baldwin e Clark, 2006). In termini non formali, il *design space* comprende "tutte le possibili varianti nella progettazione di una classe di prodotti, come ad esempio un kayak. Il *design* di un particolare oggetto corrisponde ad un singolo punto nel *design space*. Per esempio, un kayak rosso e uno kayak blu con lo stesso scafo sono due differenti punti nel *design space*. Il loro progetto differisce in una singola dimensione [il colore]. (trad. nostra di Baldwin *et al.*, 2006: 1296).

Questo ampio excursus sulle teorie della progettazione è di grande interesse per l'economista che intenda analizzare la dinamica tecno-economica in atto. È chiaro, infatti, che il *matching*

¹¹ Perez (2010) definisce *paradigma tecno-economico* un insieme complesso di interazioni tra componenti tecnico-scientifiche, sociali, culturali e istituzionali che convergono. Si realizza cioè il reciproco adattamento tra fondamentali sub-sistemi appartenenti al sistema economico-produttivo, che può essere a sua volta analizzato a differente scala (regionale, nazionale, internazionale) e determina un "senso comune" nell'affrontare i problemi economico-sociali. Tale reciproco adattamento prende lentamente piede nella coscienza collettiva, nel modo di pensare, progettare e definire azioni delle varie tipologie di agenti socio-economici. Un ingrediente essenziale di un paradigma tecno-economico è l'esistenza di un *sistema tecnologico*, che consiste nel fatto che una serie di processi ed elementi sono congruenti: un modello concettuale tecnico-scientifico (stile di pensiero, paradigma), infrastrutture materiali e immateriali, modelli culturali, fattori normativi e regolamentati, comportamenti istituzionali.

dinamico multi-dimensionale tra spazio fisico e spazio virtuale-digitale aumenta a dismisura lo spazio dei prodotti, mentre diventano centrali sia il concetto di co-evoluzione tra diversi agenti e processi, sia la congruenza tra parametri socio-tecnici rappresentativi delle dimensioni che influiscono sulla dinamica tecnico-produttiva. Un punto importante merita una doverosa riflessione: la rappresentazione digitale e il *digital thread* dischiudono un enorme potenziale per la progettazione, che può conferire nuova forza a concetti e approcci operativi per le sfide che il XXI secolo pone alle economie e all'intera umanità. Intendiamo riferirci soprattutto alla scarsità delle risorse (acqua, cibo, energia, materie prime) e ai vincoli ambientali, che condizioneranno la dinamica economica dell'intero pianeta. Questi costituiscono, infatti, un ambito dove la multi-dimensionalità e la complessità di fattori e processi che interagiscono devono indurre ad adottare una visione sistemica nell'analisi dei problemi e nell'elaborazione delle strategie. Cercheremo ora di mostrare come i concetti enunciati permeino alcuni approcci e metodologie sviluppate in campo ambientale, che si coniugano molto bene con gli sviluppi dell'universo fisico-cibernetico dell'Industria 4.0.

Ci riferiamo in particolare al Life Cycle Assessment (LCA), al Social Life Cycle Assessment (SLCA), all'Industrial Symbiosis, al From Cradle to Cradle (CTC), alla Circular Economy.

Prendiamo in esame distintamente ciascuno di essi.

2.4

La progettazione di processi e prodotti alla luce di sfide globali

2.4.1 LCA, SLCA

Il LCA, cioè la valutazione e analisi del ciclo di vita di un prodotto, è un “metodo per analizzare gli impatti multi-dimensionali sull'ambiente di un singolo prodotto, processo, impresa, città, o Paese” (Mattila *et al.*, 2012). Tale metodologia segue degli standard (ISO14040, ISO14044) e linee-guida ben definite (Guinee *et al.*, 2002; ILCD, 2010). Il LCA, che è stato sviluppato e arricchito negli ultimi due decenni, ha le sue radici nelle riflessioni e nel dibattito, iniziato negli anni '60, circa le conseguenze dell'esaurimento dei combustibili fossili e l'impatto economico ambientale del consumo di energia. Nei decenni successivi la prospettiva si è progressivamente ampliata fino all'adozione di una visione olistica, cioè sistemica e multi-dimensionale, nell'analisi dei problemi connessi al ciclo di vita di un prodotto, con l'indagine puntuale e sistematica di tutte le componenti e le fasi: produzione di materia prima, fabbricazione, distribuzione, uso, smaltimento, trasporto e consumo di energia. L'ottica iniziale è quindi incentrata sul principio “*from cradle to grave*” (“dalla culla alla tomba”) di un output, fondandosi sulla quantificazione degli input (energia, materiali impiegati, emissioni e residui ambientali), sul calcolo del “carico ambientale” dell'intero ciclo di vita di un prodotto, quindi sull'individuazione delle problematiche e progettazione delle azioni per il miglioramento. È chiaro, pertanto, come gli obiettivi fondamentali del LCA siano da un lato il contenimento del potenziale impatto ambientale di attività e processi e dall'altro l'innalzamento dei livelli di efficienza energetica nell'impiego degli input.

Occorre enfatizzare che il LCA è “*a comprehensive assessment and considers all attributes or aspects of natural environment, human health, and resources*” (Finnveden *et al.*, 2009: 1). I principali problemi affrontati nel corso degli anni in numerose esperienze a livello nazionale e internazionale hanno riguardato soprattutto la risoluzione di problemi in materia di allocazione delle risorse: *multi-output*, quando un processo genera ingenti quantità di scarto e di diversa natura (es. raffinerie); *multi-input*, se un processo riduce l'impatto dell'output o diminuisce il

consumo di input non riproducibili sostituendoli con altri riproducibili; *open-loop recycling*, che riguarda situazioni in cui un output-rifiuto è riciclato in un altro prodotto.

Problemi di questo tipo sono stati affrontati in quasi tutte le valutazioni di sostenibilità di attività e processi. Come si vede, elemento cruciale del metodo è la prospettiva basata sulla complessità dei problemi indagati, la quale è articolata nella considerazione di due orientamenti: 1) statico, cosiddetto *attributional*, che parte dai sistemi esistenti, analizzandone gli impatti ambientali lungo determinate sequenze produttive, mediante appropriate regole di “contabilità”. 2) Dinamico, che stima gli effetti di decisioni relative a potenziali cambiamenti e quindi agli effetti di possibili azioni. Ciò avviene in base a precise assunzioni e in un quadro di incertezza.

Ai nostri fini interessa enfatizzare come il LCA sia uno strumento a supporto di processi decisionali, diretti a coniugare efficienza e sostenibilità ambientale sulla base di una visione olistica e multi-dimensionale. È anche importante ribadire che la metodologia in questione è al tempo stesso ancorata a standard internazionali ben definiti (ILCD, 2010). Resta un dato di fondo: il LCA ha natura eminentemente tecnico-economica ed è quindi essenzialmente volta a dare solidi fondamenti a processi decisionali tecnico-produttivi, senza prendere direttamente in considerazione aspetti sociali.

Un arricchimento in tal senso viene realizzato con un approccio integrato, cioè il SLCA, iniziato nei primi anni 2000 proprio con il fine di integrare il LCA. La convinzione di fondo che la sostenibilità delle attività economico-produttive debba includere in modo non secondario aspetti sociali ha spinto studiosi e società di consulenza a proporre questa metodologia. Il SLCA mira a tale obiettivo partendo dalla seguente definizione: “La valutazione tecnica, che definisce gli aspetti sociali e socio-economici dei prodotti e l’impatto potenziale (positivo e negativo) che essi hanno durante il proprio ciclo di vita, comprende l’estrazione e la lavorazione delle materie prime, i processi manifatturieri, la distribuzione, l’utilizzo, il ri-uso, la manutenzione, il riciclo e lo smaltimento finale” (trad. nostra di UNEP, 2009: 37). Alcuni anni dopo la formulazione delle Guidelines per l’operationalizzazione del metodo da parte dell’UNEP, studiosi come Jorgensen (2013) ritengono che tale metodologia debba ancora “uscire dalla sua infanzia” in maniera inequivocabile. Due sono i problemi principali da affrontare perché ciò avvenga: (i) la disponibilità di dati, (ii) la mancanza di effetti del suo impiego a supporto di processi decisionali¹².

Al di là dei limiti e degli interrogativi di varia natura è importante sottolineare che “*SLCA, as all LC-based methodologies, educates and instills the systemic logic of relationship and mutuality, where if the other does well, it represents the good*” (Petti *et al.*, 2016, senza pagina, pubblicato on line).

Emerge, dunque, ancora una volta l’importanza della visione sistemica e multi-dimensionale come basilare prospettiva dinamica.

Questi aspetti sono ingredienti fondamentali di un altro approccio, che ha esplicite connessioni con il LCA, la Simbiosi Industriale (o *Industrial Symbiosis*).

2.4.2 *Industrial Symbiosis*

La IS ha una storia più che ventennale (Chertow, 2000; Chertow e Lombardi, 2005) e presenta fin dall’inizio un aspetto importante: l’orientamento prettamente operativo, basato su alcune assunzioni teoriche, derivate analogicamente da campi disciplinari tradizionali come la biologia.

¹² Il filone di ricerca e di analisi si è comunque sviluppato nel corso degli anni con una serie di analisi di caso e la pubblicazione di articoli su un ampio set di riviste (Petti *et al.*, 2016). Un dato interessante è che gli studi effettuati sono distribuiti in quote percentuali analoghe nei Paesi in via di sviluppo e in quelli già sviluppati, mentre appaiono più concentrati nei Paesi del Nord Europa (Danimarca, Svezia, Olanda e Germania). Permangono alcuni problemi concettuali (come definire i confini del sistema da analizzare), metodologici (la disponibilità di dati) e tecnici (quale metodo di rilevazione impiegare).

Chertow (2000: 314) definisce la IS come la collaborazione di entità separate in “un approccio collettivo al vantaggio competitivo che coinvolge lo scambio fisico di materiali, energia, acqua e sottoprodotti. Le idee-chiave della simbiosi industriale sono la collaborazione e le possibilità sinergiche offerte dalla prossimità geografica”(trad. nostra). Le sinergie tra unità economico-produttive consentono ad esse di conseguire benefici maggiori di quelli conseguibili individualmente e tali benefici possono estendersi ad agenti che operano in prossimità. Relazioni di prossimità spaziale e impiego multiplo delle risorse, modellazione dei flussi di input e output tra più entità congiunte, con scambi reciprocamente vantaggiosi, da un lato vanno oltre gli studi sulle agglomerazioni economico-territoriali e dall'altro pongono al centro non solo l'impiego più efficiente delle risorse, ma anche e soprattutto la considerazione approfondita e con alto livello di granularità degli effetti ambientali del loro uso. Per questa via, nata nell'ambito degli studi di ecologia industriale, l'IS utilizza creativamente la metafora dell'ecosistema industriale, ispirandosi chiaramente agli ecosistemi naturali: il metabolismo dell'ecosistema si basa sull'uso combinato di risorse diffuse e sullo “scambio” tra entità differenti degli output di scarto. La stabilità dell'ecosistema dipende dal fatto che un equilibrio dinamico stabile è presente in modo auto-organizzato, dal momento che la competizione-cooperazione inintenzionale tra organismi viventi consente il consumo e la rigenerazione dello stock di ingredienti base dello stesso ecosistema.

Analogamente la prospettiva simbiotica applicata all'ecosistema industriale implica che in aree geograficamente limitate (eco-parchi, zone con addensamenti economico-produttivi) le unità cooperano intenzionalmente, si auto-organizzano sia con una migliore utilizzazione dei materiali, per es. con lo scambio di output di un processo, prima destinato ad altro come input di un processo limitrofo, sia con l'organizzazione di partnership per l'uso di risorse strategiche come energia, acqua e trattamento rifiuti, coordinamento infrastrutturale.

È evidente l'innovativa portata intersettoriale, *multy-industry* di tale prospettiva, così come appaiono di tutta evidenza i benefici: 1) riduzione dei costi per la condivisione delle risorse. 2) Sviluppo di orizzonti strategici a medio-termine, per es. grazie al perseguimento congiunto di disponibilità di input strategici. 3) Rafforzamento della propensione a collaborare e diffusione di componenti imitative di valenza positiva nell'affrontare problemi generati dalla dinamica innovativa, dall'introduzione di vincoli normativi e regolamentari, dallo sviluppo di interazioni in grado di indurre spinte innovative endogene. Emerge, altresì, una evidente complementarità rispetto al LCA, come sottolineano Mattila *et al.* (2012), mettendo in luce analogie e differenze tra i due approcci, al lodevole scopo di evitare il rischio di “*reinventing the wheel*”.

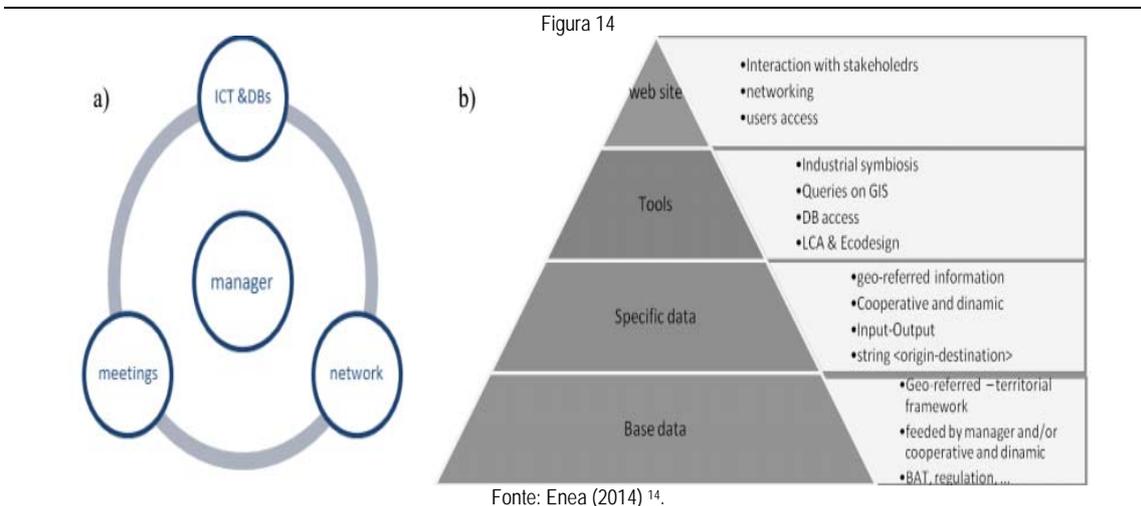
L'IS come valida strategia per i cicli di risorse è al centro di una linea di ricerca e sviluppo operativo dell'ENEA, fino alla recente creazione di una piattaforma¹³ di simbiosi industriale. L'ENEA ha anche realizzato diversi approcci all'IS, quali la visione incentrata sulla costruzione di modelli a rete come il National Industrial Symbiosis Program (NISP), illustrato da Lombardi e Laybourn (2012). Gli autori in questione mettono in luce l'importanza cruciale dell'esistenza di una rete di agenti, che apprendono reciprocamente attraverso la condivisione di informazioni, conoscenze ed *expertise*, promuovendo così innovazione e soprattutto processi eco-innovativi. Il modello NISP implica, pertanto, che cambiamenti culturali di lungo termine, con la diffusione e il radicamento del *life cycle thinking* e delle pratiche migliori, siano fonti di vantaggio competitivo, dal momento che si generano continuamente spinte per la ri-progettazione degli impieghi di input, di processi e delle tipologie di prodotti.

L'assetto reticolare è basilare per il consolidamento di comportamenti collaborativi, mentre la cooperazione e la condivisione di conoscenze crea circoli virtuosi di *upgrading* qualitativo,

¹³ Il concetto di piattaforma viene definito e discusso nel paragrafo 2.4.4.

innalzamento delle performances ambientali, acquisizione e mantenimento di vantaggio competitivo, maggiore profittabilità.

È chiara dunque la centralità che nella prospettiva NISP assumono la conoscenza e il ruolo diretto che le unità economico-produttive sono chiamate e svolgere in prima persona. Proprio al modello NISP è ispirato il progetto ENEA di valorizzazione territoriale di risorse in un'ottica eco-innovativa e ancorata a criteri di cooperazione tra mondo industriale e istituzionale. Il risultato del Progetto è la Piattaforma di Simbiosi Industriale, con una precisa architettura (Fig. 14).



Sulla base delle connessioni tra numerosi database e una serie di procedure di accreditamento degli agenti propensi alla collaborazione, processi di *matching* rendono possibile l'attivazione endogena di associazioni tra flussi di input e output, basati sia su algoritmi che sull'azione catalizzatrice di iniziative programmate (meeting, incontri mirati). Per questa via sono stati ottenuti risultati significativi in termini di sinergie settoriali e intersettoriali, con l'emergere di reti tra imprese e *stakeholders*, insieme all'innescò di attività collaborative multi-scala (ENEA, 2015).

Questo sintetico excursus sulle nuove metodologie di progettazione di processi e prodotti sarebbe lacunoso se non si prendesse in considerazione un altro approccio, che nel corso degli ultimi anni ha progressivamente esercitato forza attrattiva su molti ambiti disciplinari.

2.4.3 From cradle to cradle (C2C)

Il framework teorico ed operativo di C2C (Braungart e McDonough, 2002) si basa su tre principi fondamentali: i rifiuti sono alimento (*food*); l'impiego di energia solare; la diversità è fondamentale. L'adozione di questi tre principi inducono Braungart *et al.* (2007) a proporre un vero proprio cambiamento paradigmatico. Il paradigma standard è basato sull'eco-efficienza, cioè sull'accrescimento continuo del valore economico dell'output e la simultanea riduzione al minimo dell'impatto dell'attività economica sul sistema ecologico. L'assunzione di fondo di questo *frame* concettuale è la linearità dei flussi di materiali nel sistema industriale: input estratti dall'ambiente, trasformati in output, eliminati o smaltiti come rifiuti. Le tecniche eco-efficienti tendono a ridurre il volume, la velocità e la tossicità dei sistemi di flussi materiali senza alterare la linearità, contraddistinta da un progressivo degrado (*downcycling*) delle risorse, fino alla loro definitiva inutilizzabilità (*from cradle to grave*). Minimizzazione e

¹⁴ Per un'analisi dello stato dell'arte e delle problematiche connesse al SLCA si veda Sala *et al.* (2015).

smaterializzazione non modificano l'orizzonte strategico della degradazione entropica dell'attività produttive. Il *frame* C2C e il concetto centrale di eco-efficacia modificano, invece, profondamente il sistema dei flussi materiali, grazie ad una visione "metabolica", "ciclica". In sostanza si cerca di preservare lo status di risorsa dei materiali, mantenendo il loro livello qualitativo, anzi tentando anche di aumentarlo mediante lo sviluppo di conoscenze tali da rendere possibili più cicli di impiego degli stessi materiali in differenti processi economico-produttivi. L'obiettivo perseguito è quello di eliminare il concetto stesso di rifiuto (*from cradle to cradle*, appunto). Lo sviluppo e l'accumulo nel corso del tempo di conoscenze circa le possibilità di reimpiego (*upcycling*) capovolge di fatto la prospettiva del *downcycling*, con un orientamento strategico verso il reimpiego in campi differenti da individuare e/o reinventare. Assume dunque centralità non la minimizzazione dell'impatto ambientale, bensì l'uso intelligente dei materiali, che devono rimanere tali mediante la reinvenzione e l'immaginazione di modalità per il loro riuso. Il C2C genera impulsi dinamici verso la creatività nella riprogettazione e il ripensamento di prodotti e processi, con una visione per cui anche la riduzione del ciclo di vita dei prodotti non è un problema, perché fin dall'inizio sono ideate/ipotizzate le modalità di reimpiego: la visione ciclica dei sistemi di flussi materiali, che preservano qualità e produttività nel corso del tempo. L'eco-efficacia implica una serie di strategie "metaboliche" dei flussi "*cradle-to-cradle*", impennate sull'interdipendenza e produttività rigenerativa, caratteristiche dei sistemi naturali: "*In natura, tutti gli output di un processo diventano input di un altro. Non esiste il concetto di rifiuto*" (trad. nostra di Braungart *et al.*, 2006: 1342). Eco-efficacia non è però antitetica all'eco-efficienza: esse sono complementari, anche se la seconda senza la prima porta necessariamente alla riduzione dei flussi materiali. Questi elementi basilari fondano il *frame* progettuale *cradle-to-cradle*: "un modello per la progettazione dei prodotti e dei processi industriali che considera i materiali come sostanza nutritiva, permettendo un flusso perpetuo da due distinti processi metabolici: il metabolismo biologico e il metabolismo tecnico" (trad. nostra di Braungart *et al.*, 2006: 1343).

Il C2C ha ricevuto una crescente attenzione e numerose realizzazioni pratiche a differenti scale territoriali¹⁵.

La sfida intellettuale e tecnico-scientifica insita nei principi fondanti il framework teorico ed operativo C2C è stata raccolta da autorevoli studiosi a livello internazionale, ed Eppinger (2011) è uno degli studiosi di teoria della progettazione che con maggiore chiarezza ha sottolineato la concezione della sostenibilità ambientale del C2C. Egli infatti sostiene che il C2C sia da prendere in seria considerazione e da mettere in relazione con i principi fondamentali della più recente evoluzione nelle pratiche di progettazione dei prodotti, quali velocità di sviluppo, digitalizzazione dei processi, flessibilità delle piattaforme, management delle complessità, interazioni con consumatori nei processi di sviluppo dei prodotti. Il Samsung Research Institute (2010) ha descritto un vero e proprio "cambio di paradigma", illustrando i concetti del modello lineare con il *downcycling*, prima indicato e il modello circolare, basato sull'*upcycling* (Fig. 15).

¹⁵ La filosofia del C2C è stata enunciata in termini essenziali nei famosi Principi di Hannover, elaborati di Braungart e McDonough per l'organizzazione dell'Expo di Hannover del 2010 e sottoposta a copyright fin dal 1992 (The Hannover Principles, 2010). Il *cycling thinking* del C2C è stato adottato dalla provincia olandese di Limburg (più di un milione di abitanti), definendo innanzitutto il ciclo biologico e il ciclo tecnico-progettuale INTERREG IVC 2010-14 con altri 9 partner internazionali, tra cui Milano (Limburg, C2C network. Lessons to be learned, 2012). Molte altre esperienze sono state realizzate da imprese tessili, chimiche, meccaniche negli Usa, in Germania, Etiopia, Thailandia. Esperienze analizzate nella tesi di Laurea in Economia dello Sviluppo di Fabio Cibecchini dal titolo "Un mutamento di paradigma. From cradle to cradle" (2010).

Figura 15
MUTAMENTO DI PARADIGMA NELLA SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE

	Current Methods	C2C Paradigm
Goals	Reduce waste by limiting consumption and sacrificing material affluence	Waste-free generation and material affluence
Types of Recycling	<p>Open-loop with downcycling, which inevitably generates wastes</p>	<p>A closed-loop with upcycling, which wastes can be reused for new production</p>
Examples	<p>Reinforced and high gloss plastic used in TV lost its nature (high strength and high gloss) during recycling process and ends up with becoming a bench at park, a low value-added product. Finally, it cannot be further recycled and will be disposed of. : It is a system which inevitably generates wastes. This type of environmental activity focuses on using fewer resources for production and limiting consumption.</p>	<p>A PET bottle can be recycled in a closed-loop cycle to manufacture the same kind of PET bottle or high value-added product. : This system doesn't hinder production or consumption as it completely prevents creation of any wastes.</p>

Fonte: Samsung Research Institute (2010), Fig. 1

Nello stesso studio vengono delineati i due cicli (biologico e tecnico), con l'indicazione di molte esperienze reali, appartenenti a diversi settori di attività a scala internazionale: cosmetica, chimica, arredamento, tessile, materiali da costruzione, prodotti per lo sport, industria automobilistica¹⁶.

2.4.4 Circular Economy (Economia Circolare)

Una comunicazione della Commissione Europea del 2-12-2015 (EC, 2015) espone il Piano di Azione dell'Unione per l'Economia Circolare. L'assunzione di fondo è che occorra passare ad una dinamica economico-produttiva incentrata sulla progettazione eco-compatibile di processi e prodotti. Il perseguimento di tale finalità richiede che un cambiamento di paradigma nell'uso delle risorse per soddisfare bisogni umani fondamentali: mobilità, alimentazione, ambiente costruito.

La progettazione eco-compatibile significa puntare non solo sull'efficienza, ma anche su proprietà essenziali come riparabilità, durabilità, possibilità di ripristino e reimpiego di input e output. Un ampio studio a supporto della Comunicazione del Dicembre 2015 (McArthur Foundation e MGI, 2015) chiarisce come a tale fine sia cruciale un cambio di prospettiva: il "modello lineare", sintetizzato nell'espressione "take-make-dispose", va superato adottando una prospettiva sistemica, che prenda in considerazione le non linearità, i circuiti di feedback e le dinamiche complesse di cui sono pervasi i sistemi socio-economici. Ciò comporta che i processi produttivi siano pensati sulla base di uno schema radicalmente nuovo. Economia Circolare indica appunto un'economia industriale che recupera e ripristina i flussi materiali che sono di due tipi: "nutrienti biologici", progettati in modo tale che rientrino nella biosfera senza alterazioni; "nutrienti tecnici", progettati per "circolare" preservandone (anzi innalzandone) il livello qualitativo senza che entrino nella biosfera. "Chiudere il cerchio" (*closing the loop*), cioè superare il modello lineare, è particolarmente possibile nell'epoca odierna, perché esiste un potenziale di "tecnologie dirompenti", che possono consentire di ripensare la crescita senza intaccare la dotazione di risorse naturali (lo stock di "capitale naturale").

Non si tratta, però, di una questione che possa essere affrontata solo sul piano tecnico-scientifico; occorre in effetti ripensare la crescita perseguendo al tempo stesso efficienza,

¹⁶ Per un'analisi sistematica e approfondita delle realizzazioni in molti processi produttivi a livello internazionale, si veda Salah-El Haggag (2007).

ovvero un migliore uso delle risorse riducendo lo spreco, ed efficacia, con la riduzione o eliminazione delle esternalità negative.

Divengono quindi essenziali tre principi: 1) preservare e innalzare qualitativamente lo “stock di capitale naturale” (nutrienti biologici”). 2) Ottimizzare l’output ottenuto con l’impiego ripetuto delle risorse materiali (“nutrienti tecnici”). 3) Efficacia, cioè contenimento sistematico delle “perdite” di capitale naturale.

Tali principi devono diventare opportunità economiche e fondamento di nuovi modelli di business, quindi valorizzazione delle risorse grazie all’adozione di fondamentali criteri operativi: *recycle, remanufacturing, reuse*.

Su queste basi è possibile ipotizzare un nuovo modello di crescita, il “*growth within*”, cioè una visione di sistema che rigenera costantemente i propri ingredienti essenziali. La “crescita dall’interno” può essere stimolata attraverso autentiche “leve economiche”, quali i seguenti principi orientativi: 1) ridurre ed eliminare i rifiuti. 2) Comprendere che in economia tutto ha un valore. 3) Progettare pensando alla scomposizione e al reimpiego delle componenti e dei prodotti. 4) Differenziare tra componenti che si consumano (i nutrienti biologici) e quelli durevoli (tecnologici), i quali devono essere usati il maggior numero di volte possibile. 5) Reimpiegare i materiali lungo la catena del valore. 6) Eliminare delle sostanze chimiche tossiche. 7) Alimentare il sistema con energie rinnovabili. 8) Costruire la resilienza dei sistemi attraverso la diversità. 9) Modellare la struttura dei prezzi in modo che riflettano gli sforzi impiegati per produrre. 10) Pensare per sistemi (*systems thinking*).

Si tratta evidentemente di un profondo cambiamento dei modelli di business; sul piano più strettamente economico è importante enfatizzare il punto relativo ai prezzi, che devono incorporare il costo delle attività necessarie al perseguimento di efficienza ed efficacia, e quello del “pensare per sistemi”, che ancora una volta ribadisce l’importanza del superamento di visioni dei flussi unidirezionali dei materiali.

I principi possono essere resi operativi, perché la transizione verso l’economia circolare è ineluttabile, se sono coniugati con six *business actions*, sintetizzate con l’acronimo RESOLVE: 1) *Regenerate*, quindi spostando l’asse dei processi decisionali e progettuali verso la rigenerazione del sistema. 2) *Share*, ovvero condivisione e uso in comune delle risorse nel consumo e nella produzione, ripensando l’impiego di input lungo la catena del valore. 3) *Optimize*, quindi perseguendo l’efficienza. 4) *Loop*, che significa cercare di utilizzare componenti e materiali in modo tale da non intaccare i nutrienti biologici e da valorizzare quelli tecnici. 5) *Virtualization*, che implica sfruttare al massimo le possibilità offerte dalla rete. 6) *Exchange*, sostituendo materiali vecchi e non rinnovabili con nuove tecnologie (3D, macchine elettriche, sistemi di trasporto multi-modali).

È chiaro che la transizione all’Economia Circolare non è agevole ed è costosa: sono necessari investimenti in R&S, adeguate strutture di incentivi, mutamenti di competenze e “processi di aggiustamento” sul terreno occupazionale. Vi sono poi barriere culturali e quelle attinenti a posizioni di potere e interessi consolidati, ma con l’introduzione di appropriate regolamentazioni e la realizzazione di strategie collaborative non-collusive sarà possibile intraprendere una traiettoria irreversibile, con cui bisogna comunque misurarsi. Dalle considerazioni svolte si comprende come l’Economia Circolare costituisca un framework generale, entro il quale possono essere agevolmente inseriti gli approcci precedentemente esposti (LCA, SLCA, C2C9).

2.5

Modelli di organizzazione delle imprese: l'emergente varietà morfologica

2.5.1 *Complessità, modularità e quasi-scomponibilità nei cicli produttivi odierni*

Per cercare di comprendere le tendenze evolutive dei sistemi economico-produttivi e dei modelli organizzativi delle imprese, è necessario definire alcune coordinate generali dello scenario tecno-economico odierno, riprendendo elementi già introdotti, che sono qui ampliati aggiungendone altri di particolare importanza. Le prime coordinate rilevanti da assumere sono le seguenti: l'esistenza oramai consolidata di uno spazio connettivo globale e l'*Ubiquitous Computing*, ovvero la pervasività di dispositivi per l'elaborazione dell'informazione in ogni sfera o ambito della vita socio-economica, dal momento che essi tendono ad essere incorporati in ogni prodotto e processo di produzione e scambio di beni e servizi. È chiaro che *Ubicomp*, così definito dal direttore del celebre Palo Alto Research Center (PARC) Mark Weiser (1991, 1993), e spazio connettivo globale si alimentano reciprocamente attraverso la creazione di circuiti di feedback cumulativi di creazione e diffusione di sempre nuovi flussi informativi.

Gli esempi precedentemente introdotti portano a definire ulteriori aspetti, attinenti ai prodotti e ai processi, che diventano "*smart and connected*" (Porter e Heppelmann, 2014). La *Machine to Machine communication* (M2M), il *digital twin* e il *digital thread* (visti nel par 2.1) indicano che essi diventano sistemi generatori di flussi di informazioni che vengono scambiati, si sovrappongono e intersecano, mettendo in contatto un numero potenzialmente elevato e certo non calcolabile a priori di set di eventi: si pensi alle locomotive, alle auto, alle turbine dei motori per aerei, ai rilevatori che stimano parametri corporei, e così via. Insieme incalcolabili di mondi fisici e virtuali tendono così a diventare una sorta di universo totalmente connesso, che rompe barriere tra consolidati settori produttivi, consentendo di affrontare problemi rilevanti quali: cambiamenti demografici, scarsità delle risorse, mobilità sostenibile, la transizione energetica e ambientale¹⁷.

La generazione e lo scambio di flussi informativi, che si alimentano reciprocamente, sono resi possibili dal profondo mutamento della natura di prodotti e processi, i quali diventano "intelligenti" proprio perché basati su tre componenti (Porter e Heppelmann, 2014): *fisiche*, cioè quelle meccaniche, chimiche, elettriche; *smart* (intelligenti), che comprendono sensori, effettori, attuatori, dispositivi di accumulo dei dati, meccanismi di controllo, software e sistemi operativi incorporati in oggetti, insieme a strumenti hardware e software sempre migliori per l'interfaccia utente; *connective*, ovvero l'insieme di fattori hardware e software che consentono di diffondere e ricevere flussi di dati e informazioni.

Un aspetto rilevante, sul quale è opportuno soffermare l'attenzione, è costituito dall'enorme aumento del potenziale informativo prodotto dall'esistenza delle tre componenti. Sono infatti possibili in generale tre forme di connettività (Porter e Heppelmann, 2014: 67): 1) *one-to-one*, cioè la comunicazione tra singoli prodotti, tra un prodotto e il produttore o il consumatore. 2) *One-to-many*, che si ha quando un unico sistema centrale può scambiare informazioni simultaneamente con molti prodotti, come per esempio nel caso in cui la centrale GE controlli da remoto il funzionamento delle pale di una centrale eolica. 3) *Many-to-many*, ovvero la comunicazione multipla tra prodotti processi e sfere di attività socio-economica e produttiva,

¹⁷ Su temi relativi alla transizione tecno-economica si veda: EC (2011, World and European Energy and Environment Transition Outlook, specie il capitolo 2 "Energy and environment transition in the EU to 2050"). Per un'analisi delle strategie di management appropriate nei processi di trasformazione dei sistemi socio-tecnici (transizione socio-tecnica) negli scenari energetici e ambientali si veda Lombardi (2010).

come è sempre più frequente nella dinamica tecno-economica odierna in quasi tutti i settori produttivi per le tre coordinate generali introdotte all'inizio¹⁸.

Hardware, software e connettività globale cambiano la natura dei prodotti e al tempo stesso sono strettamente congiunti alla creazione di un'appropriata infrastruttura hardware e software, essenziale per generare, trasmettere e ricevere informazioni. Ci riferiamo alla strumentazione che consente di accumulare dati, per poi elaborarli, sviluppando nuove applicazioni e funzionalità attraverso algoritmi, database, piattaforme, motori di ricerca (espressione che non rende però bene l'idea dell'*analytical engines*, su cui ci soffermeremo nel cap. 3).

L'insieme di tutti gli elementi indicati costituiscono quello che Porter e Heppelmann chiamano *technology stack* (letteralmente una "pila di tecnologie"), anch'esso un sistema dinamico di componenti che permettono lo sviluppo di funzioni e monitoraggi, controlli, ottimizzazione, autonomia operativa nelle capacità di auto-regolazione in collegamento con variabili ambientali di varia natura.

Come si evince chiaramente dall'esempio iniziale della locomotiva in corsa tra Kansas City and Amarillo, intelligenza e connettività di prodotti e processi sono chiaramente connessi al fatto che essi necessariamente assumono la configurazione di sistemi *multi-layered*, in cui ciascuna componente-*layer* è soggetta ad una incessante evoluzione, perché ognuna interagisce con set di ambiti differenti, con livelli di autonomia necessari proprio per favorire interazioni dinamiche.

Su queste basi è logico che i prodotti siano sistemi complessi, cioè composti da molti elementi in grado di sviluppare molteplici forme e reti di interdipendenze, tali da modificare continuamente il quadro operativo e non di rado anche l'orizzonte strategico (come vedremo successivamente).

Diviene a questo punto necessario mettere in luce un elemento dinamico di assoluto rilievo: il *technology stack* dell'impresa e l'elevato potenziale di interdipendenze che esso può generare consentono al prodotto di assumere una configurazione intrinsecamente dinamica, perché le interazioni molteplici e a molti livelli possono incrementare continuamente la capacità di aggiungere funzionalità, con la creazione di radicalmente nuove funzionalità oppure l'introduzione di alcune già esistenti, ma non ancora incorporate. Si pensi agli occhiali a "realtà aumentata" (o *augmented reality*) nel campo dei beni culturali, come anche ai dispositivi di visualizzazione delle lavorazioni di estrema precisione nella mecatronica, oppure ancora negli esperimenti in laboratori di fisica e di chimica, in medicina.

Nuovi impieghi dei prodotti possono essere immaginati e realizzati, componenti addizionali possono modificare del tutto o parzialmente gli stessi prodotti, cambiando così con varia intensità le regole e le modalità competitive (su questo si veda il § 2.5).

Un'implicazione rilevante della possibilità di espandere le funzionalità dei prodotti, grazie alle interazioni tra flussi di informazioni provenienti da un numero estremamente elevato di fonti, è la progressiva perdita di centralità del prodotto come output da vendere, sostituita dalla centralità della erogazione dei servizi connessi al prodotto stesso, di cui si conserva la proprietà: "*shift from transactional selling towards product as service*" (cosiddetta *servitization*) (Porter e Heppelman (2014: 81).

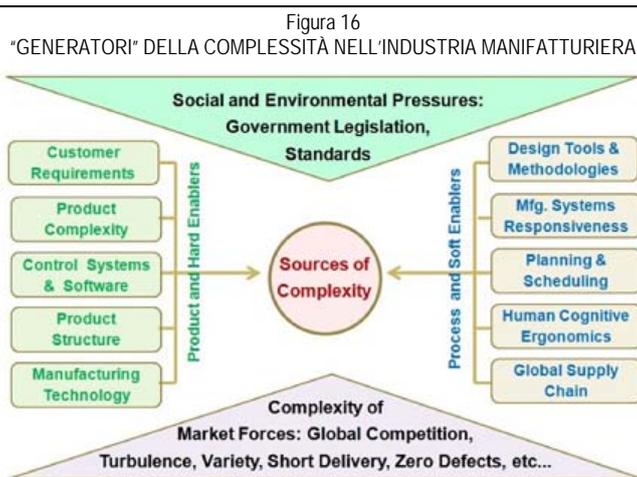
Un'altra coordinata generale che connota lo "spazio del prodotto", inteso come set di dimensioni che influiscono sul suo pattern evolutivo, è il seguente: è sempre meno rilevante la funzionalità di un singolo prodotto, mentre diviene sempre più importante la performance dell'ampio e variabile sistema-prodotto, che si modifica incessantemente sulla base degli input originati da domini conoscitivi e ambiti di interazione molteplici, a loro volta variabili.

¹⁸ Per un'analisi teorica del *many-to-many* nello spazio concettuale della produzione si veda Lombardi (2011).

Possiamo a questo punto enucleare dallo scenario tecno-economico appena descritto mediante alcune coordinate generali, una differente interpretazione del sistema economico-produttivo, che muove da una peculiare prospettiva analitica ed operativa: adottando il *sequential approach* proposto da Buenstorf (2005) possiamo concepire il processo di produzione di un bene (prodotto fisico o servizio) come una sequenza di operazioni interdipendenti, cioè di singoli step di produzione. In questa visione il processo produttivo può essere descritto attraverso due insiemi di proprietà: 1) quelle necessarie per ottenere un output tale da soddisfare le esigenze del consumatore e/o del committente (*user requirements* e *functional requirements*). 2) Quelle rilevanti per il processo, in quanto parametri da raggiungere lungo la sequenza in modo da ottenere le proprietà indicate al punto 1).

Un aspetto cruciale per conseguire i due set di proprietà è il grado di interdipendenza tra le operazioni, che è basilare ai fini della facilità con cui un processo produttivo si modifica in relazione a cambiamenti dei prezzi degli input, alla ricerca di nuove caratteristiche del prodotto, alle innovazioni tecnico-scientifiche e produttive.

La complessità dei prodotti, delle attrezzature e dei processi economici nel XXI secolo deriva dall'enorme numero e varietà di componenti, a cui vanno aggiunti l'insieme, potenzialmente enorme, di fattori e dimensioni che possono influenzare la produzione di beni e servizi. Nel caso del manifatturiero, ma il discorso vale anche per il terziario, ammesso che una distinzione netta tra i due abbia ancora un fondamento alla luce dell'analisi svolta, è individuabile un set molto ampio di generatori di complessità, imprevedibilità e incertezza (Fig. 16), dal momento che le interazioni tra di essi implicano necessariamente interazioni non lineari tra sotto-sistemi "aperti" ad una molteplicità di influenze esogene.



Fonte: ElMaraghy *et al.* (2012), Fig. 1

Non esistono definizioni univoche di complessità, peraltro declinata in diverse accezioni (complessità algoritmica, organizzativa, strutturale) ed esula dagli scopi di questo contributo un'esauriente trattazione del tema. Ai nostri fini assumiamo il concetto di sistema complesso proposto dal premio Nobel per l'Economia Herbert Simon (1962: 468): "per sistema complesso io intendo un sistema composto di un ampio numero di parti che interagiscono in maniera non semplice". Nella visione di Simon i sistemi complessi sono gerarchie composte da sotto-sistemi annidati. Il framework elaborato da Simon appare particolarmente fruttuoso per cercare di comprendere i problemi di management dei sistemi complessi come gli apparati produttivi odierni, che derivano dai processi di digitalizzazione e da pressioni competitive tali da

indirizzare verso i *Reconfigurable Manufacturing Systems* (vedi oltre). Una rappresentazione schematica molto utile è quella contenuta nella figura 17, dove si vede chiaramente l'intreccio dinamico e stratificato tra ambiti tecnico-produttivi e tecno-economici, che interagiscono all'interno di processi multi-scala, dalle strategie conoscitive a livello di micro-scala fino alle visioni strategiche, agli strumenti di progettazione e ai tools per il governo delle attività in un'ottica globale.

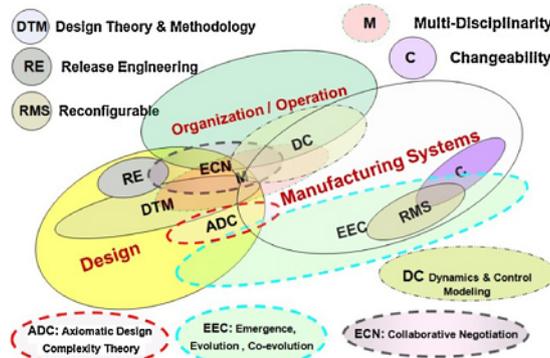
Figura 17
 COMPLESSITÀ DELLA PROGETTAZIONE, PRODUZIONE MANIFATTURIERA E DEI PROCESSI BUSINESS



Fonte: EIMaraghy *et al.* (2012), Fig. 2

In relazione ad uno scenario di questa natura è non meno complessa la rappresentazione dell'insieme di gruppi tematici, domini di conoscenza coinvolti e delle metodologie operative escogitate per tradurre ipotesi e schemi progettuali in progetti effettivi, modellati su sistemi produttivi aperti, operanti sempre in uno spazio connettivo globale (Fig. 18).

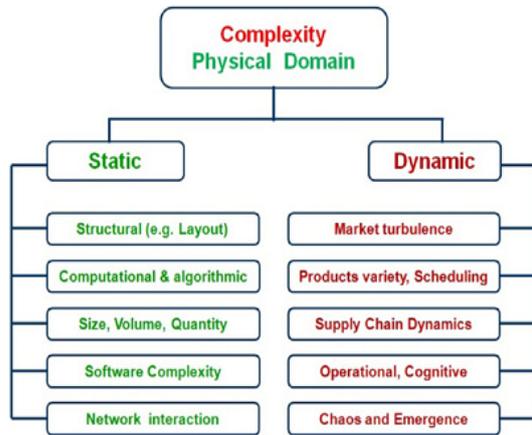
Figura 18
 COMPLESSITÀ DEI GRUPPI E DEI TEMI DI RICERCA



Fonte: EIMaraghy *et al.* (2012), Fig. 2

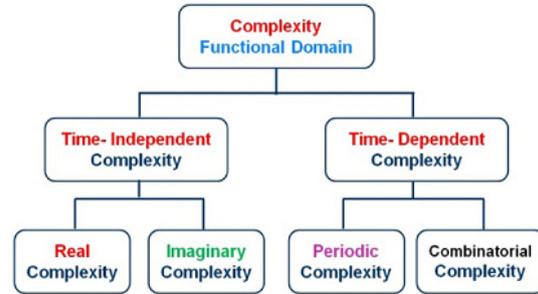
La complessità dei sistemi può essere poi declinata in relazione alle dimensioni che influenza lo spazio astratto dei processi fisici (Fig. 19) come anche lo spazio astratto delle funzioni (Fig. 20).

Figura 19
COMPLESSITÀ NEL DOMINIO DEI PROCESSI FISICI



Fonte: EIMaraghy et al. (2012), Fig. 8

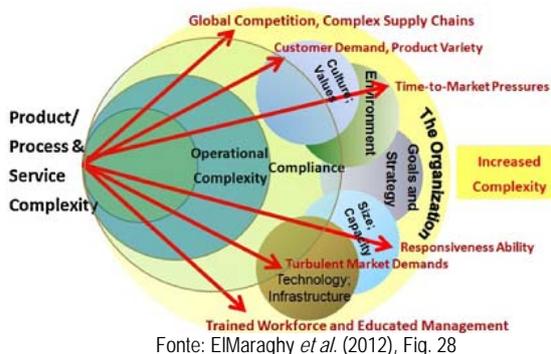
Figura 20
COMPLESSITÀ NELLO SPAZIO DELLE FUNZIONI



Fonte: EIMaraghy et al. (2012), Fig. 9

Le interazioni continue, i feedback loop e i cicli iterati di feedback contribuiscono a creare veri e propri sistemi socio-tecnici (Fig. 21), il cui governo richiede una serie di principi e tecniche operative, la cui sinossi è nella figura 22.

Figura 21
RAPPRESENTAZIONE DI UN SISTEMA SOCIO-TECNICO
NEL CICLO PRODUTTIVO



Fonte: EIMaraghy et al. (2012), Fig. 28

Figura 22
GOVERNO DELLA COMPLESSITÀ
NELLA PROGETTAZIONE E
NELLA PRODUZIONE MANIFATTURIERA



Fonte: EIMaraghy et al. (2012), Fig. 31

Variazioni in qualsiasi operazione possono innescare mutamenti in altre e quindi, sulla base del grado di interdipendenza, indurre cambiamenti differenziati lungo tutte le sequenze, a seconda dei livelli di complementarità, sostituibilità e incompatibilità. Da ciò discende un principio di fondo: grado di interdipendenza e numero delle componenti che interagiscono influenzano il livello di complessità delle sequenze di operazioni necessarie per ottenere un determinato output.

Alla luce di queste affermazioni si evince come nello scenario odierno il processo di produzione vada concepito come un caso speciale di sistema complesso elaborato da Simon (1962). Proprio a partire dal contributo di Simon ha assunto rilievo il concetto di quasi scomponibilità (*nearly decomposability*) dei sistemi naturali e sociali. Sistemi quasi-scomponibili sono i sistemi composti da una gerarchia di sotto-sistemi tra loro connessi in modo

tale che le interazioni/interdipendenze all'interno di ciascun sotto-sistema sono più forti (dinamiche ad alta frequenza nel linguaggio di Simon) di quelle tra sotto-sistemi (dinamiche a bassa frequenza).

Seguendo l'approccio sequenziale e la quasi-scomponibilità di Simon possiamo ipotizzare una gamma di possibili sequenze economico-produttive: da un estremo di "interdipendenza di grado zero" per così dire, che si ha quando le relazioni tra operazioni produttive sono predefinite e non sono ammessi circuiti di feedback, ad un grado massimo, ovvero ogni step influenza direttamente o indirettamente tutti gli altri.

È chiaro che abbiamo di fronte due modelli opposti di ciclo produttivo: da un lato vi è una sequenza perfettamente definita e potenzialmente integrata, che può consentire di perseguire efficienza ottimale nell'ottenere l'output, dall'altro vi è un insieme indefinito di potenziali sequenze, che si sviluppano concretamente sulla base delle interazioni e dei mutamenti, i quali possono a loro volta verificarsi a qualsiasi livello e in ogni componente. È chiaro che il livello di complessità delle sequenze è in generale correlato alla dinamica tecnico-scientifica e tecno-economica. In altri termini, i due modelli sono archetipi rappresentativi di organizzazione dei processi per fronteggiare la variabilità dell'ambiente competitivo e l'adattamento ad una molteplicità insorgente di fattori. Naturalmente un aspetto rilevante è anche costituito dalla tipologia dei prodotti. Gli output per decenni sono infatti stati "mono-disciplinari", nel senso che derivavano da un processo di sviluppo sequenziale o mono-disciplinare: l'assemblaggio del prodotto finale integrava componenti multiple che erano il risultato di "*simplified mono-disciplinary division of labour, either component-wise or discipline-wise*" (Tomiyama e Meijer, 2006: 29). Questa rappresentazione astratta sintetizza un processo "semplificato" e vincolato da dipendenze unidirezionali, dal momento che le alternative di scelta sono definite ex-ante per ogni step produttivo. In breve, siamo in presenza del noto approccio *top-down* di tipo fordista.

Lo scenario muta completamente se le alternative decisionali non possono essere determinate in anticipo, perché dipendono dallo sviluppo delle interazioni tra componenti a vari livelli secondo meccanismi e direttrici *bottom-up*. Innanzitutto negli ultimi decenni del secolo scorso i prodotti sono diventati *multi-components* (Ulrich, 1995), per cui le singole componenti devono essere correlate tra loro in modo da svolgere determinate funzioni. Gli elementi fisici devono quindi essere organizzati in modo tale da ottenere la corrispondenza con elementi funzionali, stabilendo al tempo stesso le regole di interconnessione tra le componenti fisiche per ottenere la congruenza tra le funzioni. A ciò si aggiunge che negli ultimi due decenni del XX secolo si è progressivamente sviluppato un ambiente tecno-economico radicalmente nuovo, contraddistinto da prodotti divenuti *multi-technology* (Pavitt, 1998: 435), cioè l'esito di combinazioni variabili di campi di conoscenze differenti e in continua evoluzione più o meno accelerata in meccanica, elettronica, fisica, software. 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 aggiungono poi, come abbiamo precedentemente indicato, le potenzialità connesse al *many-to-many*.

Siamo quindi in uno scenario dove è possibile immaginare l'estremo opposto: la completa scomponibilità dei processi, tendendo presente che tra i due estremi 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.

Un framework teorico ed operativo con cui è stato affrontato questo tipo di problematiche è quello basato sul concetto di modularità o sistema modulare. Il concetto di modularità,

impiegata in molte discipline¹⁹ anche se non definito in modo univoco dall'enorme letteratura, può essere comunque enunciato chiaramente nei seguenti termini. Si ha modularità quando un prodotto è scomponibile in componenti e sotto-componenti "assemblabili", che costituiscono i *building blocks*, i moduli appunto, sulla base delle seguenti caratteristiche: 1) minima dipendenza e similarità tra i moduli, progettati e funzionanti in maniera relativamente autonoma, ma che interagiscono in modo da costituire un "tutto integrato". 2) Più intense e frequenti interazioni si sviluppano all'interno di ciascun modulo.

Affinché ciò avvenga occorre che la modularità assuma tre caratteristiche basilari: 1) indipendenza tra gli attributi/proprietà/funzioni di ciascun modulo. 2) Indipendenza dei processi, nel senso che il ciclo di vita di ciascuna componente in un modulo è scarsamente dipendente da componenti esterne al modulo stesso. 3) Similarità di processo, che attiene alla compatibilità e similarità di vita delle componenti interne a ciascun modulo.

In sostanza, quindi, la modularità significa che un prodotto o un processo derivano dal combinare sotto-sistemi progettati indipendentemente, ma che sono compatibili e dinamicamente funzionali attraverso due elementi essenziali: 1) esistenza di informazioni visibili e di regole di progettazione (*design rules*), che stabiliscono l'architettura di processo e di prodotto, le modalità di interazione (cosiddette regole di interfaccia), cioè gli standard da rispettare per la conformità alle regole costitutive (*visible information*). 2) Informazione nascosta (*hidden information*), che sono i parametri decisionali attinenti a ciascun modulo, che non devono essere necessariamente comunicati agli altri²⁰.

È condivisibile l'affermazione che ogni sistema è in qualche misura modulare: pochi sistemi sono infatti organizzati in modo tale che tutte le parti/componenti interagiscano e si influenzino reciprocamente. Al tempo stesso non esistono sistemi del tutto scomponibili in entità elementari distribuite casualmente, come nei gas²¹, che poi si scambiano flussi informativi e materiali in modo tale da ottenere un output definito.

In termini generali, quindi, è da ritenere fondato parlare di grado di modularità basandosi sui concetti basilari definiti da Simon (dinamica ad alta e bassa frequenza) e quelli enunciati da Baldwin e Clark (*hidden and visible information* in 1997, 2000), tenendo presente che il grado di modularità di un sistema varia a seconda delle proprietà dell'ambiente competitivo e della dinamica tecno-economica. Ciò spiega anche perché il concetto appare meno ben definito e più controverso nella letteratura manageriale, che si è sviluppata intorno a tre principali filoni di ricerca (Campagnolo e Camuffo, 2010): 1) modularità nella progettazione del prodotto; 2) modularità del sistema di produzione; 3) modularità nella progettazione organizzativa.

In letteratura sono anche discussi ampiamente vantaggi e costi della modularità. Tra i primi vi è certamente la possibilità di introdurre mutamenti nelle operazioni di ciascun modulo senza necessariamente modificare componenti che appartengono agli altri moduli di un sistema. Per tale via sono facilitate la flessibilità e la variabilità, che possono essere generate parallelamente, purché siano rispettate le *design rules* prima indicate²². Un altro beneficio della modularità può essere visto nelle economie di scala realizzate mediante l'uso di moduli in "famiglie di prodotti": si pensi, ad esempio, alle routines e alle librerie nel caso del software, alla moltiplicazione di componenti aggiuntive (materiali e immateriali) nelle auto e negli aerei.

¹⁹ Biologia (Callebaut e Rasskin-Gutman, 2005), teoria manageriale (Baldwin e Clark, 1997, 2000; Campagnolo e Camuffo per una rassegna della letteratura manageriale in merito), Ingegneria (Gershenson *et al.*, 2003), teoria dell'innovazione (Ozman, 2011).

²⁰ Il concetto di modularità è particolarmente diffuso in molti settori di attività: auto, computer, telefonia, servizi finanziari, aerospaziale (si veda Campagnolo e Camuffo, 2010).

²¹ (Simon, 1962).

²² Esempi di variazioni di elementi appartenenti ai singoli moduli senza provocare modificazioni nelle altre componenti del sistema abbondano nelle auto, nei telefoni, negli aerei, nell'industria del software, e in molte altre.

Altro aspetto favorevole molto importante è la facilità con cui si possono ideare e realizzare miglioramenti dei prodotti partendo da moduli funzionali, così da poter aumentare la varietà dei prodotti stessi, che inizialmente magari avevano un piccolo insieme di componenti. Avendo ridotto la complessità dei sistemi grazie alla modularità, è possibile altresì ridurre il *lead-time* e al tempo stesso rendere più agevole la progettazione e i test di verifica, che avvengono sulla base dei raggruppamenti di operazioni e componenti.

Naturalmente la modularità ha anche delle controindicazioni, individuate essenzialmente in questi fattori: 1) l'architettura del prodotto resta prevalentemente statica, a causa del riuso delle componenti (Ulrich e Tung, 1991). 2) Non è agevole perseguire l'ottimizzazione, a causa dell'assenza di flussi globali condivisi e di volumi elevati²³. 3) Vi può essere un aumento dei costi variabili, in conseguenza di quanto indicato al punto precedente, ma bisogna comunque tenere presente che questi possono essere contenuti attraverso il reimpiego nelle famiglie di prodotti.

Esistono inoltre aspetti pregiudizievoli di fondo, che vanno tenuti in debita considerazione ai fini dell'analisi della dinamica innovativa. L'esistenza di *design rules* da rispettare implica limiti allo spazio della progettazione innovativa delle componenti, per cui un approccio modulare può far perdere di vista le potenzialità e quindi possibilità di un sostanziale incremento delle performances globali di un processo o di un prodotto. Comunque, tenendo anche presente che la modularità non può essere perfettamente realizzata nello sviluppo dei prodotti reali (Buestorf, 2005: 235), appare fondata la tesi dello stesso Buestorf che "la modularità nella progettazione di un prodotto si riferisce a specifici livelli di sotto-sistemi componenti" (ivi: 233).

Alla luce delle riflessioni svolte sembra opportuno mettere al centro dell'analisi, ai fini del presente contributo, il concetto più generale di scomponibilità del processo di produzione, "inteso come la possibilità di modificare singole operazioni di produzione indipendentemente da tutte le altre, senza la specificazione deliberata di un disaccoppiamento di interfaccia ex ante" (ivi: 235). La scomponibilità così intesa porta ad adottare una visione in termini di domini di conoscenze e ambiti conoscitivi che alimentano i processi di produzione e le operazioni attuali e potenziali delle sequenze produttive. La *knowledge-based decomposability* può essere allora molto utile per comprendere meccanismi e modalità attraverso cui si realizzano flessibilità e adattabilità, delle quali parleremo ampiamente in relazione alle piattaforme destinate ad assumere una rilevanza primaria nello scenario dell'Industria 4.0 e della Fabbrica Intelligente.

2.5.2 *Uno sguardo retrospettivo alla sequenza di modelli organizzativi dell'“impresa moderna”*

Ripercorriamo allora le linee generali di alcune forme organizzative dell'impresa moderna, a partire dalla moderna *corporation*, così come è stata analizzata da Alfred D. Chandler Jr (1977, 1986, 1992). Al centro della riflessione di Chandler è il fatto che nella seconda metà dell'800 negli Usa si è realizzato il passaggio dall'Impresa unitaria (*U-form*) all'impresa multi-divisionale (*M-form*), che è poi diventata la forma dominante per gran parte del '900. Fino alla prima metà dell'800 negli Stati Uniti operavano imprese in cui i processi decisionali erano essenzialmente basati su singole persone: un imprenditore che lavorava da solo e al massimo con pochi partner. Imprese individuali (*single-unit*) gestite direttamente dai proprietari costituivano la regola nell'industria manifatturiera, e in quella mineraria, in agricoltura e anche

²³ Bisogna però osservare che gli svantaggi indicati al punto 2 sembrano in parte superati, se si pensa che, grazie alle innovazioni tecnologiche, generate nella traiettoria delle ICT, è oggi possibile perseguire simultaneamente economie di scala e di varietà, enormi volumi di prodotti con incorporate un enorme numero di combinazioni possibili tra componenti attuali e cambiate nel corso del tempo.

in quei settori dove erano anche presenti capisquadra (*foreman*): tessile, acciaio, cotone, piantagioni di riso e tabacco. Un'organizzazione sistematica interna non esisteva e la base informativa per prendere decisioni era prevalentemente esterna, quasi mai accentrata e completa. Dopo la metà dell'800 i grandi cambiamenti delle tecnologie di produzione e nelle infrastrutture di trasporto e comunicazione (ferrovie, navigazione, telegrafo), hanno consentito alti volumi di produzione, a cui si sono aggiunti elevati volumi di distribuzione. Si sono create le condizioni per lo sviluppo dell'impresa moderna multi-funzionale, che aveva una struttura organizzativa interna per governare flussi produttivi e distributivi, basati su impianti ad alta intensità di capitale. L'accesso rapido alle informazioni e i processi di subfornitura diventati più complessi hanno richiesto lo sviluppo di differenti sotto-unità/attività e hanno quindi generato l'esigenza di un coordinamento centralizzato, di pianificazione e valutazione dell'attività. Nasce così l'impresa manageriale moderna, dove la gerarchia manageriale persegue, grazie ad un nuovo sistema di flussi informativi, processi decisionali volti all'efficienza nella forma di aumento della velocità e del volume di produzione, così da assicurare economie di scala. Queste esigenze hanno al tempo stesso innescato spinte verso il controllo a monte dei flussi di input necessari per ottenere continuità dei flussi e quindi efficienza nell'impiego delle risorse. Di qui l'emergere dell'impresa integrata, dove la "mano visibile" del management si aggiunge a quella "invisibile" del mercato. La "mano visibile" emerge in conseguenza delle esigenze di governo di processi economico-produttivi divenuti sempre più complessi per le innovazioni intervenute nelle infrastrutture materiali e immateriali (Chandler, 1973: 7-10): 1) l'accresciuta velocità dei mezzi di trasporto e comunicazione spinge le grandi imprese a organizzare la distribuzione dei beni. 2) Un insieme di elementi porta all'aumento di velocità dei processi all'interno delle imprese: la creazione del mercato nazionale e di massa negli Usa, l'impiego di macchinari sempre più perfezionati e l'obiettivo dell'utilizzo efficiente dell'energia favoriscono il miglioramento organizzativo, che retroagisce positivamente sugli altri elementi; le esigenze di alta velocità nel generare volumi crescenti di prodotto (*high velocity of throughput*) diventano dominanti in settori fondamentali come l'acciaio e la meccanica; il "management sistematico" diviene essenziale per il governo dei flussi con proprietà molto differenti da quelle del passato e grazie ad esso la grande impresa integrata può perseguire le *economies of speed*. A tutto ciò si aggiunge, inoltre, il fatto che negli ultimi decenni del XX secolo si produce un altro profondo mutamento: inizia e poi si sviluppa, specie negli USA e in Germania, una traiettoria di crescita economica incentrata sull'"ampliare l'utilizzo degli input di capitale e lavoro in una traiettoria di crescita a maggiore intensità di conoscenza"(trad. nostra di Mowery, 2010: 488). Nella dinamica tecno-economica a livello nazionale e internazionale si producono una serie di forti spinte da un lato verso la diversificazione delle attività e dei mercati di sbocco, dall'altro verso la cosiddetta "istituzionalizzazione dell'innovazione" (Mowery e Rosenberg, 2001), cioè la creazione delle funzioni di R&S interne alle grandi imprese dell'industria chimica, meccanica, elettrica, automobilistica. Per questa via le innovazioni tecnico-scientifiche e produttive divengono più intense e interagiscono in modo cumulativo con la tendenza alla diversificazione delle attività e al management sistematico di flussi con un aumentato grado di complessità. Nasce così negli Usa nei primi decenni del XX secolo e poi si diffonde successivamente in tutto il mondo il modello di impresa multi-funzionale, la cosiddetta "Forma M", composta di una "serie di divisioni operative quasi autonome e di un ufficio generale" (Chandler, 1987: 18-19).

La struttura integrata multi-funzionale si basa sulla stratificazione di funzioni manageriali, perché la forma-M distribuisce le articolazioni funzionali e le responsabilità nelle varie *business units* per fronteggiare il sovraccarico informativo (*information overload*) associato ad una struttura di imprese sempre più grandi e diversificate (Mowery, 2010). La forma-M si basa,

infatti, sulla distinzione tra decisioni operative su base giornaliera (*day-to-day*) e strategiche²⁴, data l'importanza attribuita alla centralità dell'idea del *knowledge management* per l'evoluzione dell'impresa-M, perché le capacità tecniche, funzionali e manageriali sono incorporate nell'organizzazione più che negli individui e la grande impresa è “creatrice e depositaria di prodotti che portano con sé la propria conoscenza organizzativa” (trad. nostra di Chandler, 2005: 6, cit. in Mowery, 2010: 495). L'impresa-M si configura, quindi, come “*integrated learning base*”, che sostanzia e delimita la capacità delle imprese di entrare in un nuovo mercato o in un nuovo business.

La dinamica tecno-economica della fine del '900, come precedentemente accennato, ha creato un ambiente competitivo radicalmente nuovo: “Gli artefatti tecnologici e il mondo economico e organizzativo di cui fanno parte sono complessi e in continuo cambiamento: ciascuno di essi si compone di un numero così elevato di variabili e interazioni da rendere impossibile una sua completa modellazione o la predizione e il controllo del proprio comportamento attraverso esplicite teorie codificate e linee guida.(trad. nostra di Patel e Pavitt, 1997: 143). I prodotti sono diventati *multi-technology*, il che significa che processi e prodotti hanno basi di conoscenze (*knowledge-base*) multiple, perché evolvono incessantemente le esigenze funzionali e le richieste della domanda in un ambiente definito *hypercompetitive* (D'Aveni et al, 1995; D'Aveni e Dagnino, 2010) e “ad alta velocità” (McCarthy *et al.*, 2010).

Il concetto di velocità ambientale è un tipico concetto multi-dimensionale (McCarthy *et al.*, 2010), perché molte dimensioni influenzano la rapidità dell'introduzione e diffusione dei cambiamenti, ciascuno con un proprio tasso e una propria direttrice di variazione. Il tasso di variazione è l'ammontare di mutamento in un periodo di tempo definito. Per la direttrice di variazione il discorso è più complicato, perché esso non si presta ad una stima uniforme per diversi settori. Un primo aspetto da prendere in considerazione può essere comune a tutti: la continuità o discontinuità.

Alla luce di queste distinzioni di fondo possono essere definiti una serie di indicatori: 1) tassi di cambiamento tecnologico, (stimato attraverso i brevetti; 2) la velocità di introduzione e 3) ricambio dei prodotti; 4) la rapidità sia della domanda nel cambiare *requirements* e 5) i mutamenti nella regolamentazione dei mercati e delle regole competitive, le quali poi condizionano fortemente la 6) redditività delle imprese. Le sei dimensioni sono facilmente espandibili fino a farle corrispondere al concetto di piattaforma, se aggiungiamo quelle inerenti agli ecosistemi di attività e processi economico-produttivi, dove si realizzano scambi tra agenti a molti livelli e in differenti ambiti tecno-economici.

Frequenti e discontinui cambiamenti di domanda, tecnologie, regole della competizione, regolamentazione dei mercati implicano l'interazione e l'influenza dei contesti istituzionali e organizzativi in cui avvengono. Poiché le molteplici dimensioni possono avere differenti tassi di variazione e possono percorrere numerose direttrici di cambiamento, la forma-M di organizzazione diviene “*unable to match tidily each field of its technology to one product or to one division*” (Pavitt, 1998: 435). La base di conoscenze di processi e prodotti può infatti cambiare in ciascuna dimensione costitutiva, cioè in ampiezza e profondità (*breadth and depth*, Ozman, 2010), ovvero in varietà e in complessità dei meccanismi generatori e dei flussi informativi da intercettare ai fini della produzione di output. Siccome diviene sempre più evidente che, data la natura *multi-technology* di questi ultimi, nessuna unità economico-produttiva può possedere tutte le conoscenze necessarie per produrli, ne discende che varietà e complessità della *knowledge base* generano pressioni evolutive verso nuove forme di organizzazione e di architettura delle sequenze di operazioni.

²⁴ “Si può definire *strategia* la determinazione delle mete fondamentali o degli obiettivi di lungo periodo di un'impresa, la scelta dei criteri di azione e il tipo di allocazione delle risorse necessarie alla realizzazione degli obiettivi suddetti” (Chandler, 1987: 48-49)

In uno scenario di questo tipo l'innovazione diviene un'attività combinatoriale: “*a recombination activity in which a particular knowledge type is applied to a new context, then innovation can be seen as a change in one or both dimensions of the knowledge base of products*” (Ozman, 2010: 1130), appunto l'ampiezza e la profondità della base conoscitiva. Data l'incessante e diversificata attività innovativa il potenziale di variazione delle tipologie di beni non è calcolabile a priori, perché dipende dalle strutture interattive e dai flussi informativi che si creano tra una molteplicità di soggetti ed entità.

2.5.3 *La dinamica tecno-economica e il polimorfismo organizzativo*

La *knowledge base* dei prodotti modella i processi di scambio informativo tra le unità che concorrono alla realizzazione delle varie operazioni. Ai fini del perseguimento di economie di varietà, ampliamento della gamma di componenti e prodotti, incremento della loro differenziazione, creazione di nuovi output), è necessario ricorrere ad una molteplicità di competenze, mentre la complessità dei processi e l'intensità dei cambiamenti tecnologici accelerano il ciclo di vita delle conoscenze e i tempi di accesso al mercato, con lo sviluppo di nuove complementarità e interdipendenze tra domini conoscitivi, l'emergere di nuovi *trade-offs*, l'aggiunta di nuove funzionalità. In breve, le dotazioni conoscitive cambiano, le competenze necessarie possono generare nuove combinazioni, attraverso l'aumento di conoscenze innovative e/o il reimpiego del tutto o in parte di quelle già esistenti, ma modificate in estensione ed intensità.

Possiamo quindi definire i prodotti in termini di combinazioni di basi conoscitive, che evolvono senza sosta per fronteggiare emergenti fabbisogni economico-produttivi e socio-economici. È logico allora che tutto ciò delinea un quadro estremamente variabile, incentrato su un *mapping dinamico* tra set di basi conoscitive, competenze tecnico-scientifiche, modelli di organizzazione delle strutture interattive, team tecnico-produttivi *multi-firm*. Gli elementi messi in evidenza portano a vedere come la collaborazione tra imprese e centri di ricerca sia un elemento centrale non solo per collocarsi sulla frontiera tecnico-scientifica e produttiva, ma anche per non essere “spiazzati” rispetto a nuove traiettorie di ricerca e quindi restare su direttrici in via di completo superamento. Gli *interfirm networks* possono assumere una miriade di forme: alleanze strategiche, partnership progettuali, reti stabili e informali di *open innovation* e *co-creation* nell'ambito di piattaforme (vedi il paragrafo successivo).

Questa varietà morfologica fa risaltare l'importanza -anche dal punto di vista operativo- del concetto di modularità, concepita come “un continuum che rappresenta i differenti gradi di separazione e le possibilità di combinazioni tra le componenti di un sistema, sulla base sia della forza dei legami tra di esse che del grado in cui le “leggi” dell'architettura del sistema consentono (o proibiscono) il mix e le associazioni tra le stesse componenti” (trad. nostra di Schilling, 2000: 312).

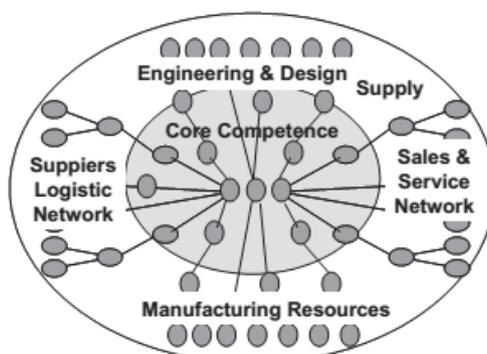
L'adozione della prospettiva incentrata sul *sequential approach*, correlato alle peculiarità combinatorie della dinamica tecno-economica odierna, fondano la tesi che l'evoluzione tecnico-produttiva attuale innesca spinte, endogene ed esogene alla sfera economica in senso stretto, verso il polimorfismo organizzativo, perché la varietà architettonica dell'organizzazione dei processi di produzione è un'implicazione necessaria della natura dei prodotti stessi nello scenario descritto finora.

Gli output, beni e servizi che si scambiano sui mercati possono essere definiti sistemi complessi multi-disciplinari (Tomiyama, 2012): complessi per il numero elevato di parti interdipendenti di cui sono composti²⁵ e multi-disciplinari per l'insieme variabile di discipline e

²⁵ Si pensi ad esempio che solo la cabina di un Airbus ha oltre un milione e mezzo di componenti; la Toyota Prius e l'iPhone funzionano probabilmente con un software il cui codice sorgente ha più di 10 milioni di linee (Tomiyama, 2012).

domini di conoscenze a cui occorre attingere per introdurre nuove funzionalità, innovare processi e prodotti e creare nuovo valore da quelli esistenti. Il trend indicato appare chiaramente irreversibile e inarrestabile, perché vi sono pressioni evolutive crescenti sui mercati verso migliori performances, più alta qualità, costi contenuti, nuove esigenze da soddisfare. L'orizzonte competitivo è ad elevata turbolenza e richiede rapidità innovativa, flessibilità strategica e operativa, adattabilità delle competenze, capacità di anticipare e cogliere ondate innovative, agilità nell'organizzazione. Le proprietà indicate e la complessità-multidisciplinarietà dei prodotti rendono improbabile, per non dire impossibile, che si possa pienamente controllare tutto l'insieme di domini conoscitivi utili per l'ottenimento di un output. Di qui la traiettoria verso la nuova configurazione dell'industria manifatturiera, per la quale già nei primi anni '2000 è stata individuata la tendenza verso "un nuovo modello di fabbrica come sistema complesso e trasformabile" (Westkamper, 2007: 419). "Il Sistema "Fabbrica" deve essere visto come una rete di processi ad alto valore aggiunto"(ivi). L'efficienza dell'attuale industria manifatturiera è strettamente connessa all'efficienza del network di funzionalità distribuite e dalle sinergie tra operazioni interne ed esterne (Fig. 23).

Figura 23
IL SISTEMA-IMPRESA COME RETE DI FUNZIONI DISTRIBUITE



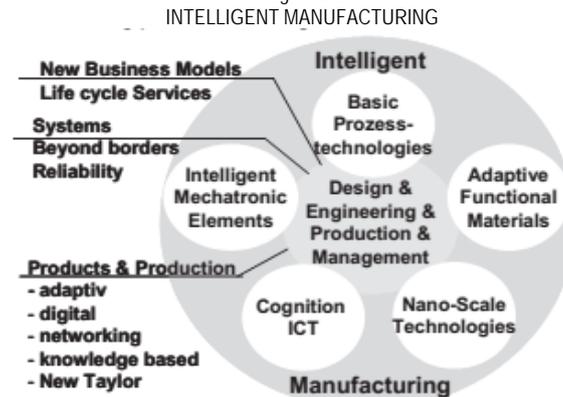
Fonte: Westkamper (2007), Fig. 1

La topologia connettiva del network, cioè la struttura e la dinamica delle connessioni, influenza le modalità di trasformazione e adattamento delle varie componenti, causando mutamenti dei prodotti, dei modelli di management e delle tecnologie da impiegare. In un ambiente ad elevata turbolenza come quello odierno si susseguono a ritmo incessante invenzioni e innovazioni nei materiali, che divengono adattivi e funzionali, cioè in grado di offrire un potenziale di applicazioni solo parzialmente noto²⁶, con inevitabili e poco prevedibili possibilità di sviluppo di conoscenze integrative delle differenti basi conoscitive, elaborate anche a livello di nanoscala in microelettronica, medicina, chimica, fisica. Si comprende allora come il quadro generale e gli ingredienti fondamentali dell'industria manifatturiera siano investiti da processi di trasformazione di lungo termine, per cui dipendono dalle strategie che agenti economici e Istituzioni sono in grado di elaborare e attuare nell'ambito delle traiettorie emergenti.

L'*Intelligent Manufacturing* (Fig. 24) è quindi completamente differente dall'industria manifatturiera conosciuta finora.

²⁶ Si pensi al grafene, borografene, stanene, fullerene, ecc. Per un'analisi dei nuovi materiali a 2 e 3 dimensioni si veda l'articolo di *Nature* (Gibney, 2015).

Figura 24



Fonte: Westkamper (2007), Fig. 3

Siamo di fronte ad attività funzionali, ad un mix variabile di processi, domini di conoscenze, *requirements* sempre nuovi da soddisfare, mutevoli obiettivi di performance. La globalizzazione dei cicli produttivi, la tendenziale individualizzazione degli stili di vita, il confronto tra culture molto diverse, la crescente sensibilità verso l'ambiente naturale, i problemi di inquinamento e la scarsità delle risorse alimentano una dinamica tecno-economica senza soste, con il prodursi di discontinuità evolutive, come la diffusione delle "tecnologie dirompenti" (cfr. cap. 5). La competizione diviene più agguerrita e ininterrotta a livello globale, generando pressioni evolutive verso sistemi di produzione che cercano sempre nuove soluzioni a problemi tecnico-produttivi. Emerge, pertanto, l'esigenza di un nuovo approccio nell'industria manifatturiera, affinché sia in grado di rispondere a precisi fattori competitivi, emergenti nello scenario descritto: 1) capacità di realizzare un aggiustamento molto rapido rispetto alla necessità di introdurre modifiche, connesse alla dinamica tecnologica; 2) attitudine a integrare velocemente nei sistemi esistenti nuove funzioni e tecnologie di processo; 3) facilità di adattamento a quantità variabili di prodotto.

L'acquisizione di tali proprietà richiede il superamento di consolidati modelli di organizzazione della produzione e delle relazioni di interdipendenza all'interno della "sequenza di operazioni".

Per comprendere meglio sottolineiamo altri due aspetti molto interessanti: agilità e riconfigurabilità.

Nell'era della conoscenza come quella odierna, quelle sono due proprietà che attengono a differenti sfere o componenti delle attività economico-produttive. La prima attiene all'impresa e in genere all'organizzazione delle attività nel suo complesso. Essa si riferisce alla capacità di un'impresa di "identificare e catturare opportunità più velocemente dei competitori" (Sull, 2010: 1). Specie in contesti caratterizzati da un'elevata frequenza di cambiamenti imprevedibili e da incertezza, l'agilità organizzativa è "una risposta esauriente alle sfide di mercato per acquisire vantaggi da mercati globali che cambiano rapidamente, si frammentano continuamente, fronteggiano rapidi cambiamenti, e competono su alta qualità, elevate performance e personalizzazione di beni e servizi (trad. nostra di Mehrabi *et al.*, 2000: 407, citazione da libro di Goldman, Nagel e Preiss, *Agile competition and Virtual Organizations: Strategie for Enriching the Customer*). Si tratta, quindi, di un principio concernente la filosofia di fondo dell'impresa nell'affrontare le sfide poste dall'ambiente tecno-economico contraddistinto da volatilità, incertezza, *hypercompetition*.

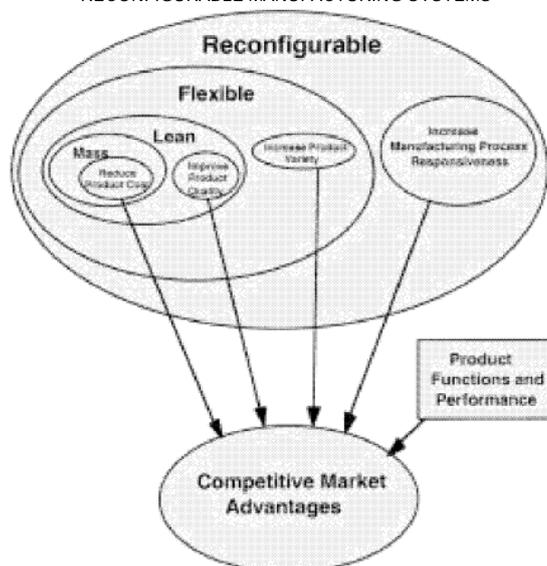
La riconfigurabilità riguarda invece i mutamenti delle singole componenti e la configurazione complessiva dei sistemi di produzione secondo le linee generali

precedentemente indicate. Essa di conseguenza appare condizione necessaria, ma non sufficiente, per l'agilità nell'attuale era ad alta intensità di conoscenze.

In particolare, però, acquisisce peculiare importanza la proprietà dei processi manifatturieri di essere "reconfigurabili", ma ciò vale evidentemente per ogni tipo di attività economica. *Reconfigurable Manufacturing System* (RMS) significa appunto che il sistema manifatturiero assume caratteristiche aggiuntive rispetto alla flessibilità, perché il sistema stesso può cambiare: i moduli interni ed esterni. Hardware e software possono essere tempestivamente modificati e riorganizzati. I sistemi di produzione divengono quindi "indeterminati" (*open-ended*) e continuamente migliorati e adattati²⁷.

Il nuovo paradigma manifatturiero tende a raggiungere nuove caratteristiche di performance e mostra la capacità di perseguire gli stessi obiettivi di efficienza dei precedenti paradigmi (Fig. 25), unitamente alla modificabilità strutturale e operativa.

Figura 25
RECONFIGURABLE MANUFACTURING SYSTEMS



Fonte: Mehrabi *et al.* (2000), Fig. 1

Le proprietà basilari che consentono ai RMS di ottenere output appropriati per un ambiente competitivo ad elevata turbolenza sono le seguenti: 1) *modularità* di tutte le componenti hardware e software del sistema. 2) *Integrabilità*, nel senso che i sistemi sono progettati in modo tale che l'introduzione di nuove tecnologie e input è facilitata e tendenzialmente rapida. 3) *Diagnosability*, intesa come capacità di identificare tempestivamente parti di qualità degradata e problemi di affidabilità. 4) *Customization*, ovvero la versatilità nello sviluppo e nell'espansione del sistema, al fine di trovare soluzioni specifiche per *requirements* variabili: famiglie di prodotti, individualizzazione delle esigenze da soddisfare, segmentazioni variabili della domanda.

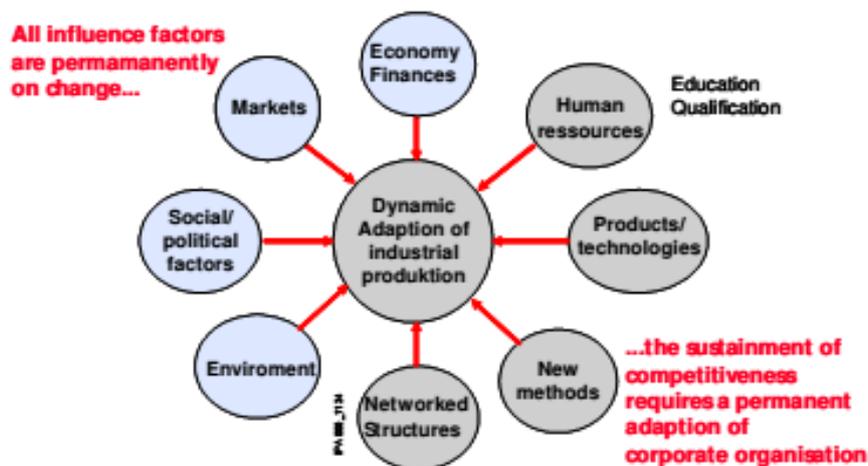
Il focus della nostra analisi e della letteratura internazionale in tema di management verte sul manifatturiero, perché è nel suo radicale processo di trasformazione, in atto da alcuni anni, che si decidono le potenzialità di crescita e sviluppo di un Paese o di una regione in un quadro competitivo contraddistinto da un'accelerata competizione, da un'estrema diversificazione delle

²⁷ "A reconfigurable systems designed for rapid adjustment of production capacity and functionality in response to new circumstances, by rearrangement or change of its components" (Mehrabi *et al.*, 2000: 405-406).

tipologie di output da produrre, da un'elevata intensità di generazione dei flussi di informazione e conoscenze a scala globale, e dall'emergere di fattori competitivi sempre nuovi in termini di qualità e di performance ottenute. Poiché i parametri della competizione mutano continuamente, è cruciale l'abilità del sistema manifatturiero di percepire e reagire ai cambiamenti, possibilmente anticipandoli. Nell'epoca presente è peraltro possibile superare due dicotomie, che hanno a lungo dominato le strategie produttive: 1) economie di scala vs economie di varietà. 2) Orientamento alla pianificazione vs orientamento al valore del prodotto (El Maraghy *et al.*, 2013).

La modularità e le logiche ingegneristiche e tecno-economiche, che assumono la centralità delle variazioni, sintetizzate nella riconfigurabilità, permettono di superare queste dicotomie. La digitalizzazione manifatturiera consente di trattare in modo dinamico la multidimensionalità dei processi tecno-economici, in cui molti fattori dinamici sono causa di elevata turbolenza e complessità (Fig. 26).

Figura 26
FATTORI DI TURBOLENZA, ADATTAMENTO DINAMICO DELLE STRUTTURE.



Fonte: Westkamper (2007), Fig. 2

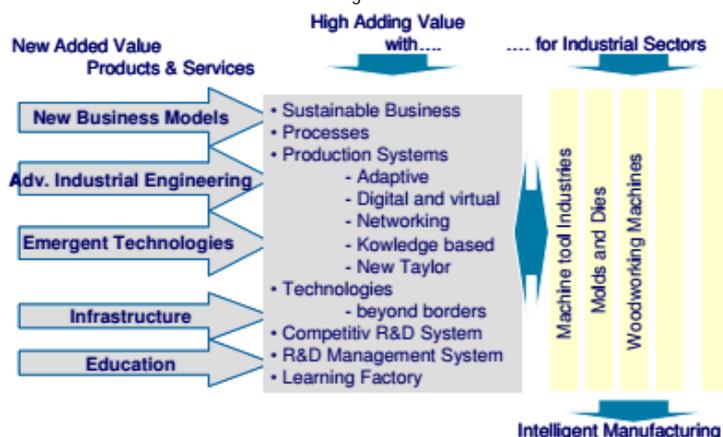
La nuova era dell'industria manifatturiera implica che, in presenza di cambiamenti imprevedibili e quindi di elevata incertezza, i sistemi di produzione acquisiscano -grazie alla digitalizzazione- alcune proprietà basilari (Koren *et al.*, 1999): 1) adattabilità e scalabilità²⁸ per reagire a variazioni quantitative dei mix di domanda; 2) estrema flessibilità di processo, componenti e output; 3) facilità di riordinamento tra le componenti hardware e software, anche e soprattutto in seguito all'introduzione di innovazioni dirimpenti.

È chiaro che "responsive systems" con tali caratteristiche devono adottare una prospettiva strategica olistica, che cerchi di integrare un ampio set di processi ed elementi, che concorrono alla dinamica tecno-economica (Fig. 27).

²⁸ Il termine scalabilità, nelle telecomunicazioni, nell'ingegneria del software, in informatica e in altre discipline, si riferisce, in termini generali, alla capacità di un sistema di "crescere" o diminuire di *scala* in funzione delle necessità e delle disponibilità (Wikipedia).

Nel mondo degli affari, in particolare in quello delle startup il termine scalabilità è utilizzato per classificare il business model dell'attività o della start-up stessa. Avere un business model scalabile significa che la propria attività è facilmente replicabile ed è pertanto possibile aumentare le dimensioni e il giro di affari in maniera anche esponenziale senza stravolgerne l'impostazione. www.imprenditoreglobale.com.

Figura 27

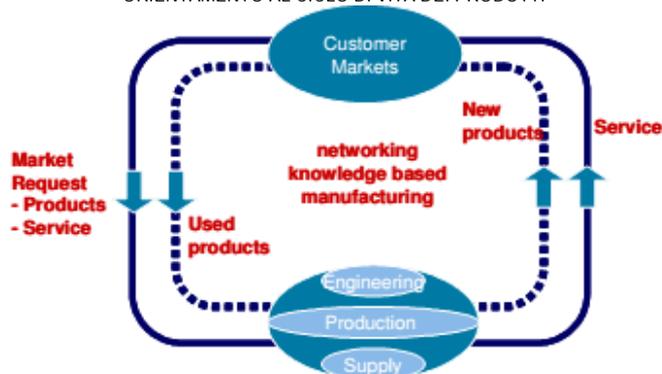


Fonte: Westkamper (2007), Fig. 3

Questo framework sarebbe però parziale se non mettesse al centro l'intensità e la frequenza dei cambiamenti nel ciclo di vita dei prodotti, in una serie di cicli di feedback cumulativi, il cui esito è necessariamente la Fabbrica Intelligente, l'Industria 4.0 o l'*Industrial Internet*, a seconda dell'espressione che si preferisce utilizzare (Fig. 28).

Figura 28

ORIENTAMENTO AL CICLO DI VITA DEI PRODOTTI



Fonte: Westkamper (2007), Fig. 4

Possiamo allora comprendere come su tali presupposti si possano concretizzare nuovi obiettivi: 1) processi tecnico-produttivi ad alta performance. 2) Incremento nell'impiego di macchinari e strumenti di produzione. 3) Riduzione degli scarti e delle emissioni. 4) Elevata qualità fino al tendenziale "zero difetti". 5) Riduzione dei consumi di materiali ed energia.

Il punto di arrivo dell'analisi è il seguente: nuove proprietà sistemiche influenzano i processi, con l'emergere di traiettorie verso la riconfigurabilità di processi e prodotti in contesti ad elevata turbolenza, complessità e incertezza. Ne deriva la necessità di assetti e modelli organizzativi che assumano come punto di partenza la prospettiva di cambiare incessantemente la "sequenza delle operazioni" in uno spazio tecnico-produttivo di natura combinatoriale, cioè in continua ridefinizione sulla base di domini di conoscenze che sono aggiunte, modificate, ricombinate.

L'accelerazione della capacità di elaborare informazione e la creazione di uno spazio connettivo globale hanno profondamente modificato lo scenario competitivo, mentre la digitalizzazione di processi e prodotti genera un potenziale enorme, tutto da scoprire e da esplorare, di sequenze di operazioni che è possibile modificare, sostituire, creare ex novo. In

sostanza possiamo attingere ad un set potenzialmente infinito di sequenze, che possono intersecarsi e sovrapporsi, solo alcune delle quali effettivamente conosciute dagli agenti tecno-economici. È come se, nel decidere cosa e come produrre, gli agenti avessero di fronte un numero potenzialmente infinito di combinazioni tra funzioni (note parzialmente o totalmente ignote e da inventare) e funzionalità, ovvero requirements da soddisfare, che possono emergere senza sosta in un mondo caratterizzato da *web of interdependencies*. Lo spazio astratto della competizione è sempre più dominato da sfide tecnico-scientifiche e tecno-economiche, determinando interdipendenze e conflitti tra parametri funzionali, interazioni e sinergie innovative tra team di ricerca, conseguenze inattese con effetti a cascata.

In una situazione così magmatica è arbitrario pensare che vi possa essere un unico modello valido di organizzazione delle sequenze di operazioni produttive (*one size fits all*). L'emergere del polimorfismo organizzativo e della varietà morfologica possono essere comprese sulla base di alcuni principi orientativi di fondo, i quali scaturiscono dalle coordinate che connotano l'odierna era ad alta intensità di conoscenza. La multidimensionalità dei processi di trasformazione e la natura combinatoriale della dinamica innovativa inducono a ritenere che la distribuzione della conoscenza e la scomposizione di funzioni e *task* produttivi debbano essere elementi basilari di un framework teorico e operativo, finalizzato a comprendere la dinamica caratterizzata da complessità e incertezza. Il perseguimento di output e l'organizzazione dei processi diretti a tale scopo richiedono, infatti, sempre più "*multi-actor organizational forms*" (Tushman *et al.*, 2012: 25). Ciò conduce non solo alla permeabilità dei confini dell'impresa, ma addirittura alla loro variabilità (come nel caso delle piattaforme), alla loro "indefinibilità" sulla base dei tradizionali approcci analitici, se le organizzazioni sono sistemi complessi, che includono interdipendenze multiple a molti livelli: tra individui, organizzazioni, organizzazioni e ambiente, industrie e una molteplicità di attività economiche complementari (Cyert e March, 1963; Caspin-Wagner *et al.* 2013).

Specie nell'era attuale le modalità di elaborazione delle informazioni acquistano un'importanza crescente per comprendere come evolve l'interdipendenza tra task e tra individui, quindi la progettazione organizzativa delle sequenze di operazioni produttive. Quella che Puranam *et al.* (2012: 425) definiscono *epistemic interdependence*, che si ha quando "Nel caso vi siano due agenti, A e B, e l'azione ottimale di ciascun agente dipendesse dalla predizione di quello che farà l'altro, noi potremmo dire di essere in presenza di interdipendenza sistemica tra loro" (trad. nostra). Data l'*interdipendenza epistemica*, affinché gli agenti possano coordinare le loro azioni è necessario che essi posseggano "conoscenza predittiva. La conoscenza predittiva di A rispetto a B permette ad A di agire come se A potesse accuratamente predire le azioni di B" (ivi: 425). La conoscenza predittiva a sua volta implica lo sviluppo di attività di elaborazione dell'informazione, comunicazione, apprendimento, processo decisionale congiunto. Alla luce di queste considerazioni le strutture organizzative formali possono essere viste come esito dei meccanismi e delle modalità che influenzano l'efficienza con cui gli agenti svolgono attività di elaborazione delle informazioni.

Interdipendenza epistemica, conoscenza predittiva, scambi informativi e decisioni congiunte sono gli elementi costitutivi di un framework che cattura precisi meccanismi alla base del polimorfismo organizzativo. Nell'orizzonte tecno-economico odierno gli aspetti messi in evidenza assumono forme del tutto differenti dal passato: dalla centralità dell'impresa siamo passati alla decentralizzazione dei processi innovativi, con sistemi innovativi distribuiti, in cui una funzione fondamentale svolge l'esistenza di comunità innovative, di entità con cui le imprese interagiscono. Ciò conferma l'importanza dei differenti gradi di scomponibilità delle sequenze, dell'organizzazione modulare di processi e sistemi, della loro distribuzione nello spazio astratto dei domini di conoscenze da combinare per risolvere problemi tecnico-produttivi

sempre insorgenti. Naturalmente non si tratta di assolutizzare le spinte innovative e la propensione di entità alla frontiera, perché nei processi economici vi sono unità estremamente differenziate. Bisogna al tempo stesso tenere presente, però, che la tensione innovativa non può essere assente tra le caratteristiche comportamentali e strategiche delle imprese, specie nella fase odierna e anche in quelle realtà non collocate sulla frontiera. A questo riguardo sembra importante riprendere dei concetti fondamentali, elaborati dalla letteratura manageriale. Innanzitutto James March, nello studio dei processi adattativi delle organizzazioni e in primo luogo la dinamica dell'apprendimento in relazione a contesti decisionali in mutamento. La formulazione originaria di March (1991: 71) contiene la distinzione basilare tra *exploration*, intesa come set di attività dirette a “ricerca, variazione, assunzione di rischio, sperimentazione, azione, flessibilità, scoperta, innovazione”, mentre *exploitation* comprende “miglioramento, scelta, produzione, efficienza, selezione, implementazione, esecuzione”. March mette poi in luce il *trade-off* tra le due e quello dell'equilibrio dinamico tra di esse, perché l'*exploration* riguarda spazi di conoscenza meno certi, più lontani nel tempo e distanti dall'ambito esistente di innovazione adattamento. Contrasti possono allora sorgere all'interno dell'organizzazione, in quanto gli esiti più imprevedibili possono non essere facilmente accettati da alcuni settori organizzativi, dove la certezza delle conoscenze note e consolidate, la velocità realizzativa, la prossimità cognitiva e la prevedibilità dei cicli di feedback in un universo conoscitivo accettato rendono più agevole il raggiungimento di obiettivi programmati. Il *trade-off* è basilare anche per altri motivi: le imprese e le organizzazioni devono programmare l'impiego di risorse limitate in vista di determinati obiettivi, non è quindi un compito agevole quello di definire la combinazione efficace tra *exploration* e *exploitation*, viste le differenze degli effetti prima indicati. Se a questo si aggiunge che l'*exploration* implica logicamente un allontanamento dalla tradizionale *knowledge-base* e dalle competenze possedute, si comprende come le scelte strategiche relative a come realizzare un equilibrio dinamico non siano affatto semplici. Non bisogna poi trascurare il fatto che la distinzione tra le due tipologie di attività dipende dall'entità che la svolge. Certe conoscenze di tecnologiche e informazioni sui mercati possono essere nuove per un'organizzazione, ma non per un'altra, come hanno giustamente sostenuto Lavie *et al.* (2010); inoltre la distinzione andrebbe effettuata anche in riferimento alle fasi del processo di creazione e diffusione delle traiettorie tecno-economiche (Perez, 2010). Questa precisazione è importante perché, se imprese e organizzazioni devono perseguire un mix variabile di *exploration* e *exploitation*, la ricerca della combinazione più appropriata deve essere correlata alla dinamica innovativa generale e alle sue peculiarità. Ciò induce a condividere e in un certo senso rafforza la tesi espressa da Lavie *et al.* (2010: 114) circa il fatto che “la distinzione tra *exploration* e *exploitation* è spesso un problema di intensità piuttosto che di tipologia di innovazione” lungo un continuum, tenendo anche presente che al *trade-off* di cui stiamo parlando se ne associa un altro: quello tra flessibilità e stabilità, che investe il dominio di conoscenze alla base di processi, prodotti, strutture organizzative, configurazioni settoriali e intersettoriali.

Possiamo quindi con un certo fondamento sostenere che gli aspetti dello scenario tecno-economico odierno, più volte sottolineati nelle pagine precedenti, spingono a ritenere che un intreccio dinamico tra l'esplorazione di nuovi campi di conoscenza e l'approfondimento/ampliamento di quelli già posseduti sia molto importante nella fase storica che stiamo vivendo. Occorre anzi sviluppare frequentemente attività esplorative in molte direzioni, soprattutto nelle fasi di transizione socio-tecnica o di più intensa dinamica innovativa multidisciplinare. In questa prospettiva appare particolarmente utile l'approccio basato sul concetto di *dynamic capabilities*, concepite come la capacità “di percepire e modellare opportunità e minacce, di cogliere le opportunità, per mantenere la competitività attraverso

l'accrescimento, la combinazione, la protezione e, quando necessario, la riconfigurazione delle risorse materiali e immateriali dell'attività imprenditoriale" (Teece, 2007: 1319, trad. nostra).

Nell'approfondire temi e questioni poste dalla dinamica tecno-economica degli ultimi decenni, anche la letteratura manageriale attribuisce centralità sia alla riconfigurazione dinamica di attività e processi, sia a nuove e ricorrenti esigenze di coordinamento strategico ed operativo, che richiedono appunto originali modalità di comportamento strategico e propensione adattativa. Il nucleo centrale delle *dynamic capabilities* è costituito, secondo O'Reilly e Tushman (2011: 6), dalla loro capacità di essere *ambidextrous*, ovvero di realizzare "un insieme complesso di routine che includono la decentralizzazione, la differenziazione, l'integrazione mirata e la capacità di leadership consolidata per gestire il complesso trade-off richiesto dal contemporaneo perseguimento di *exploration* e *exploitation*." (trad. nostra di O'Reilly e Tushman, 2004: 79)²⁹.

Al di là di questioni definitorie e di ulteriori messe a punto (O'Reilly e Tushman, 2013), riteniamo che alcuni punti essenziali emergano con tutta evidenza. Imprese e organizzazioni hanno un'ampia gamma di forme organizzative: possono adottare architetture multiple, talvolta non coerenti tra loro, in modo da poter operare in ambienti mutevoli e a incertezza variabile. Il mix di sperimentazione e adattamento, di ricerca in nuovi domini di conoscenze e di consolidamento delle dotazioni conoscitive date, va correlato alla dinamica dell'ambiente competitivo multidimensionale: tecnico-scientifico, tecno-economico, sociale, politico. In tale orizzonte generale e mutevole è meritevole di attenzione un altro concetto, sviluppato dalla letteratura manageriale: quello di *fit*, cioè congruenza (*alignment*) tra componenti organizzative e fattori ambientali (Nissen, 2014). Si distingue poi (Miles e Snow, 1984) tra *internal fit*, che si riferisce alla congruenza interna tra strategia, struttura e processi organizzativi, ed *external fit*, concernente il *matching* tra organizzazione e ambiente. Il *misfit*, disallineamento interno o esterno, influenza negativamente la performance organizzativa e quindi i risultati delle sequenze di operazioni che devono produrre un output (per riprendere il framework concettuale qui proposto).

Le riflessioni acquistano particolare rilievo, se riprendiamo un aspetto generale dello scenario odierno, cioè la diffusione di "tecnologie esponenziali" come "*quantum computing, artificial intelligence (AI), robotics, additive manufacturing, and synthetic or industrial biology*" (Deloitte, 2014, 2015). L'accelerazione della dinamica tecnologica è misurata essenzialmente attraverso il miglioramento esponenziale del costo e delle performance di tre componenti fondamentali delle tecnologie digitali: capacità computazionali, capacità di memoria dei dati (storage), ampiezza della banda di trasmissione. Queste tre "tecnologie esponenziali" di base, per così dire, progrediscono ad un ritmo mai registrato in passato, creando le condizioni per un potenziale innovativo senza precedenti, dal momento che grazie ad esse possono essere create nuove combinazioni, i cui effetti non possono essere conosciuti finché non sono esplorate le interazioni tra di esse. Tutto ciò muta profondamente le direttrici di evoluzione della dinamica tecno-produttiva: i circuiti cumulativi che si creano tra accelerazione tecnologica e potenziali connessioni fanno assumere rilevanza ai meccanismi di decentralizzazione decisionale in conseguenza del moltiplicarsi del numero e delle intensità dei flussi informativi. "*Go it alone*" [Fai da solo] non solo non è più un imperativo centrale per un modello di business, è anzi una strada che porta ad un sicuro insuccesso, perché nell'era dell'*Ubicomp* occorre riorganizzare le attività basandosi su nuovi principi, che possano mettere in grado le imprese di misurarsi con le sfide generate dal dispiegarsi delle "tecnologie

²⁹ Nel saggio del 2004 O'Reilly e Tushman svolgono anche una rassegna empirica di imprese ambidestre.

esponenziali”. I nuovi principi possono essere così sintetizzati: interazioni tra una molteplicità di attori, collaborazione diffusa, strutture organizzative aperte.

I nuovi principi hanno una certa ineluttabilità, derivante dal fatto che sistemi chiusi (individui, organizzazioni), necessariamente caratterizzati da razionalità limitata e ridotti potenziali di informazione, vanno incontro a gap informativi crescenti, destinati a riprodursi incessantemente.

La prospettiva del passaggio dalle tecnologie esponenziali alle innovazioni esponenziali (Deloitte, 2015) non è quindi arbitraria, anzi è logicamente connessa ai fenomeni e ai processi di accelerazione prima indicati; di qui discendono le proposte di nuovi modelli organizzativi quali la cosiddetta “*exponential organization*” (Ismail et al, 2014), in grado cioè di far leva sulle tecnologie esponenziali per incrementare la rapidità, a costi più bassi, con cui si raggiungono determinati output e maggiori livelli di redditività. Tutto questo potrebbe avvenire, secondo questi autori, con l’estrema riduzione dell’apparato burocratico-istituzionale e organizzativo, mediante l’impiego di tecnologie dell’informazione che consentono l’adozione di nuovi imperativi di business³⁰.

Si tratta di organizzazioni snelle, con dotazioni strutturali minime, con un nucleo economico-finanziario in grado di organizzare moduli di competenze stratificate in modo funzionale allo scopo di soddisfare *consumer needs* e di ottenere elevata profittabilità, data la forte riduzione dei costi insita nell’esistenza di mercati degli input tendenzialmente privo delle restrizioni applicate alle corrispondenti organizzazioni tradizionali. Al di là dell’accesso dibattito sulle realtà assimilabili a questo tipo di modello, le proprietà dell’organizzazione di queste imprese sono molto enfatizzate: 1) *lean* (pochi occupati e contenute risorse materiali); 2) *simple*, in quanto regole e barriere burocratiche sono ridotte al minimo; 3) alto *leverage*, dal momento che sono impiegati gli esperti più appropriati e di alto livello, sulla base delle esigenze emergenti, senza molti degli ordinari appesantimenti e vincoli. Lo scenario tecno-economico è, però, molto più ricco e diversificato di quello definito dalle *lean, simple and high leverage exponential organizations*.

Il processo *From exponential technologies to exponential innovation* (Deloitte, 2013) implica di fatto ben altri imperativi e modelli di business. Dalle riflessioni precedentemente svolte l’amplificazione dei fattori di innesco e degli effetti potenziali spinge istituzioni, imprese e individui a creare strutture connettive per mettere in relazione tra loro tecnologie e pratiche di business in modo da creare set sempre variabili di nuovi prodotti, servizi e tecnologie innovative. Ecco perché una delle morfologie organizzative di crescente diffusione negli ultimi anni è la creazione di ecosistemi di imprese, così definiti: “*A performance ecosystem consists of multiple (three or more) independent organizations and/or individuals interacting with one another to pursue shared goals*” (Deloitte, 2011:3). Tre ingredienti fondamentali degli ecosistemi sono, dunque, l’obiettivo di migliorare la performance, la presenza di individui e organizzazioni, la potenziale moltiplicazione di obiettivi, quindi l’innovazione. A tutto ciò potremmo aggiungere la varietà degli agenti che si auto-organizzano per rispondere alle sfide dell’ambiente competitivo.

Esistono ecosistemi statici, il cui focus è l’aggregazione e il consolidamento di set fissi di risorse, che possono generare valore per l’organizzazione dell’ecosistema (Deloitte, 2011), ed ecosistemi dinamici, che sono ambienti in cui -grazie alla collaborazione e al lavoro in comune- si realizza apprendimento individuale e collettivo, in modo tale che l’ecosistema genera risorse crescenti in valore.

³⁰ (Hausmann, 2015, <http://www.business2community.com/strategy/exponential-organizations-new-normal-01202894#vX3I73KPXu173z7.97>).

Le tecnologie esponenziali e la digitalizzazione di processi e prodotti portano appunto alla creazione di piattaforme tecnologiche, grazie alle quali si sviluppano ecosistemi digitali, dove processi *bottom up* e iniziative *top down* possono innescare processi innovativi imprevedibili, conseguenza di strutture interattive molto differenziate.

In relazione agli *Ecosistemi Statici* sono state anche definite quattro categorie di ecosistemi: *centralizzati*, “*sequenced ecosystems*”, *facilitati*, *auto-organizzati*.

(i) Gli *ecosistemi centralizzati* sono distinti in varie tipologie:

- 1) *Collection ecosystems*, ovvero forme organizzative che raccolgono e distribuiscono informazione secondo una geometria connettiva *hub and spoke*. Esperienza esemplare in tal senso è “*Connect & Develop*” della Procter & Gamble: dall’R&D alla C&D, cioè dalla R&S tutta interna all’impresa alla creazione di una infrastruttura aperta, chiamando a raccolta idee da tutto il mondo per poi sviluppare insieme capabilities interne alla P&G (<http://www.pgconnectdevelop.com/>).
- 2) *Contest ecosystems*, dove si invitano imprese singole oppure in gruppo, Centri di Ricerca, Università a risolvere un problema e a raccogliere una sfida, opportunamente descritta. *Innocentive* (<https://www.innocentive.com/>) è un esempio insieme alla GoldCorp Challenge (<https://www.ideaconnection.com/open-innovation-success/Open-Innovation-Goldcorp-Challenge-00031.html>), un’azienda mineraria che ha messo in rete tutti i suoi dati dal 1948 al 2010, offrendo 575.000 dollari di premio al partecipante con l’idea migliore.
- 3) *Matchmaking Ecosystems*, che consistono nel favorire connessioni tra partecipanti in vista del raggiungimento di uno scopo. In tali casi si tratta di creare l’infrastruttura che consente il *matching* tra detentori di competenze, doti, risorse, da un lato, e soggetti che hanno bisogno di quelle specifiche dotazioni³¹. *Innocentive* può essere ricondotto a questa questa tipologia di ecosistema dinamico.

(ii) I *sequenced ecosystems* si riferiscono alle catene di sub-fornitura, quindi a una serie di attività coordinate in modo sequenziale. Nella categoria sono comprese tre tipologie:

- 1) *Chain Ecosystem* (ecosistemi di sequenza), con un organizzatore centrale che definisce la sequenza e i parametri da rispettare in ogni step da parte di ciascun attore. I casi più noti sono quelli delle case automobilistiche.
- 2) *Project Ecosystems* (ecosistemi di progetto), contraddistinte da strutture organizzate per lo sviluppo e l’attuazione di determinati obiettivi in un arco di tempo definito. Gli esempi più comuni riguardano la realizzazione di progetti infrastrutturali (hardware e software) e l’edilizia con un certo grado di complessità.
- 3) *Process Network Ecosystems*, che comprendono processi di business *end-to-end*, nei quali attività differenti, organizzate in forma di moduli, sono coordinate attraverso modelli di management che lasciano gradi di libertà (*loosely coupled management approach*). Il coordinatore centrale (*central orchestrator*) definisce i moduli da seguire, le regole di interfaccia in maniera che siano adottati standard comuni, per poi consentire ai partecipanti di entrare e scambiare input e output in base alle esigenze. Un esempio è Li & Fung, azienda cinese che organizza un global network di più di 10.000 partners nell’industria dell’abbigliamento.

³¹ Ad esempio TutorVista è un sito web che mette in contatto studenti con tutor di tutto il mondo per tutoraggio online.

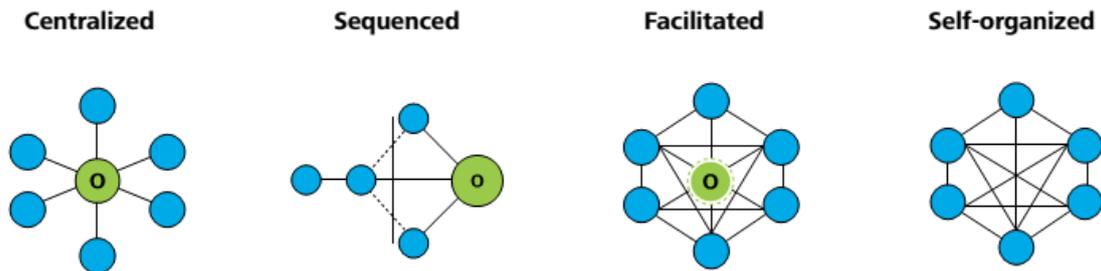
- (iii) Gli Ecosistemi facilitati sono ecosistemi che si basano su complesse relazioni a rete, con al centro un coordinatore, il quale modella le interazioni attraverso protocolli di *governance* e di forme interattive. Anche in questa categoria di ecosistemi si distinguono alcune tipologie:
- 1) *Resource Network Ecosystems*. Sono le realtà dove un organizzatore crea le condizioni affinché un ampio numero di attori possa accedere a dotazioni di risorse distribuite, come nel caso dell'American Express Forum for small business: esso consente a piccole iniziative economiche di interagire, ponendo questioni, offrendosi reciprocamente consigli e servizi.
 - 2) *Web Ecosystems*, che si hanno quando l'entità organizzatrice costruisce una piattaforma (*core platform*) per estrarre il massimo del potenziale di innovazione distribuito tra i molti partecipanti, attratti per lo sviluppo di prodotti e servizi dal successo di mercato che la stessa piattaforma assicura. Microsoft, Google, Amazon sono tra gli esempi più eclatanti a questo riguardo.
 - 3) *Open Development Ecosystems*, formati da quelle comunità di individui e organizzazioni che sviluppano e modificano prodotti congiuntamente, con partecipazione aperta a tutti. È chiaro che si tratta delle Comunità di sviluppatori di software *Open Source*, come ad esempio la *Apache Foundation*.
 - 4) *Community Ecosystems*, dove un organizzatore crea le condizioni perché si sviluppino relazioni di fiducia tra un ampio numero di partecipanti, attraverso frequenti interazioni, fino al punto di creare una vera e propria identità di appartenenza, come nel caso delle cosiddette *Comunità di pratiche (Communities of Practice)*³²,
- (iv) La quarta categoria comprende i *Self-organized ecosystems*, cioè quelli che si sviluppano unicamente mediante processi *bottom up* sulla base di interconnessioni autonomamente create dai partecipanti, senza alcun processo decisionale centralizzato. Anche in questo segmento abbiamo differenti tipologie:
- 1) *Grassroots ecosystems*, che sono aggregazioni senza standard da rispettare, barriere all'entrata e regole per la partecipazione. Sono creati in funzione di uno scopo da raggiungere, per poi dissolversi. Esempi noti sono lo *Stressed Skin Panels* nell'industria delle costruzioni, analizzato da von Hippel (2006), e i GREM (*Grassroots ecosystem management*) (Weber, 2000). In quest'ultimo caso si tratta di un movimento politico, attivo nel management delle risorse naturali, con numerosi progetti pubblico-privato diretti dallo stesso Weber.
 - 2) *Pack ecosystems*, che comprendono comunità di *problem solvers* i quali, muovendo da piccole azioni smart, possono portare alla realizzazione di grandi visioni (Hagel *et al.*, 2010).

Per quanto riguarda gli *Ecosistemi Dinamici*, il loro focus è l'aggregazione e il coordinamento di idee, fornitori, clienti. Il fine è quello di creare i meccanismi, gli strumenti e l'ambiente più idoneo per accelerare le possibilità di sviluppare e mettere a frutto il potenziale generato da processi di collaborazione e scambio informativo, con sostanziali e continui miglioramenti per i partecipanti.

Una raffigurazione delle topologie delle varie categorie è contenuta nella figura 29.

³² Un esempio interessante per gli effetti dinamici prodotti da ecosistemi comunitari nello sviluppo di collaborazioni strategico-progettuali è quello del World of Warcraft, analizzato da Thomas e Nemani (2009).

Figura 29
TASSONOMIA DEGLI ECOSISTEMI



Fonte: Thomas e Nemani, Deloitte (2009), Fig. 1

Al di là delle differenze e delle possibili parziali similarità tra i vari pattern di ecosistemi illustrati, merita porre l'attenzione su un dato di fronte ad ecosistemi digitali, che segnalano un potenziale *big shift in the global business environment* (Hagel *et al.*, McKinsey, 2009), identificato nel *mismatch* tra il tradizionale *mindset* delle imprese e l'ambiente competitivo, dovuto a tre elementi essenziali: 1) i mutamenti straordinari della infrastruttura digitale. 2) Il successo nell'odierno contesto dell'*hypercompetitive and fast changing environment* (ivi: 35) dipende non tanto dalla dotazione di conoscenze, bensì dalla capacità di partecipare ai sistemi di flussi informativi, che si modificano in continuazione. Per questa via si produce un incessante arricchimento conoscitivo. 3) I meccanismi e gli strumenti di apprendimento si diversificano, determinando un *gap* tra le imprese concepite come sistema chiuso e il potenziale di variazione connesso all'ambiente tecnico-competitivo. Soprattutto, però, emerge un fenomeno del tutto nuovo, collegato a quanto appena sostenuto: diviene importante per le aziende -in uno scenario contraddistinto da variabilità, incertezza e complessità- perseguire non solo l'efficienza nella scala di produzione (*scalable efficiency*), bensì quella che Hagel *et al.* (2009) chiamano scalabilità (vedi nota 28) nell'apprendimento (*scalable learning*) attraverso le interazioni con altri attori della dinamica tecnico-competitiva, con conseguente accelerazione della performance. A tale scopo le organizzazioni esponenziali devono contemporaneamente specializzarsi ed essere connessi con altre entità (*specialize and connect*): elevare al massimo le competenze possedute e far ricorso a partner per evolvere le loro stesse specializzazioni (Bertoen e van der Heijden, Deloitte, 2016). Ciò significa sottoporsi a processi di trasformazione profondi ed estesi, cercando di attrarre talenti e di sviluppare relazioni di interscambio con partner in grado di contribuire ad allargare il *mindset* organizzativo, tradizionalmente incentrato sulla *mission*. Ingredienti basilari di questo radicale mutamento sono: ricerca e impiego delle migliori risorse esterne; ricorso sistematico a *community and crowd*, che possono consentire la scalabilità nell'apprendimento; impiego di algoritmi sempre più perfezionati per l'elaborazione di grandi volumi di informazioni; possibilità concessa da altri di usare le proprie risorse ed *asset (lease asset)*, in modo da favorire la possibilità di interazione e al contempo *stay nimble*; creazione di efficaci regole di connessione (interfaccia) per componenti esterne; costruzione di "cruscotti" e metriche per monitorare costantemente i risultati ottenuti; sperimentazione incessante, in modo da perseguire senza sosta miglioramenti di performance ed eventualmente creare nuove funzionalità; adozione di principi di autonomia; riduzione delle gerarchie e creazione di team che possano auto-organizzarsi nei processi decisionali. Per tale via si possono perseguire molteplici itinerari di ricerca e al tempo stesso ottenere *scalable learning*.

Il punto di arrivo dell'analisi svolta è dunque l'ecosistema digitale, che essenzialmente consiste nello spostamento dalla centralità esclusiva dell'organizzazione e dell'impresa al *leverage* verso componenti esterne.

È a questo punto chiaro che la decentralizzazione innovativa e la permeabilità dei confini dell'impresa/organizzazione portano alla scoperta e alla progressiva diffusione di un nuovo modello organizzativo, anche se questa espressione non è forse del tutto appropriata: la creazione di piattaforme, che al tempo stesso consentono di accedere ad un potenziale innovativo sconosciuto a priori e di velocizzare il processo innovativo, diminuendone i costi.

2.5.4 *Ecosistemi digitali e piattaforme*

Una delle caratteristiche più importanti emerse finora è la prevalenza di sistemi di innovazione distribuita (Baldwin, 2012; Adner e Kapoor, 2010). Appare quindi logico porsi una domanda: com'è possibile che tali sistemi di funzioni distribuite possano essersi diffuse così intensamente negli ultimi anni? La risposta va cercata nella costruzione di un set di componenti tecnico-economici, connessi alla digitalizzazione dell'economia. Intendiamo riferirci alle piattaforme digitali, che stanno provocando un forte impatto su imprese, settori produttivi, intere economie nazionali e continentali. È bene chiarire subito che esistono molte definizioni di piattaforme digitali, nonostante il loro impiego diffuso nella letteratura. Si pensi che un esame delle pubblicazioni in materia di tecnologie dell'informazione ha individuato 47 tentativi definitori in 132 articoli campionati (Sun e Gregor, 2015). Nonostante ciò è fondato partire da due definizioni che sintetizzano molto bene alcuni tratti comuni delle piattaforme (nel § 3.1 viene sinteticamente introdotta la piattaforma Predix della General Electric), l'una che comprende elementi tecnici ed economici, l'altra incentrata su componenti puramente tecniche. La prima è stata formulata da Baldwin e Woodard (2009: 19): "il concetto di "piattaforma", che noi definiamo come un set di component stabili che mantengono la varietà e le proprietà evolutive di un sistema, vincolandolo attraverso i legami tra le componenti"

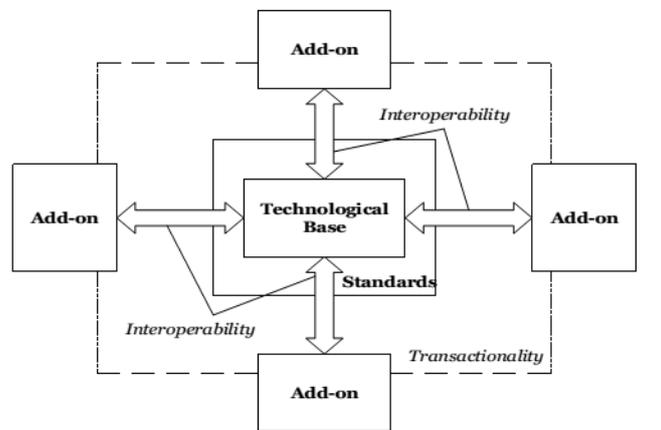
La seconda è stata elaborata da Ballon (2014: 89): "Tecnicamente, una piattaforma nei nuovi mezzi di comunicazione può fare riferimento alla configurazione di un hardware, ad un sistema operativo, ad un modello di software o a ogni altra entità comune sulla quale opera un numero di componenti o servizi ad essa associati".

Come si vede, Baldwin e Woodard delineano una visione sistemica, il cui sostrato tecnico-scientifico può essere comune alla visione di Ballon. Per approfondire gli aspetti generali, trattati da Baldwin e Woodard, possiamo partire dalle dimensioni cruciali (*core*) delle piattaforme che possono essere così descritte (Sun e Gregor, 2015): 1) *Base tecnologica*, la quale contiene una serie di componenti (soluzioni hardware e software), soggette ad una notevole molteplicità di impieghi. 2) *Standard*, ovvero le regole tecnico-progettuali, che consentono agli sviluppatori di accedere alla piattaforma quando e dove vogliono, condividendo i presupposti dell'esistenza della stessa piattaforma. 3) *Adds-on* (aggiunte funzionali). Il termine si riferisce alla possibilità che applicazioni software aggiuntive -denominate anche moduli, sotto-sistemi- aggiungono funzionalità e miglioramenti. 4) *Interoperabilità*, cioè requisiti tecnici appropriati che permettono ampie intersezioni tra base tecnologica e *adds-on*, come avviene con la connessione tramite API (*Application Program Interface*). 5) *Transazioni*, che riguardano lo spazio astratto delle interazioni tra i partecipanti alla piattaforma sulla base dei loro interessi non tecnologici (scambi economici). 6) *Governance*, che concerne le politiche, i processi, le strutture e i meccanismi impiegati nel governare la piattaforma.

Su queste basi è possibile rappresentare il modello concettuale della piattaforma che, essendo incentrata su flussi informativi, non può che mostrare proprietà analoghe a quelle dei sistemi

informativi: scomposizione, interconnettività, trasmissione delle informazioni, struttura stratificata (*multilayered*) (Fig. 30).

Figura 30
MODELLO CONCETTUALE DELLA PIATTAFORMA BASATA SULLA TECNOLOGIA DELL'INFORMAZIONE



Fonte: Sun e Gregor (2015), Fig. 2

Il *platform approach* nella produzione di beni e servizi è particolarmente efficace perché, sulla base di un insieme di asset comuni a famiglie e tipologie di prodotti (*commonalities*), è possibile sviluppare focus su numerosi segmenti di mercato. Tali asset comuni sono le componenti, come parti di progettazione di impianti e tools di produzione, i processi e le attività, la conoscenza (know how, applicazioni tecnologiche, strumenti teorici e operativi), team e relazioni interattive a vari livelli (R&S, rapporti con subfornitori), scambi con altre organizzazioni. Per questa via è possibile ridurre i costi e i tempi di sviluppo prodotti, insieme all'aumento di varietà degli output da progettare.

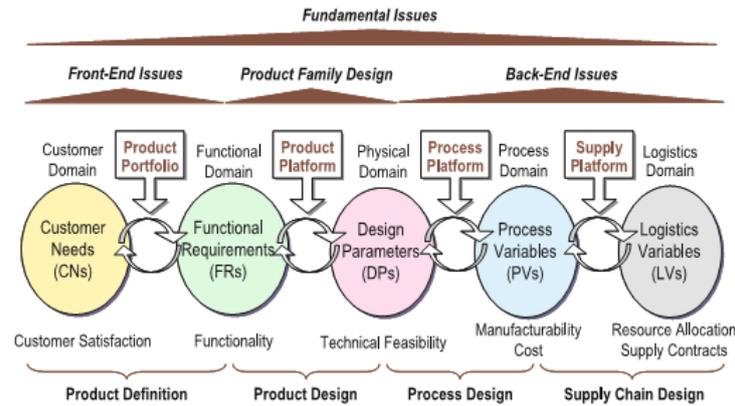
Questa breve analisi dei molteplici elementi basilari di un ecosistema basato su una piattaforma digitale ci permette di mettere in rilievo altri aspetti fondamentali che connotano l'evolversi della fabbrica intelligente. Riprendendo la definizione di Baldwin e Woodard, la combinazione di conservazione e varietà implica che attraverso le piattaforme possono per così dire passare "molti fili", una pluralità non determinabile a priori, di sequenze tecnico-produttive, evidentemente grazie all'intersecarsi di flussi informativi di varia e imprevedibile provenienza. È così possibile che si formino insiemi di entità interdipendenti, cluster, ecosistemi di business trasversali a più settori merceologici. Tutto ciò può realizzarsi perché esiste una peculiare architettura della piattaforma: un nucleo di componenti relativamente stabile, caratterizzato da *low variety*, e un insieme di componenti "periferiche" ad elevata varietà (Murmman e Tushman, 1998).

Questo schema teorico ed applicativo, incentrato su sotto-sistemi gerarchici ordinati, implica che cambiamenti negli elementi "core" generano effetti a cascata su tutti gli altri, mentre variazioni nei sotto-sistemi complementari producono effetti minori su tutti gli altri, a seconda delle interazioni e dei circuiti di feedback che si realizzano nel potenziale di variazioni dell'intero ecosistema. Queste distinzioni sono essenziali perché ci aiutano a comprendere una proprietà fondamentale degli ecosistemi digitali su cui si basano le piattaforme, cioè la *generatività* (vedi oltre).

Tornando allo schema teorico ed operativo, esso è stato applicato nello studio dello sviluppo prodotti, nella trattazione delle strategie in tema di tecnologie, nell'economia industriale. Una sintetica esposizione dei temi sviluppati in ciascuno di questi ambiti è utile per una migliore

comprensione del potenziale di variazione degli ecosistemi digitali. La piattaforma dello sviluppo di prodotti è stata importante, in quanto ha favorito l'implementazione di progetti per "famiglie di prodotti", cioè prodotti simili in cui sono introdotte varie specifiche funzionalità, congruenti con le richieste particolari dei consumatori. In una rappresentazione astratta e olistica del ciclo di progettazione e sviluppo di una famiglia di prodotti (Fig. 31) si vede come i cicli di feedback tra i sottospazi di parametri funzionali e quelli dei parametri di progettazione sia particolarmente decisiva, perché deve trasformare le interazioni tra sfera del consumo e sfera della produzione in idee innovative.

Figura 31
UNA VISIONE OLISTICA DELLA PROGETTAZIONE DELLO SVILUPPO D UNA FAMIGLIA DI PRODOTTI



Fonte: Jiao *et al.* (2007), Fig.1

Occorre enfatizzare che ciò consente di perseguire livelli più elevati di strategie ad alta varietà, per cui è necessario un cambiamento importante di mindset e modelli mentali per imprese e organizzazioni: "From portfolio thinking to platform thinking" (Sawhney, 1998). In questo modo si può ottenere la scalabilità nella produzione di una varietà di output, ma evidentemente occorrono precise strategie tecniche di organizzazione della piattaforma economica, attinenti alla struttura proprietaria e alla governance.

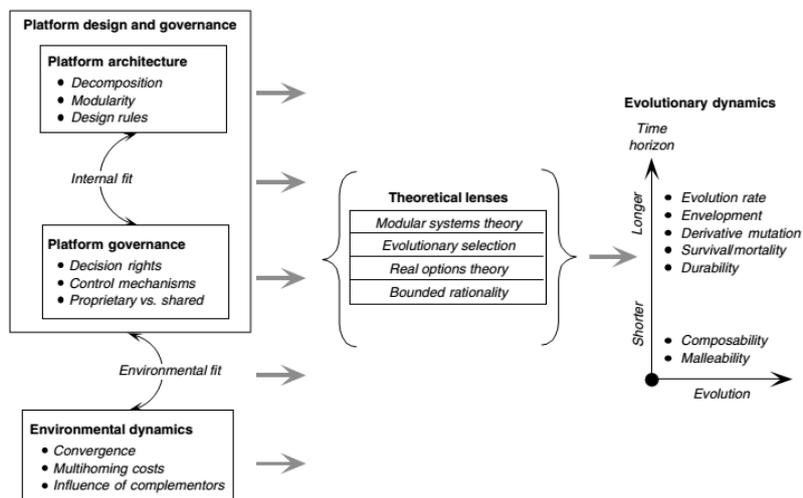
È chiaro che in questa prospettiva la modularità diventa un principio strategico manageriale di tutta rilevanza. L'insieme degli elementi basilari appena descritti aiutano a comprendere il secondo dei temi discussi in letteratura, cioè le strategie tecnologiche elaborate da società in competizione per acquisire leadership nei settori, a partire da quelli ad alta tecnologia (lotta tra Microsoft e Netscape, Intel vs Microsoft e Cisco). La leadership di piattaforma diviene quindi una questione di grande importanza, dove si combinano temi relativi all'architettura del prodotto, alla scelta delle alternative tecniche più efficaci, alla capacità di focalizzarsi su *common goods* dell'industria nel medio-lungo periodo, alla creazione di un'appropriata organizzazione manageriale con funzioni tecno-economiche differenziate, infine allo sviluppo di filosofie comunicative penetranti ed estese sia con partners che con gli appartenenti a nucleo propulsivo della piattaforma (Cusumano e Gawer, 2002). Emergono ancora una volta *commonalities* (componenti comuni) e modularità come principi teorici e criteri operativi, che costituiscono la base per comprendere una terza e basilare caratteristica delle piattaforme, cioè che esse costituiscono uno spazio virtuale entro cui imprese, organizzazioni, Istituzioni e comunità di pratiche realizzano transazioni. Nell'economia industriale sono infatti sottolineati sia elementi relativi a *two-sided markets*, soprattutto i fattori di vantaggio per agenti massimizzanti rispetto ad altre forme di organizzazione del mercato, sia *multi-sided markets*, dove le transazioni avvengono tra gruppi di operatori al fine di ottenere economie di scala e di

varietà. La base fondamentale è sempre costituita dalla condivisione di asset e dalla possibilità di introdurre variazioni a molti livelli. Entra in gioco a questo punto un'altra componente basilare, perché il potenziale di varietà dipende dall'architettura della piattaforma, così definita: “System architecture is an abstract description of the entities of a system and the relationships between those entities.” (Crawley et al., 2004: 2)³³.

Abbiamo dunque definito tre elementi basilari (architettura, commonalities, modularità) delle piattaforme e quindi degli ecosistemi digitali. Bisogna enfatizzare un punto: il *Platform Thinking* implica che gli standards “are rules or protocols specifying how to connect components to a platform, or how to connect different products and use them together” (Cusumano, 2010: 33).

L'insieme di questi due aspetti (sviluppo di famiglie di prodotti e la configurazione di architetture, commonalities e moduli) fa sì che tra gli effetti più vantaggiosi di una piattaforma vi sia la varietà e la “evolvability” nel corso del tempo. Ciò è possibile perché architettura, governance e dinamica ambientale sono tutte strettamente correlate le une alle altre attraverso incessanti flussi informativi (Fig. 32).

Figura 32
FRAMEWORK PER STUDIARE L'EVOLUZIONE DELLE PIATTAFORME

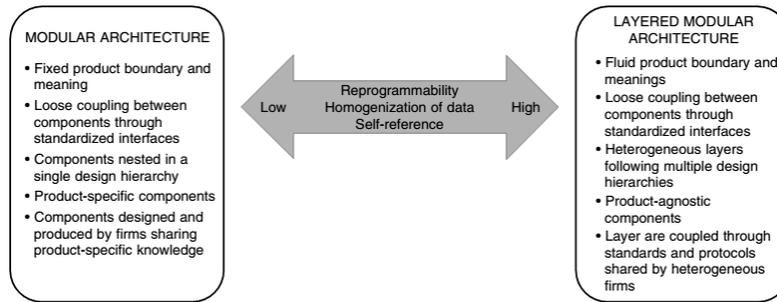


Fonte: Tiwana et al. (2010), Fig. 2

Non bisogna però trascurare che esistono molte tipologie di architetture, tanto che è possibile ipotizzare ibridi tra assetti modulari e modelli con architettura modulare stratificata (Yoo et al., 2010) (Fig. 33).

³³ Per un'analisi approfondita del concetto di architettura, delle distinzioni tra varie tipologie, specialmente tra architettura fisica e funzionale, si veda Levis e Wagenhals (2008).

Figura 33



Fonte: Yoo *et al.* (2010), Fig. 2

Le implicazioni di ampia portata nella scelta tra le due configurazioni risiedono in questo: quella modulare consente *difference in degree*, nel senso che esistono vincoli che limitano i gradi di libertà di variazione nell'ambito dei parametri del sistema gerarchico dato. L'architettura *layered modular* genera invece *difference in kind*, di natura sostanzialmente diversa, perché l'eterogeneità dei *layers*, correlata a molteplici gerarchie di progettazione, e la loro versatilità non vincolata a singoli prodotti, le regole e i protocolli condivisi da una pluralità di attori permettono alla piattaforma di assumere una proprietà generale di grande rilevanza per la dinamica innovativa, cioè la *generatività*. Tale concetto è definito da Zittrain (2008: 70): "La *Generativity*" è la capacità di un Sistema di produrre cambiamenti non previsti attraverso contributi esterni non filtrati e provenienti da varie fonti" (trad. nostra).

Le tecnologie generative sono quelle che hanno "la capacità di produrre cambiamenti non richiesti guidati da una platea ampia, variegata e non coordinata" (Zittrain, 2006: 1980), la generatività è "una funzione della capacità di una tecnologia di esercitare un effetto leva su un certo numero di operazioni, di adattarsi ad una gamma di lavori differenti, di potere essere facilmente padroneggiata ed accessibile." (Zittrain, 2006: 1981). L'elevata adattabilità delle componenti hardware, le connessioni attraverso network senza (o con scarso) controllo centralizzato fanno sì che si possa ottenere *capacità di leverage*, ovvero conseguire obiettivi non raggiungibili isolatamente e comunque tali da richiedere sforzi impropri. Adattabilità significa invarianza nell'impiego della tecnologia per alcune modalità e meccanismi operativi, mentre vi è prontezza nell'introdurre modifiche per ampliare la gamma degli usi (si ricordi gli *adds-on*, il software per la flessibilità aggiuntiva). In questa visione l'adattabilità implica che si possa far leva su potenzialità al fine di perseguire continuamente obiettivi non previsti all'inizio. Complementare rispetto ad essa è la facilità di acquisire nuove competenze tecnologiche da parte di un nuovo partecipante, in modo che essi possano adottare e adattare la tecnologia, alimentando così il potenziale di variazione. Accessibilità, infine, significa che la riduzione di ostacoli regolamentari e normativi grazie all'esistenza di protocolli pubblici può facilitare l'apprendimento e il controllo delle tecnologie. Alla luce di questi criteri la "*generativity aumenta con l'abilità degli utilizzatori di generare nuovi utilizzi che siano facili da distribuire e siano fonte di ulteriore innovazione*" (Zittrain, 2006: 1981). È altresì chiaro che le piattaforme aperte hanno un grado di generatività molto maggiore di quelle chiuse a terzi, dal momento che le seconde hanno vincoli predefiniti nelle interazioni ammesse, cioè obiettivi in funzione di esiti determinati nelle linee generali. Nelle prime, invece, i gradi di libertà sono praticamente indefiniti perché, pur partendo da parametri di riferimento, che sono essenziali per innescare processi collaborativi, lo sviluppo delle interazioni e la libertà nel creare strutture interattive di fatto apre uno spazio generativo sconosciuto, dove si può pienamente esplicitare la propensione all'*exploration*³⁴. Per riprendere la terminologia

³⁴ L'interpretazione qui esposta della generatività è in parte differente da quella proposta da Zittrain.

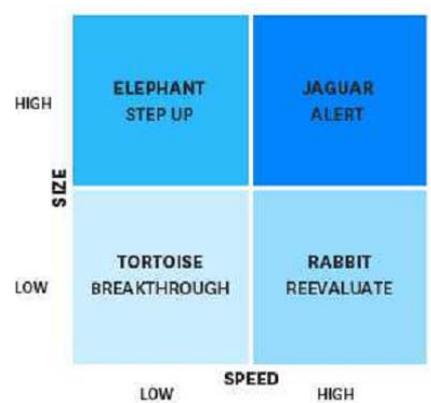
precedentemente impiegata in relazione ai prodotti *multi-technology*, le piattaforme aperte permettono il *mapping many-to-many*, riferito sia agli attori potenzialmente interattivi, sia ai domini di ricerca da investigare. Le piattaforme chiuse possono essere incentrate su una logica *one-to-many* oppure *many-to-one*, come si può vedere nelle varie configurazioni digitali riportate nel paragrafo precedente.

Il potenziale di variazione degli ecosistemi digitali di fatto è una conseguenza del superamento dei tradizionali confini tra imprese ed è quindi uno spazio ignoto, entro il quale le spinte a cambiare costantemente l'ecosistema possono essere al tempo stesso endogene ed esogene. È anzi sempre più frequente l'impossibilità di distinguere nettamente tra endogenità ed esogenità. Ciò non significa la tendenziale sparizione delle imprese, bensì qualcosa di profondamente diverso dal passato: esse tendono a diventare nuclei strategici, che organizzano sistematiche combinazioni variabili di componenti delle sequenze di operazioni. La fecondità del *sequential approach* proposto all'inizio diviene evidente: la generatività implica una gamma di sequenze potenziali tutte da scoprire e da verificare con criteri di efficienza ed efficacia sulla base di regole e orizzonti strategici condivisi, insieme a gradi libertà nell'attingere a conoscenze ed expertise di varia natura e provenienza. In breve, quindi, generatività degli ecosistemi digitali e natura combinatoria della dinamica tecno-economica sono le connotazioni più pregnanti dello scenario odierno, entro cui si definiscono strategie e criteri operativi per sistemi produttivi "intelligenti". L'intelligenza risiede nello sviluppo di capacità, propensioni, expertise, mindset aperti e tali da saper cogliere le opportunità e le sfide nello spazio ignoto delle connessioni tra mondo fisico e spazio virtuale.

Viviamo in un universo economico in continua, potenziale, espansione e dotato di un dinamismo apparentemente inarrestabile, dove la competizione può assumere accelerazioni selettive molto accentuate (*red ocean*). Di qui deriva per le imprese l'imperativo della ricerca di spazi nuovi, basati su vantaggi competitivi creati ex novo che, almeno nell'immediato, non vedono molti competitori (Kim e Mauborgne, 2005).

Nell'orizzonte tecno-economico odierno l'elaborazione della strategia più appropriata ed efficace è pertanto cruciale, perché un mondo così dinamico comporta necessariamente una varietà di comportamenti e una gamma variabile di opzioni strategiche, da cui derivano performance competitive molto differenti, come quelle efficacemente sintetizzate da Govindarajan e Srinivas (2013) nella *competitive jungle* di archetipi comportamentali (Fig. 34), che sono ripresi nel paragrafo successivo.

Figura 34
LA "GIUNGLA COMPETITIVA"



Fonte: Govindarajan e Srinivas (2013), Fig. 1

Ai nostri fini è rilevante il punto che dietro la varietà di comportamento vi sono differenti elaborazioni strategiche, a loro volta correlate alla varietà delle morfologie organizzative con cui si strutturano le sequenze di operazioni economico-produttive.

Varietà morfologica, spazio generativo ed ecosistemi digitali sono le componenti fondamentali del Multiverso: un insieme teoricamente infinito di sequenze interattive e di processi generatori di informazioni. Dinamiche combinatorie e ricombinatorie di domini conoscitivi: dalla progettazione/invenzione di nuovi materiali (a due dimensioni 2D, materiali programmabili, § capp. 4-5) all'aggiunta di funzionalità creative in processi e prodotti digitalizzati (Bio-Bricks, borographene, stanene, phosphorene, ecc.). In questo scenario si affermano nuovi principi strategici e operativi: co-creation, interdisciplinarietà, multidisciplinarietà, reinvenzione continua di modelli di business.

2.6

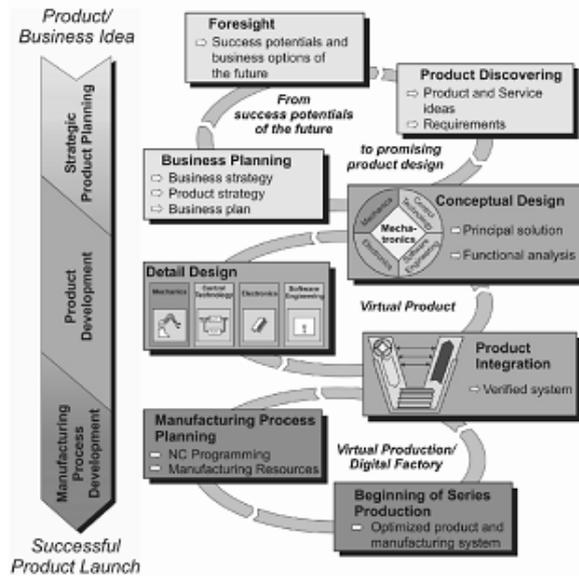
Proprietà delle imprese nell'Industria 4.0 e Modelli di business

Nelle pagine precedenti abbiamo più volte indicato caratteristiche che le imprese dovrebbero acquisire per aumentare le probabilità di sopravvivenza e di successo nell'attuale *hypercompetitive environment*. Con una certa insistenza abbiamo enfatizzato come nello scenario delle interazioni costanti tra il *mondo* fisico e quello virtuale del *digital twin* sarà fondamentale -in un quadro contraddistinto da estrema varietà potenziale- l'adozione di nuove forme di congruenza tra *internal fit*, definito "configurazione coerente di attività" che si rafforzano reciprocamente, ed *external fit*, inteso come "attitudine a realizzare set di scelte interdipendenti appropriate rispetto all'ambiente competitivo" (Siggelkow, 2011). La competizione richiederà sempre maggiori capacità di anticipare futuri trend, generare nuove idee e conseguenti prodotti, modificare mindset e strutture interattive a rete, nel tentativo di cercare nuove competenze per fronteggiare le sfide e risolvere nuovi problemi onde soddisfare *user needs* e *production requirements*.

Data la consapevolezza dell'esistenza di un potenziale da scoprire, le imprese devono necessariamente intraprendere tre cicli "ideativi e decisionali"³⁵. (i) Il primo comprende attività di *foresight*, ovvero di individuazione di potenzialità e correlate ipotesi di business, processi di scoperta di prodotti attraverso l'elaborazione -in un ambiente ad "alta velocità"- di informazioni relative alla produzione: costo, *product life cycle (PLC)*, tecnologie necessarie, variazioni dei programmi produttivi durante il *PLC*. (ii) Il secondo ciclo si incentra sull'analisi e la comprensione delle relazioni tra i differenti domini di conoscenze necessarie per ottenere un output funzionale agli obiettivi, facendo interagire numerose competenze appropriate. Questo ciclo comporta l'esplorazione del mondo virtuale con modelli di simulazione e tools applicativi, esperimenti mediante cambiamenti di parametri e variabili di prodotto e di processo (*virtual production*). (iii) Il terzo ciclo comprende le interazioni tra *Virtual Production* e *Digital Factory* per approfondire in modo sistematico l'insieme dei problemi, disfunzionalità e gap tra "stati del mondo" progettati e quelli realmente ottenuti, cercando così di perseguire ottimizzazione e adattamento a circostanze del tutto impreviste o parzialmente raffigurate attraverso l'attività di *matching* (Fig. 35).

³⁵ La definizione dei cicli è nostra, ma è ispirata ad un contributo di "ingegneria economica" (Gausemeier *et al.*, 2006, Fig.1, qui riprodotta nella Fig. 17)

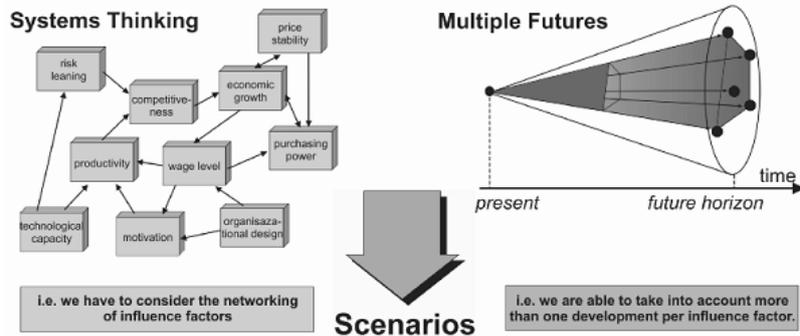
Figura 35
IL PROCESSO DI INNOVAZIONE DEL PRODOTTO COME SEQUENZA DI CICLI



Fonte: Gausemeier *et al.* (2006), Fig.1

Per realizzare con successo i tre cicli occorrono analisi di scenario e, in relazione a tutti i fattori indicati, emergono due principi basilari: 1) *systems thinking* per analizzare tempestivamente le interdipendenze, gli effetti distribuiti dei cambiamenti, le necessità progettuali e operative emergenti. 2) *Multiple futures*, nel senso di sviluppare intelligenza e immaginazione sistemica, connessa alla molteplicità di possibili sentieri di sviluppo (Fig. 36).

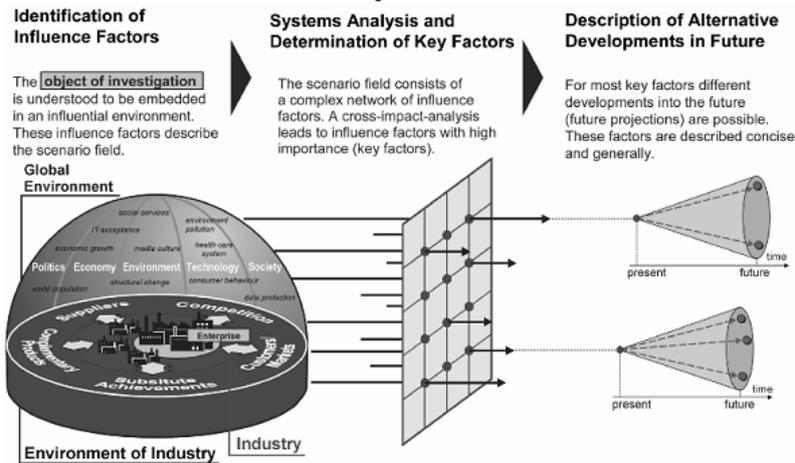
Figura 36
LA PIANIFICAZIONE STRATEGICA RICHIEDE SYSTEMS THINKING E LA PREFIGURAZIONE DI SVILUPPI ALTERNATIVI



Fonte: Gausemeier *et al.* (2006), Fig. 3

I tentativi razionali di delineare alternative e le implicazioni di dinamiche reticolari delle componenti possono evidentemente aumentare la probabilità di catturare elementi del potenziale da scoprire. È altresì chiaro che più l'analisi è penetrante e sistematica, maggiore è la consapevolezza delle sfide e la conoscenza del campo di forze evolutive di cui si deve tenere conto, per rispondere con adeguate azioni strategiche (Fig. 37).

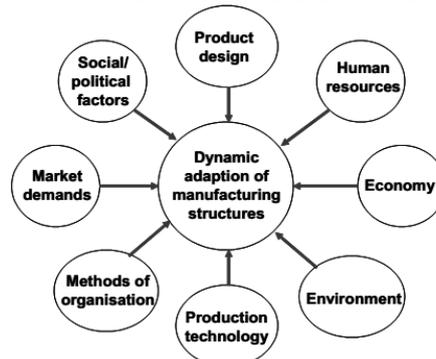
Figura 37



Fonte: Gausemeier *et al.* (2006), Fig. 4

I fattori analizzati e la turbolenza ambientale, che appare sempre più un elemento intrinseco allo spazio connettivo globale, alimentano influenze reciproche tra mondo fisico e virtuale, generando pressioni evolutive verso la creazione di strutture produttive modulari (cfr. § 2.4.3), in modo che le componenti di un prodotto e di un processo possano essere sostituite oppure in parte innovate, senza che ciò implichi un mutamento di tutto il sistema, purché si realizzino moduli compatibili con le *design rules* (regole di connessione, trattate nel paragrafo 2.4.3). È importante inoltre tenere presente che il nucleo produttivo-manifatturiero, grazie alla pervasività dei *cyber physical systems*, è investito da cambiamenti così profondi ed estesi da non renderlo comparabile con le attività tradizionalmente svolte. Esso infatti tende a diventare un mix di sistemi composti di sotto-sistemi modulari al contempo fisici e virtuali/digitali. Per questa via la struttura di produzione manifatturiera, oltre che costituire un insieme integrato di funzioni direttamente manipolative dei materiali e di funzionalità aggiuntive per rispondere ai *customer requirements*, diventa *adattabile*, essendo l'adattabilità fondamentale per catturare la molteplicità di dimensioni e processi di cambiamento da considerare, onde acquisire vantaggio competitivo (Rees e Deimler, 2011) (Fig. 38).

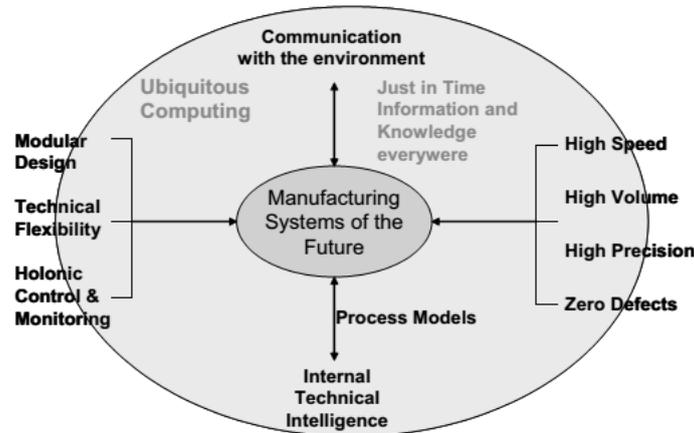
Figura 38
STRUTTURE MANIFATTURIERE ADATTATIVE



Fonte: Westkamper (2006), Fig. 1

Il binomio dinamicità adattabilità e visione sistemica diviene fondamentale proprietà di ciò che abbiamo richiamato più volte, ovvero l'*Ubiquitous Computing* (Fig. 39).

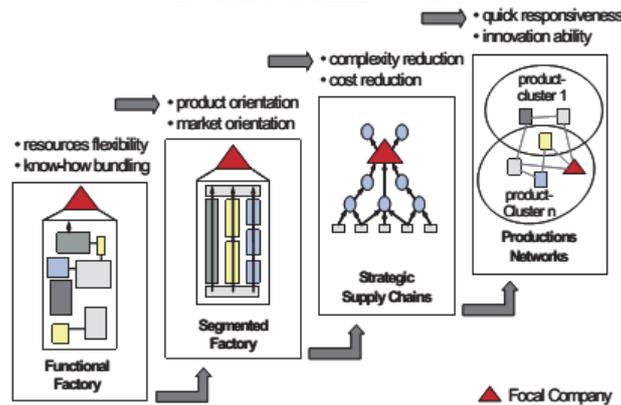
Figura 39
L'INDUSTRIA MANIFATTURIERA NELL'ERA DELL'UBIQUITUS COMPUTING



Fonte: Westkamper (2006), Fig. 7

Dall'analisi svolta discende che negli ultimi decenni è iniziata una vera e propria rivoluzione della stessa fabbrica a coronamento di una sequenza di modelli operativi funzionali (Fig. 40).

Figura 40
EVOLUZIONE DELLE IMPRESE



Fonte: Wiendhal et al. (2007), Fig. 1.3

La *functional factory* è quella dotata di risorse flessibili e capace di accumulare competenze per specifiche tecnologie, ma con un certo grado di adattatività e variazione delle tipologie di prodotto e della quantità, pur se con lunghi tempi di consegna e elevati stock di output.

La *segmented factory* è una forma maggiormente orientata alle esigenze del cliente ed è organizzata in aree manifatturiere, che sono "buffer" di input e prodotti semi-finiti, e aree di assemblaggio³⁶. Il tutto viene rappresentato in strutture gerarchiche o semi-gerarchiche.

La *forma funzionale odierna* è invece contraddistinta da reti produttive, che evolvono senza sosta lungo il ciclo di vita di una famiglia di prodotti. In questa configurazione organizzativa le relazioni di partnership hanno gradi ridotti di dipendenza, almeno apparentemente, mentre il cliente finale ha un solo interlocutore. È chiaro che il detentore delle informazioni di mercato può in molti casi esercitare, per così dire, un ruolo egemone non solo dal punto di vista tecnico-

³⁶ L'interpretazione dei contenuti della sequenza evolutiva qui esposta diverge da quella del saggio di riferimento.

produttivo, perché conosce con maggiore precisione i *customer requirements*, ma soprattutto in quanto la natura delle informazioni sui mercati consente di condizionare il processo di esecuzione degli ordini. La possibilità di ricorrere ad un ampio set di nodi alternativi della rete, dotati di competenze simili o comparabili, permette quindi alle entità appartenenti al network di ottenere economie di costo e alti livelli di qualità.

La forma organizzativa odierna, che si profila con sempre maggiore chiarezza come la “prossima generazione” dell’organizzazione di fabbrica, si basa su cluster produttivi in continua evoluzione, veri e propri sotto-sistemi modulari, con un’“impresa focale” in grado di elaborare strategie di prodotti complessi, soggetti a mutamenti di elevata frequenza nello spazio connettivo globale. Tutto ciò investe il sistema manifatturiero, ma un discorso analogo può essere svolto a proposito di quelle che sono tradizionalmente chiamate funzioni terziarie, investite da quella che Zysman (2006) ha definito “rivoluzione algoritmica”. Essa indica il processo di trasformazione progressiva di molte attività terziarie in sequenze basate su regole formalizzate, codificate e rese computabili, che sono poi riprogrammabili in funzione delle esigenze e dei problemi da risolvere. I servizi tendono a diventare combinazioni mutevoli di conoscenza codificata e tacita, a seconda delle interazioni user-producer, nonché dei cicli di feedback tra agenti (individui e organizzazioni). Su queste basi la stessa impresa si trasforma profondamente: diviene una gerarchia distribuita di attività, compiti, funzioni, obiettivi e disegni strategici, in una configurazione a network dove il mix variabile di “legami forti” e “legami deboli” è alla base della sua capacità di intercettare flussi informativi e quindi di partecipare al processo innovativo. Un’entità con tali caratteristiche, ovvero composta di gruppi semi-autonomi, richiede lo svolgimento di funzioni di coordinamento, che a loro volta dipendono dall’operatività di “tecnologie intelligenti” e dalla disponibilità di capitale umano in grado di combinare gli input in modo da generare risposte adattative e creative ai cambiamenti. La rivoluzione algoritmica è direttamente connessa all’era digitale e alle trasformazioni dei cicli produttivi, che divengono sequenze di fasi distribuite a livello internazionale (*cross national production networks*). Grazie ai “*tools for thought*”, cioè strumenti per organizzare, manipolare, conservare e trasmettere informazioni, l’economia tende a diventare *experimental economy* (Zysman *et al.*, 2006).

Il sistema economico-produttivo nel suo complesso diviene adattabile, trasformabile, ad elevata performance, in una parola “intelligente”, perché può cambiare le sue caratteristiche strutturali a seconda dei *change drivers* esogeni ed endogeni. Naturalmente, riprendendo quanto affermato nei paragrafi precedenti, i *change drivers* possono anche essere interni a network di cluster evolutivi.

Per quanto riguarda quelli esogeni, la loro molteplicità e le reciproche interdipendenze determinano la complessità e variabilità dell’ambiente, con cui le forme organizzative delle “sequenze di operazioni” devono misurarsi. Gli impulsi al cambiamento possono essere individuati in precisi fattori: 1) volatilità della domanda. 2) Aumento della varietà dei prodotti, sia nelle componenti fondamentali (*core components*) che in quelle complementari e addizionali. 3) Mutamenti di strategia, nel senso di valutare un set di elementi fondamentali (mercati, tecnologie, tipologie di consumatori) ed in primo luogo acquisire conoscenze opportune per stimare se sono sufficienti trasformazioni a livello operativo, oppure siano necessari aggiustamenti tattici, con atteggiamenti più o meno pro-attivi verso i cambiamenti ipotizzati per il futuro.

La trattazione svolta finora fa emergere un’altra proprietà della configurazione manifatturiera odierna. Tradizionalmente gli studi e i progetti di riorganizzazione hanno messo in rilievo il concetto di flessibilità, definita “l’abilità di un sistema di cambiare il proprio comportamento senza cambiare la propria configurazione.” (trad. nostra di Wiendahl *et al.*,

2007: 785). Per contro la riconfigurabilità “è interpretata come la capacità di cambiare il comportamento di un Sistema modificando la sua configurazione.

In entrambi i casi, però, la definizione richiede che siano ben definiti i confini del sistema. Nello scenario odierno, con le configurazioni dei network di cluster innovativi e con imprese focali, c'è chi ritiene più appropriato il concetto di *changeability* “as characteristics to accomplish early and foresighted adjustments of the factory's structures and processes on all levels to change impulses economically” (ivi: 785).

Per essere *changeable* l'impresa deve possedere una serie di caratteristiche peculiari, che riguardano la gerarchia di risorse di cui essa deve disporre per ottenere gli output desiderati. La gerarchia delle risorse comprende le postazioni di lavoro, le *cells*³⁷, sistemi e sotto-sistemi di assemblaggio, segmenti (intesi come sotto-insiemi compatti di attività per lo svolgimento di un'altra attività).

Proprio in rapporto a questa differenziazione stratificata Wiendahl *et al.* (2007) indicano alcune proprietà essenziali per ottenere la *changeability*: 1) *changeover ability*, riferita alla capacità di una macchina o di un stazione di lavoro di esigere una particolare lavorazione in un particolare momento, con il minimo sforzo e senza ritardi. 2) *Reconfigurability*, che definisce l'abilità operativa di un sistema di produzione e assemblaggio di passare agevolmente e in tempi rapidi dal trattare una particolare tipologia di input ad un'altra. 3) *Flexibility*, concernente la capacità operativa di un'intera area produttiva e logistica di effettuare operazioni su set di componenti diverse tra loro. 4) *Transformability*, che riguarda la capacità dell'intera impresa di riorganizzare l'intera struttura produttiva e logistica nel cambiare famiglie di prodotti. 5) *Agilità*, che è la capacità di ridefinire strategicamente mercati, prodotti e attività.

Tutti gli elementi indicati ed altri che ci accingiamo a illustrare sono alla base della progettazione di una “*living, evolving factory*”, che può essere rapidamente e in modo efficiente riconfigurata per rispondere ai mutamenti di mercato (Koren, 2006). È a tal fine che sono precisate una serie di caratteristiche che l'impresa riconfigurabile deve possedere: 1) *Modularità*. 2) *Integrabilità*, come capacità di integrare i moduli mediante una molteplicità di dispositivi elettronici e informatici, protocolli e regole. 3) *Diagnosability*, che significa da un lato l'esistenza di un sistema di interconnessione e valutazione degli eventuali divari tra set di parametri e assegnati a ciascuna componente (cella, stazione di lavoro, set di operazioni, ecc.) e dall'altro soprattutto individuare sia le causa della *failure*, sia i possibili rimedi. 4) *Scalabilità* (vedi nota 28). 5) *Convertibility*, cioè la facilità di un sistema nello svolgere nuove funzionalità controllandone la congruenza con gli esistenti fabbisogni produttivi. 6) *Customization*, che ovviamente indica la estrema flessibilità della struttura di produzione per rispondere ad esigenze molto specifiche della domanda (Si veda Dashchenko, 2006, cap. 21).

La descrizione effettuata delle profonde trasformazioni dell'industria manifatturiera, dei modelli d'impresa, dei pattern evolutivi delle sequenze di operazioni mettono in evidenza alcuni dati di fondo: il prodotto e l'impresa sono sistemi che evolvono incessantemente nel panorama tecno-economico odierno. Ciò significa che l'adozione di una visione sistemica è cruciale per misurarsi con le sfide competitive. Il punto di partenza è l'assunzione di essere di fronte a insiemi di processi (energetici, materiali, informativi), che devono essere organizzati in forme adeguate sia a recepire continue variazioni, sia a generarle direttamente in modo sempre più pressante.

È doveroso ribadire che i flussi di informazione vanno organizzati per rappresentare la sfera produttiva, mentre il *mapping dinamico* tra mondo fisico e mondo virtuale è influenzato e si sviluppa in uno spazio connettivo globale. Nell'universo fisico-informativo della nostra epoca

³⁷ Si tratta di gruppi di operazioni finalizzate ad un obiettivo, quali la conclusione di una fase di lavoro, il controllo di qualità, ecc.

l'impresa, comunque la si intenda definire, può essere vista da molteplici prospettive. Ai nostri fini essa è un sistema di scelte interdipendenti (Siggelkow, 2011) con processi e attività da rendere congruenti. Assumono pertanto un grande rilievo le interazioni tra le molte dimensioni che devono essere considerate: ricerca, produzione, architettura organizzativa. Il sistema di scelte interdipendenti richiede la capacità di effettuare appropriate selezioni in differenti spazi della ricerca, ovvero in ambiti nei quali la scelta delle soluzioni ai problemi per dare origine a prodotti da collocare sui mercati con differenti gradi di turbolenza.

Modelli organizzativi delle imprese e tipologie dell'ambiente competitivo presentano oggi, nell'era dell'accelerazione tecnologica e dell'*Ubicomp*, due proprietà essenziali: complessità e varietà, unite a tutti quei fattori prima illustrati, che ampliano costantemente lo spazio generativo degli ecosistemi digitali.

Possiamo allora comprendere come per le imprese sia necessario ridefinire il proprio modello di business. La prospettiva di *Reconfigurable Manufacturing Systems*, la creazione di ecosistemi digitali e di piattaforme, con la loro natura stratificata e dinamica, il potenziale di funzionalità che è possibile aggiungere o modificare, sono tutti fattori destinati a cambiare profondamente le attività, le sequenze di operazioni che portano agli output, la natura stessa di questi ultimi e del business in cui si esprimono le strategie delle imprese e delle organizzazioni. Ovviamente nella letteratura in tema di *strategic management* esistono numerose definizioni del *modello di business*. La più pregnante ai nostri fini ci sembra quella proposta da Amin e Zott (2012: 42): “*We define a company’s business model as a system of interconnected and interdependent activities that determines the way the company “does business” with its customers, partners and vendors.*” Le interazioni e il *matching* incessante tra il mondo fisico e quello virtuale, l'intensità della dinamica innovativa nello spazio connettivo globale impongono a qualunque attore (impresa, organizzazione, Centro di Ricerca, Università) di reinventare il proprio modello di business. Cosa significa questo e quali le sue implicazioni?

Potremmo così esprimere i principi fondanti dell'innovazione del proprio modello di business, da cui poi trarre regole generali e specifiche di comportamento (Knowledge Wharton School, 2009): 1) possedere un *open mindset* individuale e collettivo, senza mai dare per “scolpite nella pietra” le soluzioni dei problemi tecnico-produttivi più accettate. L'apertura mentale, insieme alla curiosità intellettuale, spinge alla ricerca di nuovi problemi, tanto più se sono sorprendenti e *challenging* per il sapere consolidato. 2) Approfondire le conoscenze alla base del proprio modello di business “a livello granulare”, cioè con il maggior grado di dettaglio possibile, in modo da re-immaginarlo partendo con processi *bottom-up*. 3) *Systems thinking*, che significa sviluppare le capacità di connettere piccoli e grandi eventi, aspetti specifici ed elementi di carattere generale a vari livelli (sistemi gerarchici, modelli scomponibili).

Una visione generale delle interdipendenze e delle connessioni tra tutte le dimensioni indicate nella definizione di *business model* prima esposta è pertanto essenziale quanto la conoscenza delle componenti più granulari. Il framework sistemico deve essere evidentemente improntato all'*open mindset* per cercare di comprendere e spesso modificare gli elementi di varietà in quello che abbiamo definito spazio generativo. Le scelte relative al modello di business, infatti, “*define the architecture of the business, and expansion paths develop from there on out.*” (Teece, 2010: 181). La realizzazione di un modello di business “*may require systems, processes and assets that are hard to replicate*” (ivi, 182)³⁸. L'innovazione tecnologica non è di per sè garanzia di successo se il nuovo prodotto o servizio non è inserito in strategie di proiezione sui mercati e mancano meccanismi di “cattura del valore”.

³⁸ Il saggio di Teece (2010) contiene una sintetica analisi di molti modelli di business adottati da imprese famose a livello internazionale.

Riteniamo a questo punto che, sulla base dei principi enunciati, sia logico dedurre precise regole operative, riferite in particolare all'odierno scenario dell'universo fisico-digitale: 1) Scandagliare in modo sistematico l'orizzonte generale e il proprio contesto operativo per "scoprire problemi", perché il primo rischio è non vederli e il successivo è il dover accettare le soluzioni proposte da altri, con un gap temporale pregiudizievole per le proprie attività. 2) Elaborare con attenzione mix variabili di *exploration and exploitation* negli itinerari di ricerca per la soluzione dei problemi tecnico-produttivi individuati. 3) Sviluppare una costante propensione ad interagire con altri agenti e al tempo stesso potenziare al massimo la capacità di integrazione tra flussi ininterrotti di risorse informative e materiali.

Naturalmente principi e regole richiedono, come abbiamo prima indicato, una *knowledge base* dinamica e la dotazione di competenze adeguate, insieme all'esercizio di una funzione imprenditoriale profondamente diversa da quella esercitata in passato. Sembra a questo proposito di particolare interesse l'elaborazione di Eliasson (2005) e Johansson (2010), che delinea traiettorie evolutive verso un'"*experimentally organised economy*, dove la funzione imprenditoriale e l'impresa divengono attività dirette alla soluzione di problemi di coordinamento di conoscenze appartenenti a domini diversi, modificati dai processi sperimentazione di nuove idee, approcci, metodologie. In questa visione l'impresa viene intesa come un team di competenze coordinate in funzione della scoperta di potenzialità di business in un mondo eterogeneo, complesso e ad elevata imprevedibilità.

Bisogna tenere anche presente che il campo degli studi strategici nei primi anni 2000 è stato animato da un'ampia discussione sulle riviste specializzate, soprattutto in merito al tema di fondo delineato da Kim e Mauborgne (2004, 2005). L'impiego della metafora dell'oceano rosso e blu ha avuto un ampio successo editoriale nell'indicare due differenti tipi di strategie di proiezione sui mercati. In breve si tratta di questo: elemento fondamentale dell'"oceano blu" consiste nel cercare spazi di prodotto per cui non esiste la domanda, che va creata, offrendo così possibilità per la profittabilità e una notevole crescita. La creazione di nuove industrie, dove non esistono competitori, è una delle due modalità di attuazione della strategia, mentre l'altra consiste nell'inventare un sotto-spazio innovativo all'interno dello spazio dei prodotti esistente, dove peraltro la concorrenza è più spietata (*red ocean*). Quest'ultimo è caratterizzato dal fatto che si compete in aree di mercato dove i confini settoriali sono ben definiti e condivisi, le regole competitive altrettanto ben delineate. In queste condizioni l'imperativo è vincere la competizione nel conquistare la domanda attraverso un attraente trade-off valore costo.

Per contro nel *blue ocean* gli obiettivi strategici sono la creazione di un nuovo spazio di mercato, in modo da rendere almeno in un primo tempo irrilevante la competizione, e di una nuova domanda, superando il *trade-off* valore-costi, mentre viene realizzato la congruenza (*fit*) tra l'intero sistema di attività di un'impresa nel perseguire la differenziazione e minori costi.

Al di là delle formulazioni più o meno accattivanti sotto il profilo del marketing strategico ed editoriale, la metafora *blue-red oceans*, con l'enunciazione di 6 principi generali e operativi, cattura aspetti che nella prospettiva dell'universo fisico-digitale delineata in questo contributo assumono un fondamento tecnico-scientifico. Le pressioni evolutive che spingono verso il *blue ocean* sono generate da imprese, centri di ricerca, Istituzioni, individui attraverso l'accelerazione dell'innovazione tecnologica, la proliferazione estrema di prodotti e servizi, la competizione ininterrotta a livello globale su tutti questi aspetti. L'unità d'analisi non è l'impresa né l'industria, bensì le azioni strategiche e le conseguenti decisioni di creare un nuovo spazio di prodotto e quindi di mercato (Fig. 41).

Figura 41
COMPARAZIONE TRA ORIZZONTI STRATEGICI

Red Ocean Versus Blue Ocean Strategy	
The imperatives for red ocean and blue ocean strategies are starkly different.	
Red ocean strategy	Blue ocean strategy
Compete in existing market space.	Create uncontested market space.
Beat the competition.	Make the competition irrelevant.
Exploit existing demand.	Create and capture new demand.
Make the value/cost trade-off.	Break the value/cost trade-off.
Align the whole system of a company's activities with its strategic choice of differentiation <i>or</i> low cost.	Align the whole system of a company's activities in pursuit of differentiation <i>and</i> low cost.

Fonte: Kim e Mauborgne (2004)

La capacità di elaborare e tradurre in pratica la *blue ocean strategy* non è peculiare di un certo tipo di industrie o di imprese. Al contrario è un potenziale di azione da intraprendere, che possono cogliere aziende grandi e medio-piccole di qualsiasi settore, come nel caso del *Cirque du soleil*, analizzato da Kime e Mauborgne insieme a tante altre imprese leader a livello nazionale e internazionale nel corso del XX secolo.

La metafora sembra utile e stimolante, in quanto delinea un framework generale, che aiuta a definire orientamenti e propensioni manageriali del tutto coerenti con la nostra trattazione: inventare nuovi spazi di prodotti, andare oltre il *trade-off* valore/costo, creare aree non competitive e quindi generare nuove regole e tecnologie. Questa visione manageriale in qualche modo si misura con il *digital landscape*, nel quale l'orizzonte competitivo è in continua mutazione a livello nano- micro- meso- e macro. Non è quindi casuale, ma in un certo senso costituisce il riflesso della dinamica tecno-economica in atto, che negli ultimi anni la letteratura manageriale abbia visto il proliferare di metafore, nel tentativo di catturare propensioni comportamentali e attitudini strategiche delle imprese, costrette a misurarsi con le sfide generate dai mutamenti in atto. Una delle più suggestive è certo quella proposta da Govindarajan e Srinavas (2012, precedente Fig. 34). I due autori impiegano una rappresentazione bi-dimensionale (velocità, dimensione aziendale) per descrivere la capacità innovativa di individui e imprese. La tipologia di comportamento sintetizzata nella tartaruga significa che occorre un'innovazione radicale (*breakthrough*), senza cui il destino nella dinamica competitiva appare segnato. La modalità "*rabbit*" indica che la velocità non riesce a stimolare processi di crescita, quindi è necessaria un'analisi e una riconsiderazione approfondita di tutti i fattori interni ed esterni, per esempio i rapporti con i clienti e la domanda che si genera, per individuare quali sono gli ostacoli che impediscono lo sviluppo di un business di successo. L'elefante costituisce l'archetipo dell'organizzazione pienamente soddisfatta del posizionamento competitivo, fino al punto di mostrare noncuranza verso possibili mosse di competitori per un eccesso di sicurezza di sé. È proprio il momento, invece, per procedere ad una ristrutturazione, per instillare nuova linfa e spinte come quelle iniziali, alla base del successo raggiunto, ma è importante individuare attentamente le risorse necessarie per superare il divario tra ciò che l'impresa è e quello a cui dovrebbe strategicamente tendere. Non è difficile ipotizzare il riferimento reale per la rappresentazione dell'elefante che deve cambiare, reinventarsi per tornare ad essere un leader indiscusso, *cutting edge, global player agile e adattabile*. Riteniamo di non essere lontani dal

vero pensando che la General Electric sia proprio uno dei termini di riferimento possibili, perché questo *leading global player* ha almeno due volte nella sua storia recente modificato profondamente il proprio modello di business. Nel 2009 con la *reverse innovation* (Immelt *et al.*, 2009), ovvero mettendo al centro della propria strategia di business non solo gli *high-end products* delle società più avanzate, ma anche i prodotti più adatti a mercati decentralizzati, locali, propri del Paesi emergenti. Se è vera questa nostra interpretazione, il secondo caso di “gigante” che si ristrutturava e cambia profondamente la propria cultura, il modello di business e l’intera configurazione tecno-economica è la reiventazione strategica di sé stessa con l’*Industrial Internet* e la decisione di diventare società leader mondiale non tanto nel produrre hardware, quanto software (cfr. § 3.1).

Tornando alla metafora zoologica, la quarta tipologia di impresa, il giaguaro, ha il compito di stare sempre all’erta ed essere molto dinamico, evitando il rischio di diventare tartaruga o elefante in un mondo ipercompetitivo e ad alta intensità di cambiamento. In queste situazioni occorre essere prontamente reattivi, non di rado anticipare, pena il trasformarsi in tartaruga ed essere fuori dalla competizione, come è accaduto a Nokia, Blackberry, o alla stessa Microsoft, che è rimasta tartaruga nel mercato degli smartphone. Andando comunque al di là dell’immaginifica rappresentazione in una matrice a due dimensioni, gli aspetti cruciali restano quelli più volte sottolineati: il perseguimento dell’*internal fit* e dell’*external fit* di un’impresa, indipendentemente dalle sue dimensioni e sulla base di una tempestiva conoscenza delle traiettorie evolutive sul piano tecno-economico. Tutto ciò acquista un particolare rilievo specialmente nell’universo fisico-digitale in cui le economie stanno per entrare e nel quale le sequenze economico-produttive sono un numero potenzialmente infinito. Tutto dipende dalle competenze e dalla capacità di individui e organizzazioni di adottare i comportamenti e le strategie più efficaci rispetto alla varietà e alla complessità dei processi di mutamento, che hanno un’intensità e una velocità senza pari nella storia dell’umanità.

2.7

L’universo fisico-digitale e il modello toscano

Le riflessioni che seguono non si basano su una ricognizione sistematica dell’evoluzione del sistema economico-produttivo regionale. Non è ovviamente nostra intenzione proporre una visione organica di come il modello possa rispondere alle sfide che si profilano. L’intento più contenuto di questo paragrafo è quello di mettere in risalto elementi dinamici e aspetti più *sticky* rispetto all’evoluzione generale in atto. Il tutto avviene sulla base di alcune indagini pubblicate e della partecipazione diretta all’elaborazione di alcune decine di progetti innovativi presentati da imprese toscane a bandi regionali. È superfluo sottolineare ancora una volta come una delle basi del successo dell’economia toscana negli ultimi decenni sia la sua peculiare configurazione distrettuale, su cui la letteratura è molto ampia (si veda Becattini *et al.*, 2009).

In queste note affrontiamo la seguente domanda di ricerca: sono rilevabili segnali di mutamenti tali da poter affermare che l’apparato produttivo regionale si stia misurando con le molteplici sfide che si profilano nell’ambiente competitivo ad elevata turbolenza, incertezza e intensità innovativa?

Cercheremo di rispondere attraverso l’esposizione di ricerche e indagini sia quantitative che qualitative. L’auspicio è ovviamente che dalle proposte emerga un *puzzle* componibile, in grado di stimolare riflessioni sulle traiettorie evolutive del sistema produttivo regionale.

Le Relazioni Annuali dell’Irpet sull’economia della Toscana hanno più volte mostrato come agli inevitabili effetti negativi di una crisi profonda e generalizzata, con effetti di rimbalzo

(cosiddetto *double dip*), abbiano prodotto processi selettivi dell'industria manifatturiera tradizionale. L'analisi condotta per il periodo che va al 2007 e il 2009 (Mariani *et al.*, 2009) mostra che nel confronto con gli anni pre-crisi (2004-2006) essa ha registrato un "calo più vistoso nella probabilità di sopravvivenza in tutto il periodo considerato" (Mariani *et al.*, 2012). Il fenomeno ha peraltro riguardato in misura più marcata le imprese con meno di 10 addetti, ad indicare processi selettivi più intensi per le micro-unità. Al tempo stesso, però, la capacità reattiva delle imprese toscane ha presentato aspetti non irrilevanti di notevole dinamismo. Un altro contributo elaborato in sede Irpet-Unioncamere Toscana (La situazione economica della Toscana nel 2013) mostra come, di fronte alla sequenza di spinte recessive (2008-2009; 2011-2013) le imprese abbiano adottato una pluralità di comportamenti. Il primo, di natura difensiva, incentrato sul tradizionale contenimento dei costi e la compressione dei margini, senza introdurre cambiamenti significativi di tecnologie o di prodotto. Un secondo atteggiamento è stato certamente più dinamico, definito "pro-attivo", nel senso che le unità in questione hanno cercato di cogliere nuove tendenze innovando il mix di mercato/prodotti, anche con l'esplorazione di nuovi canali distributivi e sbocchi commerciali (p. 49). Dai dati contenuti nello studio (Tab. 3.5, p. 50) si evince anche un aspetto non del tutto positivo: tra le misure adottate per la riqualificazione dell'offerta la "realizzazione di programmi di investimento" riguarda una percentuale piuttosto bassa che, se unita a una modesta capitalizzazione delle stesse imprese, delinea un quadro in leggero movimento, ma che si misura con un ambiente competitivo ad elevata velocità.

Il quadro diviene più interessante e vivace se si prende in esame la Relazione Irpet *La Toscana oltre la crisi* (Febbraio 2014), dalla quale emerge che in un'"economia in transizione" come quella toscana, caratterizzata da un lungo periodo di diminuzione degli investimenti (2008-2013), esiste un nucleo consistente di circa 3300 imprese eccellenti (5,5% del manifatturiero) che, rispetto al periodo pre-crisi, hanno continuato ad aumentare fatturato e occupazione. Si tratta per lo più di imprese medio-grandi, le quali operano stabilmente sui mercati internazionali. Un sotto-insieme di questo nucleo, pari a circa 1000 unità, presenta indicatori di performance di crescita piuttosto alte: imprese giovani con più di 10 addetti, con aumenti marcati di fatturato e addetti (50.000 rispetto ai 20.000 del 2003) e un contributo del 12% all'export totale toscano.

Esiste, dunque, in Toscana un nucleo propulsivo manifatturiero, che è riuscito a mostrare comportamenti marcatamente dinamici durante anni di profonda recessione.

Una conferma di queste affermazioni, con un ampliamento dei flussi informativi acquisiti ed elaborati, è desumibile da una ricerca svolta da ricercatori di Unioncamere e del DISEI (Dipartimento di Scienze per l'Economia e l'Impresa) (*Rapporto dell'Osservatorio sullo sviluppo d'impresa*, 2014). L'intento della ricerca è stato quello di effettuare un primo tentativo di esplorazione di una serie di database esistenti presso Unioncamere Toscana, al fine di individuare e comprendere fattori e meccanismi alla base delle dinamiche di crescita e sviluppo delle imprese toscane.

Gli esiti dell'indagine esplorativa svolta su database dinamici presso Unioncamere, attraverso un'analisi di cluster con precisi indicatori, ha portato a definire quattro raggruppamenti-tipologie di imprese, così definite: 1) *forerunner*, che definisce le unità con andamenti pluri-dimensionali più dinamici; 2) *runner*, con performance meno brillanti e diversificate; 3) *follower*, denominazione riferita a entità che sembrano avere posto in essere strategie e comportamenti di pura "resistenza" alla crisi in atto; 4) *laggard*, che raggruppa le imprese in maggiore difficoltà e non ancora in grado di avviare strategie efficaci di risposta alla dinamica involutiva che le sta interessando con particolare intensità.

L'indagine esplorativa ha inoltre permesso di individuare, sia nell'universo complessivo dell'indagine che in due sotto-sistemi produttivi (moda e “*mechanical engineering*”, da ora in poi ME), due cluster di imprese con significativi profili dinamici: il 22% nella moda e un terzo nel ME presentano infatti indicatori del tutto o in parte soddisfacenti per quanto riguarda fatturato e investimenti (indici di crescita), produttività e redditività operativa. Quasi metà del sotto-sistema Moda e poco meno del 45% nel caso del ME compongono il cluster denominato “*follower*”, con indicatori che delineano un quadro di sostanziale contenimento degli effetti della crisi nel primo e un andamento molto più diversificato nel secondo.

Un'incidenza percentuale sostanzialmente simile nei due sotto-sistemi (28-29%) hanno le imprese che presentano indicatori di situazioni in forte deterioramento strutturale (cluster denominato *laggard*).

Pur nella consapevolezza che il nostro universo d'indagine non sia statisticamente significativo, sembra tuttavia interessante trarre alcune indicazioni di carattere generale dal lavoro di analisi svolto su un campione di 1.500 imprese.

Occorre innanzitutto rilevare che un numero cospicuo di unità esaminate mostra non solo un'apprezzabile capacità di tenuta, ma anche segnali di appropriata reattività ad una delle crisi più gravi degli ultimi cento anni.

Il secondo elemento, connesso al precedente, è che l'aggregato in questione ha continuato ad investire, riuscendo a preservare un certo grado di solidità economico-finanziaria, oltre che buone posizioni di mercato.

Il terzo aspetto di rilievo concerne il fatto che lo strato con i profili più dinamici (*forerunner e runner*) è composto soprattutto da piccole e medie imprese, che sono quindi riuscite a realizzare combinazioni dinamiche di fattori, in base ai quali non è arbitrario sostenere che siamo di fronte a processi crescita, sia pure contenuta.

Bisogna altresì mettere in risalto l'esistenza di una differenziazione settoriale piuttosto evidente e significativa sul piano delle classi dimensionali di addetti. Nel sotto-sistema della Moda i profili più dinamici hanno un'incidenza percentuale (intorno al 22%) e sono presenti soprattutto nella classe 10-49 addetti). Nel ME, invece, le componenti più dinamiche sono rilevabili nelle classi di addetti “*estreme*” (10-49, ancor più in quella oltre 500 addetti).

Questi elementi inducono a ritenere fondata la seguente proposizione: *durante la profonda crisi, iniziata nel 2007, la capacità di crescita è una proprietà che non può essere associata a una precisa caratterizzazione dimensionale delle imprese toscane.*

Da questa affermazione è fondato dedurre che la capacità di crescita è il risultato dei processi, non correlati alla dimensione, attraverso i quali strategie e comportamenti aziendali realizzano modelli appropriati di business in un ambiente competitivo ad elevata turbolenza come quello odierno.

I campioni analizzati dall'Irpet e da Unioncamere-DISEI non sono comparabili e comunque sono solo in parte sovrapponibili; purtuttavia è notevole che da insiemi rilevanti di unità economico-produttive emergono elementi di indubbio interesse e similarità sul terreno dei profili dinamici delle imprese. Cerchiamo allora di dare uno sguardo più ravvicinato, aumentando il livello di “granularità” dell'analisi mediante l'esame di filiere cruciali dell'economia toscana: tessile e pelletteria.

Riprendendo una linea di ricerca introdotta in Bacci (2004), ma i cui ulteriori sviluppi sono pubblicati in Bacci *et al.* (2010) e in Randelli e Lombardi (2013), sono enucleabili le seguenti traiettorie evolutive, concernenti la filiera della pelletteria e che forniscono spunti di riflessione al fine di comprendere le dinamiche di trasformazione di parti significative dell'apparato produttivo toscano. È superfluo ribadire che la produzione pellettiera toscana e fiorentina ha subito un sostanziale processo selettivo, con una notevole diminuzione dei piccoli produttori e

soprattutto delle unità “indipendenti. In questo scenario, specie nei due lavori del 2010 e 2013 emerge con tutta evidenza una traiettoria evolutiva dei sistemi di piccola impresa già indicata in Lombardi (2003): 1) tendenza alla formazione di aggregazioni semi-verticali di imprese, con determinate “unità centrali”, ovvero leader global player in grado di proiettarsi sui mercati internazionali. 2) Le imprese leader organizzano intorno a sé differenti morfologie reticolari, con differenti livelli di stratificazione e gradi di accentrimento decisionale. 3) Le organizzazioni a rete in parte si sovrappongono, per tale via favorendo processi di osmosi delle culture tecnico-professionali, che in questa maniera costituiscono un “sostrato” di competenze tale da diventare forza attrattiva per l’arrivo di global player internazionali. 4) In queste reti tendono a consolidarsi flussi informativi sia *top-down* che *bottom-up*, con una funzione essenziale attribuita a tecnici specializzati. Questi ultimi sono il più delle volte selezionati all’interno dei *supplier* locali, in modo da stimolare al massimo processi osmosi *cross-functional* e rafforzare così i meccanismi connettivi tecnico-culturali, che sono decisivi per realizzare strategie produttive dinamiche (Randelli e Lombardi, 2013). 5) Sono adottate peculiari modalità di *governance*, dato che funzioni sistemiche di organizzazione della filiera (R&S, marketing e finanza) sono svolte a livello di *business group*, mentre mix variabili di prezzo, autorità e trust sono strumenti adottati per il controllo qualitativo e quantitativo dei parametri di processo e di prodotto.

Gli elementi conoscitivi acquisiti con le ricerche esposte lasciano intravedere come componenti significative della produzione manifatturiera siano state interessate da processi di trasformazione come quelle indicate nei paragrafi iniziali di questo contributo: emergere di *global value chain* e *global production networks*, formazione e consolidamento di processi multi-scala con distribuzione delle funzioni lungo le sequenze economico-produttive a scale territoriali molto differenti (Lombardi e Macchi, 2012). Tutto ciò avviene senza la perdita di importanza delle agglomerazioni territoriali; queste ultime possono anzi contenere fattori attrattivi di varia natura: competenze, beni ambientali e paesaggistici, condizioni di *well-being*. È importante sottolineare un aspetto rilevante: la funzione attrattiva non è svolta solo da competenze di livello tecnologico elevato. Una ricerca appena terminata e ancora inedita di IRES Toscana sulla filiera della pelletteria e la domanda di professionalità fornisce elementi indubbi proprio su questi aspetti: all’interno di una tendenza generale verso un incremento della domanda di lavoro con dotazioni cognitive più elevate, permane una forte esigenza di lavorazioni con contenuti tecnico-esperienziali riproducibili meccanicamente, né su dispositivi basati su algoritmi formalizzati. Anche se si tratta di apporti produttivi importanti, siamo sempre sui gradini più bassi del *technological ladder* settoriale, quindi soggetti a pressioni sui costi retributivi. Importa rilevare, ai nostri fini, che siamo in presenza di un fenomeno importante: processi multi-scala che combinano elementi estremamente dinamici nello spazio connettivo globale e dell’ambiente competitivo ad alta velocità con aspetti a prima vista appartenenti ad un mondo in via di superamento, ma così non è per la filiera della pelle.

Una dinamica tecno-economica di questa natura sembra aver interessato decisamente meno il tessile pratese (Lombardi e Macchi, 2014), dove si è realizzata una dinamica involutiva, che attiene in particolare alle innovazioni di processo, prodotto e tecnologie, oltre che alla prevalenza di modelli manageriali *unfit* rispetto alla diversificazione delle traiettorie evolutive delle filiere e del sistema produttivo locale. Il mancato emergere di nuove figure imprenditoriali in grado di svolgere funzioni di global player e di inserire stabilmente le sequenze produttive locali in processi multi-scala ha fatto sì che il grande potenziale innovativo, espresso negli ultimi decenni, abbia perso forza propulsiva autonoma. Al contempo si sono prodotti una serie di circuiti di feedback negativi, che hanno contenuto la dinamica: riduzione della domanda dei prodotti tradizionali, fino ad una inversione di segno; minore innovazione, calo degli

investimenti, persistere di modelli manageriali non del tutto consapevoli delle nuove sfide connesse a scenari strategici profondamente cambiati rispetto ai decenni trascorsi.

Tutto ciò non ha però impedito che realtà molto dinamiche sul piano tecnico-produttivo potessero consolidarsi e sviluppare un'attività di notevole livello. Il riferimento è all'Istituto "Buzzi" di Prato, che nel corso di un recente seminario della Regione Toscana ("I luoghi per lo sviluppo" 13 ottobre 2016) ha presentato un'illustrazione della rilevante svolta non solo a scala locale, ma anche e soprattutto a livello nazionale e internazionale, di analisi dei materiali e certificazione per una serie di grandi player sul mercato mondiale (Bartolini, presentazione in powerpoint).

Dall'analisi sin qui svolta, che ovviamente contiene aspetti parziali e purtuttavia significativi, si deduce che il sistema economico-produttivo toscano sta reagendo in forme molto diversificate alla dinamica tecno-economica in atto. È quindi logico che la configurazione distrettuale presenti aspetti di più o meno tendenziale superamento, ma anche insospettite doti di *reengineering* e rivitalizzazione secondo nuove direttrici tecnologiche e ambientali.

Nell'area conciaria di S. Croce, infatti, esiste una ricca e significativa attività di progettazione tecnico-produttiva, soprattutto grazie all'azione di forme associative consortili appositamente costituite, le quali hanno sviluppato numerosi progetti, finalizzati all'introduzione di nuove tecnologie per la riduzione delle emissioni, al recupero di particolari materiali (ad es. il cromo), alla creazione di un codice etico (Associazione Conciatori) e allo sviluppo di una certificazione ambientale di distretto (Certificazione EMAS). Nel contempo sono stati sviluppati consistenti rapporti di collaborazione e partnership sia tecnologica che strategica con Centri di Ricerca e Università (Università di Pisa e Firenze, Scuola Superiore S. Anna) e collaborazioni intense e continue con aziende della chimica. Vi sono anche rapporti collaborativi con Istituti di Ricerca per il calcolo dell'*ecological footprint* (impronta ecologica), ovvero l'ammontare di risorse naturali consumate nell'attività produttive, stimato attraverso l'area biologica (mare e terra) necessaria per produrre tali risorse e assorbirne i rifiuti. L'elaborazione di strategie innovative e di conseguenti progetti è stata possibile grazie all'operatività di veri e propri "agenti catalizzatori" di risorse materiali e immateriali (orizzonti e linee strategiche), quali Po.Te.Co. (Polo Tecnologico Conciario) e l'Associazione Conciatori. La loro azione ha consentito di avviare non solo disegni strategici settoriali e di filiera, ma anche innovazioni progettuali su scala territoriale più ampia, per esempio nel recupero di risorse essenziali, come nel caso dell'acqua di scarto della Val di Nievole, recuperata a fini produttivi per essere utilizzata nell'area conciaria, quindi depurata alla fine del ciclo completo. Altri progetti in corso di attivazione nel campo della bio-economia.

Altri elementi di notevole interesse sono desumibili dalla nostra partecipazione diretta all'elaborazione di progetti presentati da imprese nell'ambito del POR-REG Smart Specialization 2020 e dalla collaborazione ai Progetti innovativi, presentati da imprese insieme a Confindustria Siena, con il finanziamento di Fondimpresa.

Il set di realtà aziendale che abbiamo indagato e per le quali il team di lavoro del Distretto tecnologico "Sistema Interni" ha contribuito all'elaborazione strategico-progettuale comprende più di cinquanta imprese toscane, appartenenti a numerosi comparti: mecatronica, elettronica, macchine movimento terra, materiali e dispositivi per le costruzioni edili, dispositivi per il controllo energetico, mobili e arredamento, vetro, nautica, artigianato artistico. Nell'80-90% delle linee strategico-progettuali siamo in presenza di direttrici innovative che colgono peculiarità abbastanza simili a quelle degli scenari descritti nei paragrafi iniziali. Anche nell'artigianato artistico, per esempio, vi sono strumenti e forme embrionali di *digital twin*, mentre altre metodologie e ipotesi progettuali impiegate in molte imprese analizzate potrebbero essere ritenute non distanti dall'universo fisico-virtuale al centro di questo lavoro. Il divario non

è da valutare tanto sul piano tecnico, quanto sul terreno strategico-progettuale e manageriale. In particolare sembra di poter affermare con un certo fondamento che vi sono soprattutto problemi di *mindset* tecnico degli addetti e degli imprenditori nell'affrontare un framework teorico ed operativo del tutto differente, incentrato su interdisciplinarietà, *cross-functional team*, partnership progettuale con altre unità. Non è un caso che le realtà più aperte in questa direzione siano quelle produttrici di output *multi-technology* e quindi con un grado di complessità del prodotto tale da rendere impossibile il controllo completo della serie di domini conoscitivi necessari per dare origine a risultati che le mettano in grado di essere competitive.

Non è sorprendente, inoltre, che il tasso di innovatività dei prodotti, processi e tecnologie non appaia, tranne in alcuni casi di vere eccellenze produttive, particolarmente elevato, ove con questa espressione sintetica si indicano attività di produzione non prossime alla frontiera. Rimane comunque, al termine di queste riflessioni sull'universo fisico-digitale e il modello toscano, un punto cruciale: la funzione imprenditoriale tradizionalmente esercitata nei sistemi di piccola impresa a nostro avviso richiede un profondo cambiamento culturale e strategico. La direttrice strategica più promettente e appropriata per lo scenario tecno-economico generale è quella al centro dell'elaborazione di Eliasson (2010): la funzione imprenditoriale deve assegnare centralità ad attività di sperimentazione in nuovi campi e ambiti degli ecosistemi digitali in continuo mutamento.

Sperimentazione e coordinamento strategico tra set variabili di linee di ricerca dovrebbero essere le coordinate generali per un *mindset* imprenditoriale che intenda misurarsi con le sfide odierne.

È chiaro, infine, che il perdurare di un orizzonte strategico-culturale limitato a scala locale implica l'assunzione, consapevole o inintenzionale, che si possa operare sulla base di strategie "di nicchia". Ipotesi di un tale posizionamento competitivo sono però soggette ad elevata vulnerabilità in uno spazio connettivo globale, che crea incessantemente "nicchie dinamiche", ovvero funzionalità e *demand requirements* che rischiano di "spiazzare" molte opzioni produttive e output oggi esistenti.

Vi sono comunque in Toscana realtà distribuite, territorialmente e dal punto di vista settoriale, che sono già in qualche modo attive sul terreno della "Fabbrica Intelligente", come viene con precisione documentato da QUINN (2015), che mette anche a fuoco alcuni problemi sui quali torneremo nella parte finale del capitolo 6, ovvero quello che chiameremo il divario tra il potenziale tecnico-scientifico esistente a livello regionale e il potenziale economico produttivo ("difficoltà di collaborazione tra mondo della ricerca e mondo dell'impresa", Quinn, p. 57).

Bisogna però rilevare alcuni segnali positivi di inversione della tendenza, cioè di iniziative che mirano a stimolare processi di trasformazione verso lo scenario incentrato su Industria 4.0.

È doveroso innanzitutto ribadire che la presenza di global player può costituire un motore essenziale: si pensi alla Piattaforma tecnologica Predix della General Electric, a cui già collaborano imprese toscane, sia manifatturiere in senso stretto che sviluppatrici di funzionalità aggiuntive (laboratori universitari e piccole unità ad alta intensità di conoscenza).

Un passo in avanti molto importante potrebbe essere costituito dalla recente delibera regionale (8.11.2016), con la quale è stata decisa la creazione del Distretto tecnologico *Advanced Manufacturing*, con la fusione di due preesistenti distretti tecnologici (Fortis e Automotive), e della Piattaforma Regionale Industria 4.0. Si tratta di un'architettura generale, che sistematizza molte componenti dei vari livelli del sistema formativo regionale, con l'obiettivo cruciale di coordinamento strategico-operativo rispetto sia all'analisi delle potenzialità di evoluzione economico-produttiva, sia alla generazione di impulsi verso la trasformazione verso Industria 4.0. Si tratta di significativo tentativo di accelerazione, che ovviamente richiederà ulteriori passaggi e strumenti di natura progettuale ed operativa.

Esistono, inoltre, in Toscana entità poco note, ma molto attive nell'orizzonte tcno-economico al centro di questo contributo.

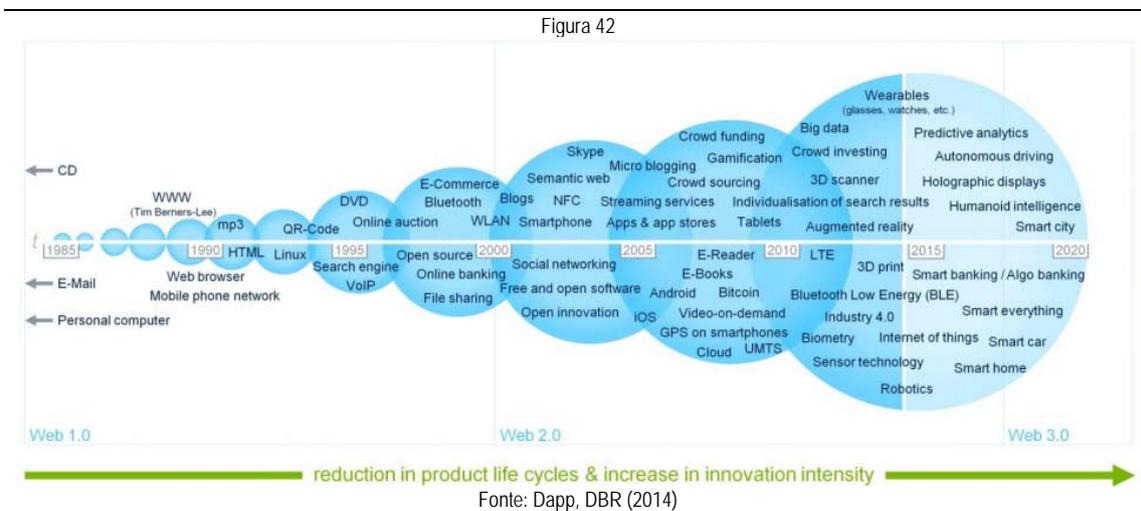
Intendiamo riferirci innanzitutto all'esperienza dell'area industriale di Montacchiello, situata nell'ambito del Comune di Pisa, dove un "agente catalizzatore" privato ha progressivamente creato un insediamento di imprese high tech (nazionali e multi-nazionali) attive nelle ICT, oltre a realtà di coworking e di startup innovative, grazie alla costituzione di una infrastruttura materiale di alto potere attrattivo (rete ad elevata ampiezza di banda³⁹).

³⁹ Questa esperienza e altre iniziative di catalizzazione innovativa sono analizzate nella tesi dottorato in Architettura presso l'Università di Firenze. Il titolo della tesi, elaborata dal Dott. Manuel Marin è: "L'ecosistema dell'innovazione nei processi di regionalizzazione dell'urbano. Implicazioni per la pianificazione spaziale".

3.
 COMPLETA DIGITALIZZAZIONE DELLO SPAZIO TECNO-ECONOMICO.
 SFIDE TECNO-ECONOMICHE E NUOVI MODELLI MANAGERIALI

3.1
 Dalla digital ubiquity al platform thinking

Se la traiettoria irreversibile nei prossimi decenni è la tendenziale digitalizzazione dello spazio tecno-economico, ovvero la creazione di una rappresentazione virtuale isomorfa ai processi e ai prodotti reali, è fondamentale trarne alcune implicazioni sul piano sia delle metodologie e degli strumenti operativi, che su quello dei processi decisionali e strategici degli agenti (individui, imprese, organizzazioni) (Fig. 42).



Una rappresentazione grafica dell'universo fisico-digitale in continua espansione fa intravedere come le linee di sviluppo e i campi di applicazione hardware e software si arricchiscano incessantemente con l'aggiunta di sempre nuovi domini da esplorare e approfondire. Siamo attualmente sulla soglia di un potenziale tutto da scoprire, che richiede ad ogni tipologia di agenti mutamenti significativi di modelli, metodologie e strumenti di elaborazione delle informazioni e della conoscenza. Grandi sfide si profilano innanzitutto nel doversi misurare con quantità crescenti di dati di diversa natura, che non saranno facile oggetto di elaborazione se non si modificheranno gli strumenti e i modelli utilizzati. Ciò comporta che ne saranno influenzati i processi decisionali a tutti i livelli, perché nel processare le informazioni occorreranno meccanismi altamente innovativi e potenti, i quali a loro volta apriranno traiettorie di sviluppo nuove e fino a poco tempo fa impensate.

Siamo entrati nell'era dei *Big Data* o *Massive Data*. Naturalmente non esiste una definizione univoca, che vada al di là del riferimento a grandi volumi di dati e informazioni. In questo contributo adottiamo la definizione elaborata dal McKinsey Global Institute (2011: 1-2): "*Big Data refers to databases whose size is beyond the ability of typical database software tools to capture, store, manage, and analyze. This definition is intentionally subjective and incorporates a moving definition of how big a dataset needs to be in order to be considered Big Data. We assume that, as technology advances over time, the size of datasets that qualify as Big Data will*

also increase. It is also important to note that the definition can vary by sector, depending on what kinds of software tools are commonly available and what sizes of datasets are common in a particular industry. With those caveats, Big Data in many sectors today will range from a few dozen terabytes to multiple petabytes (thousand of terabytes)”.

In realtà bisogna tenere presente almeno tre aspetti dei Big Data su cui concentrare l'attenzione.

Oltre alla dimensione crescente, grazie all'accelerazione della potenza computazionale disponibile e all'Ubicomp, è da tenere presente che proprio questi elementi alimentano la velocità crescente nella creazione e nell'uso dei flussi informativi da parte di tutti gli operatori.

Il terzo aspetto da considerare è che tali flussi non sono un universo disorganizzato, bensì un enorme spazio in cui si combinano strutture di dati secondo modalità prevedibili, ma anche set informativi non organizzati e semi-strutturati (vedi infra).

Tutto questo è conseguenza del fatto che i Big Data derivano dalle interazioni tra imprese, mercati e istituzioni, dalle strategie di ottimizzazione e adattamento dei processi produttivi, dalle ricerche congiunte in campo sanitario nella lotta contro le malattie e per l'ottenimento di trattamenti sanitari efficaci, dai tentativi effettuati in sfere della *sicurezza* pubblica sia nella vita quotidiana che nel *cyberworld*, dai progetti di organizzazione *smart* di città reti energetiche, infrastrutture di trasporto e così via.

L'*Ubicomp* e la connettività globale richiederanno innanzitutto un'infrastruttura complessa, che include -oltre alle componenti fisiche e immateriali (software e competenze tecniche)- lo sviluppo di nuove, e al momento solo ipotizzabili, capacità di elaborazione strategica e quindi di organizzazione dei processi decisionali in grado di individuare e misurarsi con sfide molto spesso impreviste. Una *survey* dell'*Economist Intelligence Unit* (EIU, 2015) su 550 top manager di imprese global player rivela che il data management è diventato da alcuni anni uno *strategic corporate asset*, nel senso che è base fondamentale per catturare opportunità di business e profittabilità. È stato anche rilevato un salto di qualità: i Big Data, da campo di possibilità teorico, sono divenuti uno strumento essenziale per mettere a fuoco e risolvere problemi. In estrema sintesi, nel periodo 2011-2015 vi è stata una *data evolution* “*from data adolescence to data adulthood*” (p. 18), che consiste di fatto nella diffusa consapevolezza che le decisioni economico-produttive devono essere sempre più *data-driven*, in quanto i dati sono un asset essenziale per iniziare processi innovativi, elaborare proposizioni anticipatorie su basi algoritmiche e sviluppare processi decisionali rafforzati dall'intelligenza computazionale. Sono tutti temi di grande rilevanza che cercheremo di approfondire nei prossimi paragrafi.

Il punto di partenza della riflessione è che la *digital ubiquity* (Iansiti e Lakhani, 2014) produce innanzitutto un cambiamento dei meccanismi di intelligenza strategica nello sviluppo di nuovi prodotti e tecnologie, perché il paradigma dominante dell'evoluzione economico-produttiva non è più incentrato sui principi dello “spiazzamento” o sostituzione di ciò che esiste, bensì su connettività e ri-combinazione. La pervasività dei *cyber physical systems* e il *matching dinamico* nell'universo fisico-digitale rende imperativa la ricerca di spazi tecnico-produttivi sempre nuovi attraverso partnership strategico-progettuali. Ciò significa assumere comportamenti adattativi e al tempo stesso in grado di individuare potenzialità inesprese, cambiando tempestivamente i propri *frames*, compresi quelli che sono stati fonti di successo nel passato più recente. Si pensi alla General Electric e al suo annuncio circa *Industrial Internet*, che prevedeva la riorganizzazione da impresa che avremmo definito di “industria pesante”⁴⁰ a società leader globale nella produzione di software per il controllo e la gestione dell'enorme ammontare di informazioni generate da sensori, microprocessori, attuatori e una miriade di

⁴⁰ Turbine, pale eoliche, sistemi biomedicali, locomotive, attrezzature per l'estrazione di risorse energetiche.

dispositivi di monitoraggio granulare di tutte le tipologie di output vendute. La creazione di un nuovo centro di ricerca nel campo del software e di una piattaforma (*Predix*), insieme all'organizzazione di partnership estese a livello globale con un numero rilevante di unità e Centri di ricerca, evidentemente è dovuto al fatto che *l'Ubicomp* e la *digital connectivity* generano in primo luogo enormi volumi di dati, che devono essere elaborati in informazioni e conoscenze per il management delle strutture tecnico-produttive esistenti. Si tratta infatti della necessità di coordinare l'enorme potenza computazionale distribuita con l'acquisizione dei dati e informazioni, al fine di ridurre le conseguenze di *failures* e anzi cercare di prevenirle mediante strumenti e modelli computazionali in grado di stimare preventivamente le potenzialità di crisi e *defaillances*. La creazione del valore si trasferisce quindi dalla produzione fisica alla generazione, gestione e analisi della produzione immateriale. Sviluppiamo questo punto relativo alla General Electric, perché è emblematico di un numero crescente di realtà produttive anche su piccola scala. Dal 2011, data della creazione della GE software, ad oggi alcune migliaia di ingegneri, con differenti background specialistici, hanno creato il software che consente a Predix la *predictive maintenance*, perché connette direttamente ai dispositivi GE distribuiti nel mondo e basati su *M2M communications* di controllare i parametri di funzionamento. Gli effetti positivi sono notevoli: non solo si effettua la manutenzione preventiva, con diminuzione dei periodi di inattività delle attrezzature e quindi riduzione dei costi, ma al tempo stesso aumenta l'efficienza e si previene la possibilità di sovra-utilizzazione e di sotto-utilizzazione, evitando così rischi di *failures* sistemiche e altri gravi imprevisti. Occorre inoltre sottolineare che in questo modo si può anche intervenire meglio e con maggiore tempestività, perché –attraverso *l'Ubicomp* e la *digital ubiquity*- è possibile monitorare costantemente scenari alternativi: input e tecnologie innovative, competenze da coinvolgere. Può pertanto cambiare lo spazio delle interazioni, moltiplicando al tempo stesso le potenzialità di business e le ricombinazioni tra domini conoscitivi. Ha fatto ricorso a Predix, per esempio, il Public Service Enterprise Group (PSEG), società operante a New York e nel New Jersey per controllare in tempo reale le variazioni della domanda di elettricità, le condizioni della rete, l'utilizzazione degli input di gas. In pochi mesi PSEG ha aumentato l'output del 6%, ridotto dell'1,5% la quantità di input consumata e accresciuta la flessibilità operativa dell'intero set di turbine a gas produttrici di elettricità.

Un ulteriore esempio, che potrebbe assumere un significato paradigmatico anche per l'Italia e le molte *utilities* attive a livello nazionale e locale, è il seguente. Nel 2014 Google ha rilevato con 3,2 miliardi di dollari la Nest, società che opera nel campo dei termostati e strumenti di controllo delle emissioni. Quello che è accaduto successivamente comprova ulteriormente come la *combination and recombination* possano far scoprire il potenziale tecnico-economico da cui attingere nello scenario odierno. Nest utilizza e gestisce i flussi di informazioni inerenti all'intero processo che va dal controllo della temperatura nelle case al consumo aggregato di energia. Quest'ultimo è poi oggetto di transazione con le società erogatrici di energia, le quali possono in tal modo elaborare modelli computazionali di previsione dei consumi e conseguentemente modelli computazionali per la produzione sulla base di scenari alternativi, ottenendo così più alti livelli di efficienza. È interessante sottolineare un duplice aspetto: 1) Nest ottiene profitti sia con i suoi prodotti dal costo più elevato rispetto ai concorrenti, sia con informazioni aggregate, fornite ai produttori. In questo modo i pattern di consumo elaborati sono fonte di risparmio per le *utilities*, 2) Parte di questi risparmi sono poi concessi ai consumatori che hanno acquistato i termostati e i dispositivi di controllo dei micro-sistemi produttori di energia.

A conferma della natura combinatoriale dello spazio tecnico-produttivo, su cui abbiamo insistito più volte, Nest sta impiegando la stessa piattaforma per connettersi con sistemi di

lavaggio *Whirlpool*, distribuiti in molte abitazioni, al fine di controllare e regolare i cicli di lavaggio durante le ore di picco, con l'esito finale -a livello di sistema aggregato- di un uso più efficiente degli impianti di produzione e distribuzione di energia, evitando così imprevisti eventi catastrofici o negativi in genere. Viene fatto ampio uso da Nest, infatti, di molte altre società operanti nei più svariati campi di attività (automotive, mezzi di trasporto, controllo infrastrutturale) di modelli costruiti in base ai *digital twin*, che consentono di utilizzare i dati *real time* per simulare scenari di varia intensità e estensione. Siamo in questi casi di fronte a una vera e propria attività di sperimentazione, su cui ci soffermeremo maggiormente nel paragrafo 3.3 e nel capitolo 4). Tutto ciò viene anche connesso con la *wearable technology*, dato che una società produttrice di dispositivi "indossabili" adatta la temperatura dell'ambiente a seconda della presenza o meno delle persone, dell'orario (notturno, diurno) e dello stato individuale (sonno, veglia). È superfluo rimarcare che possono essere ipotizzate le regolazioni di altri beni di consumo elettronici. Questi ultimi sono quindi da considerare espressioni concrete di quanto precedentemente affermato circa l'insieme indeterminato di potenzialità che è possibile aggiungere grazie all'*Ubicomp* e alla *digital connectivity*. Soprattutto i casi riportati indicano chiaramente che, data l'esistenza di un universo di flussi informativi da organizzare, gli agenti tecno-economici sono di fronte alla necessità di effettuare una vera e propria discontinuità: dal progettare e realizzare un output che soddisfi parametri di domanda come "box funzionale" (set di funzioni) per le esigenze ad un modello del tutto innovativo e intrinsecamente dinamico. Si tratta, infatti, dello sviluppo di soluzioni specifiche per il cliente, basate sull'integrazione di molteplici apporti: tecnologia, visioni del business, ruoli e funzioni di agenti in partnership.

È a questo punto importante porre l'accento su un aspetto cruciale dell'evoluzione dell'organizzazione funzionale delle imprese, che sta investendo tutto il mondo economico-produttivo, a partire da entità in grado di competere a livello globale. Si tratta di un processo rilevante, perché apre spazi tecno-produttivi molto ampi per imprese di tutte le dimensioni. Il punto cruciale è il seguente: diviene centrale la capacità di svolgere funzioni dinamiche in una configurazione economico-produttiva che evolve incessantemente e in maniera solo in parte prevedibile nell'universo fisico-digitale.

Partiamo dall'esempio della Boeing (Nolan, 2012), che ha completamente rivoluzionato l'organizzazione della sequenza di operazioni che portano alla realizzazione dei vari modelli di aereo. La filosofia manageriale e il modello prevalso per decenni avevano al centro la struttura gerarchico-funzionale dalla progettazione alla realizzazione dell'output. In seguito alla rivoluzione delle ICT e dei metodi di progettazione e comunicazione, nel 1996 viene enunciata una strategia ventennale per il 2016, concretizzata in un framework strategico-operativo del tutto rivoluzionario rispetto al passato. La strategia per il 2016 vede al centro la Boeing come "integratore di sistemi", perno dinamico di un network organizzativo globale di unità, che sviluppano attività e competenze per generare output funzionali con determinate caratteristiche parametrizzate. Il prodotto viene infatti concepito come un insieme organico di sistemi tra loro integrati, i quali conferiscono valore al cliente lungo il ciclo di vita delle varie componenti del Boeing 747 (e ovviamente reddito alla Boeing), "unità centrale" del sistema complessivo. Si tratta in sostanza di un'integrazione organizzativa virtuale, ottenuta grazie all'*Ubicomp* e quindi alle possibilità di sviluppare e tenere sotto controllo un processo tecnico e decisionale molto frammentato, ma il cui coordinamento avviene mediante la visione sistemica del prodotto, composto di sotto-sistemi "annidati" al loro interno, con ulteriori sotto-sistemi e così via fino alle componenti elementari. Tutto questo è realizzato su scala globale e genera ovviamente problemi non banali di coordinamento decisionale tecnico-economico, nonostante le enormi possibilità di manipolare quantità rilevanti di flussi informativi, elaborati dalla miriade di unità coinvolte nel progetto. Riuscire a sostenere una coerenza strategica globale in un progetto

complesso e di notevole varietà al proprio interno non è certo un compito agevole. Purtroppo, appunto le nuove tecnologie dell'informazione e la digitalizzazione di processi e prodotti, unitamente ad una vera e propria "rivoluzione manageriale", hanno consentito di realizzare output che circolano nei cicli di produzione avendo al centro apparati strumentali di controllo diretti anche da remoto, insieme a sistemi di software così complessi da indurre un famoso esperto di aeronautica ad ipotizzare che in prossimo futuro potremo avere aerei senza piloti a bordo.

Prima di approfondire il tema di come tutto questo sia possibile, è doveroso ribadire che nel caso della Boeing, come in quello della GE, della Google-Nest e in molti altri analizzati nella letteratura di riferimento si vedono i primi effetti dell'espansione progressiva di quello che abbiamo chiamato universo fisico-digitale, unitamente ad una profonda trasformazione della configurazione organizzativa delle imprese, sempre più tendenti a diventare "integratori di sistemi" e coordinatori strategici.

Interessa rilevare, ai fini del presente studio, cioè la Fabbrica 4.0, che questa trasformazione apre spazi enormi per tutte le tipologie di imprese. Riprendendo quanto precedentemente affermato circa la varietà morfologica, proprio le tendenze descritte delineano un quadro evolutivo contraddistinto da un elemento importante: le sequenze di operazioni lungo il ciclo generatore di output sono fortemente scomponibili e possono essere raggruppate a seconda delle molteplici forme di coordinamento per sistemi e sotto-sistemi. Ciò vale per la produzione di motori di aereo, turbine per l'energia eolica, locomotive, come per i mobili e i macchinari per arredamenti componibili⁴¹.

In un quadro generale di questo tipo i progetti di ingegnerizzazione e controllo manageriale consentono, infatti, di perseguire da un lato la verticalizzazione (*vertical networking*) delle configurazioni a rete delle sequenze produttive con apparati di controllo e meccanismi decisionali reattivi in tempo reale a variazioni dell'ambiente competitivo, dall'altro l'integrazione orizzontale (*horizontal networking*) tra sotto-sistemi e moduli adattativi rispetto a cambiamenti rilevanti di pervasivi *cyber physical systems*. L'integrazione orizzontale consente di incrementare la varietà delle soluzioni escogitate per rispondere ad esigenze *customer specific*, ma anche per studiare senza sosta nuove linee di ricerca applicata con forme variabili di *exploitation/exploration*.

L'integrazione verticale, perseguita grazie alla capacità di controllo dei crescenti flussi di informazione, è ottenuta mediante l'ancoraggio a direttrici progettuali e strategiche, a loro volta elaborate in un ambiente dinamico e con gradi variabili di complessità a scala locale e globale. Il *vertical and horizontal networking* è strettamente connesso alla creazione degli ecosistemi digitali (Cap. 2) perché -grazie alle loro caratteristiche strutturali e ai meccanismi interattivi- possono favorire il raggiungimento di una proprietà dinamica rilevante: il *dynamic scaling* della produzione innovativa. È infatti possibile accelerare le performance dei partecipanti (individuali o in team) sulla base dei potenziali di interazione che si attivano nello sviluppo di progetti e linee di ricerca per la risoluzione di problemi. Gli effetti dinamici di scala nelle traiettorie economiche sono generalizzati per tutti i partecipanti agli ecosistemi digitali (Deloitte, 2011), nell'ambito dei quali il consolidamento di strutture attive fa sì che si sviluppino relazioni *trust-and competence based* a vari livelli, con partecipazioni individuali e organizzate (team), grazie agli apporti più diversi⁴². Proprio l'esistenza di ecosistemi dinamici apre spazi tecnico-produttivi per "scalare rapidamente" anche a micro-unità e permette di risolvere un apparente paradosso:

⁴¹ In quest'ultimo caso aziende toscane analizzate direttamente.

⁴² Può ad esempio accadere che attività molto tradizionali, come quelle inerenti alla falegnameria, possano trovare opportunità ininterrotte di business durante la crisi in atto, grazie al loro inserimento stabile in reti produttive di global player. Ciò è stato verificato direttamente.

coesistono ecosistemi altamente scalabili e relazioni basate sulla fiducia. La soluzione del paradosso sta proprio nella creazione di un ambiente interattivo peculiare, che ha una proprietà essenziale: individui e piccoli team, che incontrerebbero immediatamente limiti nella possibilità di sviluppare relazioni fiduciarie, possono superarli attraverso la partecipazione a team che operano nell'ambito di ecosistemi in grado di innescare processi multi-scala. Lo sviluppo di partnership con *players downstream*, cioè di agenti nei layer meno elevati delle catene globali del valore, diviene un ingrediente non secondario sia in comparti *high-tech*, sia in settori merceologici ritenuti più tradizionali, ad esempio nella moda, come abbiamo rilevato nella filiera della pelletteria (§ 2.6). Occorre infatti realizzare congiuntamente obiettivi dinamici, che accomunano sequenze economico-produttive tra loro molto differenti, ottenendo così agilità sia nei cicli di sviluppo e vita dei prodotti, sia nei modelli operativi digitali, integrabili attraverso competenze molto diversificate e continuamente aggiornabili. Per questa via è possibile un accorciamento delle catene del valore e i tempi di reazione ai mutamenti, mentre l'elaborazione delle strategie di marketing divengono *hyper-targeted*, cioè con target molto specifici e ad elevata variazione nel tempo e nello spazio. Su queste basi è possibile la reinvenzione continua di processi e attività, sfidando quelli che si configurano come vincoli e problemi rispetto alle specializzazioni esistenti (MGI, Markovitz e Willmot, 2014). Per raggiungere questi obiettivi è essenziale creare *cross-functional units*, in modo da realizzare sequenze di operazioni in grado di fronteggiare una questione basilare: come inserire le esperienze dei consumatori e dei committenti in genere nel ciclo di realizzazione di un output (*tackle end-to-end customer experience*). Automazione di processo, *data analytics*, strutture organizzative agili e flessibili sono tra i fondamentali principi operativi che dovrebbero orientare le strategie imprenditoriali (MGI, De Smet *et al.*, 2015).

È chiaro che tutto ciò comporta un'accelerazione nel digitalizzare i processi di business, mentre la creazione di ecosistemi digitali evidentemente amplia lo spazio tecnico-produttivo per attività di *exploitation/exploration* (§ 2.4.3).

Le riflessioni svolte fondano la tesi che occorre un cambio di paradigma per organizzazioni e imprese: pensare in termini di piattaforme e non di strutture⁴³ per assegnare centralità ai progetti, ai team multidisciplinari e interdisciplinari, a partnership strategico-progettuali e quindi a una riorganizzazione del lavoro e delle competenze (Cap. 5). Organizzazioni e imprese vanno ben oltre il superamento del modello “*one size-fits all*” e alla varietà morfologica deve essere logicamente associata una forza lavoro digitale in grado di cogliere opportunità, rispondere alle minacce, misurarsi con le sfide e sviluppare un potenziale rispetto a cui si possiede un'informazione molto parziale e incompleta. *Platform thinking* non è antitetico, anzi è del tutto coerente e complementare, con il *systems thinking* precedentemente trattato (§ 2.5). Le proprietà strutturali e dinamiche delle piattaforme rendono a nostro avviso molto chiari i motivi per i quali assumono grande importanza i sistemi aperti, che attraverso le piattaforme possono per così dire “muoversi” nello spazio combinatoriale della dinamica tecnico-scientifica e tecnico-produttiva, attualmente preclusa a chi adotta modelli manageriali chiusi e compatti, riducendo lo spazio delle esplorazioni di nuovi domini di conoscenze.

Dopo aver analizzato tutta una serie di aspetti e implicazioni concernenti le sfide e i modelli manageriali connessi alla digitalizzazione dello spazio tecnico-produttivo, è necessario introdurre considerazioni essenziali in merito alle metodologie e agli strumenti con cui *systems and platform thinking* possono attingere al potenziale tecnico-scientifico e produttivo. Dalla trattazione svolta finora emerge in modo netto che “tutto è informazione” e, data l'enorme espansione dell'universo fisico-digitale, l'accelerazione esponenziale delle crescita e diffusione

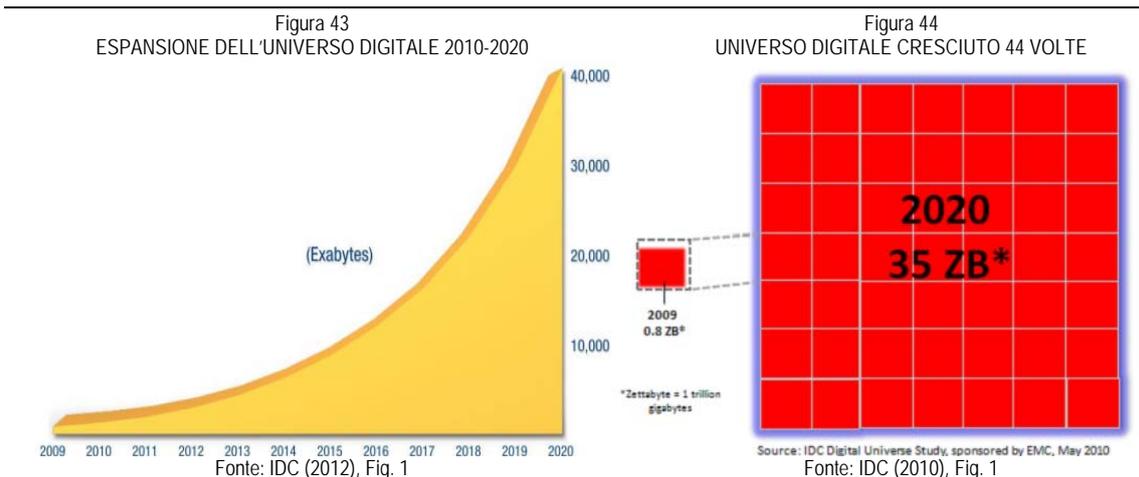
⁴³ La parola d'ordine è “*Think Platform not structure*” (MGI, De Smet *et al.*, 2016)

di flussi informativi pone questioni fondamentali, rispetto a cui si misurano alcuni strumenti essenziali a disposizione delle imprese nello scenario con al centro la Fabbrica Intelligente.

3.2

Big Data, data science

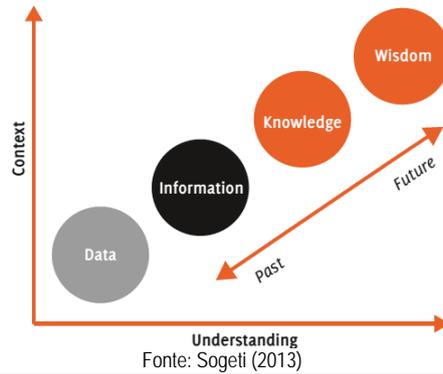
Computer sempre più potenti, *UbiComp networking*, moltiplicazione di grandi database stanno creando quantità crescenti di dati e informazioni, misurati progressivamente negli ultimi anni in terabytes, petabytes, exabytes (Figg. 43-44).



Dati, informazioni e conoscenze provengono da molti domini conoscitivi e pongono rilevanti problemi e difficoltà di elaborazione sia per le dimensioni, sia per la loro natura molto differente. Chiariamo innanzitutto le differenze tra dati, informazioni e conoscenze, trattati in modo più sistematico in Lombardi e Macchi (2016, cap. 6). In questa sede viene svolta una trattazione più sintetica, appropriata per i temi al centro del presente contributo.

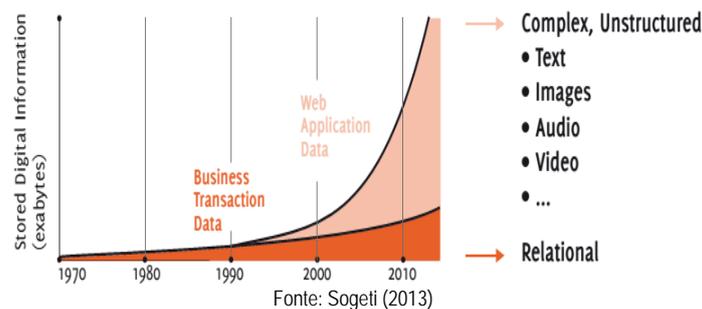
I dati sono costituiti da ciò che i sensori rilevano in relazione a una o più variabili oggetto di misurazioni. Informazione è quanto viene ottenuto attraverso l'organizzazione dei dati, individuando una struttura in modo che sia possibile effettuare calcoli ed estrarre stime tramite varie metriche, collocandole in un contesto. Conoscenza, infine, attiene alla interpretazione in riferimento appunto al contesto, mediante l'elaborazione di associazioni causali e la capacità di fare previsioni (Bohn, 1994). Alla conoscenza possiamo aggiungere la *wisdom*, che significa scelta della visione più appropriata sulla base di uno o più cicli *data-information-knowledge*. Mentre i primi tre step del processo di elaborazione richiedono eminentemente attività di analisi, la *wisdom* richiede capacità di sintesi rappresentativa di quantità di informazioni e conoscenze in crescita esponenziale. Non si tratta di una piramide, con al vertice la *wisdom*, bensì di domini conoscitivi differenti, tra i quali realizzare circuiti di feedback (Fig. 45).

Figura 45
 "TUTTO È INFORMAZIONE"



Sono quindi processi di elaborazione non semplici, che avvengono sempre meno su base individuale e si sviluppano quasi necessariamente in uno spazio connettivo globale. Oltre alla crescita esponenziale, vi è un altro aspetto di grande importanza: dati e informazioni si presentano in formati molto diversi. Innanzitutto sono espressi in una quota crescente in forma “non strutturata”, cioè non in database organizzati e con caratteristiche relazionali bene definite. Al contrario, l’*UbiComp* e la connettività globale generano dati e informazioni in formati molto eterogenei (Fig. 46).

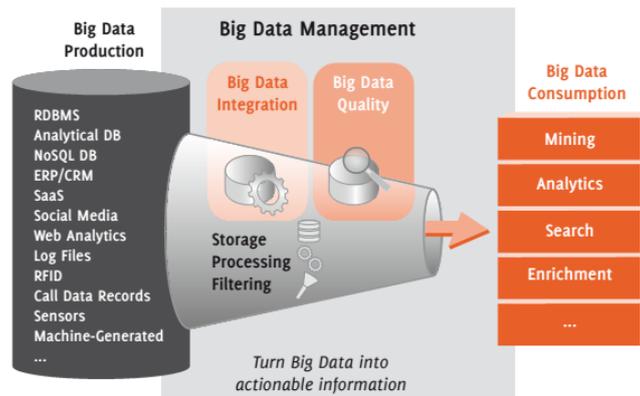
Figura 46



In generale i dati sono raggruppati in tre tipologie in base alla fonte: 1) generati da dispositivi computazionali (sensori, attuatori, *smart grid*, *data services*, strumenti audio-video). 2) Prodotti dagli utilizzatori: social network, immagini, testi scritti, contenuti web. 3) *Master data*, cioè condivisi da più imprese, e *case data*, specifici per singole realtà produttive.

Il numero delle dimensioni e delle entità individuali e/o collettive coinvolte è tale che volumi crescenti di flussi informativi e di natura qualitativa molto differente sono intrinseci all’universo fisico-digitale, che è al centro della nostra trattazione, e soprattutto pongono sfide computazionali ai modelli manageriali basati sul *systems and platform thinking* (Fig. 47).

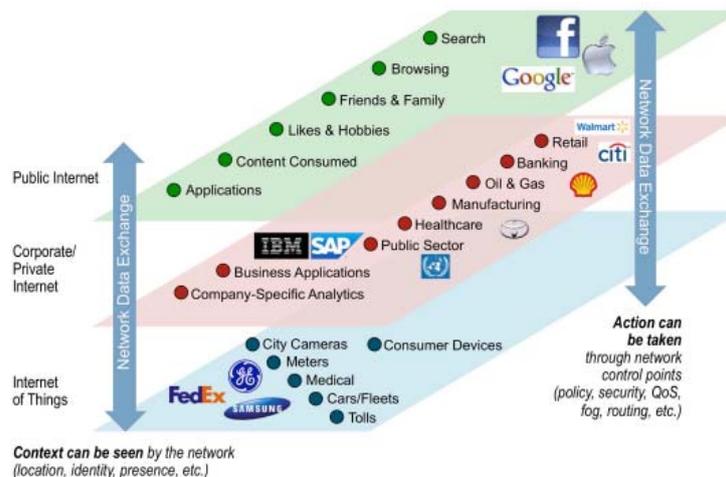
Figura 47
LO SPAZIO DEI FLUSSI INFORMATIVI DIGITALIZZATI E LE SFIDE EMERGENTI



Fonte: IDC (2013)

Poiché siamo di fronte a flussi originati da una molteplicità tendenzialmente quasi infinita di domini, sorgono immediatamente questioni attinenti a come trattare un'enorme, crescente e così diversificata massa di dati e informazioni, in modo tale da trarne conoscenze utili per varie finalità: tecnico-scientifiche, di benessere, politico-sociali (Fig. 48).

Figura 48
LA RETE CONNETTE DIFFERENTI DOMINI DI CONOSCENZE



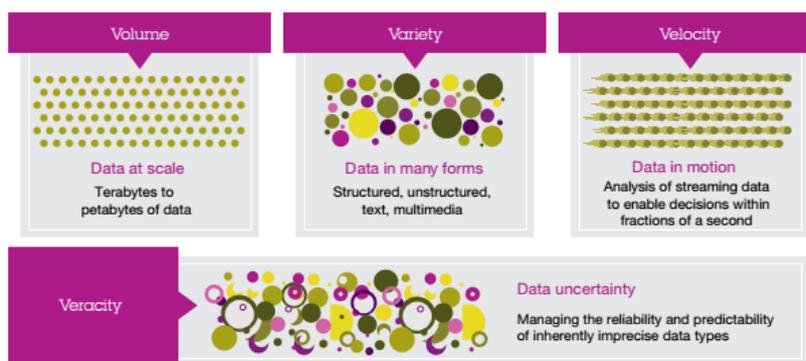
Fonte: Cisco (2012), Fig.1

A di là della loro tipologie e domini di provenienza, i dati sono classificati essenzialmente in tre categorie: strutturati, non strutturati, semi-strutturati. I primi comprendono quelli contenuti in file o record, a loro volta organizzati in database e fogli di calcolo. La struttura dipende dal modello con cui sono categorizzati e dalle modalità con le quali sono trattati ed elaborati, nonché dalle modalità di accesso. Naturalmente i dati strutturati hanno vantaggi, perché possono essere più facilmente interrogati e analizzati, tenendo presente che vi sono limiti nella potenza computazionale (*storage*, memoria, tempi di elaborazione). I dati non strutturati sono quelli non facilmente categorizzabili in termini ben definiti e quindi non possono essere organizzati in contenitori rigorosamente progettati: foto, immagini grafiche, file pdf, email, presentazioni in powerpoint, weblog, documenti wiki e elaborazioni in word. I dati semi-strutturati sono infine

quelli che hanno solo alcuni aspetti degli uni e degli altri, ad esempio tags, marcatori utili ad identificare certi elementi, ma non è possibile elaborare modelli in grado di conferire ad essi una struttura.

Il potenziale informativo che si profila è quindi vasto e ad esso corrisponde un potenziale innovativo apparentemente senza limiti: “*The only restriction in the domain of Big Data is one’s own imaginative power.*” (Sogeti, 2013: 5). L’ampia ed estremamente diffusa espressione “Big Data” significa pertanto che nella dinamica competitiva globale gli agenti devono necessariamente sviluppare intelligenza analitica tale da poter investigare campi di conoscenza e ambiti innovativi sempre più diversificati. Tralasciando questioni relative ad una precisa ed universalmente accettata definizione di *Big Data*, è opportuno mettere in evidenza le dimensioni che li caratterizzano: volume, varietà, velocità, veracità (Fig. 49).

Figura 49
LE DIMENSIONI DEI BIG DATA

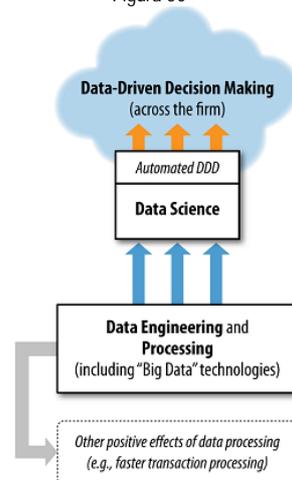


Fonte: IBM (2012), Fig. 2

L’odierna dinamica tecno-economica richiede agli operatori *business intelligence*, da perseguire mediante strumenti che consentano elaborazioni tali da estrarre dal crescente potenziale innovativo rappresentazioni da tradurre poi in efficaci modelli di business.

A tal fine sono stati sviluppati filoni di ricerca teorica e applicata, racchiusi in termini quali *Data Science* e *Data Mining*. Con la prima ci si riferisce ad un insieme di principi fondamentali, che orientano l’estrazione di conoscenza dalle quantità di dati, mentre con la seconda si indicano le tecnologie impiegate per estrarre la conoscenza dai dati sulla base di quei principi. In altri termini, “*Data science involves principles, processes, and techniques for understanding phenomena via the (automated) analysis of data*” (Provost e Fawcett, 2013: 4). Data science e Data Mining sono essenziali per prendere decisioni in un universo fisico-digitale, contraddistinto da varietà, velocità, flussi informativi crescenti. I processi decisionali, infatti, non possono prescindere da una molteplicità di vari processi generatori di dati, che vanno dunque organizzati e analizzati, quindi soggetti a molteplici elaborazioni per dedurre scelte strategiche in contesti operativi ecosistemici. A tal fine data science può molto efficacemente contribuire ai processi decisionali *data-driven* secondo il framework teorico-pratico, rappresentato sinteticamente nella figura 50.

Figura 50



Fonte: Provost e Fawcett (2013), Fig. 1.1

Occorre rilevare a questo proposito una sostanziale novità rispetto al passato nello svolgimento di processi decisionali di imprese e organizzazioni. Nel capitolo XII della *Teoria Generale* (1936, edizione italiana del 2010), Keynes descrive le decisioni di investimento e quindi l'elaborazione strategica in termini di calcolo razionale + intuito (i famosi *animal spirits*). La scuola di pensiero neo-austriaca, sintetizzata nelle linee essenziali in Kirzner (1997), vede la funzione imprenditoriale come essenzialmente basata su processi di scoperta di opportunità e potenzialità latenti o inesprese, individuate grazie all'*alertness* imprenditoriale, cioè la capacità di intravedere ciò che altri non sono in grado di percepire. Nell'universo fisico-digitale dei *Big Data*, i processi decisionali cambiano sostanzialmente: l'intuizione non può essere svincolata dall'analisi sistematica dei dati. Ciò avviene non solo perché gli agenti tecnico-economici devono fronteggiare un ammontare crescente di flussi informativi, che eccede la potenza computazionale di singole unità decisionali, per quanto essa sia rafforzata dall'impiego di strumenti e metodologie di calcolo sempre più potenti.

È importante non confondere *skills*, competenze e processi di elaborazione ai vari livelli, così come è essenziale distinguere *data science* e *data-driven business*, dal momento che la prima implica anche la creazione di modelli previsionali e sempre più spesso lo sviluppo di vere e proprie attività di sperimentazione di linee strategiche alternative, nella prospettiva più volte ribadita dello spazio tecno-economico combinatoriale.

Modelli di previsione e campi di sperimentazione possono fornire gli elementi basilari per prendere decisioni che comportano nuovi orientamenti strategici, vere e proprie discontinuità rispetto ai tradizionali modelli di business. Ciò vale ancor di più se si pensa al fatto che le intersezioni e le sovrapposizioni tra flussi informativi di varia provenienza generano spinte endogene ed esogene verso sempre nuove sequenze economico-produttive, alla scoperta di nuove funzionalità e alla ridefinizione di quelle esistenti. È allora evidente che la capacità di sviluppare *data analytics* diviene un asset strategico e ne consegue la capacità di estrarre informazioni adeguate a supporto di processi decisionali che tendono sempre più a configurarsi come set di attività sperimentali, insieme alla ricerca di ulteriori conferme a sostegno di attività economico-produttive già consolidate. Da queste considerazioni si evince chiaramente che il *systems and platform thinking* è intrinsecamente connesso all'*analytics thinking*, con al centro una propensione costante alla sperimentazione, proprio grazie all'analisi sistematica dei dati, all'organizzazione dei flussi informativi e all'elaborazione di modelli previsionali e scenari sperimentali.

Riprendendo la definizione elaborata dalla McKinsey, qui adottata, è fondato ritenere che i *Big Data* sono un meccanismo generatore di cambiamento per qualsiasi attività di business in base ai seguenti motivi (Forbes, 2015): 1) permettono alle imprese di sviluppare una migliore intelligenza del mercato e dei comportamenti dei consumatori. 2) Favoriscono l'innalzamento del livello di efficienza operativa. 3) Fanno sì che le imprese possano interagire più intensamente con i consumatori, migliorando le loro esperienze e al tempo stesso elevando le loro potenzialità di business con modelli sempre migliori di elaborazione dei dati.

Oltre a questi punti importanti, fattore cruciale è che, insieme a processi più efficienti e alla gestione dinamica delle risorse per far fronte a varietà e complessità, stanno cambiando la natura e le modalità dei processi decisionali. L'universo fisico-digitale, infatti, vede il progressivo consolidamento di "*bits, bytes, algorithms*", accanto alle (e talvolta in sostituzione delle) persone con il loro istinto, le loro intuizioni e conoscenze. L'enorme e crescente quantità di flussi informativi, unita alla loro varietà, hanno spinto tecnologi, economisti, sociologi e scienziati a sviluppare metodologie e strumenti in grado di estrarre informazioni utili da set multiformi di dati (strutturati, non strutturati, semi-strutturati). Ciò ha peraltro messo in moto una serie di processi con feedback positivi maggiormente in grado di generare le tendenze in atto: minor costo delle tecnologie dell'informazione, aumento della potenza e dell'efficienza computazionale, riduzione degli errori umani, con un ampliamento progressivo delle possibilità di attribuire maggiori fondamenta quantitative e qualitative alle basi cognitive dei processi decisionali. Non è quindi sorprendente che siano state sviluppate analisi tecniche e tecnologie che consentono di combinare differenti data sets e creare nuove conoscenze e *insights*. Due degli esempi più rilevanti in questo campo sono Hadoop e Spark. La prima è un'architettura *open source* per processi computazionali ad elevato parallelismo. Con le sue caratteristiche Hadoop riesce a trattare dataset con quantità di dati che superano la capacità di sistemi di database relazionali. La sua genesi è interessante. Nei primi anni 2000 Google deve fronteggiare la sfida alla sua infrastruttura di elaborazione dati posta dalla mole crescente di attività di navigazione, scrittura testi, indicizzazione. La sfida è raccolta dai suoi ingegneri creando prima un'infrastruttura basata su due sistemi proprietari (GES e MapReduce) con proprietà innovative sul piano della computazione parallela, scalabilità nel *data storage, fault tolerance*. Dopo la pubblicazione nel 2000 di un articolo accademico, dove è spiegato il lavoro svolto, Doug Cutting, uno sviluppatore di software *open source*, decide di lavorare su MapReduce creando Hadoop. Quest'ultimo è notato immediatamente anche da Yahoo, i cui ingegneri decidono di investire ulteriormente in Hadoop, che diviene così un progetto completamente *open source* e con caratteristiche tali da farlo accettare da tutte le imprese operanti sul web, sia nuove che "*incumbent*".

Un'altra tecnologia altamente competitiva rispetto alla precedente e diventata recentemente molto popolare, è Spark, che ha alcune caratteristiche strutturali diverse da Hadoop, grazie alle quali riesce ad ottenere una maggiore rapidità di elaborazione, soprattutto per quanto concerne la velocità con cui flussi di dati entrano in applicazioni particolari e ammettono cicli di feedback (Forbes, 2015b). Queste proprietà sono particolarmente utili nelle situazioni interattive con i consumatori e nel monitoraggio nell'industria manifatturiera. Hadoop e Spark sono in realtà espressioni degli enormi progressi compiuti sia sul piano dell'architettura hardware, sia nel campo del software, ma è più esatto sostenere nel mondo dell'Intelligenza Artificiale, che tanta importanza dovrebbe assumere nei prossimi decenni, dopo le poderose spinte evolutive ricevute negli ultimi dieci anni proprio dall'espansione dell'universo fisico-digitale.

Per cercare di chiarire alcuni punti basilari, senza ovviamente la pretesa di effettuare una trattazione esauriente dei temi inerenti all'Intelligenza Artificiale (d'ora in poi IA, si veda a

riguardo il successivo paragrafo 3.3), iniziamo proprio dalle sfide poste da esigenze crescenti di analizzare flussi informativi caratterizzati da varietà e velocità.

Vi sono problemi immediati da affrontare per la trasformazione di set di documenti, immagini, video, reti e flussi incessanti di informazioni in stringhe di bit da conservare, indicizzare e recuperare a seconda delle esigenze e delle funzioni da svolgere.

La sfida più rilevante, che ne racchiude molte altre, è quella del management dell'enorme numero di stringhe di bit viste come "*potential sources of discovery, knowledge*" (NAP, 2013: 2). Emerge soprattutto l'importanza di un obiettivo ambizioso in tutti i campi disciplinari: effettuare inferenze, il che dipende dalla capacità di raggiungere il massimo livello qualitativo possibile, riducendo al minimo gli errori (*bias*), che possono essere di vario tipo: 1) *sampling bias*, dovuto alle differenze con cui sono organizzati i dati e quindi ai metodi di campionamento che possono presentare delle distorsioni. 2) Errori dovuti all'origine (*provenance*), perché i meccanismi sistemici e inferenziali stratificati non lavorano sempre con dati originari, ma spesso con output indiretti dovuti a inferenze specifiche. 3) Alterazioni prodotte da cicli di feedback e quindi con amplificazione del "rumore" o dei bias in sistemi altamente interconnessi. 4) Ultimo aspetto problematico è costituito dalle conseguenze potenzialmente molto dannose di errori, quando si impiegano sistemi basati su combinazioni di molti elementi. Ciò può infatti portare ad una crescita esponenziale delle ipotesi da vagliare a fini previsionali e quindi a effetti catastrofici di eventuali errori.

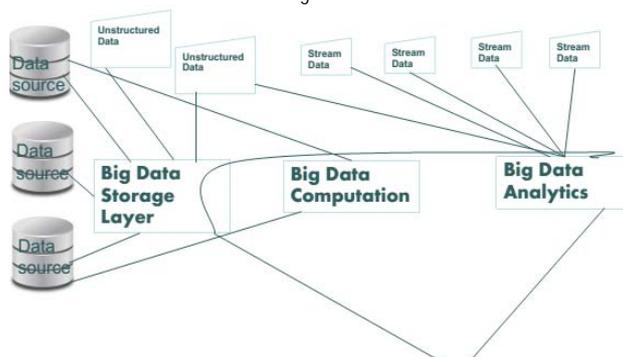
A fronte di queste e altre sfide (problemi) il *Committee on analysis of Massive data* (NAP, 2013) formula determinati principi computazionali e inferenziali di notevole importanza: 1) occorre sviluppare infrastrutture computazionali scalabili (Hadoop e Spark lo sono, unitamente alla caratteristica di modularità). 2) La ricerca deve assegnare grande importanza a centri decisionali *real time* con accelerata valutazione del *trade off* tra velocità e accuratezza. 3) È necessario creare sistemi e algoritmi scalabili in modo tale da poter trattare collezioni di dati sempre più ampie. 4) L'interdisciplinarietà è essenziale, data l'elevata dimensionalità di molti database, la loro eterogeneità e la molteplicità di domini conoscitivi coinvolti. È anzi rischioso analizzare i problemi all'interno di confini disciplinari prestabiliti, perché può sviare e rallentare enormemente la ricerca di soluzioni, quando occorre studiare e approfondire problemi che vanno oltre gli orizzonti consolidati degli agenti, "*a suitable cross-disciplinary outlook can point researchers toward an essential refocusing*" (NAP, 2013: 7).

A questo punto è necessario prendere in esame, sia pure sinteticamente, alcuni dei metodi e degli strumenti sviluppati per trattare questi enormi flussi di dati e informazioni. Come vedremo immediatamente vi è una sorta di progressione tecnico-scientifica, che vede il suo acme attuale negli sviluppi dell'IA.

Un'analisi sistematica della letteratura concernente *Big Data Analytics* è effettuata da Elragal e Haddara (2014), che effettuano una rassegna di tecniche e metodologie proposti da vari gruppi di studiosi a livello internazionale. Agneeswaran *et al.* (2013) sviluppano un'analisi tecnica degli strumenti esistenti nel campo del *Big Data analytics*, individuando tre macro-temi di ricerca: 1) *Storage*, ricerca e recupero di *Big Data*. 2) Analisi tecniche. 3) Paradigmi in competizione.

Lo spazio dei flussi informativi diviene senza limiti (Fig. 51).

Fig. 51

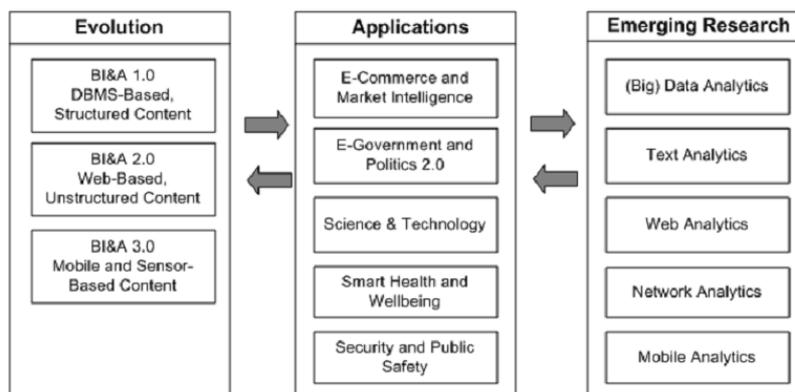


Fonte: Agneeswaran (2012)

Mattman (2014), dopo una lunga esperienza al *Jet Propulsion Laboratory* della NASA, indica una serie di principi orientativi nella *data science*: 1) filosofia *open source*. 2) *Data-grid middleware* distribuito su molti domini di ricerca tecnico-scientifica. 3) Esperienza web come fonte da cui sviluppare e attingere. 4) *Open mindset* e adozioni di stili computazionali analoghi a quelli propri degli ambiti ritenuti più propriamente scientifici.

L'enorme disponibilità di dati e lo sviluppo impetuoso di tecniche e metodologie di analisi ha innescato una serie di direttrici di ricerca, che hanno tentato di coniugare *Business Intelligence* e *Analytics* (d'ora in poi BI&A) sia per il business che per attività più prettamente tecnico-scientifiche. Chen *et al.* (2012) individuano un'evoluzione a tre stadi (Fig. 52).

Figura 52



Fonte: Chen *et al.* (2012), Fig. 1

A ciascuno dei tre stadi corrisponde una matrice con record che associano caratteristiche chiave e *capabilities*, tutte da sviluppare per affrontare questioni emergenti (Tab. 1).

Tabella 1
BI&A: CARATTERISTICHE FONDAMENTALI

Table 1. BI&A Evolution: Key Characteristics	
	Key Characteristics
BI&A 1.0	<ul style="list-style-type: none"> • DBMS-based, structured content • RDBMS & data warehousing • ETL & OLAP • Dashboards & scorecards • Data mining & statistical analysis
BI&A 2.0	<ul style="list-style-type: none"> • Web-based, unstructured content • Information retrieval and extraction • Opinion mining • Question answering • Web analytics and web intelligence • Social media analytics • Social network analysis • Spatial-temporal analysis
BI&A 3.0	<ul style="list-style-type: none"> • Mobile and sensor-based content • Location-aware analysis • Person-centered analysis • Context-relevant analysis • Mobile visualization & HCI

Fonte: Chen *et al.* (2012), Tab. 1

La grande espansione di tecnologie, strumenti e metodi ha quindi aperto una finestra su un universo di potenziali sviluppi concettuali, metodologici, strumentali e applicativi (Tab. 2).

Tabella 2

Table 2. BI&A Applications: From Big Data to Big Impact					
	E-Commerce and Market Intelligence	E-Government and Politics 2.0	Science & Technology	Smart Health and Wellbeing	Security and Public Safety
Applications	<ul style="list-style-type: none"> • Recommender systems • Social media monitoring and analysis • Crowd-sourcing systems • Social and virtual games 	<ul style="list-style-type: none"> • Ubiquitous government services • Equal access and public services • Citizen engagement and participation • Political campaign and e-polling 	<ul style="list-style-type: none"> • S&T innovation • Hypothesis testing • Knowledge discovery 	<ul style="list-style-type: none"> • Human and plant genomics • Healthcare decision support • Patient community analysis 	<ul style="list-style-type: none"> • Crime analysis • Computational criminology • Terrorism informatics • Open-source intelligence • Cyber security
Data	<ul style="list-style-type: none"> • Search and user logs • Customer transaction records • Customer-generated content 	<ul style="list-style-type: none"> • Government information and services • Rules and regulations • Citizen feedback and comments 	<ul style="list-style-type: none"> • S&T instruments and system-generated data • Sensor and network content 	<ul style="list-style-type: none"> • Genomics and sequence data • Electronic health records (EHR) • Health and patient social media 	<ul style="list-style-type: none"> • Criminal records • Crime maps • Criminal networks • News and web contents • Terrorism incident databases • Viruses, cyber attacks, and botnets
	Characteristics: Structured web-based, user-generated content, rich network information, unstructured informal customer opinions	Characteristics: Fragmented information sources and legacy systems, rich textual content, unstructured informal citizen conversations	Characteristics: High-throughput instrument-based data collection, fine-grained multimodality and large-scale records, S&T specific data formats	Characteristics: Disparate but highly linked content, person-specific content, HIPAA, IRB and ethics issues	Characteristics: Personal identity information, incomplete and deceptive content, rich group and network information, multilingual content

Fonte: Chen *et al.* (2012)

La rappresentazione sistematica contenuta nelle tabelle 1-2 e nella tabella 3 è una espressione puntuale dell'universo fisico-digitale al centro di questo contributo (Tab. 3).

Tabella 3

Table 3. BI&A Research Framework: Foundational Technologies and Emerging Research in Analytics					
	(Big) Data Analytics	Text Analytics	Web Analytics	Network Analytics	Mobile Analytics
Foundational Technologies	<ul style="list-style-type: none"> • RDBMS • data warehousing • ETL • OLAP • BPM • data mining • clustering • regression • classification • association analysis • anomaly detection • neural networks • genetic algorithms • multivariate statistical analysis • optimization • heuristic search 	<ul style="list-style-type: none"> • information retrieval • document representation • query processing • relevance feedback • user models • search engines • enterprise search systems 	<ul style="list-style-type: none"> • information retrieval • computational linguistics • search engines • web crawling • web site ranking • search log analysis • recommender systems • web services • mashups 	<ul style="list-style-type: none"> • bibliometric analysis • citation network • coauthorship network • social network theories • network metrics and topology • mathematical network models • network visualization 	<ul style="list-style-type: none"> • web services • smartphone platforms
Emerging Research	<ul style="list-style-type: none"> • statistical machine learning • sequential and temporal mining • spatial mining • mining high-speed data streams and sensor data • process mining • privacy-preserving data mining • network mining • web mining • column-based DBMS • in-memory DBMS • parallel DBMS • cloud computing • Hadoop • MapReduce 	<ul style="list-style-type: none"> • statistical NLP • information extraction • topic models • question-answering systems • opinion mining • sentiment/affect analysis • web stylometric analysis • multilingual analysis • text visualization • multimedia IR • mobile IR • Hadoop • MapReduce 	<ul style="list-style-type: none"> • cloud services • cloud computing • social search and mining • reputation systems • social media analytics • web visualization • web-based auctions • internet monetization • social marketing • web privacy/security 	<ul style="list-style-type: none"> • link mining • community detection • dynamic network modeling • agent-based modeling • social influence and information diffusion models • ERGMs • virtual communities • criminal/dark networks • social/political analysis • trust and reputation 	<ul style="list-style-type: none"> • mobile web services • mobile pervasive apps • mobile sensing apps • mobile social innovation • mobile social networking • mobile visualization/HCI • personalization and behavioral modeling • gamification • mobile advertising and marketing

Fonte: Chen *et al.* (2012)

L'articolo di Chen *et al.* (2012) contiene peraltro un'analisi bibliometrica completa dell'evoluzione degli studi e delle pubblicazioni sia in ambito accademico che industriale. Bisogna inoltre segnalare altri contributi interessanti, apparsi sullo stesso numero della Rivista *MIS Quarterly* e che mettono a fuoco aspetti rilevanti, connessi ai temi centrali di questo lavoro. Chen *et al.* spiegano come nello spazio virtuale metodi e strumenti quali *blogs content analysis*, *social network analysis*, *analysis of Communities* siano essenziali per il *profiling* dei consumatori. Park *et al.* (2012) chiariscono che in un ambiente competitivo incerto, con frequenti e rapidi cambiamenti organizzativi, sorgono problemi di quantità e qualità dei dati da elaborare ai fini delle strategie di mercato per gruppi sociali, che tendono a mostrare similarità comportamentali difformi rispetto a quanto accade realmente. Gli autori in questione elaborano a tal fine un modello computazionale con meccanismi inferenziali concernenti i comportamenti dei consumatori e analizzati con strumenti socio-tecnici tali da consentire di validare i profili dei soggetti attraverso il *mining* dei social network. In questo scenario non mancano contributi come quello di Sahoo *et al.* (2012) che, sviluppando un filone di ricerca denominato "*collaborative filtering*", si propongono di modificare/orientare le scelte dei consumatori, suggerendo loro prodotti che non avrebbero altrimenti inserito nel proprio orizzonte di preferenze e quindi non avrebbero valutato. A questo fine gli autori, sulla base dei dati raccolti e sistematizzati in merito alle scelte passate dei consumatori, elaborano un modello matematico

con algoritmi che possono, almeno nella situazione sperimentale simulata, influire sugli orientamenti e le preferenze già consolidate.

Dopo aver trattato molti aspetti relativi a Big Data e al Data Analytics non possiamo trascurare un accenno ai rischi e ai pericoli insiti nell'impiego e sviluppo di questi nuovi strumenti e metodologie di *Information processing*. Per una loro trattazione sistematica si invia al libro di Helbing (2015a) e ad una sintetica esposizione in Helbing (2015b), oltre che ad altri contributi, presenti nella sua intensa attività di analisi di problemi e questioni emergenti nella società odierna (<http://www.coss.ethz.ch/people/helbing.html>).

In questa sede ci limitiamo a segnalare un filone di letteratura economica e politica, al centro di un ampio dibattito negli Usa e in Europa, particolarmente in Inghilterra. Intendiamo riferirci alla tecnica e alla pratica del *nudging*, da *nudge* “spinta gentile” in italiano (Thaler e Sunstein, 2014)⁴⁴. Nel loro volume Thaler e Sunstein hanno proposto una sorta di “manifesto per un nuovo paternalismo” che si basa sul ruolo che esperti dovrebbero svolgere nel progettare “architetture delle scelte” tali da orientare appunto le scelte delle persone, che sono fallibili e non perfettamente razionali, nel loro stesso interesse: consumare beni meno dannosi, adottare comportamenti meno deleteri individualmente e meno costosi per la società (sanità). Questo “paternalismo libertario”, come viene anche denominato, non determina le scelte, ma cerca di influenzarle sulla base della conoscenza di quali sono le migliori preferenze di cui le decisioni degli individui e delle società dovrebbero tenere conto. Esperienze reali di impiego delle tecniche di *nudging* sono già state realizzate negli Usa e in Inghilterra, dove esiste un team che lavora proprio su questi temi (BIT, Behavioural Insight Team, <https://www.gov.uk/government/organisations/behavioural-insights-team>), inizialmente operante alle dipendenze del Governo e ora indipendente. Esula dagli obiettivi di questo contributo l'approfondimento di questi temi; ci limitiamo pertanto a segnalare alcuni contributi critici: Leonard (2008), Freeman (2013), Waldron (2014).

Non è comunque possibile trascurare importanti temi al centro dell'analisi di Evgenij Morozov, attento analista dei problemi relativi alle funzioni e a gli sviluppi di internet nei Paesi democratici e in quelli dittatoriali (Morozov, 2011). Ai nostri fini interessa soprattutto sottolineare alcuni problemi connessi a quello che Morozov chiama *data-centric e data-intensive capitalism* (Morozov, 2015). Tre tecnologie digitali molto pervasive sono infatti oggi basilari per la vita socio-economica: 1) sensori, che producono informazioni, 2) filtri, cioè software e algoritmi in grado di selezionare componenti relative alla domanda e all'offerta, 3) profili, intesi come meccanismi di organizzazione delle informazioni tali da classificare fasce di popolazione in base alle loro caratteristiche e ai comportamenti.

Per questa via è possibile costruire “identità digitali”, che possono includere la modalità di regolazione dei termostati a casa fino alle più minute preferenze di consumo e alle peculiarità personali (salute, stile di vita ecc.). Le identità digitali assumono una grande importanza sia a fini di business che per obiettivi di orientamento politico-sociale, al fine di influenzare i processi decisionali pubblici e privati in materia di scelte collettive (grandi progetti, elezioni, servizi sociali). Si sta realizzando quanto nel 1967 era prefigurato da Paul Baran, uno degli inventori del metodo della “commutazione di pacchetto” alla base della trasmissione dati che ha reso possibile Internet: la rivoluzione dei computer consisterà nell’“automazione dei flussi di informazione” e grazie alla rete di comunicazione tra computer “*We are moving headlong into an era when information processing will be available in the same way one now buys electricity*”. Secondo Baran la moltiplicazione dei flussi informativi avrebbe posto esigenze e pressioni verso una elaborazione centralizzata, quindi fondamentali problemi di regolazione, che

⁴⁴ Richard Thaler, premio Nobel per l'Economia, è uno dei maggiori teorici della *behavioral economics*. Sunstein è politologo e prolifico autore di saggi e libri ampiamente discussi.

oggi includiamo nel concetto di *privacy* (Morozov, 2013), ma che racchiude questioni di grande portata, relative alla possibilità di modificare le stesse basi dei processi democratici, influenzando la direzione dei processi decisionali e favorendo regimi dittatoriali. Si tratta dei pericoli che, in *The dark side of Internet*, Morozov (2011: 82) sintetizza con l'espressione "*control by entertainment approach*".

I concetti esposti in questo paragrafo indicano chiaramente che l'universo fisico-digitale ha innescato un processo esponenziale di crescita quantitativa e qualitativa di infrastrutture hardware e software, a ulteriore dimostrazione dell'accelerazione tecno-economica di cui abbiamo parlato nelle pagine iniziali.

Uno degli ambiti in cui più marcati sembrano essere i progressi in atto è quello dell'Intelligenza Artificiale e del *Machine Learning*, che svolgeranno un ruolo cruciale nel futuro prossimo di uno scenario incentrato sulla Fabbrica Intelligente.

3.3

Machine Learning, Intelligenza Artificiale, Augmented reality

Lo sviluppo impetuoso dei flussi informativi a scala globale non poteva che generare impulsi per campi di frontiera nell'elaborazione dell'informazione. La creazione di algoritmi e programmi sempre migliori e perfezionati sono stati la risposta dinamica alle crescenti esigenze di *massive data analytics*.

Il *Machine Learning* (apprendimento automatico, d'ora in poi ML) è una traiettoria di ricerca teorica e applicata, il cui principale obiettivo è quello di costruire programmi per computer sempre più potenti e sofisticati, in grado di apprendere automaticamente in base all'esperienza e al di là di una esplicita programmazione: "Machine learning is a set of tools that, broadly speaking, allow us to "teach" computers how to perform tasks by providing examples of how they should be done" (Hertzman e Fleet, 2010). Se il *data mining* esplora e classifica i dati cercando di individuare pattern (configurazioni) e relazioni associative, il ML, che preferiamo chiamare intelligenza computazionale, può essere analizzato da vari punti di vista: *The Artificial Intelligent view*, *The Software Engineering view*, *The Stats view* (Hertzman e Fleet, 2010). In sostanza esso si basa su alcune tipologie di algoritmi di apprendimento: 1) apprendimento supervisionato (*supervised learning*), che si ha quando nella fase di *training* del dispositivo computazionale vengono forniti dati etichettati con i valori "corretti" per procedure di classificazione e metodi di regressione. 2) Apprendimento non supervisionato (*unsupervised learning*), realizzato senza "etichettatura" dei dati, lasciando al dispositivo la scoperta e l'analisi di pattern, soprattutto con due metodi (riduzione delle dimensioni -*dimension reduction*- e clustering).

Si è inoltre verificato, negli ultimi anni, lo sviluppo dell'intelligenza computazionale con la progettazione di efficienti e accurati algoritmi predittivi (Mohri *et al.*, 2012) attraverso una serie di tecniche abbastanza consolidate: *sequence and path analysis*, *clustering and text analysis*, *forecasting predictive analysis*, *web mining* ecc.). Algoritmi *Data driven* devono apprendere famiglie e classi di concetti, sulla base dei quali classificare oggetti/eventi/processi nel campo di indagine. L'intelligenza computazionale è in sostanza una combinazione dinamica di computer science, probabilità e statistica, modelli matematici di ottimizzazione. I campi di applicazione sono numerosi: classificazione di testi e documenti, analisi del linguaggio naturale, riconoscimento vocale, riconoscimento ottico, biologia computazionale, diagnosi mediche, motori di ricerca, scoperta di frodi (carte di credito, telefonate), giochi, controllo veicoli senza guidatore (robot, navigazione).

Nei campi indicati si pongono in realtà problemi di varia natura e con gradi di difficoltà molto eterogenei, rispetto ai quali bisogna definire tecniche e strategie di apprendimento: *decision tree learning, artificial neural networks, evaluating hypotheses, bayesian learning, computational learning theory, instance-based learning, genetic algorithms, learning sets of rules, reinforcement learning, analytical learning, combining inductive and analytical learning* (Mitchell, 1997). In sostanza, quindi, il ML o intelligenza computazionale è un insieme di metodi (algoritmi + programmi) in base ai quali si cerca di ottimizzare una prestazione alla luce dei dati e dell'esperienza passata. Attraverso la combinazione di statistica e matematica è possibile costruire modelli previsionali sulla base di campioni (Alpaydin, 2010), arricchendo così l'armamentario a disposizione degli analisti di business e dei ricercatori dei numerosi campi disciplinari dove il ML è divenuto strumento fondamentale di lavoro. Il ML, anche se spesso confuso con l'IA, consiste di fatto in “*to program computers to automatically recognize complex patterns and make intelligent decisions based on data*” (Bohte e Nguyen, 2016). Nello stesso numero della rivista in cui è pubblicato il contributo di Bohte e Nguyen ⁴⁵ si delinea una grande sfida per la scienza dell'elaborazione delle informazioni: la “valanga di dati” e gli enormi dataset hanno favorito il raggiungimento di risultati impressionanti con ML, Deep Learning ecc.⁴⁶, ma sono sempre trattati grandi volumi di dati con lunghi processi di apprendimento. Le situazioni reali, in cui sono coinvolti robot come gli esseri umani, richiedono invece processi decisionali non basati su milioni di tentativi, bensì sull'uso di risorse limitate rispetto ai task da adempiere, cioè l'impiego appropriato della “*prior knowledge*”, che consiste in dati “meno abbondanti” (Mouret, 2016) e su un numero esiguo di tentativi.

Il ML sta diventando una risorsa strategica importante per il management, dal momento che la *statistical inference* può essere visto come ingrediente fondamentale per l'elaborazione strategica delle imprese, concepita sulla base del ML in tre stadi (Pyle e San Jose, 2015): 1) *prescription*, cioè organizzazione dei dati in database per rappresentare e comprendere “il passato” (*OLAP, on line analytical processing*). 2) *Prediction*, nel senso di studio dei dati storici per individuare e predire l'evoluzione di eventi e comportamenti futuri. 3) *Pescription*, ovvero delineare trend di comportamento di consumatori e produttori, in modo da definire le basi per le proprie azioni strategiche, ad esempio nel valutare e quindi agire rispetto a rischi di insolvenza di debitori.

Le differenze rispetto a tradizionali tecniche di inferenza statistica sono ben sintetizzate in questo grafico (Fig. 53).

⁴⁵ Una sezione speciale dell'ERCIM News dell'Ottobre 2016 è dedicata al Machine Learning e a questioni relative alle intersezioni con AI, Deep Learning, Quantum Computing.

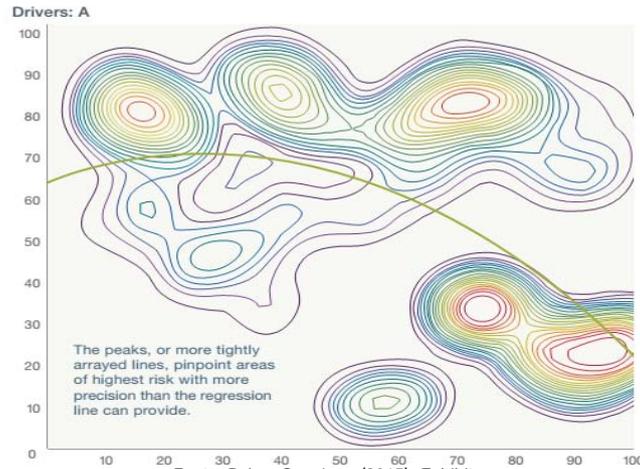
⁴⁶ “For instance, the ImageNet database used in image recognition contains about 1.2 million labelled examples; DeepMinds's AlphaGo used more than 38million positions to train their algorithms to play Go; and the same company used more than 38 days of play to train a neural network to play Atari 2600 games, suchas Space Invaders or Breakout.” (Mouret, 2016).

Figura 53

The contrast between routine statistical analysis and data generated by machine learning can be quite stark.

Value at risk from customer churn, telecom example

— Classic regression analysis ○ Isobar graph facilitated by machine learning: warmer colors indicate higher degrees of risk



Fonte: Pyle e San Jose (2015), Exhibit

Questi sintetici accenni alla grande proliferazione di programmi per computer sempre più perfezionati e complessi, basati su algoritmi di apprendimento, ci porta direttamente sul terreno dell'IA, che ha di recente mostrato al mondo alcuni successi importanti, di cui parleremo tra poco. Naturalmente anche dell'IA esistono molte definizioni, riportate da Russell e Norvig (1995: 28) e raggruppate in quattro categorie: sistemi che pensano come gli umani, sistemi che pensano razionalmente, sistemi che agiscono come gli umani, sistemi che agiscono razionalmente. In realtà le categorie sono riducibili a due: l'una si occupa dei processi di pensiero e di ragionamento, mentre l'altra si occupa del comportamento⁴⁷.

Uno dei massimi esperti di IA, Nils Nilsson (2010), ha scritto che manca una definizione accettata di IA. Un classico contributo introduttivo (Charniak e McDermott, 1985: 6) definisce l'IA *"The study of mental faculties through the use of computational models"*⁴⁸.

Nilsson (1998: 1-2; ed .it. 2002: 21-22) propone questa definizione: *"Artificial Intelligence broadly (and somewhat circularly defined) is concerned with intelligent behavior in artifact. Intelligent behavior, in turn, involves perception, reasoning, learning, communicating and acting in complex environment"*. Lo stesso Nilsson spiega poi molto bene i due approcci o paradigmi fondamentali impiegati negli studi sull'IA: 1) il paradigma "classico" (Newell e Simon, 1972) dell'elaborazione simbolica, incentrato sull'ipotesi di *"physical symbol systems"*, ovvero sistemi fisici che elaborano informazioni sulla base di *"basi di conoscenza dichiarative"*: la conoscenza relativa al dominio di un problema è rappresentata attraverso *"declarative sentences"* ed elaborata mediante la logica del primo ordine. A fronte di questa struttura simbolica essenzialmente *top-down*, collegata in modo fisico nel dispositivo che elabora

⁴⁷ Per una breve e molto ricca sintesi dei principali temi discussi nel corso del suo sviluppo si veda Russell e Norvig (2009), specialmente il capitolo primo.

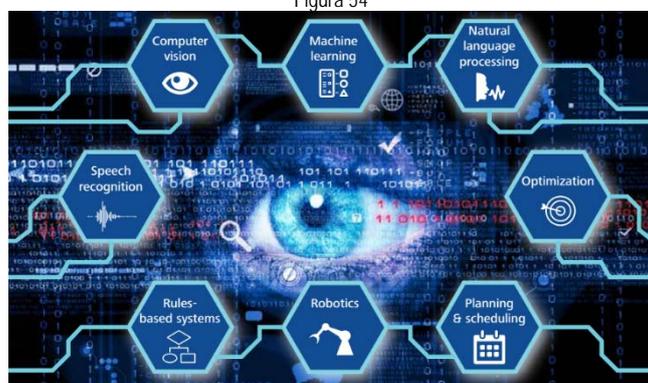
⁴⁸ Il libro di Charniak e McDermott è particolarmente importante perché spiega in modo efficace il paradigma "classico" dell'IA, essenzialmente basato su "conoscenza dichiarativa" e calcolo proposizionale (logica dei predicati del primo ordine). I due autori impiegano uno dei linguaggi più diffusi alle origini dell'IA, cioè il LISP, per rappresentare processi inferenziali quali induzione, deduzione e "abduzione" (quest'ultima indica la formulazione di ipotesi esplicative da sottoporre a verifiche, si veda in particolare il capitolo 8).

l'informazione, è stato sviluppato nel corso di decenni il secondo approccio, cioè il cosiddetto "sub-simbolico". 2) Il paradigma sub-simbolico è esplicitamente ispirato ai sistemi neurali biologici del cervello, abbandonando la "metafora del computer" propria dell'altro paradigma, ovvero del "cervello come computer". La computazione neurale, nota anche come connessionismo, modella reti di processori-nodi senza rappresentare la conoscenza in modo esplicito. Essa cerca di simulare la dinamica individuale e collettiva (regole di attivazione e propagazione delle informazioni) delle reti neurali che si attivano nel cervello. Ingredienti basilari dei modelli connessionisti sono l'analisi dell'evoluzione delle strutture connettive e la misura della forza delle connessioni ("Patterns of connectivity") e della densità connettiva. A partire dalla pubblicazione del fondamentale volume di Rumelhart e McClelland (1986, vol. I) i modelli connessionisti, grazie alla conoscenza *distribuita* nei sistemi neurali artificiali e senza la "manipolazione simbolica" hanno mostrato una serie di successi nel riconoscimento di immagini, nell'interpretazione del linguaggio, nell'analisi dei testi. Dopo alcuni anni di un relativamente minore successo le reti neurali stanno incontrando una rinnovata e crescente attenzione, in seguito ad alcuni contributi innovativi di importanti centri di ricerca, tra i quali in primo piano è quello di Geoffrey Hinton (come vedremo tra poco).

I cambiamenti tecnico-scientifici e le innovazioni economico-produttive hanno stimolato l'interesse per l'IA anche in campo manageriale: ad esempio Deloitte (2014: 3) definisce l'IA come "the theory and development of computer systems able to perform tasks that normally require human intelligence" e dedica da alcuni anni numerosi contributi al tema del suo impiego.

In realtà, dagli anni '50 in poi, l'IA ha vissuto periodi di entusiasmo e alte aspettative, alternate a delusioni. Fattori propulsivi di un grande rilancio negli ultimi due decenni sono indubbiamente la "legge di Moore", *Big Data*, Internet, *Cloud Computing*⁴⁹, l'elaborazione di nuovi algoritmi e software che hanno consentito un grande sviluppo del *Machine Learning*. È interessante la visione delle tecnologie cognitive che caratterizzano il campo dell'IA (Fig. 54) e che sono tali da permettere di svolgere compiti specifici tipicamente umani Deloitte (2014).

Figura 54



Fonte: Deloitte (2014), Fig. 1

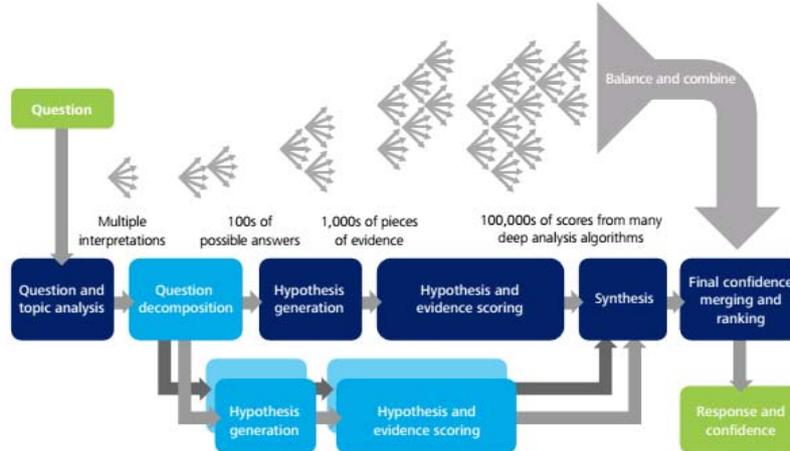
Le 8 tecnologie appena raffigurate sono già impiegate in molte attività economiche. Nelle banche il ML è utilizzato per scoprire pattern indicatori di comportamenti fraudolenti, mentre le tecnologie per il riconoscimento del linguaggio naturale servono per automatizzare le

⁴⁹ La definizione standard di cloud computing è la seguente: "Cloud computing is a model for enabling ubiquitous, convenient, on-demand network access to a shared pool of configurable computing resources (e.g., networks, servers, storage, applications, and services) that can be rapidly provisioned and released with minimal management effort or service provider interaction." (NIST, National Institute of Standard and Technology, US Department of Commerce, 2011).

interazioni telefoniche di assistenza clienti e l'identificazione degli autori delle chiamate. In sanità il riconoscimento del linguaggio parlato per la trascrizione dei consulti dei medici è usato in quasi metà degli ospedali americani. La *computer vision* automatizzata analizza mammografie e altre immagini mediche, mentre Watson dell'IBM, di cui parleremo tra poco, legge e comprende un'ampia letteratura medica mediante il *Natural Language Processing*, altre tecniche di generazione delle ipotesi servono per automatizzare la diagnosi e il ML ne migliora l'accuratezza. Nelle scienze della vita sistemi di ML contribuiscono a predire relazioni di causa-effetto sulla base di dati biologici e le attività di composti, arrivando addirittura ad aiutare le case farmaceutiche nell'identificare medicine promettenti. Nei media e nell'industria dell'intrattenimento un numero crescente di imprese usano *Data Analytics* e NLP per elaborare articoli e materiale narrativo, oltre che sintesi di eventi sportivi. Nel settore pubblico tecnologie cognitive sono adoperate per sorveglianza, controllo di osservanza della legge, scoperta di frodi. In alcuni settori high-tech società integrano *computer vision* e ML per inventare nuove tipologie di prodotti: aspirapolvere e robot per la pulizia della casa, termostati intelligenti, strumenti di controllo degli elettrodomestici e delle *smart homes*.

NLP e ML sono sotto-campi di ricerca dell'IA, mentre il *Cognitive Computing* è un concetto relativamente nuovo, che consiste in sistemi cognitivi capaci di apprendere grazie a interazioni con dati e umani, fino a divenire adattativi, diventando sempre più intelligenti nel corso del tempo (Deloitte, 2015). Il focus principale del *cognitive computing* sono i dati non strutturati, che secondo IBM costituiscono l'80% dei dati odierni. Esso è anche oggetto di grandi investimenti da parte di leader globali come Apple (software di riconoscimento vocale SIRI), Google Now insieme a Deep Mind, Microsoft con Cortana e Delve (ultima aggiunta sul set OFFICE). Secondo Deloitte (2015) nessuno di questi prodotti è comparabile con Watson, che offre: 1) *deep cognitive computing capabilities*, cioè NLP e ML, quindi ipotesi basate sull'evidenza e valutazione delle stesse. 2) Hardware appropriato per lo sviluppo di quelle *capabilities*, cioè la potenza computazionale e il *memory storage*, che consentono elaborazioni in tempo reale. 3) Comunità di supporto, perché IBM sta creando intorno a Watson un "Partner Program", che include lo sviluppo di App, *providers* di contenuti e di servizi. Deloitte (2015: 9) elenca anche 8 player in grado, però, di offrire solo *cognitive computing* di nicchia, mentre Watson in termini tecnici è un "*advanced open-domain question answering system with Natural Language Processing NLP*". Esso inoltre offre Watson Service come una piattaforma di servizi. Nel rispondere a quesiti Watson è in grado di adattarsi formulando ipotesi, migliorandole nell'interagire con gli utilizzatori e valutandone l'attendibilità. Di fatto Watson è un ecosistema con una sorta di "cervello capace di formulare ipotesi grazie ad una peculiare architettura e ad una serie di strumenti logico-operativi. Per questi ultimi si rinvia a Deloitte (2015), mentre gli altri sono esposti nella figura 55.

Figura 55
COME WATSON ELABORA INFORMAZIONI IN RISPOSTA A QUESITI



Fonte: Deloitte (2015), Fig. 7

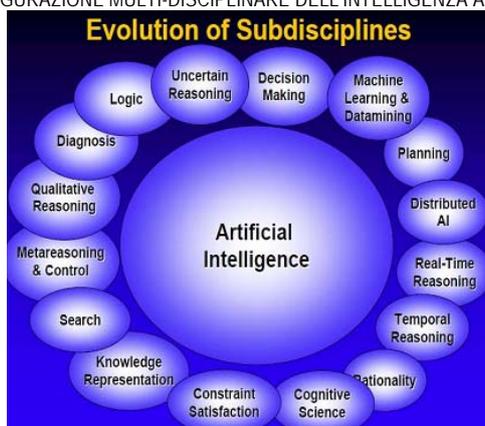
I problemi trattabili da parte di Watson devono essere posti in linguaggio naturale, richiedono una ricerca basata sul contesto e catene inferenziali. Per tale via essi permettono un “*active learning and decision support*”. Non sono problemi adatti a Watson i calcoli matematici complessi, le analisi predittive e il ragionamento induttivo. I maggiori limiti, sempre secondo Deloitte (2015), consistono nel fatto che esso ricerca soprattutto testi e comprende solo l’inglese, mentre alcune tecnologie non possono essere integrate e lo sviluppo di App richiede il coinvolgimento di IBM.

A questo punto pensiamo sia da ritenere accettabile la definizione proposta da Shubhendu e Vijoy (2013: 28) per cui possiamo definire l’AI come: “*is the study of ideas to bring into being machines that respond to stimulation consistent with traditional responses from humans, given the human capacity for contemplation, judgment and intention. Each such machine should engage in critical appraisal and selection of differing opinions within itself. Produced by human skill and labor, these machines should conduct themselves in agreement with life, spirit and sensitivity, though in reality, they are imitations*”.

La ricerca in IA è iniziata negli anni ‘50, quando scienziati e ricercatori hanno iniziato a interrogarsi sulle possibilità che macchine esprimessero capacità intellettuali analoghe a quelle umane. L’espressione IA è coniata nel 1956 da John McCarthy del MIT e da allora ha visto l’evoluzione di numerosi domini di conoscenza, discipline e sotto-discipline, insieme all’aumento esponenziale della potenza computazionale dei computer (Fig. 56).

Figura 56

LA CONFIGURAZIONE MULTI-DISCIPLINARE DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE



Fonte: Shubhendu e Vijoy (2013), Fig. 1.1

I campi di applicazione dell'IA sono in aumento e comprendono un numero elevato di attività tecnico-scientifiche ed economiche: esplorazioni spaziali, industria manifatturiera, trasporti, produzione trasporto di energia, sanità, studio dei processi decisionali in psicologia ed economia.

La storia dell'IA negli ultimi tre decenni è segnata dall'evoluzione delle traiettorie di ricerca basate sulle reti neurali. Dopo un boom alla fine degli anni '80 e nei primi anni '90, c'è stato un rallentamento nella generazione di novità, parallelamente ad una maggiore diffusione e ad un arricchimento significativo di strumenti e concetti relativi al ML. Finalmente, a metà anni 2000 c'è stata una rilevante innovazione nel campo delle reti neurali, che sta producendo delle forti aspettative in molti studiosi, ricercatori e soprattutto imprese global player. Prima di spiegare tutto questo una breve, ma essenziale premessa, basata su Russell e Norvig (1995) è necessaria. Nell'IA è basilare il concetto di agente inteso come entità capace di percepire l'ambiente mediante sensori e agire su di esso attraverso effettori/attuatori. Un software/agente è ovviamente un insieme di stringhe che rappresentano percetti e azioni. L'agente è razionale "se fa la cosa giusta", nel senso che ha successo rispetto all'ambiente e tale successo è misurato con una metrica delle performance, sulla base di criteri non immutabili, in quanto l'agente deve essere autonomo, cioè in grado di adottare un comportamento, determinandolo in relazione alla sua esperienza e al contesto di riferimento. L'agente razionale non è onnisciente, anzi un punto fondamentale è proprio la distinzione tra razionalità e onniscienza. Quest'ultima significa che l'agente conosce l'esito effettivo di tutte le sue azioni; l'agente razionale, invece, ha una metrica per definire il suo grado di successo. Le sue decisioni si basano sulla sequenza delle proprie percezioni passate, su ciò che conosce circa l'ambiente delle azioni che egli può compiere. La definizione di agente ideale razionale è la seguente: *"For each possible percept sequence, an ideal rational agent should do whatever action is expected to maximize its performance measure, on the basis of evidence provided by the percept sequence and whatever built-in knowledge the agent has"* (Russell e Norvig, 1995: 33). Nell'IA, quindi, centrale è l'"agente programma", ovvero una funzione che rappresenta le associazioni tra percetti e azioni. L'agente-programma deve "girare" su qualche tipo di dispositivo computazionale, con una sua architettura, correlata all'oggetto scelto per l'implementazione su qualche *special purpose hardware*, oppure su software che in un certo senso "isoli" il dispositivo computazionale dall'agente-programma. Pertanto la sintesi finale è agente = architettura + programma.

Questo ideale agente razionale, grazie a computer sempre più potenti e alle capacità computazionali acquisibili *on demand* in piattaforme *cloud*, consente attualmente di lavorare a molti strati di dispositivi computazionali, quindi di trattare in parallelo dati e informazioni acquisite da enormi dataset. Le risorse materiali e immateriali a disposizione consentono ora di riconoscere pattern⁵⁰, di analizzare micro e macro-comportamenti, infine di delineare anche una gamma di decisioni “intelligenti” possibili (il tema sarà ripreso tra poco a proposito della robotica). In breve, abbiamo dispositivi computazionali in grado di apprendere, conoscere e scegliere anche tipologie di azioni, che si estendono fino all’utente: si pensi a SIRI e a Cortana di Microsoft.

A tutto ciò si aggiungono i recenti successi dell’IA, che hanno suscitato grande interesse tra gli esperti e l’opinione pubblica in generale. Nel 1997, dopo una prima sconfitta, il supercomputer IBM “Deep Blue” ha sconfitto per la prima volta a scacchi - nel corso di una rivincita- il campione del mondo allora in carica Kasparov. Deep Blue era un computer tradizionale, che utilizzava algoritmi molto potenti, su concetti tradizionali dell’IA: processi di elaborazione delle informazioni basati su sistemi di ramificazioni esplorate in profondità e ampiezza (*depth and breadth*), grazie ad una enorme potenza di calcolo lungo lo spazio delle mosse possibili (spazio del gioco) e all’attribuzione di valutazioni. Queste ultime erano basate su funzioni, cioè algoritmi in grado di valutare la “bontà” delle posizioni dei pezzi. La strabiliante potenza di calcolo di Deep Blue è evidente per il fatto che esso era capace di generare 200 milioni di posizioni al secondo al fine di decidere la mossa migliore. Dopo Deep Blue IBM intraprende altri grandi sfide: creare un computer capace di vincere in un gioco non basato su set di regole definite, l’universo delle combinazioni possibili deve essere “astronomico” come nel gioco degli scacchi. Il progetto IBM ha come obiettivo di creare un agente artificiale con capacità inferenziali su una vasta serie di ambiti: politica, storia, letteratura, arte, scienza, intrattenimento. In poche parole, un agente con capacità “umane” nel trattare gli argomenti più disparati sulla base di una conoscenza di fondo non esaustiva delle regole del gioco, spesso con informazioni parziali e ambigue, talvolta anche con incertezza ed enigmi da risolvere per arrivare ad acquisire la conoscenza riferita ad un contesto. La missione intrapresa nel 2007 dal Centro ricerche IBM è stata pertanto quella di creare un *computer system* (*Researcher, Watson.Ibm.com*, ultimo accesso 18-8-2016) in grado di andare oltre i dati strutturati (righe e colonne in database, fogli di calcolo) per elaborare informazioni partendo da dati non codificati e non-strutturati: testi in linguaggio naturale, domande delle persone, documenti, libri di riferimento, notizie, discorsi, immagini, ecc., insomma tutto il materiale che gli umani scambiano senza l’utilizzo di dispositivi computazionali e che spesso è fonte privilegiata di nuove informazioni e conoscenze. La missione di IBM Research Center e, più precisamente, del DeepQA Research Team è quella di realizzare *computer systems* intelligenti, cioè capaci di analizzare i contenuti nelle varie modalità indicate, comprendendo questioni ed esigenze poste dalle persone, come nella vita di tutti i giorni.

Nel 2011 il computer Watson ha superato concorrenti umani a *Jeopardy*, un gioco a quiz che copre un arco ampio di temi ed ambiti (storia, politica, scienza, intrattenimento, ecc.) e si basa anche su indovinelli, espressioni iconiche, le quali talvolta richiedono un’interpretazione non immediata del significato, con una serie di complessità interpretative (sfumature, ambiguità, ecc.) tipiche delle conversazioni umane e certamente estranee alla logica con cui i tradizionali dispositivi computazionali processano l’informazione⁵¹. Con la vittoria di Watson, dopo anni di preparazione e un lungo allenamento con numerosi “*sparring partner*” umani, inizia nella

⁵⁰ In astronomia, nell’evoluzione dei micro-organismi, nel sequenziamento del DNA, nel mapping tra genotipo e fenotipo, nell’espressione di un virus e nella dinamica diffusiva su scala spazio-temporale globale.

⁵¹ La creazione di Watson e il processo che ha portato alla sua vittoria sono ricostruiti da Ferrucci *et al.*, 2010.

visione di IBM una nuova traiettoria di ricerca: il *cognitive computing*, che caratterizzerà la *Cognitive Era*, incentrata sulla combinazione di “*data analytics and statistical reasoning of machines with uniquely human qualities, such as self-directed goals, common sense and ethical values*” (IBM, Kelly III, 2015).

Al di là delle enfattizzazioni connesse alle strategie di marketing, Watson e i suoi sviluppi software negli ultimi cinque anni, sono dispositivi capaci di riflettere e valutare il grado di certezza delle proprie conclusioni sulla base di processi inferenziali molto complessi, che nel caso di Watson 2011 ha coinvolto un cluster di 750 90 IBM Power, ciascuno dei quali con 3290 *power processors* attivi a 3,55 Gigahertz. Watson era in grado di processare 500 gigabytes per secondo, equivalenti al contenuto di un milione di libri (Intervista di Ferrucci, leader del DeepQA Research, ww.aol.com 18.2.2011). Lo stesso Ferrucci sul *New York Times Magazine* ha spiegato che la *knowledge base* di Watson era composta da “*books, reference material, any sort of dictionary, thesauri, folksonomies, taxonomies, encyclopedias, any kind of reference material you can imagine getting your hands on or licensing. Novels, bibles, plays.*” (Intervista di Clive Thompson, 16-6-2010).

Una delle sintesi più efficaci dell’“agente” Watson è contenuta nel brano di Eric Brown, IBM Research Manager:

“*Watson does not take an approach of trying to curate the underlying data or build databases or structured resources, especially in a manual fashion, but rather, it relies on unstructured data - documents, things like encyclopedias, web pages, dictionaries, unstructured content. Then we apply a wide variety of text analysis processes, a whole processing pipeline, to analyze that content and automatically derive the structure and meaning from it. Similarly, when we get a question as input, we don’t try and map it into some known ontology or taxonomy, or into a structured query language. Rather, we use natural language processing techniques to try and understand what the question is looking for, and then come up with candidate answers and score those. So in general, Watson is, I’ll say, more robust for a broader range of questions and has a much broader way of expressing those questions*” (brano tratto da *conversation with Eric Brown*, KurzweilAINet | Accelerating Intelligence. Blog, 31-1-2011.)

Watson non gioca solo a *Jeopardy!* Ora ha iniziato a lavorare! All’Hotel McLean in Virginia, nel Connecticut, opera Connie, un robot che utilizza numerose componenti di Watson (*Dialogue, Text to speech, Speech to text, Natural Language Classification*, e così via) per accogliere alla *conciierge* dell’Hotel i clienti, rispondendo alle loro domande. Tra l’altro le interazioni con i clienti stessi consente a Connie di acquisire nuove conoscenze per fornire consigli sempre migliori, parallelamente all’incremento della sua *knowledge base*, con un *upgrading* continuo di prestazioni e interazioni.

Oltre a Watson ha suscitato una vasta eco anche l’impresa di AlphaGo⁵², un agente artificiale che nell’ottobre 2015 ha superato Lee Sedol, vice-campione mondiale di GO, tradizionale gioco cinese dall’enorme spazio di gioco (mosse possibili), molto più ampio di quello degli scacchi e più vasto del totale degli atomi nell’universo visibile, nonostante le regole base siano relativamente semplici⁵³.

Com’è possibile che Watson, Connie e AlphaGo, analogamente a tutta una serie di dispositivi presenti nelle *self-driving cars*, negli aerei da combattimento e in quelli di linea, nei droni degli eserciti e del famoso distributore di pizze nella caotica Bombay, siano in grado di svolgere attività così complesse? Che dire poi della performance del leader del Centro di

⁵² AlphaGo è un software creato da DeepMind, startup londinese acquistata da Google nel 2014 per 400 milioni di dollari (The Guardian, 27-1-2014).

⁵³ Per un’analisi tecnica e una rappresentazione dello spazio del gioco GO si veda l’articolo apparso su Nature (Silver *et al.*, 2016).

Ricerca Microsoft Rick Rashid: ha stupito la platea di una sua *lecture* in Cina, nel corso della quale un programma ha trasformato il suo *speech* in testo inglese scritto con un errore del 7%, quindi tradotto lo stesso discorso in testo cinese scritto e infine pronunciato con voce che si esprimeva in Mandarino!

Il fatto è che nei primi anni 2000 c'è stata una svolta importante con l'innovazione del *Deep Learning* da parte di Geoffrey Hinton, professore dell'Università di Toronto. Hinton e il suo team hanno sviluppato nuove tecniche di organizzazione delle reti neurali, definite appunto *deep learning* (DL). In breve, il DL consiste in molti livelli di semplici moduli raggruppati, i quali tutti apprendono e la maggior parte dei quali compie operazioni di *multiple mapping*, cioè associazioni complesse non lineari, svolgendo così funzioni molto complesse di input e di elaborazione a grana fine⁵⁴.

Reti neurali con un numero elevato di layer consentono di creare rappresentazioni molto complesse e articolate con livelli di precisione assai più accurati che nel passato. Per questi motivi metodi di *Deep Learning* stanno mostrando performance notevoli nel riconoscimento di testi vocali e scritti, immagini, semplici fonemi, ricostruendo rappresentazioni complesse (foto di cani, gatti e persone) da semplici e sparsi dettagli tipologici o categorie.

I risultati ottenuti con gli impressionanti sviluppi dell'IA hanno riacceso grandi aspettative non solo sulle possibilità che il *Deep Learning* possa creare qualcosa di molto simile all'intelligenza umana, ma anche che le realizzazioni concrete da attendersi possono essere enormi e al momento quasi nemmeno ipotizzabili: dalla *self-driving car* agli aerei di linea senza pilota e guidati da remoto, alla progettazione di nuove molecole e medicine (*drug discovery*). Un numero crescente di imprese global player -oltre ad Amazon, Google, Facebook, Microsoft, Intel, Qualcomm- impiegano metodi di *Deep Learning* quali NVIDIA (processori grafici, componenti per prodotti multimediali), Mobileye (tecnologie per evitare collisioni tra auto), anche se non mancano riflessioni critiche⁵⁵. Vari di team di scienziati e ricercatori progettano macchine intelligenti ispirate al funzionamento del cervello, in particolare alla neocorteccia cerebrale e alle sue caratteristiche topologiche, cioè alla struttura delle connessioni dinamiche e alle sequenze temporali di strutture sinaptiche che conservano memoria di processi e degli eventi. Oltre alle differenze di architettura e di principi organizzatori del software, c'è da rimarcare che *Deep Learning* ottiene risultati interessanti, ma richiede un enorme impiego di risorse computazionali. Non a caso Google è una delle imprese di punta nei metodi di DL.

Bisogna comunque andare al di là delle dispute di natura teorica (come mostra il libro di Hawkins) e competitiva, in quanto sono ovviamente in gioco partnership strategico-progettuali per molte funzioni e attività economico-produttive cruciali nei prossimi decenni. È indubbio che siamo di fronte a grandi progressi del *Maching Learning* e nell'IA: si stanno costruendo *computer systems* in grado di svolgere non più solo funzioni meccaniche e ripetitive, come è avvenuto fino a pochi anni or sono. Nell'elaborazione di flussi enormi di dati, non solo si superano i limiti computazionali degli esseri umani, ma si profilano agenti artificiali capaci di elaborare modelli previsionali, delineando scenari alternativi e talvolta avanzando "suggerimenti", nel senso di delineare una gamma di opzioni possibili da verificare. Su queste basi cambia l'orizzonte generale per la stessa scienza: dalla *data intensive science* si passa alla *computational science* (Hey *et al.*, 2009), vero e proprio nuovo paradigma per l'esplorazione scientifica. Il "diluvio di dati" in astronomia e nella fisica delle particelle, nelle reti simbiotiche fisico-digitali per il monitoraggio e controllo a scala planetaria (Rajkumar *et al.*, 2010), in bio-informatica (Bell *et al.*, 2009), come nell'universo fisico-digitale al centro di questo contributo,

⁵⁴ Per una descrizione tecnica, molto precisa ed esauriente, si veda LeCun *et al.* (2015).

⁵⁵ Uno degli studiosi che ha argomentato molto bene le proprie perplessità è Jeff Hawkins, (*On Intelligence*, Times Book, 2004), fondatore della società Numenta, che ha sviluppato un sistema di *Machine Learning* (Open Source Platform NuPIC).

richiede il *computational thinking*, che implica risolvere problemi, progettare sistemi, analizzare il comportamento umano ricorrendo a concetti della *computer science* (Wing, 2006). Ciò significa usare astrazione e scomposizione di compiti e funzioni complesse in componenti sottoponibili al pensiero ricorsivo. Nell'era del *petabyte* bisogna pensare alla dimensione di petabyte "stored in the cloud", dove l'approccio standard alla scienza, basato sulla sequenza ipotesi-modelli-test diviene obsoleto (Chris Anderson, *Wired*, 2006): i petabytes ci consentono di sostenere "la correlazione è tutto", perché a quella scala la dimensionalità dei problemi è elevata e quindi "we can throw the numbers into the biggest computing clusters the world has ever seen and let statistical algorithms find patterns where science cannot".

Questa tesi è forse un po' esagerata, ma è comunque sicura l'importanza del *computational thinking* a scala di petabyte come a livello di nanoscala. Nella scienza dei materiali è ad esempio superata l'era dell'estenuante "trial and error", che pure ha dato all'umanità il MenloPark, dove lavorava Thomas Edison⁵⁶. Siamo entrati in quella che alcuni scienziati chiamano *golden age for materials* (The Economist, *Technology Quarterly*, 5-12-2015). Nuovi strumenti (microscopio elettronico a forza atomica, *AT Force microscope*, sincrotrone) consentono agli scienziati di studiare e testare materiali con gradi di risoluzione finora impossibili. L'impiego di risorse computazionali permette inoltre di lavorare a un vero e proprio "genoma dei materiali", progettando proprietà a partire da legami fisico-chimici a livello atomico e ipotizzando nuovi composti con una lista di "promettenti candidati" a 2 e 3 dimensioni (si veda Gibney, 2015). Ciò che si evince dall'evoluzione delle scienze fisiche è non molto differente da quanto accade nelle scienze sociali: gli sviluppi degli strumenti di rappresentazione e delle procedure di inferenza per processi a larga scala, insieme a dispositivi computazionali che forniscono elementi basilari per le riflessioni e le valutazioni dei *trade-off* decisionali delineano un paradigma di convergenze tra l'intelligenza nei cervelli e nelle menti (Hawkins, 2015). L'intelligenza diventa razionalità computazionale.

Non è ovviamente questa la sede per una discussione dei problemi e delle sfide che affrontano studi e progetti di IA, ma vale la pena proporre al lettore un resoconto del dibattito intercorso tra alcuni studiosi di frontiera in questo campo. Gli interventi raccolti sotto la forma di risposte articolate ad una serie di domande di ricerca rivolte a *leading practitioners* degli Usa sono esposte nel volume curato da Beyer (2016). Tra i punti più importanti ai nostri fini vi è innanzitutto la convinzione unanime che sono oggi a disposizione e in continuo sviluppo strumenti e metodologie che consentono di trattare flussi enormi di dati multi-direzionali nel tempo e nello spazio. Il *Deep Learning*, con i molti strati di cluster (fino a 15 e più) di moduli-nodi è una tecnologia in forte espansione per la comprensione di immagini, testi e linguaggio parlato, così come per l'analisi di domini conoscitivi ad elevata complessità strutturale (dalla genomica alla fisica delle particelle). La combinazione di *Machine Learning* e altri software strutturati permette di costruire sistemi computazionali intelligenti in grado di raggiungere livelli sempre più promettenti in termini di proprietà ottenibili: auto-diagnosi e auto-controllo, individuazione di nuove funzionalità, quindi progettazione di materiali oggetti e processi di fabbricazione a differente scala (dal micro-, nano- al macro-livello della vita quotidiana). La robotica è uno degli ambiti di confluenza dei rilevanti progressi raggiunti lungo le varie direttrici di ricerca, grazie ad una serie di feedback cumulativi: incremento accelerato della capacità computazionale, grandi progressi dell'hardware richiesto per interagire con il mondo fisico, aumento dell'affidabilità di sensori e riduzione della loro dimensione, invenzione di nuovi materiali. Contemporaneamente il mondo tecnico-scientifico ha effettuato dei veri e

⁵⁶ Non tutti ritengono il *trial and error* estenuante. Uno dei più grandi inventori della storia, appunto Thomas Edison, è famoso per aver fatto 9999 tentativi prima di trovare la lampadina elettrica. Edison ha poi sempre rifiutato l'interpretazione dei 9999 tentativi come fallimenti, li vedeva in modo diverso: "ho scoperto 9999 modi di non fare una cosa".

propri salti qualitativi nelle modalità di rappresentazione e realizzazione di modelli di pianificazione, controllo e percezione del comportamento. Tutto questo è avvenuto grazie anche all'interdisciplinarietà e alla convergenza nell'adozione del *computational thinking*, che ha consentito a molti campi di ricerca sia teorica che applicata di ottenere risultati “considerati un sogno solo alcuni anni or sono” (intervento di Daniela Rus, direttrice del CSAIL, *Computer Science and Artificial Intelligence* del MIT, pp. 38-41, in Beyer, 2016).

Il punto di arrivo dell'analisi effettuata in questo paragrafo è che la robotica costituisce uno degli ambiti con maggiore potenzialità di applicazione e sviluppo dei grandi progressi in atto nel ML e nell'IA, soprattutto a partire da trend oramai consolidati verso la reazione di computer systems in grado di svolgere funzioni di crescente contenuto cognitivo. Riprendendo uno dei temi indicati nel primo capitolo, ovvero il potenziale creativo dell'universo fisico-digitale nel creare/modificare/aggiungere sempre nuove funzionalità, uno degli aspetti più importanti della dinamica tecnico-scientifica e produttiva odierna è l'espansione continua di funzioni cognitive e, seppure a livello embrionale, anche decisionali, che possono essere svolte da agenti artificiali.

Tra gli strumenti oggi a disposizione per la ricerca sia sul terreno teorico che applicativo, vi è poi l'*Augmented Reality* (AR) che può fare un uso esteso e di grande potere amplificativo dei Big Data.

L'AR definisce i casi in cui un ambiente reale è “incrementato” per mezzo di oggetti virtuali (Milgram e Kishino, 1994). A differenza della realtà virtuale l'AR incrementa il mondo reale fornendo informazioni addizionali e assistenza tecnica (DBR, 2015). Poiché l'AR amplia la visione del mondo reale attraverso lo sviluppo di applicazioni con contenuti conoscitivi molto più ampi, l'interazione tra utilizzatore e contesto in *real time* è di gran lunga più ricca, riducendo la complessità di un compito o di una funzione da svolgere. Gli esempi più comuni sono *smartphone* e occhiali (*google glass*), anche se in realtà il set di dispositivi dell'AR è molto più vasto: *smartwatch*, *wearables* (abbigliamento e accessori dotati di sensori e attuatori) a cui si aggiungono campi di applicazione dell'AR -oltre all'elettronica di consumo, giochi, multimedia- di grande importanza: sanità, navigazione, automazione industriale, ricerca tecnico-scientifica in laboratorio (per es. nella progettazione di materiali a nano-scala) e nella biochimica.

L'utilità pratica dell'AR può essere di grande portata in diversi ambiti: Jaguar e Land Rover stanno lavorando al “parabrezza virtuale”, che proietta direttamente sul parabrezza effettivo la distanza reale dalle altre auto per frenare oppure mostrare le opportunità di superamento. Un dispositivo simile viene attualmente studiato dal produttore del casco per moto Skully AR-1. Nell'industria delle costruzioni, durante il processo di edificazione e di ricostruzione dopo un terremoto, è possibile visualizzare direttamente esattamente come sarà lo spazio, addirittura con il calcolo delle condizioni di vento locale. Al Fraunhofer Institute stanno sviluppando un metodo per la visualizzazione di questo tipo non solo per specialisti, ma anche per persone ordinarie non abituate allo *spatial thinking* (DBR, 2015: 6). L'impiego dell'AR nel campo dei beni culturali potrebbe essere di grande importanza per un Paese come il nostro e per la Toscana in particolare, come mostra un'esperienza realizzata a Lecce (Banterle *et al.*, 2015)⁵⁷.

A tutto ciò va anche aggiunto che nelle *global value chain* l'AR può consentire ad operatori distribuiti in tutto il mondo di interagire in tempo reale, quasi lavorando in gruppo. È dunque evidente la connessione diretta tra AR e Industria 4.0; anzi l'AR può diventare un cruciale fattore propulsore nella dinamica dell'universo fisico-digitale: assistenza post-vendita e manutenzione, arricchimento continuo delle informazioni nell'industria turistica, design e verifiche di prototipi, interazioni uomo-robot (Ong *et al.*, 2007; Nee *et al.*, 2012).

⁵⁷ Per un'ampia analisi dei campi di applicazione dell'AR e delle esperienze realizzate in Europa si veda ERCIM News (n. 103, October, 2015); tale pubblicazione è curata dallo European Research Consortium for Informatics and Mathematics.

L'AR è in effetti un insieme dinamico e compatto di differenti ampi di ricerca e tecnologie, sviluppato innanzitutto a fini militari, come si può vedere dalle foto qui riprodotte da: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2640869/Google-glass-war-US-military-reveals-augmented-reality-soldiers.html>



Alla luce dell'analisi svolta sulle tecnologie, metodologie e sugli strumenti in continua espansione e sviluppo, è doveroso affrontare una delle questioni emergenti negli studi dell'attuale "era dei petabytes": quali sono gli effetti sull'occupazione e sul lavoro in genere se gli scenari concernenti la Fabbrica Intelligente si realizzano pienamente, diffondendosi in ogni sfera della vita sociale ed economica?



4. POTENZIALITÀ, SFIDE E PERICOLI DI INDUSTRIA 4.0 NELL'“ERA DEI PETABYTES”

Secondo autorevoli Centri di Ricerca internazionali (Atlantic Council, Brent Scowft Center on International Security, Primakov Institute of World Economy and International Relations, 2015a) il mondo è a un punto critico, a causa di una serie di fattori che delineano potenzialità, sfide e possibilità. In un mondo diventato multipolare le ragioni di conflitti tra le potenze tradizionali e quelle in ascesa si moltiplicano a vari livelli: internazionale, tra Paesi divisi da “linee di faglia” a matrice politico-religiosa e da crescenti ambizioni tecnico-economiche, e nazionale/infra-nazionale tra molteplici componenti, in cui l'incertezza del mondo globalizzato fomenta antichi e nuovi sentimenti di appartenenza e, quindi, di divisione. Se a tutto questo si aggiunge la proliferazione senza limiti di tecnologie e nuove tipologie di armi, tra le quali non secondari sono i progetti di *cyberwars* con attacchi mirati a sistemi informatici che controllano centrali nucleari, centri di elaborazione dati e siti di importanza strategica, si comprende come le possibilità di conflitti regionali e anche di più larga scala siano non irrilevanti. Non bisogna peraltro trascurare l'importanza cruciale che tenderanno ad assumere come fonti di conflitto l'accesso e il controllo di risorse sempre più strategiche nei prossimi decenni (acqua, terreni, fonti energetiche fossili,...), le quali rischiano di diventare scarse alla luce di ipotesi sui trend di sviluppo delle nuove economie e della popolazione dell'intero pianeta. Il mondo diverrà policentrico, data la crescita delle economie emergenti e il rallentamento di quelle già sviluppate. Il dollaro dovrebbe conservare il ruolo di moneta di riserva globale, ma la sua incidenza sulla finanza potrebbe scendere dall'attuale 60% al 45% in un decennio, mentre l'euro di fatto è già una moneta di riserva e potrebbe restare “seconda moneta di riserva, salendo dall'attuale 20-25% al 25-30%”. Nei prossimi venti anni potrebbe emergere una terza moneta di riserva, cioè lo yen, che ora costituisce il 10-15% della finanza globale. Al di là di questi macro-indicatori economico-finanziari, un trend che sembra consolidarsi è quello verso un crescente “regionalismo”, cioè la creazione di cluster regionali (aggregazioni sovranazionali come EU, ASEAN, MERCOSUR), con la creazione di vere e proprie “piattaforme produttive continentali”, ovvero *global production network* con addensamenti di attività dinamiche nelle varie regioni sulla base di appropriate funzioni di coordinamento strategico-produttivo, oltre che politico-istituzionale.

Sono quindi ritenuti probabili grandi cambiamenti geo-economici, con una ridefinizione delle leadership politico-economiche secondo processi che sono tutti in divenire (*in state of flux*) e dagli esiti imprevedibili, dati il numero e l'entità dei fattori, le interdipendenze e le contraddizioni a varia scala.

Nonostante tutto emergono, però, tendenze sufficientemente consolidate: riequilibrio del potere a livello internazionale, mutamenti della geografia tecnico-produttiva, nuove potenzialità di conflitti, che possono assumere aspetti devastanti se si trasformano in guerre economico-finanziarie più o meno evidenti mediante attacchi improvvisi contro determinate monete. In un quadro globale caratterizzato da queste coordinate generali si sta realizzando una “confluenza di forze” (Sirkin *et al.*, BCG, 2015) che tendono ad accelerare i processi di adozione di tecnologie per l'*advanced manufacturing*: diminuzione dei prezzi e sempre migliori performance di hardware e software, digitalizzazione di processi e prodotti, crescente connettività, pressioni competitive verso la flessibilità produttiva e la riprogettazione di beni assumendo vincoli di natura ambientale. Cinque *technological tools* sono considerati tra le fonti del grande potenziale in grado di cambiare profondamente l'industria manifatturiera e tutta una serie di attività

economiche, ma è da ritenere che di fatto non vi sia sfera socio-economica esente dalla loro pervasività: *Autonomous Robot, Integrated Computational Materials Engineering, Digital Manufacturing, Industrial Internet and Flexible Automation, Additive Manufacturing*. Un effetto fondamentale delle interazioni tra i cinque *tools* è certo l'incremento della produttività del lavoro, anche se la loro introduzione e la piena valorizzazione richiederanno un periodo non breve e quindi occorre adottare un orizzonte analitico e strategico di medio-lungo termine. Ciò logicamente implica che, come abbiamo precedentemente affermato riguardo all'evoluzione dei sistemi e processi multi-dimensionali e complessi, è doveroso attendersi sentieri evolutivi non lineari, con elevati margini di incertezza e imprevedibilità.

Proprio questo fatto aggiunge a tutti gli elementi finora descritti una questione di grande rilevanza: ha senso elaborare strategie in condizioni di incertezza? In caso di risposta affermativa, con quali strumenti e modalità?

Prima di rispondere ai quesiti, approfondiamo brevemente uno dei cinque *tools*, l'Integrated Computational Materials Engineering (da ora in poi ICME). Oltre a quanto è stato già affermato nel capitolo 2, si pensi ai nuovi materiali a 2D, che vengono "pensati" e progettati dopo l'invenzione del graphene, che è un sottile foglio di carbonio spesso un atomo, fluido e trasparente, più forte dell'acciaio, più conduttore del rame e così sottile da essere effettivamente bidimensionale (Gibney, 2015). Allo Swiss Federal Institute of Lausanne (EPFL) si studiano materiali *super-flat*, chiamati *transition-metal dichalcogenides (TMDCs)*, i quali derivano da combinazioni di vari ingredienti di base e hanno un'ampia gamma di proprietà ottiche ed elettroniche. Molti TMDCs sono semiconduttori e quindi potenzialmente più adatti del graphene per processi digitali a scala molecolare. Scienziati e ricercatori parlano di possibili materiali 2D con proprietà tutte da scoprire, per esempio combinandoli per creare materiali molto sottili, ma di fatto 3D che, essendo "superpiatti", potrebbero consentire interi circuiti digitali partendo da componenti spesse come atomi, creando dispositivi finora nemmeno immaginabili. Gli stessi scienziati stanno appena iniziando ad intuire le potenzialità di questi materiali, creati iniziando da elementi analoghi a "mattoncini della Lego". È dunque incominciata un'avventura nella *Flatland* (Gibney, 2015) dove, all'inverso di quanto accade nella *Flatland* di Abbot, è la prospettiva 2D che permette di scoprire proprietà insospettite: facilità di conversione di luce in elettricità e viceversa, di cui si intravedono grandi implicazioni per quanto concerne le tecnologie dell'informazione, la grafica e la trasmissione delle informazioni (ad esempio nella crittografia quantistica).

Si stanno anche studiando altri materiali 2D partendo dall'esplorazione di elementi della tavola periodica (silicene dal silicio, germanene dal germanio) (Aix-Marseille University, France), phosphorene (Purdue University) e tanti altri con un'analogo *mental frame*: logica combinatoria di componenti elementari atomiche per progettare materiali con determinate proprietà nuove o molto incrementate rispetto a quelle fornite da quelli esistenti. In questo panorama di invenzioni e innovazioni, che certamente daranno impulso a successivi sviluppi delle ICT e quindi all'ulteriore espansione dell'universo fisico-digitale, la convergenza di nuove traiettorie di ricerca (materiali 2D, nanotecnologie, nuovi software per l'IA e il *quantum computing*) è possibile che porti a quella che un numero crescente di esperti definisce la prossima innovazione radicale, cioè la computazione quantistica⁵⁸. Il *quantum computing* si basa su intuizioni sviluppate da Feynman, premio Nobel per la fisica nel 1965, e Deutsch, fisico inglese che negli anni '80 elaborò un modello di computer quantistico, circa il modo di elaborare informazioni in base a principi della meccanica quantistica. Non è ovviamente questa

⁵⁸ Simonite (2015a, 2015b, 2016) ha descritto su *Technology Review* alcuni significativi annunci e azioni strategiche di Google nel *quantum computing*: passi decisivi compiuti nella realizzazione, "lancio" del primo computer quantistico, acquisizione di una società (Rigetti Computing) per dotarsi di chip quantistici.

la sede per una trattazione esauriente della materia, ma ai nostri fini è comunque importante chiarire che l'unità di informazione di base non è il classico bit, il quale ha due stati (0,1), bensì il *qubit*, che può anche assumere qualsiasi combinazione lineare dei due valori (cosiddetto principio di sovrapposizione). I computer quantistici (CQ) non solo saranno quindi incomparabilmente più veloci e potenti di quelli odierni, ma soprattutto avranno un approccio computazionale del tutto differente ed effetti quasi incredibili. Ad esempio, nella decrittazione di codici di accesso a database, anziché effettuare miliardi di tentativi con sequenze di combinazioni possibili, un CQ può sfruttare la sovrapposizione di stati e provare simultaneamente tutte le combinazioni possibili (cosiddetto parallelismo quantistico). Una simulazione effettuata da Microsoft indica che un problema di fattorizzazione, che su un computer convenzionale impiegherebbe 31000 anni, potrebbe essere risolto in pochi secondi da un CQ. Quando quest'ultimo sarà disponibile molti, se non la maggior parte, dei problemi di decrittazione odierni saranno risolvibili quasi istantaneamente. Si aprirà allora una "nuova era", perché problemi intrattabili con i computer convenzionali diverranno trattabili dal punto di vista computazionale: un CQ potrebbe esplorare simultaneamente migliaia di combinazioni molecolari per calcolare in breve tempo le migliori, al fine di scoprire nuovi materiali e medicine. Tra le sfide più interessanti da affrontare ci sono la creazione di superconduttori a temperatura ambiente anziché a gradi prossimi allo zero assoluto, oppure la modellizzazione accurata e con alto grado di dettaglio del cambiamento climatico. È inoltre chiaro che su queste basi la digitalizzazione di processi e prodotti, quindi lo sviluppo ed espansione dell'universo fisico-digitale, subirà un'accelerazione ulteriore con effetti al momento imprevedibili, dato che la traiettoria tecno-economica è appena iniziata. Sebbene il primo CQ sarà molto grande, "successivamente potranno diventare molto piccoli e fornire un'immensa potenza computazionale per gli individui e lo sviluppo dell'*Internet of Things*" (trad. nostra di Atlantic Council, 2015a: 18). In effetti le più grandi società leader su Internet stanno investendo ingenti somme sullo sviluppo di un CQ: Microsoft (Simonite, Technology Review, 10-10-2014); IBM, che ha recentemente annunciato un nuovo chip superconduttore come tecnica cruciale per la creazione di un CQ (Simonite, 29-4-2015); Google, che nel Dicembre 2015 ha ufficialmente dichiarato di aver provato il CQ, sviluppato insieme alla NASA dal 2013, impiega effettivamente principi quantistici nell'elaborazione dell'informazione, anche se non tutti gli esperti sono d'accordo (Simonite, 8-12-2015). Nel Dicembre 2015 il fisico John Martinis, assunto da Google nel suo *Artificial Intelligence Lab*, ha spiegato che si tratta di un primo test di successo, attuato sulla tecnologia canadese di processo *D-Wave* a temperatura molto bassa. Naturalmente l'esperimento scientifico non significa che un CQ sia già a disposizione degli ingegneri di Google, ma un orizzonte temporale "interno a Google" per un dispositivo utile praticamente è fissato per il 2017 (Simonite, 18-12-2015) e già nel corso di quest'anno ricercatori dell'Università di Google hanno fatto un significativo passo in avanti verso un CQ pienamente funzionale da un punto di vista pratico. Tutto ciò avviene mentre già da 4 anni la CIA e Amazon stanno investendo consistenti risorse nel *quantum computing* sempre sulla base della tecnologia canadese *D-Wave* (Simonite, 4-10-2012).

Come si vede, siamo in presenza di una serie di innovazioni tecnico-scientifiche di grande valore, che possono consentire di affrontare alcune sfide globali, di fronte a cui si trova il mondo globalizzato.

Dopo aver indicato all'inizio di questo capitolo le sfide geo-politiche globali, ci soffermiamo su quelle tecnico-scientifiche e di natura ingegneristica.

La National Academy of Engineering (Olson, NAE, 2016) ha compilato una lista di 15 Grandi Sfide per l'ingegneria nel XXI secolo: 1) Rendere l'energia solare economica, 2) Sviluppo della realtà virtuale. 3) *Reverse engineering del cervello*, cioè dalla comprensione

del funzionamento del cervello evincere principi generali di grande utilità non solo dal punto di vista sanitario, ma anche nella prospettiva di una differente concezione dell'industria manifatturiera (nell'ottica di Industrial Internet) e delle comunicazioni. 4) Progettazione di migliori medicine, come precedentemente indicato a proposito dell'ICME. 5) Sviluppo dell'informatica della salute, cioè nuovi sistemi di raccolta e gestione delle informazioni sanitarie, per innalzare il livello e l'efficienza delle cure mediche in risposta sia a malattie finora incurabili che all'esplosione di emergenze. 6) Ripristino e miglioramento delle infrastrutture urbane (materiali e immateriali). 7) Fornire l'accesso all'acqua pulita. 8) Provvedere alla sicurezza del cyberspace. 9) Riuscire a ottenere energia dalla fusione. 10) Prevenire il terrore nucleare, ovvero minacce di attacchi con armi sempre più letali da parte di qualsiasi tipologia di agente. 11) Controllo del ciclo dell'azoto, da un lato mediante nuove tecnologie di fertilizzazione, dall'altro con la cattura e il riciclo dei rifiuti. 12) Sviluppo di cattura e stoccaggio del carbonio (CO₂) per controllare il riscaldamento globale. 13) Invenzione di nuovi strumenti per la ricerca scientifica. 14) Nuovi strumenti per l'apprendimento individuale, in modo da avere processi formativi individualizzati, a misura delle necessità e aspirazioni individuali degli studenti. 15) Incremento della realtà virtuale.

Le 15 sfide per il secolo attuale si profilano dopo le grandi conquiste del secolo scorso: 1) elettrificazione, 2) automobile, 3) aereo, 4) offerta e distribuzione dell'acqua, 5) elettronica, 6) radio e televisione, 7) meccanizzazione dell'agricoltura, 8) telefono, 9) computer, 10) Aria condizionata e refrigerazione, 11) autostrade, 12) astronavi, 13) internet, 14) diagnostica per immagini (*imaging*), 15) elettrodomestici, 16) tecnologie sanitarie, 17) petrolio e tecnologie petrolchimiche, 18) laser e fibre ottiche, 19) tecnologie nucleari, 20) materiali ad elevate prestazioni (nuovi materiali).

Dagli elementi addotti in questo capitolo appare fondato dedurre che vivremo in un mondo rappresentato da zettabyte, dove gli algoritmi assumeranno un'importanza sempre maggiore: *a world run on algorithms?* (Atlantic Council, 2013).

Soprattutto, però, la ricerca tecnico-scientifica ed economico-produttiva sembra ampliare continuamente i propri orizzonti: invenzione-progettazione di nuovi materiali partendo da componenti atomiche e molecolari; studio di una quantità indefinita di combinazioni tra discipline differenti; strutture interattive multi-scala e spazio connettivo/conoscitivo globale.

Siamo quindi in un'epoca dove l'*hypercompetition* è sempre più strettamente connessa all'elaborazione di informazioni e conoscenze che evolvono a ritmi imprevedibili e diseguali. Si moltiplicano variazioni incrementali, concepite come adattamenti e miglioramenti di tecnologie nell'ambito di paradigmi dominanti, e innovazioni radicali, che modificano gli elementi basilari dei paradigmi accettati, come per esempio la computazione quantistica, la quale introdurrebbe una discontinuità di natura pari, se non superiore, a quella dell'introduzione del primo computer elettronico della storia (ENIAC, negli anni 1940-46).

Analogamente l'invenzione e la progettazione di nuovi materiali non esistenti in natura può portare e innovazioni radicali, basate su un cambiamento paradigmatico di natura tecnico-scientifica riguardo alle procedure conoscitive con cui si è fatta ricerca finora: da procedure per tentativi ed errori fino ad ottenere output con proprietà desiderate a procedure sperimentali sulla base di linee progettuali, ideate e realizzate a varia scala.

Lo scenario odierno è, quindi, per molti versi, dominato dall'incertezza e dall'ambiguità, come quando sono possibili diverse soluzioni per gli stessi problemi tecnico-produttivi e non è chiaro quale sia la migliore oppure quale sarà quella dominante, perché nelle dinamiche multi-dimensionali non sempre prevale la valutazione sulla base di criteri di ottimalità tecnico-

scientific⁵⁹. In contesti simili aumenta logicamente il rischio di operare scelte non di successo. La probabilità di fallimento strategico potrebbe essere ritenuta uno spreco e costituire una barriera alle possibilità di investimento, quindi di generare spinte innovative.

È chiaro, pertanto, che il secolo XXI si prefigura come contraddistinto da variabilità, livelli mutevoli di incertezza, presenza al tempo stesso di invarianza e mutamenti di varia natura. Purtuttavia ciò non significa assenza completa di traiettorie ben definite, è anzi vero il contrario: si profilano trend abbastanza precisi nelle linee generali, come abbiamo cercato di mettere in risalto, anche se circondate da aloni di variabilità tali da rendere obsoleti e soprattutto pericolosi i processi decisionali standard, eredità cognitiva di modelli mentali che hanno avuto successo a determinate condizioni, attualmente in via di superamento. È da ritenere, pertanto, che occorra innanzitutto essere consapevoli del fatto che l'insuccesso o l'esito non del tutto favorevole di strategie di business dipendono dalle capacità di misurarsi con le sfide e le potenzialità che emergono in determinate fasi dell'evoluzione tecno-economica. Talvolta è necessario cambiare le assunzioni fondamentali, sulla cui base vengono prese le decisioni.

Alla luce delle riflessioni svolte finora in merito all'universo fisico-cibernetico e alle convergenze di molte tecnologie verso un insieme potenzialmente molto vasto di innovazioni incrementali, unite a innovazioni radicali, esistono pochi dubbi che l'incertezza sia il tratto dominante del secolo presente. Proprio l'incertezza viene spesso considerata un fattore altamente ostativo verso l'elaborazione di strategie (non solo da parte delle imprese), proprio perché le situazioni incerte rendono meno validi i punti di ancoraggio decisionale. Eppure, proprio in condizioni di incertezza, l'esercizio strategico può, anzi nell'epoca odierna deve, svilupparsi sulla base di un nuovo modello mentale, su metodologie e strumenti diversi da quelli prevalenti nel passato.

Il modello prevalente di *strategic management* poggia, ad esempio, su un modello lineare di sviluppo, basato su una sequenza predeterminata di step/fasi con criteri ben definiti per valutare lo sviluppo e la prosecuzione realizzativa di un progetto. I cosiddetti *gate-focused processes* hanno come assunzione basilare l'esistenza di ambienti stabili e prevedibili, per i quali sono appropriate pratiche basate sull'efficienza statica, cioè l'uso ottimale di risorse assegnate in funzione di obiettivi ben definiti.

Questo modello mentale e la visione strategico-progettuale su di esso fondata non sono più idonee in situazioni caratterizzate da incertezza. Per comprendere meglio come poter prendere decisioni volte ad attuare progetti, bisogna allora cercare di comprendere quale tipo di incertezza si profila nell'ambiente decisionale e come raccogliere e selezionare le informazioni rilevanti ai fini della strategia da elaborare. Si rivela molto proficua a questo fine l'elaborazione di alcuni studiosi e analisi di *strategic management*.

L'analisi del Boston Consulting Group (2013) argomenta come, quando prevalgono incertezza e ambiguità, sia necessario un mutamento di aspettative. Aniché puntare sulla prevedibilità e quindi la programmazione secondo sequenze ordinate di passaggi, un cambiamento di prospettiva dovrebbe indurre ad adottare un'impostazione strategico-progettuale aperta e flessibile, creando le condizioni affinché i team progettuali possano adattarsi ad informazioni che arrivano di continuo da una pluralità di fonti diverse. Il *Managing the Unmanageable*, cioè l'agire strategico quando si tratta di decidere in merito a innovazioni radicali (BCG, 2013) può essere fondato su basi razionali partendo dall'adozione di un *open mindset*, che implica il perseguire fin dall'inizio "soluzioni multiple", introducendo indicazioni di continuità quando nuove informazioni inducono ad apprendere e quindi a ripensare orientamenti e scelte ipotizzate. Criteri orientativi razionali possono allora essere enunciati

⁵⁹ Si pensi alla "battaglia" sul modello di aereo e connesso dispositivo di atterraggio (mobile vs fisso) svoltasi negli anni 30 negli Usa (Vincenti, 1999).

anche sulla base di autorevoli esperienze: flessibilità, cambiamenti di direzione per rispondere a nuove e inattese informazioni, seguire simultaneamente una pluralità di direzioni di ricerca, ampliare l'orizzonte strategico e operativo invece di restringerlo, sviluppare ricerche in parallelo e non in sequenza, organizzare *cross-functionality* tra più team di ricerca interni ed esterni all'impresa o ai Centri di ricerca, mettere al centro non l'efficienza statica, bensì l'apprendimento e l'adattabilità a processi di trasformazione. In breve, imprese e organizzazioni dovrebbero improntare l'elaborazione strategica e la loro operatività ad una cultura di "*open innovation*" e "*thinking in new boxes*", alla ricerca del modello mentale più appropriato per catturare aspetti significativi di una realtà in divenire, dove l'inatteso può arrivare all'improvviso. Nel Multiverso odierno, che va sempre più caratterizzandosi per la diffusione di ecosistemi digitali, la prospettiva di mutamenti senza sosta, con innovazioni incrementali e radicali, spingono ad adottare la prospettiva generale appena descritta.

Le considerazioni svolte mettono in luce l'importanza dello stile strategico che un'impresa o un'organizzazione, gli agenti tecno-economici in generale, adottano in relazione alle proprietà dell'ambiente tecno-economico. È allora opportuno articolare ulteriormente l'esame di quest'ultimo e delle forme che esso può assumere, fino a definire in modo più preciso le modalità dell'agire strategico più consone all'odierno scenario evolutivo. Finora abbiamo considerato la prevedibilità e l'incertezza, dobbiamo ora aggiungere la *malleabilità*, ovvero in che misura il contesto tecno-economico può essere influenzato da un agente e dai suoi competitori⁶⁰. Lo "stile classico", che prevale nelle industrie entro orizzonti stabili e prevedibili, è stato già precedentemente sintetizzato: obiettivi prefissati, cercare di ottenere una posizione di mercato il più favorevole possibile, ottenere il massimo dalla dotazione di risorse e *capabilities* possedute, consolidare il posizionamento competitivo.

Tutto questo vale per imprese global player e in grado di collocarsi sulla frontiera tecnico-produttiva, ma le prescrizioni comportamentali sono utili se praticate anche da unità economico-produttive a vari gradi di distanza dalla stessa frontiera.

Quando però si presentano congiuntamente competizione globale, intensa dinamica tecnico-scientifica, varie fonti di incertezza politico-economica, lo stile classico di elaborazione strategica fa correre fortemente il rischio di essere fuori strada: le strategie basate sulla stabilità degli obiettivi e delle previsioni possono diventare rapidamente obsolete. L'azione congiunta dei fattori indicati richiede, infatti, una costante revisione degli obiettivi, mutamenti rapidi di risorse materiali e immateriali. Le *strategie classiche* possono portare a fallimenti, occorre flessibilità strategica ed operativa per adattarsi velocemente ai cambiamenti più o meno intensi, causati da comportamenti altrui, del tutto o in parte esogeni al contesto economico, e da discontinuità tecnico-scientifiche. Uno *stile adattativo* diviene quindi essenziale in condizioni riconducibili a quelle definite in termini generali. Possono però verificarsi condizioni competitive ancora più dinamiche, ovvero quelle in cui le barriere all'entrata sono basse, i tassi di reattività e invenzione possono essere ancora molto alti e di conseguenza il posizionamento competitivo variabile per la molteplicità e le potenzialità innovative degli agenti tecno-economici. L'orizzonte odierno, precedentemente definito "Multiverso" e basato su ecosistemi digitali molto dinamici, è un esempio emblematico di tale situazione, in cui si sviluppano strutture interattive globali e processi di combinazione/ricombinazione di domini conoscitivi. Occorre allora andare oltre lo stile strategico adattativo e spingersi fino a formulare una *shaping strategy*, cioè sviluppare capacità innovative in grado di modificare la stessa dinamica tecno-economica. L'esistenza di piattaforme ecosistemiche digitali consente di diventare *shaping agent* a qualsiasi agente, purché questi acquisisca il *mindset* più appropriato e sviluppi strategie

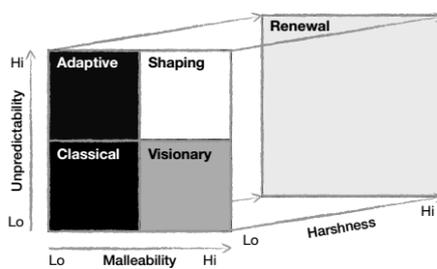
⁶⁰ Reeves *et al.* (2012) analizzano molti esempi a riguardo, specie nella logistica e nella moda.

entro strutture connettive all'altezza, divenga consapevole delle potenzialità che il Multiverso permette di attuare. Esiste, ed è stata rilevata nella *survey* effettuata da Reeves *et al.* (2012), un'altra tipologia di comportamento strategico, ovvero quello "visionario", in grado di anticipare il futuro, come avviene nel caso di grandi innovatori, di cui è costellata la storia degli ultimi secoli e, ai nostri fini, nel campo delle tecnologie dell'informazione, delle nuove scienze dei materiali, della teoria fisica e chimico-molecolari.

Dalla disamina effettuata si evince un elemento di grande interesse: i processi decisionali, sia strategici che operativi, devono necessariamente basarsi su un principio orientativo di fondo: bisogna innanzitutto analizzare l'ambiente in cui si opera e si compete, per poi commisurare le strategie e le azioni alle proprietà dello scenario di riferimento. Di qui deriva, inoltre, la necessità di soffermarsi su un aspetto complementare rispetto a punti messi ora in evidenza. Vi sono alcuni pericoli da evitare, che sono di natura cognitiva e organizzativo-strutturale. Il primo consiste nel perseverare nello stile strategico non adatto all'evoluzione ambientale, perché il successo ottenuto in passato può generare "trappole cognitive", impendendo così di comprendere l'impellenza di un cambiamento di stile. L'eccesso di fiducia nelle proprie forze, connesso alla trappola cognitiva, può costituire un pericolo letale per agenti che devono misurarsi con sfide del tutto nuove. Può inoltre accadere che imprese e organizzazioni si rendano conto della necessità di cambiare metodologie e comportamenti, ma resistenze di varia natura (cultura, potere, prestigio) possono ostacolare o impedire le scelte e le azioni di uno stile strategico differente, con tutte le implicazioni negative che possono scaturire. Tra queste una ci sembra di particolare importanza: il rischio di creare un *mismatch* tra cultura tecnico-produttiva esistente e il potenziale di trasformazione richiesto dalla dinamica tecno-economica. Proprio per evitare simili pericoli, utili spunti di riflessione sono desumibili dalla cosiddetta tavolozza strategica (*strategic palette*), proposta da analisi di strategic management dopo aver effettuato un'approfondita *survey* di 150 imprese, appartenenti a una vasta gamma di industrie in molti Paesi: bancarie, farmaceutiche, *high-tech*, agro-alimentari (Reeves *et al.*, 2012). Oltre alle quattro tipologie di stile già considerate (*classical*, *adaptive*, *shaping*, *visionary*) gli autori ne introducono una quinta il *renewal* (Fig. 57).

Figura 57

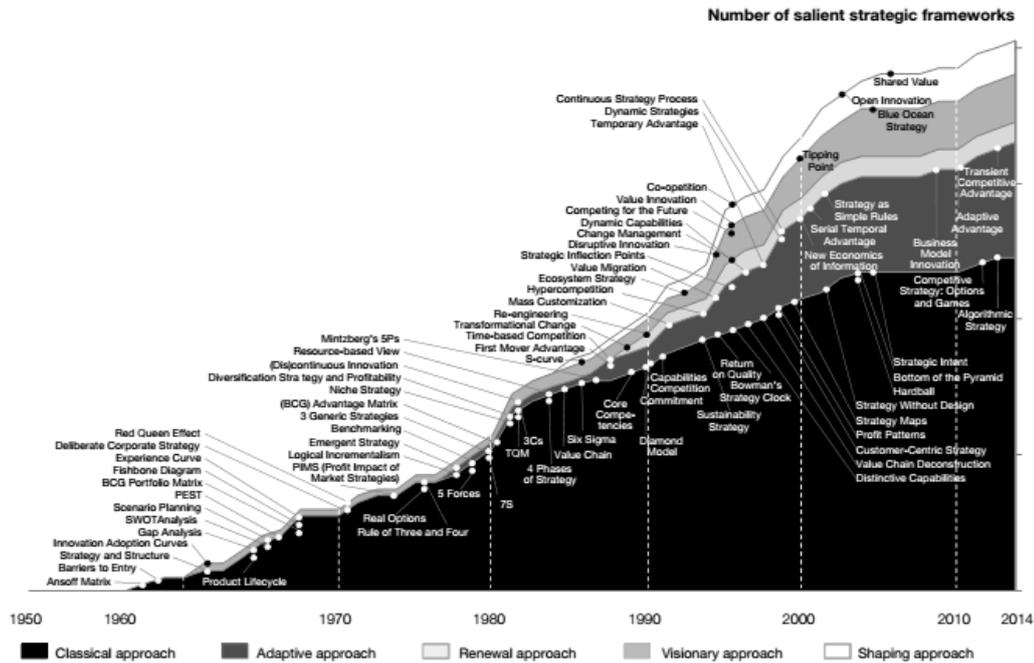
The strategy palette: five environments and approaches to strategy



Fonte: Reeves *et al.* (2015), Fig. 1.4

Your strategy needs a strategy (Reeves *et al.*, 2015), anche perché c'è un'enorme produzione di schemi strategici, proposti da un numero elevato di studiosi, come si evince dalla figura 58 derivata da elaborazioni di base effettuate in Ghemawat (2002).

Figura 58



Fonte: Reeves *et al.* (2015), Fig. 1.3

Il quinto archetipo risponde alla necessità per un'impresa di conservare e liberare risorse nel tentativo di assicurarsi la sopravvivenza e al tempo stesso scegliere lo stile più adatto al contesto competitivo, acquisendo per questa via la consapevolezza dei rischi e delle sfide, delle avversità (*hardship*), che possono mettere in discussione la sopravvivenza.

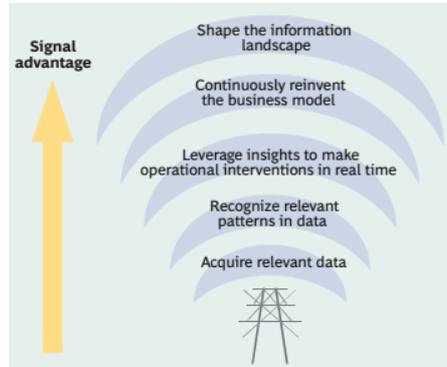
Il Multiverso in cui siamo entrati richiede sempre più azioni competitive rapide in risposta a discontinuità endogene ed esogene, che distruggono competenze e creano le basi per nuove capacità. Riuscire ad ottenere un vantaggio competitivo durevole è impossibile (D'Aveni e Dagnino, 2010). In ambienti caratterizzati da innovazioni *disruptive* è necessaria una continua innovazione strategica, dove è importante non il posizionamento statico, bensì l'incessante generazione di azioni innovative, con il rinnovamento senza sosta di competenze e direttrici di ricerca tecnico-produttiva. Ancora una volta, dunque, nel Multiverso di ecosistemi digitali, al cui interno le sequenze di fasi e step economico-produttivi sono combinati a seconda dell'esito delle interazioni possibili in uno spazio connettivo globale, è cruciale l'assunzione di essere di fronte ad un potenziale di direttrici solo in parte note. Di qui la scelta cruciale della scelta dello stile strategico per il successo e/o la sopravvivenza nella competizione, unita alla consapevolezza che le strategie di nicchia sono anch'esse necessariamente di breve periodo, perché le nicchie sono spazi conoscitivi e techno-economici sottoposti ad un ambiente mutevole e a "ad alta velocità" come tutti gli altri spazi.

Riteniamo a questo punto abbastanza fondati i motivi per cui in un mondo contraddistinto da flussi crescenti di informazioni, non sempre a dire il vero di qualità medio-alta, è essenziale la capacità di catturare prontamente i segnali, interpretandoli correttamente per poi tradurli in azioni strategiche sulla base dello stile più appropriato.

L'analisi dei dati e l'elaborazione dell'informazione è cruciale per comprendere la tipologia e l'orizzonte competitivo, insieme alle modalità evolutive della dinamica techno-economica. In mancanza di esse lo stile strategico diventa inevitabilmente di retroguardia, con elevato rischio

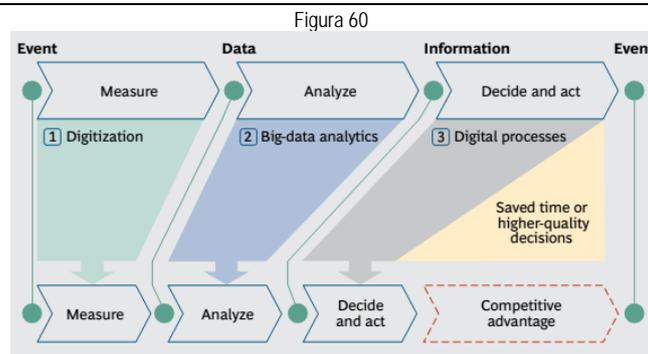
di essere soggetti perdenti nella inesorabile dinamica selettiva. In questo scenario è utile pensare nei termini definiti dalla raffigurazione contenuta nella figura 59.

Figura 59
LE FASI EVOLUTIVE PER IL VANTAGGIO DERIVANTE DALLA CATTURA ED ELABORAZIONE DI SEGNALI E INFORMAZIONI



Fonte: BCG (2010)

Dalla corretta modellazione dell'universo informativo dipende, infatti, la gamma di opzioni su cui fondare lo stile strategico. È al tempo stesso chiaro che nell'era del "vantaggio competitivo temporaneo" la propensione e l'attitudine all'elaborazione informativa con prontezza e rapidità, oltre che con precisione, sono fondamentali per non essere "spiazzati" dall'invasione di *Big Data* e dai competitori nella *time-based competition*. Nel Multiverso odierno è poi strategicamente importante essere in grado di partecipare in modo non marginale ai processi di accelerazione informativa ben sintetizzati dalla figura 60.



Fonte: BCG (2014a), Exhibit 1

L'informazione diviene un asset strategico e non potrebbe essere altrimenti alla luce dell'analisi sviluppata nei paragrafi precedenti, per cui l'apprendimento, la capacità di reazione e di anticipazione strategica devono diventare attributi diffusi per imprese che operano in ecosistemi digitali. Adattamento sulla base di segnali di cambiamento catturati e ben compresi, sperimentazione continua di nuove soluzioni a problemi tecnico-produttivi, sviluppo di capacità nel governare sistemi con vari gradi di complessità sono proprietà sempre più essenziali in un'epoca "satura di informazioni" (Reeves e Deimler, 2011). Ovviamente sperimentare in un mondo con *overload* informativo può apparire più difficile, ma proprio l'esistenza di ecosistemi digitali auto-organizzati può creare le condizioni migliori per favorire attività di sperimentazione imprenditoriale, sia per micro-unità che per macro-unità. Gli esempi più volte richiamati di IBM, GE, P&G e molti altri, dimostrano come vi sia un enorme spazio da

esplorare, dove lo sviluppo di feconde interazioni è alla portata di ogni tipologia di agente, purché dotato di un *open mindset* e delle risorse intellettuali, cioè delle *capabilities* e propensioni più appropriate.

Tentiamo ora una provvisoria sintesi conclusiva degli elementi emersi, nel tentativo di definire un punto di arrivo formulando una proposizione generale in merito a come si possano elaborare strategie in condizioni di incertezza, quesito iniziale di questo capitolo.

Stiamo vivendo una fase storica contraddistinta da un'accelerazione dei processi di *business* digitalizzati. Essendo questi ultimi sottoposti a dinamiche di automazione e sviluppo di forme di IA sempre più prossime ad attività cognitive umane in uno spazio connettivo globale, un imperativo basilare per gli agenti è la continua reinvenzione di processi e prodotti, con la riconfigurazione delle sequenze produttive attraverso l'innesto di sempre nuove competenze interne ed esterne in unità economico-produttive, che devono necessariamente operare mediante *cross-functional teams* (interni ed esterni). Possiamo allora rispondere fondatamente ai quesiti iniziali cercando di definire in modo più preciso l'incertezza sul terreno strategico-manageriale⁶¹.

Courtney *et al.* (2000) distinguono quattro livelli di incertezza. Il primo riguarda le situazioni in cui le coordinate di fondo dell'orizzonte strategico sono ben definite e forniscono una base sufficiente per prendere le decisioni, dato l'impiego di consolidati strumenti di analisi: ricerche di mercato e studio dei comportamenti dei competitori e delle catene del valore, oltre ad una serie di modelli che vanno dalle "cinque forze" del *framework* di Porter all'analisi dei flussi di cassa scontati (*DCF-based model, discounted-cash-flow*). Il secondo livello di incertezza si ha quando può essere definito, in base a conoscenze sufficientemente precise, un set limitato di scenari, con possibilità di assegnare probabilità e quindi definire azioni da intraprendere mediante una ponderazione razionale degli elementi posseduti. Il terzo livello di incertezza è caratterizzato dalla possibilità di delineare un set di "futuri potenziali", dato un numero limitato di variabili-chiave che determinano il *range* di variazione, anche se l'esito finale può non essere conosciuto con precisione. Siamo nel caso delle industrie emergenti, dell'entrata in nuovi mercati geografici o in ambiti già consolidati, ma in cui si tenta di introdurre novità importanti⁶². L'incertezza presente nell'affrontare questo tipo di scenario rafforza la tesi, precedentemente enunciata, circa l'informazione posseduta come asset strategico, ma soprattutto diviene importante la capacità di elaborare un numero appropriato di scenari alterativi, individuando pattern evolutivi sufficientemente validi, che possono essere assunti a fondamento di strategie robuste e all'altezza delle molteplici sfide.

Il quarto livello di incertezza è quella dove è praticamente impossibile fare previsioni: avranno successo i progetti di *quantum computing*? Saranno utilizzabili a scala ordinaria nuovi materiali con determinate proprietà a micro- e nano-scala? Un prodotto radicalmente nuovo andrà incontro a *demand requirements* di entità tale da giustificare grandi investimenti in R&D? In contesti simili, caratterizzati da complessità-incertezza e ambiguità, il potere predittivo appare molto limitato e le strategie basate sulla ricerca di ottimalità statica sono molto rischiose, perché le suddette proprietà rendono "cieca" l'elaborazione strategica. La conseguenza non è però la paralisi decisionale, bensì l'opposto: prendendo spunto dalla natura e dai cambiamenti emersi a piccoli passi nel corso di molti secoli, Beinhocker (1999) suggerisce di adottare modelli decisionali basati su una "popolazione di strategie multiple, che evolvono nel corso del tempo" sulla base dell'informazione in arrivo, la quale consente di ridefinire progressivamente meglio e con maggiore precisione le traiettorie evolutive. Se nella dinamica tecno-economica non esiste un ottimo globale a cui tutti devono tendere, perché complessità-incertezza-ambiguità

⁶¹ Per una trattazione più approfondita si veda Lombardi (1999) e Lombardi e Macchi (2016, capitoli 5-6-7).

⁶² Si pensi alla produzione di semiconduttori in graphene e con i nuovi TMDCs prima descritti.

implicano che il panorama delle variabili decisionali è in costante e imprevedibile mutamento, la “stasi è la morte”. Se molti fattori e processi stanno cambiando, il movimento continuo, cioè l’esplorazione di sempre nuove strade è la regola base. Un’altra regola fondamentale, connessa alla precedente, è il parallelismo, cioè il tentare contemporaneamente differenti percorsi di ricerca: la sperimentazione in parallelo, come abbiamo precedentemente sostenuto, accresce la probabilità che qualche tentativo possa produrre frutti. Con una pluralità di strategie aumenta la probabilità di effettuare le mosse giuste in un ambiente fortemente dinamico. L’esperienza di molte imprese a livello internazionale, inoltre, mostra che le probabilità di successo si ampliano in misura significativa con un mix variabile di azioni strategiche, alcune delle quali seguendo traiettorie di sviluppo incrementale e altre incentrate su innovazioni radicali con l’esplorazione di ambiti conoscitivi del tutto nuovi (*mix short and long jumps*) (Beinhocker, 1999). Pertanto la scelta di una “popolazione variabile di strategie” conferisce robustezza e validità ai modelli di business delle imprese, ma in genere lo stesso può dirsi per qualsiasi agente tecno-economico, evitando così la paralisi decisionale in ambienti contraddistinti da incertezza, ambiguità e complessità multi-dimensionale.

Un’obiezione logica può essere, però, immediatamente sollevata: dato il fondamento razionale di questa visione dei processi decisionali, dove si trovano le risorse impegnative per sperimentare questo framework? Grandi imprese, global player, Centri di ricerca e agenti dotati di leadership possono dotarsi delle risorse necessarie, ma gli altri? Le piccole imprese, le unità economico-produttive non di frontiera, individui e gruppi di ricercatori non appartenenti a network consolidati come possono misurarsi con le sfide economiche, tecnologiche e scientifiche attraverso una pluralità di strategie simultanee. Uno degli aspetti più innovativi del Multiverso e degli ecosistemi digitali sta proprio in questo: l’inserimento e l’appartenenza a reti e strutture connettive globali consente di essere presenti e partecipare allo spazio combinatoriale (cfr. § 3.2), quindi di realizzare concretamente il principio della “popolazione variabile di strategie”, che è tanto importante in un ambiente tecno-economico con le caratteristiche più volte indicate.

Dobbiamo rispondere a un quesito: cosa significa tutto questo per il sistema economico-produttivo toscano? È superfluo (e sarebbe ridondante) mettere in evidenza alcune peculiarità del modello toscano e del sistema distrettuale: flessibilità, capacità reattiva rispetto ai cambiamenti della domanda, patrimoni tecnico-professionali accumulati nell’arco di generazioni, mix di conoscenze irripetibili, frammentazione dei cicli produttivi e significativa osmosi delle conoscenze tra innumerevoli unità medio-piccole, sistemi in grado di auto-organizzarsi attraverso figure e imprese-chiave dei distretti.

Tutti questi elementi sono alla base di un successo unanimemente riconosciuto in un ambiente competitivo, che ora è profondamente trasformato da una serie di discontinuità: introduzione delle tecnologie dell’informazione; innalzamento del contenuto tecnico-scientifico degli input produttivi (si pensi alla progettazione dei nuovi materiali di cui abbiamo precedentemente parlato); innovazioni metodologiche nella ricerca di soluzioni a problemi tecnico-produttivi; cambiamenti dei modelli manageriali e dell’organizzazione dell’impresa (creazione di team sperimentali orientati a progetti); mutamenti della funzione imprenditoriale, con l’emergere di imprenditori che svolgono attività di coordinamento strategico nell’ambito di una pluralità di strategie sviluppate in partnership.

Per fronteggiare le indicate discontinuità le piccole imprese operanti in agglomerazioni economico-territoriali non possono procedere individualmente e in ordine sparso, ma occorre sviluppare “funzioni di sistema”, ovvero attività e servizi in grado di favorire processi di aggregazione strategico-progettuale per misurarsi con le sfide e le potenzialità del Multiverso. Sono in sostanza necessari veri e propri “agenti catalizzatori”, cioè agenti in grado di innescare

dinamiche di collaborazione progettuale, meccanismi di cooperazione interaziendale. È logico ipotizzare alcune di tali funzioni di sistema, nel senso che generano benefici per aggregazioni di unità produttive a qualsiasi scala esse operino:

- 1) Analisi di scenario settoriale e intersettoriale, non solo tracciando i profili macro-economici, ma anche e soprattutto con l'esame sistematico dei trend evolutivi tecnico-scientifici e produttivi in un orizzonte intersettoriale a livello globale.
- 2) Analisi del posizionamento competitivo delle imprese singole e dei micro-sistemi di imprese, alla luce di quelli che appaiono i sentieri evolutivi della competizione, cercando di catturare gli elementi propulsivi esogeni, i fattori complementari essenziali e gli elementi ostativi di varia natura.
- 3) Individuazione di esigenze generali su cui organizzare strategie cooperative di sistema. Come si vede, si tratta di un lavoro di approfondimento sistematico che va ben al di là di una *SWOT analysis*, di cui non va ovviamente sottovalutata l'importanza e l'utilità. Attualmente esistono metodologie e motori di ricerca, database e centri di elaborazione che consentono di avere accesso ad un volume enorme di informazioni strutturate e non strutturate. Ciò implica che la funzione catalizzatrice degli agenti prima indicati dovrebbe avere come ingrediente basilare anche la capacità di organizzare e interpretare flussi informativi funzionali alla generazione di spinte evolutive verso micro-unità e sistemi di piccola impresa. Esse infatti devono acquisire consapevolezza delle discontinuità intervenute e dovrebbero essere sostenute nell'accesso ai nuovi e potenti strumenti con strategie appropriate, cioè adattative, mirate su molteplici direttrici, *shaping strategies*, come è accaduto in qualche caso anche in Toscana nel campo della robotica e della meccatronica. È chiaro che agenti catalizzatori peculiari sono già i global player presenti nella nostra regione nell'industria della moda, nell'elettronica, nella meccatronica, nella chimico-farmaceutica. È molto probabile, per fare un esempio, che la GE svolga una funzione di questo tipo attraverso la sua piattaforma Predix, anche se abbiamo solo elementi conoscitivi indiretti a riguardo.
- 4) Un'altra funzione di sistema che le singole micro-unità non possono esercitare autonomamente, né è pensabile che si inneschino in modo automatico processi di realizzazione, riguarda l'approfondimento e quindi l'elaborazione di progetti di area. Pensiamo, ad esempio, a problemi di eccessivo uso di risorse primarie (acqua, aria), riutilizzo di output di scarto attraverso modelli *cradle to cradle* o di simbiosi industriale, bio-economia, ecc. La scala delle operazioni e il livello strategico non possono che essere di filiera e/o di sistema locale; è quindi necessario che agenti catalizzatori riescano a mettere in moto processi di cooperazione strategica complessa, cambiamento culturale, mutamenti delle competenze, innovazione manageriale individuale e collettiva, sviluppo di orientamenti collaborativi, stimoli alla partnership per la progettazione congiunta, creazione di database dinamici, azioni di sensibilizzazione nella propagazione informativa. Non ultimo l'agente catalizzatore potrebbe essere l'elemento che permette la valorizzazione stessa delle scelte strategiche collettive. Non è infrequente infatti che azioni di filiera (scelte di eco-sostenibilità, tracciabilità, certificazione standard di lavoro, ecc.) pur esistenti, non vengano messe a valore.
- 5) Poiché stiamo attraversando una fase storica di profonda trasformazione anche dal punto di vista energetico e ambientale, sorgono esigenze di riprogettare processi e prodotti a partire da nuovi materiali e dall'assunzione di vincoli nell'uso delle risorse e nel loro reimpiego. Di qui la necessità di cogliere e sfruttare al meglio le spinte verso itinerari di ricerca non solo per le imprese collocate sulla frontiera, ma anche e soprattutto per entità produttive ad una distanza più o meno marcata dalla stessa frontiera. Per queste ultime, infatti, appare più problematica l'adozione di strategie adattative oppure di una combinazione tra *short and*

long jump (indicate da Beinhocker, 1998), che sono da ritenere essenziali durante le fasi di intensa trasformazione come quella odierna. La creazione di cicli di feedback positivi tra l'analisi del posizionamento competitivo (azione di sistema indicata nel punto 2) e le direttrici di ricerca per affrontare i problemi delineati diventa un imperativo strategico e un orientamento operativo, in mancanza dei quali i sistemi di piccola impresa rischiano non solo di perdere il vantaggio competitivo conseguito negli ultimi decenni, ma anche di non catturare i segnali e quindi il potenziale insito in un'economia sempre più basata su ecosistemi digitali. È a questo proposito necessario chiarire un aspetto importante: tra le peculiarità dei distretti industriali e i sistemi di piccola impresa vi sono indubbiamente la flessibilità operativa, l'adattabilità e la duttilità strategica. Questi termini sono ricorrenti anche nell'analisi e nelle riflessioni odierne sulla dinamica tecno-economica odierna e sulle piattaforme digitali. Bisogna però essere consapevoli del fatto che il loro significato e le basi conoscitive sono completamente diverse. Le infrastrutture materiali e immateriali attualmente delineano le condizioni per processi aggregativi di natura progettuale e strategica sulla base di un radicale cambiamento di ruolo e funzione degli operatori; ciò avviene a causa di una nuova cultura tecnologica e manageriale, di cui abbiamo già messo in evidenza l'importanza della componente scientifica oltre che dell'apporto esperienziale, cioè il semplice accumulo della conoscenza sul posto di lavoro.

Cambia dunque il mix tra conoscenza tacita e quella formale secondo modalità e processi imprevedibili: si pensi solo alle possibili implicazioni della digitalizzazione dei processi per la progettazione e il controllo chimico-fisico dei materiali, dell'impiego di agenti digitali nel monitoraggio di processi e prodotti profondamente ridefiniti in molti dei settori produttivi regionali.

- 6) L'ultima funzione di sistema su cui soffermare l'attenzione è una conseguenza logica di tutte le precedenti. Per un apparato produttivo come quello toscano, ritenuto di composizione tradizionalmente "matura", nonostante la presenza di un numero consistente di imprese digitali, si pone ancora di più l'esigenza di una estesa e profonda trasformazione delle varie filiere, con l'obiettivo di approssimarsi alla frontiera tecnico-produttiva ed eventualmente collocarsi su di essa, sempre nella consapevolezza di vivere in un'epoca di *temporary competitive advantage*. Per realizzare tutto questo sono necessarie partnership pubblico-private, oltre alla compartecipazione strategica interaziendale e intersettoriale. È allora necessario che l'attore pubblico svolga funzioni decisive in un'era di transizione multi-dimensionale, cioè tecnico-scientifica, energetica, ambientale, seguendo principi generali ben definiti, la cui validità non dipende dalla scala di applicazione, perché dovrebbe anzi essere applicata ad ogni scala con coerenza e determinazione (cfr. cap. 6).

5.

LA DIGITALIZZAZIONE E IL LAVORO. VERSO LA "GIG ECONOMY"?

Nella dinamica tecno-economica odierna a livello globale sono in pieno sviluppo alcune "tecnologie dirompenti" (*disruptive technologies*), il cui impatto nei prossimi anni è ritenuto tale da investire una vasta serie di attività economico-produttive e tecnico-scientifiche, dando al tempo stesso origine ad un insieme di possibili prodotti e servizi oggi solo parzialmente immaginabili. Prendendo come riferimento lo studio del McKinsey Global Institute (MGI, 2013), i meccanismi propulsori del cambiamento profondo e diffuso sono 12: 1) *Internet Mobile*, 2) *Automation of knowledge work*, 3) *Internet of Things (IoT)*, 4) *Cloud technology*, 5) *Advanced robotics*, 6) *Autonomous and near autonomous vehicles*, 7) *Next generation genomics*, arricchito da *data analytics* e dalla *synthetic biology*, 8) *Energy storage*, 9) *3D printing*, 10) *Advanced materials*, (cfr § 2.2) 11) *Advanced oil and gas exploration and recovery*, 12) *Renewable energies*.

Da un'indagine, svolta per il World Economic Forum (2016) presso imprese global player, emerge un quadro convergente: fattori propulsivi di mutamenti nei prossimi decenni sono considerati la robotica, l'Intelligenza Artificiale e il *Machine Learning*, le nanotecnologie, il *3D Printing*, la genetica e le biotecnologie, le nuove tecnologie in campo energetico, l'IoT. Da tutto ciò deriveranno sfide fondamentali e spinte sistematiche verso l'adozione di strategie di adattamento pro-attive, nel senso che sarà sempre più necessario sviluppare la capacità di anticipazione strategica, cioè di delineare scenari sulla base dei quali preparare set di scelte e azioni da intraprendere (cfr. cap. 4).

Questa visione è condivisa da una numerosa serie di studi ad opera di Centri di Ricerca Internazionali, come ad esempio quello dell'Atlantic Council (2013), dove sono analizzati essenzialmente temi relativi all'energia, al 3D e al 4D *Printing*, con quest'ultima tecnologia che concerne "oggetti programmabili per cambiare forma e funzione dopo essere stati prodotti". I Materiali Riprogrammabili (*adaptive materials*) saranno utili nelle infrastrutture e nelle costruzioni per adattarsi ai pesi e alle variazioni stagionali, come anche nell'industria aeronautica, nel mobile e arredamento, nell'abbigliamento.

È logico che le prime sperimentazioni siano in corso nei nano-compositi multi-funzionali, che combinano proprietà in risposta ad onde elettromagnetiche oppure a stimoli come l'immissione in acqua, esposizione a calore e pressione, fonti di energia. È interessante notare che l'unità fondamentale dello spazio digitale del 4D *Printing* è il *voxel*, il quale è il *pixel* con una quarta dimensione data dal volume⁶³. Questa traiettoria di ricerca è unita alla cosiddetta *Synbio Revolution*, cioè la combinazione di biologia sintetica, bioingegneria e un ampio insieme di discipline, quali ingegneria, computer science e tecnologie dell'informazione. Nel Rapporto National Research Council e National Academy of Engineering (NRC-NAE, 2013) *Positioning Synthetic Biology to Meet the Challenges of the 21st Century*, la modellazione computazionale dovrebbe consentire di creare blocchi costruttivi di base (*Bio-Bricks*) da assemblare e ricombinare per ottenere nuovi materiali genetici dagli impieghi più impensabili (in medicina, nella rigenerazione di materiali), ma anche dai rischi potenziali al momento del tutto sconosciuti. Le ricadute teoriche in campo energetico e ambientale potrebbero essere innumerevoli: purificazione dell'acqua, nuove fibre per l'industria tessile, proto-cellule costruttive per riprogettare costruzioni e addirittura città.

⁶³ "Materiali riprogrammabili" è il titolo di un Progetto di ricerca avviato dal DARPA nel 2013.

Tutti questi *drivers of change* in un'epoca contraddistinta dalla presenza di *catene del valore globali* sono destinati a generare effetti su scala globale, mettendo al centro esigenze basilari di riqualificazione e innalzamento (*reskilling, upskilling*) dei contenuti tecnico-scientifici e professionali della forza lavoro, in un quadro complessivo caratterizzato da alcuni fattori: cambiamenti demografici e socio-economici, trasformazione degli ambienti di lavoro e delle modalità di erogazione delle prestazioni (vedi *infra* la *Gig Economy*), mutamenti climatici e vincoli sulle risorse naturali, transizione verso la *green economy*, longevità e società che invecchiano, aumento della volatilità geopolitica (che può innescare impatti amplificati nello spazio connettivo globale), società emergenti con una composizione demografica fortemente caratterizzata dalle coorti giovanili, rapida e crescente urbanizzazione.

Gli effetti sul lavoro e sull'occupazione dell'azione congiunta di tutti questi fattori, a volte convergenti e talvolta contraddittori tra di loro, non sono prevedibili in modo preciso, ma alcuni trend evolutivi generali possono essere delineati con un certo fondamento. Bisogna tenere presente un aspetto basilare: l'impatto sui settori di attività e sui vari Paesi sarà differente, perché entrano in gioco variabili specifiche, che talvolta assumono una funzione decisiva. Ad esempio il livello di specializzazione preesistente, le modalità di esercizio della funzione imprenditoriale, la capacità di elaborazione strategica e le norme di comportamento etico-sociali e istituzionali condizionano in misura determinante i sentieri evolutivi a varia scala locale, nazionale, settoriale. Se a ciò aggiungiamo il differente grado di adattatività della cultura tecnico-scientifica ed economico-produttiva prevalente e l'eterogenea attitudine/propensione a misurarsi con le grandi sfide indicate, si comprende come un esercizio previsionale non solo sia molto difficile, ma anche generatore di rischi, se non si parte da un'analisi di scenario globale molto attenta e sistematica, andando al di là della ripetizione di formule stereotipate. Ciò è assolutamente necessario, perché occorre conoscere in modo adeguato il potenziale di sviluppo di un Paese, di un'impresa o di un'area economico-territoriale. A tal fine è dunque importante mettere a fuoco trend generali e al tempo stesso le componenti del proprio modello di sviluppo finora prevalente, nel tentativo di comprendere appieno le discrasie, i gap da recuperare, i fattori da prendere in considerazione per formulare strategie adeguate ai propri punti di forza e ai fattori di vulnerabilità, sottoposti a sfide e minacce radicalmente nuove.

Alla luce di queste considerazioni nelle pagine successive effettueremo un esercizio come quello appena ipotizzato. Descriveremo, pertanto, trend a livello globale e relativi a industrie specifiche, per poi tracciare un quadro delle tendenze inerenti sia ai contenuti più propriamente tecnico-professionali delle prestazioni di lavoro, sia alle loro modalità di regolazione e svolgimento. Tutto ciò verrà sviluppato sulla base di studi e analisi effettuati da autorevoli Centri di Ricerca Internazionali.

Nella già citata indagine del *World Economic Forum* (2016), il quadro evolutivo generale è contraddistinto da un mix di effetti positivi e negativi sull'occupazione. Se l'IA è ritenuta causa di riduzione occupazionale, anche se non a livelli tali da creare movimenti sociali anti-sistema, gli altri motori del cambiamento (*IoT, Data Analytics, Robotics*) sono ritenuti generatori di effetti positivi sul terreno dell'occupazione anche perché importanti componenti socio-demografiche a scala globale agiscono fortemente in tale direzione: l'aumento delle classi medie nei Paesi emergenti, le crescenti aspirazioni delle donne, l'esigenza di affrontare vincoli climatici e ambientali. Occorre però osservare che l'incremento di volatilità sul piano geopolitico potrebbe causare processi dagli esiti imprevedibili, come sta ed esempio accadendo nel mercato del petrolio, dove la turbolenza sui prezzi è l'esito di innovazioni tecnologiche (tecnica del *fracking* per produrre *shale oil and gas*) e di comportamenti strategici di natura politica,

economica e militare⁶⁴. Il dato fondamentale è la convinzione (diffusa tra manager e global player) del declino dell'industria manifatturiera in seguito agli estesi processi di sostituzione del lavoro, causata dal *3D printing*, dal maggior livello di efficienza nell'impiego delle risorse, dalla minore domanda presente in società che invecchiano. A dire il vero sono anche presenti aspettative di complementarità tra nuove tecnologie come la robotica avanzata e i nuovi materiali, che da un lato dovrebbero ridurre alcune componenti della forza lavoro, ma al tempo stesso richiederanno nuovi fabbisogni occupazionali con competenze sia specialistiche che generali: tecnici di programmazione e management di "sistemi di sistemi"⁶⁵, ingegneri e manager delle catene di subfornitura con vari livelli di competenze generali e specifiche, economisti e manager dell'informazione.

Dati questi elementi individuati a macro-scala, cercheremo ora di approfondire rilevazioni relativamente più puntuali, che attengono alla composizione della forza lavoro in conseguenza della diffusione di alcune delle *disruptive technologies* precedentemente descritte.

Uno dei temi centrali riguarda gli effetti della diffusione della robotica avanzata e dell'insieme delle tecnologie complementari di cui essa è espressione. Poiché la letteratura a livello internazionale è ovviamente molto ampia, selezioneremo i contributi più significativi ai nostri fini per la rilevanza teorica, la ricchezza dei contenuti empirici e la problematicità del dibattito e delle riflessioni in corso. Vedremo che esiste una pluralità di linee interpretative, ciascuna delle quali coglie elementi interessanti dei processi reali in corso. Anticipiamo che non è possibile trarre una conclusione univoca sulle traiettorie evolutive, e che ciò non costituisce una limitazione del dibattito, bensì un risultato coerente sia con lo scenario dell'universo fisico-digitale al centro di questo contributo, sia con la complessità della dinamica di trasformazione odierna.

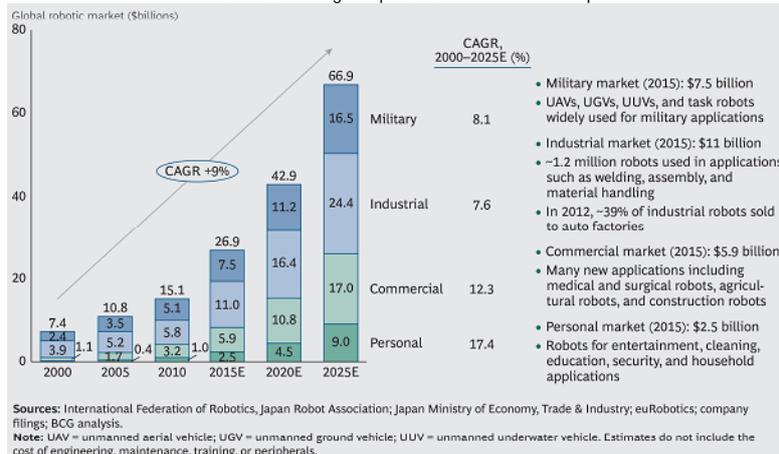
Iniziamo con qualche dato sulla diffusione dell'"onda robotica".

Come si vede dalla figura 61 la spesa mondiale dovrebbe aumentare di oltre quattro volte dal 2010 al 2025, con un forte incremento relativo dell'impiego di robot a fini di ausilio personale, anche se le quote preponderanti sul totale restano quelle dell'apparato militare e dell'industria. I Paesi a maggiore "densità robotica", cioè numero di robot per lavoratore nel manifatturiero, sono Corea del Sud e Giappone, mentre il 40% del totale dei robot industriali è impiegato nell'automotive, soprattutto in cinque Paesi: nell'ordine Giappone, Francia, Germania e Italia. Date le potenzialità di sviluppo di questo mercato, si è innescato un processo di *Merger & Acquisition* a livello mondiale, con l'entrata e l'emergere di nuovi global player, in primis Google e Amazon, e qualche ri-orientamento strategico (fine della *joint venture* GE-FANUC), come si evince dalla figura 62.

⁶⁴ Su questi temi di grande rilievo per l'evoluzione odierna e nel prossimo futuro, si vedano le pubblicazioni del Belfer Center for Science and International Affairs, in particolare i report di Leonardo Maugeri, tra cui Maugeri (2016).

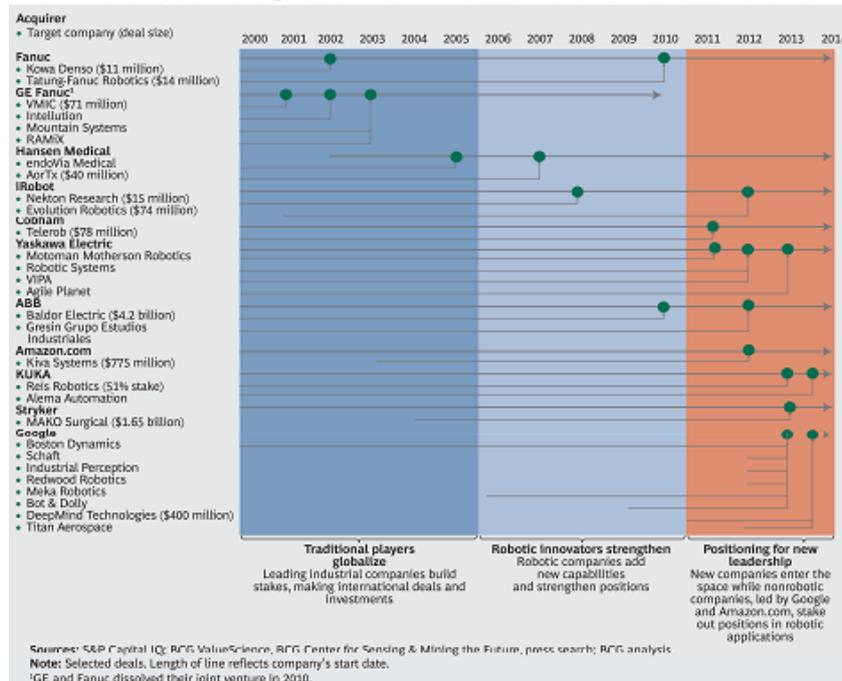
⁶⁵ *Systems of systems (Sos)* è una consolidata traiettoria di ricerca teorica ed applicata del DoD (Department of Defense Usa).

Figura 61
LA SPESA MONDIALE IN ROBOTICA È STIMATA IN 67 MILIARDI DI DOLLARI NEL 2025
CAGR: acronimo in inglese per il tasso di crescita composto



Fonte: BCG (2014b), Exhibit 1

Figura 62
DINAMICA DI FUSIONI E ACQUISIZIONI NEL CAMPO DELLA ROBOTICA A LIVELLO MONDIALE



Fonte: BCG (2014), Exhibit 2

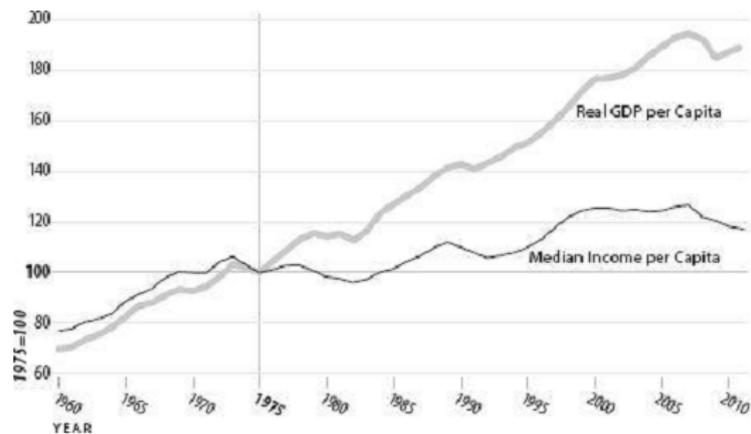
“The Robots are coming”

Il grande successo editoriale del libro di McAfee e Brynjolfsson (*The Second Machine Age*, 2011) ha innescato un ampio dibattito negli Usa e a livello internazionale. La tesi sostenuta da due autori è che l'innovazione digitale, grazie alle tecnologie di portata generale (*General Purpose Technologies*), cioè tecnologie quali le ICT in grado di pervadere tendenzialmente tutte le sfere della vita economico-sociale, ha consentito un aumento della produttività del lavoro fino a metà anni 2000, ma successivamente alla fine della Grande Recessione vi è stata negli Usa una lenta e bassa crescita dell'occupazione. Nella ricerca delle cause di questo fenomeno, essi

argomentano la seguente tesi: la ripresa “senza lavoro” riflette cambiamenti strutturali, connessi appunto all’innovazione tecnologica, che richiede profondi cambiamenti organizzativi e culturali⁶⁶.

Altre questioni segnalate dai due autori riguardano innanzitutto la crescente disuguaglianza negli Usa, nonostante la crescente produttività, evidenziata anche dal fatto che il reddito mediano è diminuito proprio negli anni di maggiore crescita della produttività e di diffusione innovativa (anni ‘90) (Fig. 63).

Figura 63
PIL PRO-CAPITE E REDDITO MEDIANO PRO-CAPITE



Fonte: McAfee e Brynjolfsson (2011), Fig. 9.1

I due studiosi correlano questo fenomeno a ciò che chiamano “*the great decoupling*” (McAfee e Brynjolfsson, 2015) (Fig. 64).

Figura 64
PRODUTTIVITÀ DEL LAVORO E OCCUPAZIONE NEGLI USA 1972-2011

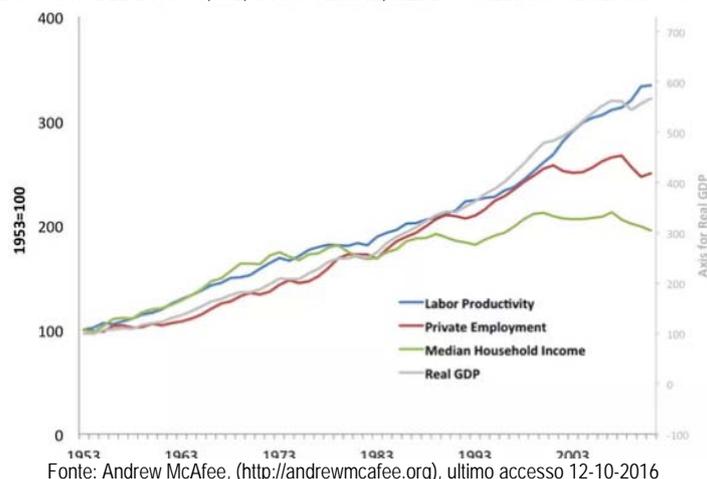


Fonte: McAfee e Brynjolfsson (2011), Fig. 11.1

⁶⁶ Va precisato che il libro di McAfee e Brynjolfsson è del 2011; successivamente le questioni di fondo da investigare sono rimaste le stesse, ma la loro forma fenomenica è stato differente: il livello di disoccupazione negli Usa è basso, praticamente di quasi piena occupazione, ma il livello dei salari non aumenta, nonostante la politica monetaria denominata *quantitative easing*. Il groviglio di questioni dietro questo e una serie di veri e propri paradossi sono al centro del dibattito negli Usa e la letteratura autorevole a riguardo è, come si può immaginare, piuttosto ampia e tale da non portare a visioni interpretative univoche.

Le cause vanno ricercate nel fatto che si è interrotto il “ciclo della prosperità”, ovvero il lungo periodo in cui produttività e reddito degli americani crescevano all’unisono (Fig. 65); “*computers and robots are learning many basic skills at an extraordinary pace*” (McAfee e Brynjolfsson, 2015: 69).

Figura 65
 PRODUTTIVITÀ DEL LAVORO, PIL, OCCUPAZIONE, REDDITO MEDIANO NEGLI USA 1953-2011



L’*“economic abundance”*, come definiscono la lunga serie di andamenti sincronici dei trend di crescita della produttività del lavoro e del reddito pro-capite, non si è tradotta negli ultimi anni in un analogo andamento della distribuzione della ricchezza. Ciò comporta che si sta producendo uno svuotamento della classe media e la tecnologia non crea automaticamente benefici per tutti⁶⁷.

Big Data analytics e *high speed communication* hanno incrementato la produttività delle persone con competenze ingegneristiche e nella progettazione creativa, mentre gli sviluppi del *Machine Learning* e dell’Intelligenza Artificiale hanno sostituito lavoratori che svolgevano funzioni impiegate e compiti di elaborazione meccanica delle informazioni. La conclusione di McAfee e Brynjolfsson non è comunque pessimistica: “la tecnologia ha aperto un grande territorio, ricco di potenzialità e continuerà a farlo”; non si tratta di “*to compete against machines but to compete with machines*”.

The Robots are coming sostiene Danilla Rus (2015), direttrice del Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory al MIT, nel suo intervento in un numero speciale della rivista *Foreign Affairs* (Luglio 2015). L’analisi è rassicurante: obiettivo della robotica non è sostituire gli umani con la meccanizzazione e l’automazione di compiti e funzioni, bensì quello di instaurare una collaborazione efficace. I robot sono più efficienti nel “macinare numeri”, sollevare oggetti pesanti e raggiungere livelli di precisione elevati in contesti ben definiti; gli umani hanno capacità di generalizzazione e di pensiero creativo, grazie alla facoltà di ragionare e apprendere dall’esperienza. L’orizzonte entro cui la robotica si muove è quello di creare ambienti pervasi da robot (*pervasive robotics*) sviluppando migliori strumenti e modalità di comunicazione tra robot e umani⁶⁸.

⁶⁷ Il *great decoupling* e lo “svuotamento” della *middle class* sono stati rilevati in 42 (Cina, Messico e India inclusi) su 51 Paesi secondo uno studio di Karabarounis e Neiman (2013).

⁶⁸ Nel Laboratorio di Danilla Rus stanno progettando un gruppo di robot che montano componenti dell’IKEA.

Un po' meno rassicurante circa gli effetti della robotica e dell'IA sul lavoro due altri contributi. Il Pew Research Center, in collaborazione con l'*Imagining Internet Center* dell'Università di Elon, ha condotto nel 2014 un'indagine presso 200 eminenti esperti, che lavorano e dirigono Centri di ricerca di Imprese e Università americane impegnate in studi e progetti di frontiera. Un particolare interessante è che le personalità prescelte per l'indagine sono tutte analisti e creatori di tecnologie ampiamente accreditati per ciò che hanno realizzato, insieme a specialisti che hanno già dato prova di effettuare proiezioni confermate in precedenti ricerche. Richiesti di delineare uno scenario al 2025, l'unanimità degli interpellati è concorde nel vedere come settori profondamente trasformati dalla robotica e dell'IA la sanità, i trasporti e la logistica, l'assistenza clienti e la manutenzione delle case. Emergono, invece, divergenze circa l'impatto sull'economia e l'occupazione nel loro insieme. Il 48% del campione ritiene infatti che robot e agenti digitali avranno nel 2025 sostituito quote significative di "colletti bianchi e blu", creando al contempo una forte crescita delle diseguaglianze, con interi strati sociali "non occupabili" e conseguenti rischi di rotture dell'ordine sociale.

Il restante 52% delinea, per contro, uno scenario meno catastrofico: pur essendo convinti che nei prossimi anni molti lavori saranno svolti da robot, gli esperti in questione ritengono che comunque l'ingegnosità e l'inventiva umana riusciranno a inventare nuovi lavori, industrie e attività, analogamente a quanto è avvenuto nel corso delle precedenti Rivoluzioni Industriali.

Data l'autorevolezza delle persone interpellate per delineare una visione a dieci anni e soprattutto data la loro partecipazione diretta a progetti tecnico-scientifici di avanguardia, soffermiamoci su alcuni elementi generali, che possono essere utili ai fini della nostra riflessione. Un primo aspetto su cui fermare l'attenzione è la convinzione diffusa che robotica e IA costituiscano una sorta di "architettura algoritmica" in grado di connettere innumerevoli funzioni economiche e comunicative, attraverso la creazione di ciò che un professore della Syracuse University chiama "*framed judgment spaces*", spazi di valutazione organizzati secondo schemi ben definiti. In altri termini, l'intelligenza computazionale si svilupperà nell'ambito del complesso funzionamento di apparentemente semplici e invisibili dispositivi digitali che interagiscono. Robotica e IA dovrebbero "sparire" dal panorama della vita ordinaria e diventare "tecnologie invisibili", come sta accadendo nel passaggio dal personal computer ai pervasivi *cyber physical systems*.

Un secondo aspetto interessante è che agenti digitali accompagneranno la nostra vita e saranno onnipresenti nelle nostre case, con grandi benefici soprattutto per persone anziane, malate e disabili, ma anche per il controllo energetico degli edifici in condizioni ordinarie e di emergenza ambientale. È chiaro, però, che agenti digitali di questo tipo potrebbero essere fondamentali per riorganizzare la propria attività, il lavoro e in genere le condizioni di vita familiari.

Sebbene la maggior parte degli esperti preveda rilevanti progressi nella robotica e nell'IA, una minoranza di essi ritiene che gli effetti saranno lenti e gradualmente per una serie di elementi: 1) analogie con quanto accaduto nelle ondate innovative del passato. 2) Fattori socio-politici impediranno una vasta e sistematica eliminazione di lavori. 3) Alcune attività e funzioni, che richiedono empatia, creatività e pensiero critico, non potranno mai essere trasformate in algoritmi più o meno complessi e quindi il ruolo degli umani resta insostituibile.

Sono molto interessanti anche i punti sollevati da coloro che invece accentuano l'impatto su occupazione e lavoro per una serie di ragioni. Alcune funzioni fino ad ora ritenute del tutto esenti dagli avanzamenti tecnologici in corso, come le attività legali, iniziano ad esserne interessate in modo penetrante: l'analisi e scansione dei documenti vengono sempre più spesso eseguite mediante cosiddetti "*predictive coding algorithms*", destinati a diffondersi ancora maggiormente nel prossimo futuro. Un secondo elemento degno di riflessione concerne il

divario esistente tra l'accelerazione della dinamica innovativa e la capacità delle persone di cambiare e adattarsi ai mutamenti.

Viene messo anche in risalto il fatto che il tipo di innovazioni tecnologiche in atto può intrinsecamente generare una divisione tra “*haves*” e “*have-nots*”, tra chi è dotato di *open mindset* e di determinate competenze di livello medio-alto e chi ne è privo, con la conseguenza di produrre nuove e articolate forme di disuguaglianza. Le differenti dotazioni cognitive di partenza, oltre che le disuguaglianze e le conseguenti limitazioni nelle possibilità di ascesa culturale ed economica (Darvas e Wolff, 2016).

In tal modo, la dinamica innovativa, anziché “liberare dal lavoro” e dare la possibilità di ampliare le ore di tempo libero, potrebbe addirittura realizzare condizioni tali da rendere molte persone prive dei mezzi per sostenere un livello di vita accettabile.

Dato il numero elevato di lavori che aggregano e trasmettono informazioni di routine, quali vendita, assistenza clienti, assistenza sanitaria e assistenza legale, c'è anzi il rischio elevato che molti tipi di attività siano svolti da dispositivi automatizzati, mentre altre tipologie verranno toccate, ma saranno ulteriormente dequalificate e avranno compensi ridotti. Uno dei pericoli che gli esperti vedono profilarsi è che possa crearsi uno strato ridotto di funzioni e posizioni lavorative ad elevata qualificazione e con alte remunerazioni, insieme ad un numero molto ampio di lavori a basso contenuto di professionalità e basse remunerazioni.

Su queste basi c'è chi paventa anche la formazione di un grande “spartiacque sociale”: da un lato coloro che possono permettersi di acquistare prodotti e servizi ad alto contenuto di robotizzazione e IA, dall'altro coloro che costituiscono una vera e propria *underclass*, con potere d'acquisto sempre più distante da ciò che viene prodotto. Di qui l'eventualità che la crescente disuguaglianza e la disoccupazione elevata possano mettere a repentaglio l'ordine sociale.

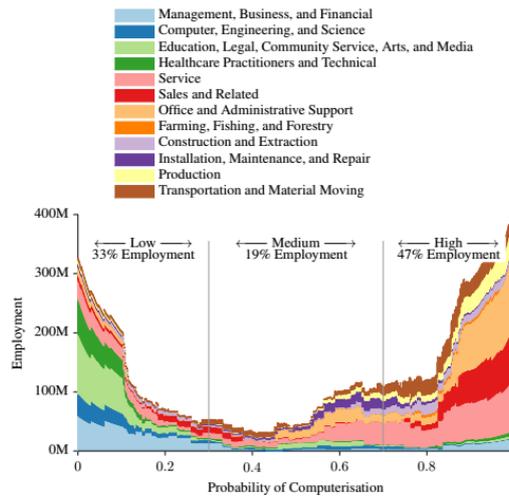
Il dato di fondo, secondo molti, è proprio il mutamento che riguarda il concetto stesso di lavoro: occorrerà ripensare il senso stesso del lavoro e i fondamenti del “contratto sociale” prevalso nei decenni post-bellici, nel momento in cui dispositivi “intelligenti” svolgeranno gran parte delle attività lavorative più faticose, ripetitive e in misura crescente anche cognitive.

Uno scenario certamente più pessimistico è tracciato da Derek Thomson (The Atlantic, 2015) che, dopo aver ricordato come da tre secoli periodicamente emergano scenari di sostituzione del lavoro umano con le macchine, indica tre ragioni per ritenere che oggi, prendendo a riferimento gli Usa, la “fine del lavoro” non sia la consueta frase ricorrente, bensì qualcosa di diverso. Se si guarda agli Usa, infatti, la progressiva diminuzione di importanza del lavoro emerge dall'andamento delle quote di ricchezza che va ai salari: esso mostra un trend di crescita continua fino agli anni '80, una lieve inversione nel decennio '90, per poi continuare la caduta dopo il 2000, accelerata durante la Grande Recessione. Karabarbounis e Neiman (2013) stimano che nuove competenze e software innovativo siano i maggiori responsabili di quasi metà del lavoro sostituito, ma concause sono anche la globalizzazione e la perdita di potere contrattuale dei lavoratori. Thompson porta come esempi dei mutamenti di aspetti basilari delle società leader globali delle comunicazioni. Nel 1964 AT&T valeva 267 miliardi di dollari odierni, con 758.611 occupati; Google, odierno gigante delle telecomunicazioni vale 370 miliardi con soli 55.000 addetti, meno di un decimo della forza lavoro AT&T nel periodo di maggiore prosperità. C'è un altro segnale, che Thompson interpreta nel senso della “fine del lavoro”: l'incremento continuo di uomini che non lavorano e giovani sotto-occupati. La classe di età 25-54 anni è negli Usa in continua diminuzione dal 2000 e tra i maschi adulti il trend decrescente è iniziato anche prima. La quota di giovani in entrata sul Mercato del Lavoro che non lavorano è raddoppiato dalla fine degli anni '70; attualmente il 16% dei giovani sono

disoccupati o nelle non forze di lavoro. Si tratta della fascia di forza lavoro che potrebbe dare il massimo del contributo alla capacità produttiva di un Paese.

C'è infine un terzo fattore che induce Thompson allo scenario meno favorevole al lavoro: il software di "ultima generazione" è in grado di svolgere attività e funzioni sempre più complesse, per cui è ipotizzabile che una larga quota di esse sia "computerizzabile". In un famoso contributo Frey e Osborne (2013) stimano che quasi metà dell'occupazione Usa ha un'alta probabilità di essere sostituita da computer, un altro 19% ha una probabilità media di essere sostituito (tra lo 0,3% e lo 0,7%). Il dato più significativo è appunto che il 48% dei lavori potrebbero non essere più affidati ad umani nell'arco dei prossimi dieci anni (Fig. 66)

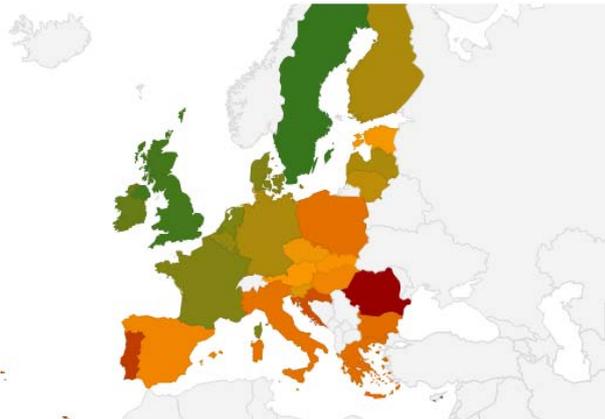
Figura 66
OCCUPAZIONE UFFICIALE AL 2010, DIVISA PER CATEGORIE IN BASE ALLA PROBABILITÀ DI SOSTITUZIONE MEDIANTE COMPUTER



Fonte: Frey e Osborne (2013), Figure III

Un esercizio analogo a quello di Frey e Osborne è stato effettuato da Jeremy Bowles (2014), che ha applicato lo stesso schema analitico e classificatorio pervenendo alla conclusione rappresentata nella figura 67.

Figura 67
TIPOLOGIE DI OCCUPAZIONI "COMPUTERIZZABILI" IN EUROPA



Fonte: Bowles (2014)

I Paesi nordici (Olanda, Germania, Belgio, UK, Francia, Irlanda) hanno livelli di rischio di “computerizzazione” simili a quelli degli Usa; più ci si allontana da questi Paesi, maggiore è il rischio di automazione e nei Paesi periferici dell’Europa i livelli sono massimi.

Comunque, al di là delle stime e delle loro basi concettuali, su cui torneremo tra poco, vi sono pochi dubbi sul fatto che stia realizzandosi una profonda trasformazione nella struttura della forza-lavoro, mentre altre sono molto probabilmente in gestazione. Questi cambiamenti, che sono più avanti negli Usa, stanno ora interessando anche l’Europa, come sostiene Jean Pisani-Ferry (2015): un’analoga polarizzazione è in via di realizzazione nel nostro continente, dove la creazione di piattaforme digitali sta cambiando profondamente il rapporto tra società produttrici di beni o servizi e i consumatori, come avviene nel caso di Uber e Airbnb, tra committenti e fornitori di input tra agenti che collaborano in partnership strategiche, tra coordinatori strategici delle piattaforme e un insieme indeterminato di potenziali partner progettuali.

In tale quadro il contenuto e la regolazione dei rapporti di lavoro sono destinati a mutare radicalmente. Prima di sviluppare questo punto cruciale, è però necessario approfondire ancora un aspetto concernente le basi teoriche della “*computerisability*” del lavoro. Lo schema teorico di fondo è esposto in Autor *et al.* (2003), dove si definiscono sia i compiti di routine (*routine tasks*) che quelli non di routine. Per quanto riguarda i primi, si tratta di attività eseguite secondo regole esplicite⁶⁹. Per quanto concerne i secondi, invece, essi riguardano le attività di risoluzione dei problemi e di complesse attività di comunicazione, nelle quali i computer svolgono una funzione complementare (Autor *et al.*, 2003: 1289). Sia le attività di routine che quelle non di routine possono essere a loro volta distinte in due categorie: manuali e cognitive/astratte, distinzione proposta da Autor e Dorn (2013).

Nel caso delle prime (*routine*), sia le manuali (produzione, riparazione, assemblaggio ripetitivo) che cognitive (vendite, funzioni impiegatizie e amministrative) possono essere trasformate in algoritmi ed eseguibili da dispositivi computazionali. Nel caso delle seconde (*non di routine*), le attività manuali richiedono poca formazione e impiegano lavoratori con skills di “*situational adaptability, visual and language recognition, and in-person interactions*” (Autor, 2010: 4), ad esempio: servizi di ristorazione, aiuto nella cura della casa, lavorazioni nel settore delle costruzioni, sicurezza. Si tratta di attività difficili da rendere “meccaniche” e che di solito richiedono interventi personali.

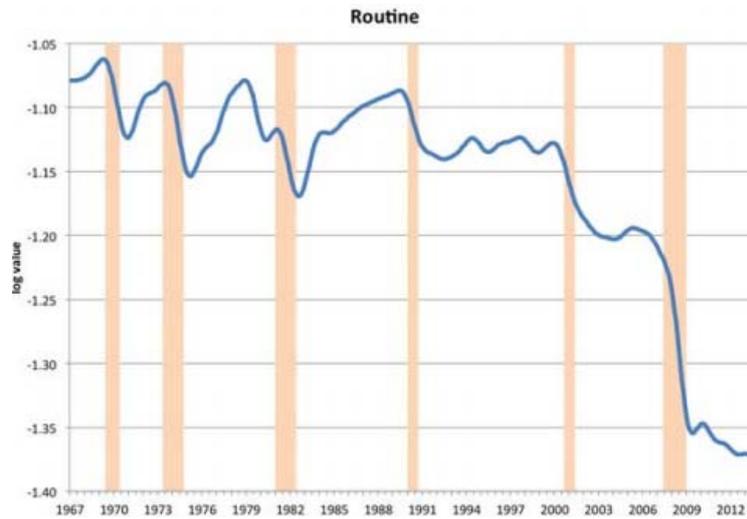
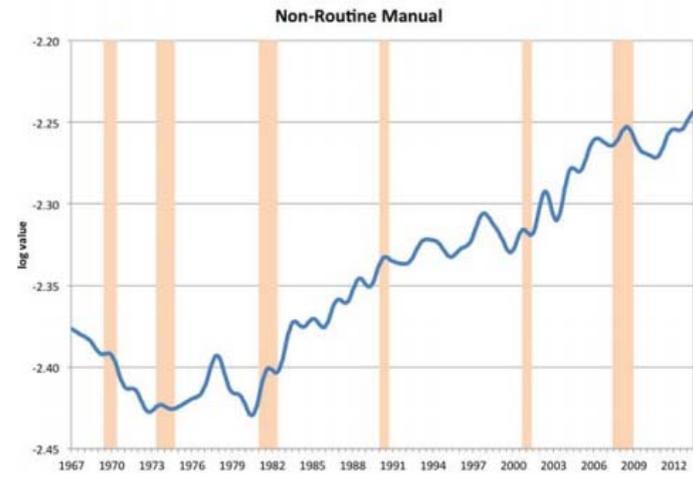
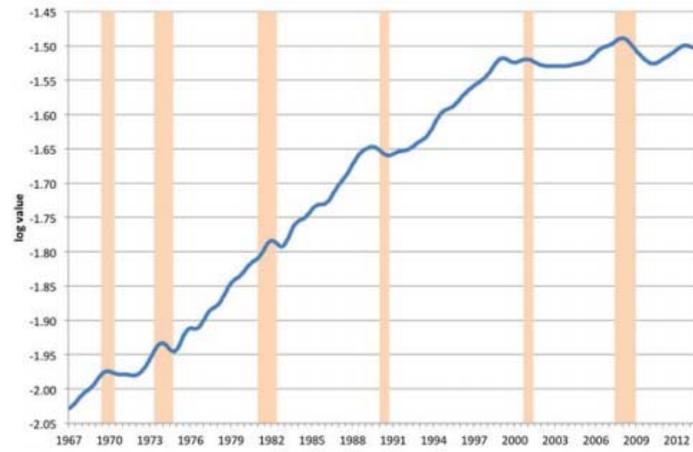
Le attività cognitive/astratte non di routine sono invece quelle dirette alla risoluzione di problemi, che richiedono intuito, persuasione e sempre più alti livelli di formazione.

Altri studiosi (Jaimovich e Siu, 2012) hanno effettuato un esercizio molto interessante, perché hanno analizzato l’andamento dell’occupazione durante e dopo le ultime sei recessioni e successive riprese, applicando la distinzione tra attività di routine e non di routine, più le relative sotto-distinzioni in cognitive/astratte e manuali. Uno dei risultati più significativi delle loro analisi è che, a differenza delle cinque precedenti crisi (1969-70, 1972-75, 1981-82, 1990-91, 2001) quella del 2007-2009 presenta un tratto peculiare: la ripresa nelle attività di routine è stata praticamente inesistente (Fig. 68). Ciò giustifica la loro tesi per cui la *job polarization*⁷⁰ è dovuta innanzitutto alla perdita di lavori di routine durante la fase recessiva, così come la ripresa con poco lavoro (*jobless recovery*) è causata dallo stesso fenomeno di polarizzazione delle posizioni lavorative. In sostanza è aumentata la domanda di professionalità con contenuti cognitivi di livello medio-alto e al tempo stesso di prestazioni non di routine che richiedono skill di bassa qualità cognitiva. L’impiego in questi compiti lavorativi sta peraltro interessando quote crescenti di giovani con titoli di studio medio-alti.

⁶⁹ Si tratta cioè di attività svolte secondo precise procedure, basate su regole (conoscenza codificata).

⁷⁰ L’espressione è stata coniata da Goos e Manning (2003)

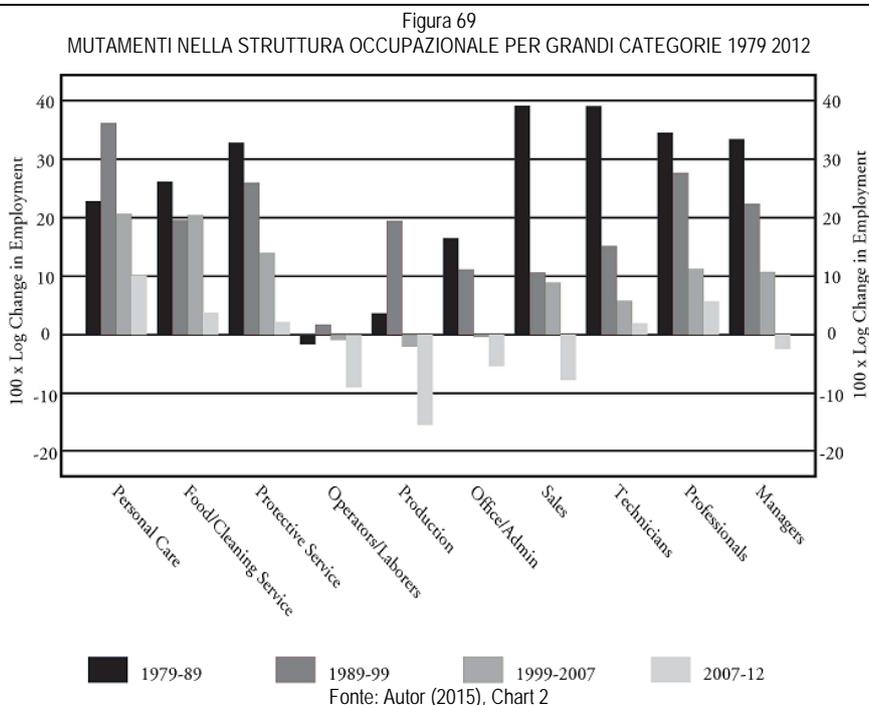
Figura 68
OCCUPAZIONE PER CATEGORIE 1967-2013
Non-Routine Cognitive



Fonte: Jaimovich e Siu (2012), Fig. 4

Queste ricerche sembrano avvalorare la tesi di fondo di Autor (2010), secondo il quale negli Usa la ripresa economica post-recessiva mostra un incremento della domanda di lavoro ad alta qualificazione (salari elevati) e a bassa qualificazione (bassi salari), mentre si riducono in misura consistente quelle dei lavori di media qualificazione.

Altri studi sembrano confermare la tesi della *job polarization* in riferimento agli Usa e ad altri undici Paesi (Autor, 2015) (Fig. 69).



Muovendosi da sinistra verso destra nella figura 69 si evince come il primo gruppo di quattro tipologie occupazionali, che riguarda persone con livelli di istruzione medio-alti e corrispondenti livelli retributivi, presenti robusti tassi di crescita su tre decenni, mentre nel corso dell'ultima recessione e la successiva ripresa non presenta gravi decrementi occupazionali.

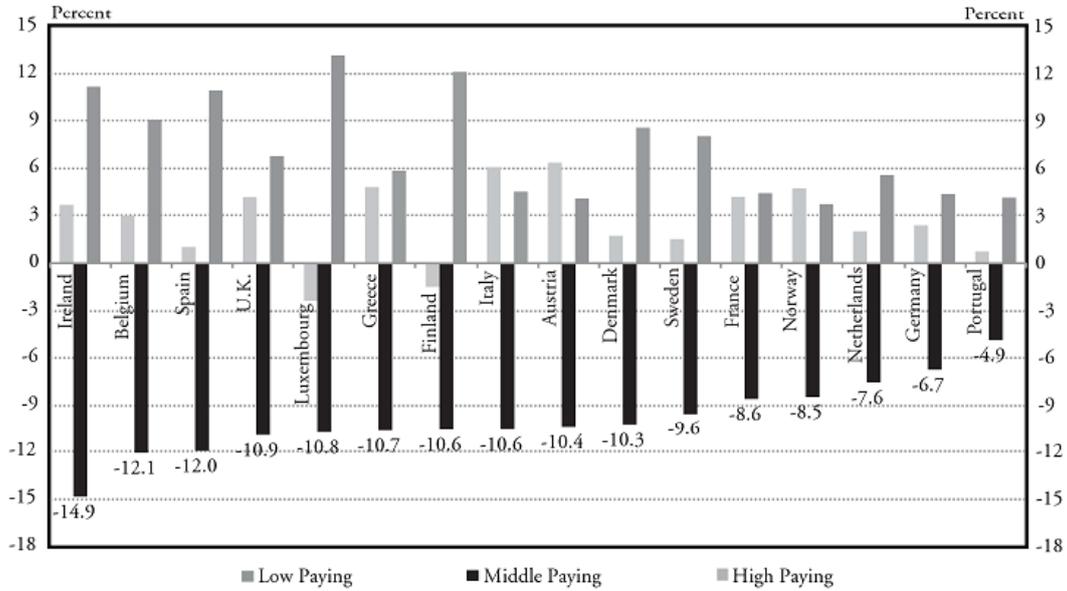
Il gruppo centrale di attività, relative a produzione e a compiti operativi, evidenzia chiaramente un tasso di crescita con un declino più marcato tra il 2007 e il 2012. C'è da osservare che i primi sotto-insiemi di questo raggruppamento (addetti alle vendite, uffici, amministrazione) comprendono lavoratori *middle-skilled*, posizioni prevalentemente *white collar* svolte principalmente da donne con titoli di studio di scuola superiore, mentre solo alcune posizioni vedono detentrici di titoli rilasciati da *College*. Gli altri due sotto-insiemi (produzione, compiti operativi) sono invece un mix di *white and blue collar* a bassa e media qualifica, molti dei quali maschi con titoli di scuola superiore o inferiori.

Il terzo insieme di attività più a sinistra della figura 69 comprende attività di aiuto e assistenza alla persona, servizi di ristorazione. Si tratta di occupazioni di persone frequentemente non in possesso di titoli di istruzione post-secondaria e con salari medi di livello inferiore a quelli delle altre sette categorie rappresentate. Come si vede, il trend di crescita è molto accentuato a partire dal 1979, mentre è stato piatto dal 1959 al 1979⁷¹.

⁷¹ Il trend non è rappresentato in questa sede, ma è raffigurato in Autor e Dorn (2013).

La *job polarization* sarebbe il risultato della crescita delle “due ali” di occupazione a basso e alto livello di istruzione, che ha generato la diminuzione dei lavori *middle skills*, i quali nel 1979 costituivano il 60% del totale, nel 2007 il 49% e nel 2012 il 46% (Autor, 2015). Questa tendenza non è comunque una caratteristica propria solo degli Usa, ma anche di 16 Economie europee (Fig. 70).

Figura 70
MUTAMENTI OCCUPAZIONALI NELLE COMPONENTI A BASSI, MEDI E ALTI SALARI 1993-2010



Fonte: Autor (2015), Chart 3. L'elenco è tratto dalla Tabella 2 di Goos *et al.* (2014)

L'incidenza sul totale dell'occupazione con livelli retributivi medi è declinata dappertutto, mentre i lavori ad elevata retribuzione sono aumentati ovunque e quelli a bassi livelli retributivi sono aumentati in 14 Paesi su 16.

In sostanza, quindi, robotizzazione e Intelligenza Artificiale potrebbero aver accentuato la tendenza alla *job polarization*, tenendo presente che gli ultimi sviluppi tecnico-scientifici, descritti nei precedenti capitoli, hanno particolarmente interessato i lavoratori impegnati in *routine tasks*, determinando quello che Goos *et al.* (2014) hanno chiamato *routines based technological change*. L'analisi delle ore lavorate e dei trend occupazionali di tre raggruppamenti occupazionali mostra chiaramente la *job polarization* (Tab. 4).

Tabella 4
LIVELLI E QUOTE DI ORE LAVORATE 1993-2010

Occupations ranked by mean European wage	ISCO code	Average employment share in 1993 (in percent) (1)	Percentage point change 1993–2010 (2)	RTI (3)	Offshorability (4)	Within (5)	Between (6)
<i>High-paying occupations</i>		31.67	5.62	-0.72	-0.12	3.11	2.51
Corporate managers	12	5.65	0.59	-0.75	-0.32	0.49	0.10
Physical, mathematical, and engineering professionals	21	2.93	1.36	-0.82	1.05	1.11	0.25
Life science and health professionals	22	2.01	0.57	-1.00	-0.76	0.23	0.34
Other professionals	24	2.79	1.38	-0.73	0.21	0.67	0.71
Managers of small enterprises	13	4.16	0.17	-1.52	-0.63	-0.03	0.19
Physical, mathematical, and engineering associate professionals	31	4.44	0.21	-0.40	-0.12	0.22	-0.01
Other associate professionals	34	7.24	0.79	-0.44	0.10	0.27	0.53
Life science and health associate professionals	32	2.45	0.55	-0.33	-0.75	0.14	0.41
<i>Middling occupations</i>		46.75	-9.27	0.69	0.24	-4.77	-4.50
Stationary plant and related operators	81	1.70	-0.25	0.32	1.59	0.06	-0.31
Metal, machinery, and related trade work	72	8.78	-2.08	0.46	-0.45	-0.81	-1.26
Drivers and mobile plant operators	83	5.03	-0.48	-1.50	-1.00	-0.11	-0.38
Office clerks	41	10.60	-2.06	2.24	0.40	-2.34	0.28
Precision, handicraft, craft printing, and related trade workers	73	1.45	-0.54	1.59	1.66	-0.30	-0.24
Extraction and building trades workers	71	7.35	-0.64	-0.19	-0.93	0.39	-1.03
Customer service clerks	42	2.13	0.06	1.41	-0.25	-0.14	0.20
Machine operators and assemblers	82	5.99	-1.63	0.49	2.35	-0.56	-1.07
Other craft and related trade workers	74	3.72	-1.66	1.24	1.15	-0.96	-0.69
<i>Low-paying occupations</i>		21.56	3.65	-0.08	-0.84	1.66	1.99
Laborers in mining, construction, manufacturing, and transport	93	4.26	-0.55	0.45	-0.66	0.01	-0.55
Personal and protective service workers	51	6.86	2.36	-0.60	-0.94	0.65	1.71
Models, salespersons, and demonstrators	52	6.06	-0.11	0.05	-0.89	0.29	-0.40
Sales and service elementary occupations	91	4.38	1.95	0.03	-0.81	0.72	1.23

Fonte: Goos *et al.* (2014), Tab. 1

Tabella 5
QUOTE INIZIALI DI ORE LAVORATE E VARIAZIONI PERCENTUALI 1993-2010

	Four lowest-paying occupations		Nine middling occupations		Eight highest-paying occupations	
	Employment share in 1993 (in percent)	Percentage point change 1993–2010	Employment share in 1993 (in percent)	Percentage point change 1993–2010	Employment share in 1993 (in percent)	Percentage point change 1993–2010
Austria	21.82	6.36	51.61	-10.44	26.57	4.08
Belgium	17.49	3.00	48.50	-12.07	34.01	9.08
Denmark	24.09	1.73	39.70	-10.30	36.21	8.56
Finland	20.24	-1.50	39.69	-10.60	40.06	12.10
France	19.92	4.19	46.69	-8.60	33.39	4.41
Germany	20.71	2.37	48.03	-6.74	31.26	4.37
Greece	21.66	4.81	47.81	-10.65	30.54	5.84
Ireland	21.13	3.68	48.21	-14.85	30.66	11.17
Italy	27.01	6.06	51.04	-10.59	21.94	4.53
Luxembourg	21.70	-2.38	49.91	-10.76	28.40	13.15
Netherlands	16.78	1.99	37.90	-7.56	45.33	5.57
Norway	22.85	4.73	38.82	-8.47	38.34	3.74
Portugal	25.75	0.73	47.46	-4.86	26.78	4.13
Spain	28.02	1.01	48.67	-11.95	23.30	10.93
Sweden	21.82	1.52	41.98	-9.55	36.20	8.03
United Kingdom	16.88	4.17	43.64	-10.94	39.49	6.77

Notes: Long difference 1993–2010. Occupational employment pooled within each country. Occupations are grouped according to the mean European occupational wage as in Table 1.

Fonte: Goos et al (2014), Tab. 2

Un corollario di questa tesi, su cui non ci soffermiamo rinviando al contributo di Autor (2015) per la sua rappresentazione, è il seguente: la “computerizzazione” ha prodotto effetti positivi sulle attività ad alta intensità di conoscenza (*abstract task intensive activities*) per l’esistenza di complementarità con i dispositivi computazionali, ma ha contribuito anche la bassa elasticità di offerta di lavoro in grado di svolgere quel tipo di funzioni lavorative. Le attività ad alta intensità manuale (*manual task intensive activities*) sono invece debolmente influenzate dalle complementarità con i computer e al tempo stesso caratterizzate da una domanda finale elastica e da un’offerta elastica di lavoro, che modera la crescita salariale indotta dalla domanda.

Altri autori ritengono invece che la tendenza verso la polarizzazione salariale e più in generale verso una stagnazione dei salari sia già in atto da decenni e, oltre ad altre cause non trascurate dagli stessi autori finora citati (offshoring, delocalizzazione, globalizzazione), vi siano una serie di fattori che spingono verso un contenimento generale dei salari.

L’ipotesi interpretativa della *job polarization* incentrata sulla dinamica tecnologica ha nel corso degli anni avuto differenti formulazioni.

Quella iniziale, la cosiddetta *Skill biased technical change* (SBTC), spiegava la disuguaglianza salariale in base alla “corsa tra tecnologia e formazione” (*race between technology and education*), per cui la richiesta di maggiori skills e competenze avevano portato a più alte retribuzioni per coloro in possesso di livelli formativi più elevati e decrescenti compensi per gruppi sociali con formazione non al passo coi tempi (Autor et al, 1998; Goldin e Katz, 2010). Questa prima formulazione dello SBTC, definita “*canonical model*”, non è però riuscita a spiegare i trend degli anni ‘90 e 2000, soprattutto per quanto concerne da un lato il divario crescente tra percettori di compensi medio-bassi e quelli che ricevevano retribuzioni elevate, dall’altro la decelerazione del cosiddetto *college premium*, ovvero i salari più alti per le

competenze più elevate in base ai titoli di studio. Ciò ha indotto alcuni studiosi ad avanzare un'altra versione del modello esplicativo sempre *technology-based*. Autor (2010) e Acemoglu e Autor (2012) hanno elaborato il cosiddetto *task framework*, il cui focus è appunto, come abbiamo prima visto, l'impatto della computerizzazione sull'occupazione e la *job polarization*.

Un'interpretazione alternativa è stata invece avanzata da analisti e studiosi dell'Economic Policy Institute (Centro di ricerca indipendente). In *The State of Working America* (Mishel *et al.*, 2012) e in *Don't blame the robots* (2013), sulla base di un'ampia evidenza empirica, si dimostra come la tecnologia non sia il fattore causale decisivo della polarizzazione salariale, in atto fin dagli anni '70. Nella loro analisi critica del "*canonical model*" e del "*task framework*" essi mettono in risalto che in realtà l'*occupational upgrading* al centro degli studi indicati si è realizzato nel corso dei decenni in cui si sono simultaneamente verificate sia la crescita e la caduta della disuguaglianza salariale che la crescita e la diminuzione del salario mediano. Ciò significa che l'*occupational upgrading* non può essere ritenuto l'unico fattore causale. Altri elementi hanno concorso a determinare quello che essi definiscono *wage deficit*, per indicare che lavori con qualsiasi dotazione di conoscenze (livelli di formazione) non hanno ottenuto un'appropriata crescita salariale. Il *wage deficit* quindi, anziché lo *skill deficit*, va a loro avviso messo al centro dell'analisi, onde individuarne le cause, che sono poi da imputare all'azione congiunta di misure macro e micro-economiche, riconducibili ad un determinato set di elementi: politiche fiscali e monetarie, liberalizzazioni e deregulation di mercati e settori, politiche commerciali, riduzione del salario minimo, riduzione del tasso di sindacalizzazione, globalizzazione senza regole, scarsa mobilità sociale⁷².

La *wage stagnation* in atto non solo negli Usa può avere molte cause, ma probabilmente una può essere individuata nell'innovazione tecnologica e nel diffondersi delle piattaforme tecnologiche, che sono alla base della "*share economy*". Siamo di fronte a quella che Robert Reich (2015) definisce economia "*on demand*", "*on call*", che costituisce a suo avviso "il più grande cambiamento del secolo nella forza lavoro americana. Si stima che in cinque anni più del 40% della forza lavoro americana avrà un lavoro incerto, in 10 la maggior parte di tutti noi". La sua visione dell'impresa è di un'entità governata da uomini di affari a cui occorreranno solo un piccolo gruppo di "talenti ancorati" all'impresa stessa, cioè innovatori e operatori strategici responsabili dei punti di forza competitiva. Tutti gli altri saranno fungibili e richiesti per la loro affidabilità e il basso costo. Algoritmi complessi individueranno necessità e fabbisogni, valutando le performances produttive con metriche di assegnazione del rating in base all'esperienza; software di varia natura controlleranno e gestiranno ogni tipo di transazione, mentre dispositivi di "profilazione" dei consumatori e della domanda, di analisi della dinamica tecnologica forniranno elementi per l'elaborazione di strategie produttive. Tutti i rischi dei cambiamenti ricadono sui lavoratori e l'orizzonte che si profila è un "*spot-auction market*" per moltissimi lavori: giornalista, professore, programmatore, infermiere, idraulico, ecc. In sostanza secondo Reich emerge uno scenario in cui è incerto se, quando e quanto si lavorerà, con livelli di remunerazione variabili e comunque tendenti verso il basso. Si tratta di un mondo nel quale le tradizionali misure economiche rischiano di avere sempre meno significato e diventano irrilevanti le forme storicamente consolidate di protezione del lavoro, quali il salario minimo, la sicurezza del lavoratore, l'astensione dal lavoro per motivi medici e familiari, cioè un po' tutte le componenti storiche del Welfare State. In breve, ci sarà un mondo di lavoratori indipendenti con il rischio economico-produttivo diffuso in una società che vive nell'incertezza. Saremmo di

⁷² Darvas e Wolff (2016, § 2.3) documentano come in molti Paesi, in primis gli Stati Uniti, le crescenti disuguaglianze di reddito e di retribuzioni sia negli ultimi decenni unite a una sostanziale riduzione della mobilità sociale. I temi della disuguaglianza e della mobilità sociale esulano dagli obiettivi del presente lavoro e non sono quindi approfonditi ulteriormente. La bibliografia qui indicata comunque contiene indicazioni esaurienti per analisi più articolate.

fronte alla cosiddetta “*Gig Economy*” oppure “*On line Economy*” (Dokko et al, 2015)⁷³ che definisce contesti in cui tendono a prevalere posizioni lavorative temporanee e le organizzazioni contrattano con lavoratori indipendenti prestazioni specifiche. Gli esempi di “*Gig Companies*” sono già noti: Airbnb, Huber, TaskRabbit, Crowd Flower, Elance-Upwork, Freelancer.com, Guru, Zaarley, Fiverr. Dokko *et al.* (2015) approfondiscono numerosi aspetti di natura economica, isituzionale, normativa concernenti rapporti di lavoro così “volatili”.

Se lo scenario descritto da Reich ha un qualche fondamento è giusto porsi una domanda: cosa accadrà se “i robot prendono i lavori?”⁷⁴.

L’insieme di tecnologie su cui ci siamo più volte precedentemente soffermati si sta espandendo ad un ritmo impressionante: il numero di robot è salito da 1,2 milioni nel 2013 a 1,5 nel 2014 ed è ipotizzato in circa 1,9 nel 2017. Il Giappone ne possiede il maggior numero (306.700), seguito da NordAmerica (236.400), Cina (182.300), Corea del Sud (175.600) e Germania (175.000). Il costo di robot e macchinari a controllo numerico computerizzato è diminuito sostanzialmente, così che il tempo di recupero degli investimenti (*payback time*) è diventato molto più breve. La produzione e diffusione di conoscenze in materia è immediatamente globale. Si pensi al fatto che una recente competizione lanciata dal DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) prevedeva otto compiti da svolgere per robot in un ambiente pericoloso, quali “guidare un veicolo, aprire una porta, lavorare con trapano portatile, girare una valvola e salire le scale”. L’obiettivo era quello avere un agente artificiale capace di operare in un reattore nucleare danneggiato, in modo tale da creare un ambiente troppo pericoloso perché esseri umani potessero agire. Un team coreano ha vinto il premio di 2 milioni di dollari (Markoff, 2015).

Vi sono comunque robot in grado di svolgere funzioni complesse come quelle svolte dalle creazioni robotiche (AIBO, P40, Pepper & Jimmy, Sophie, ecc.) nell’ambito di un filone di ricerca tendente a creare *sociable robots*, che sono anche in grado di suonare musica Jazz (Wilf, 2013)⁷⁵. Intanto in Giappone all’Hotel Henn-na robot controllano i clienti e li guidano nelle loro stanze. Il robot alla reception parla inglese e giapponese, può prendere le prenotazioni e regolare la temperatura delle stanze, dove gli ospiti a voce possono controllare l’illuminazione e porre domande sul tempo e la temperatura esterna.

Nella ristorazione vi sono robot per prendere le prenotazioni e servire ai tavoli, come per il pagamento, con un risparmio considerevole di personale. Altri esperimenti di *Human Robot Interaction* sono il robot NAO e il progetto *Stress Game*, con robot che cercano di comprendere lo “stato interno” degli umani (stati fisico-psicologici) e quindi fornire assistenza nei processi adattativi della vita quotidiana.

Robotica, IA e tutte le altre innovazioni di cui abbiamo parlato sono alla base del “ritorno della questione delle macchine” (*The return of the machine question, Special Report on Artificial Intelligence, The Economist 25-7-2016*).

Dall’analisi sviluppata si evince chiaramente che la dinamica tecnico-scientifica, soprattutto nelle componenti connesse all’IA e alla robotica, avrà un impatto crescente sul lavoro e la vita delle persone. In particolare, grazie alla crescente potenza computazionale e allo sviluppo di nuove architetture di software, le nuove tecnologie potranno svolgere alcuni compiti cognitivi tradizionalmente propri degli umani: analisi radiologica, funzioni predittive di manutenzione e successive azioni di ripristino delle condizioni di funzionalità normali in molte industrie.

⁷³ L’origine del termine *gig* risale al Jazz e alla peculiare dinamica di nascita e scioglimento delle formazioni, legate a concerti oppure a performance limitate nel tempo.

⁷⁴ “*What happens if robots take the jobs? The impact of emerging technologies on employment and public policy*” (West, Brookings Institution, Center for Technology Innovation, October 2015).

⁷⁵ Al filone di ricerca, denominato *social robotics* contribuiscono molti studiosi (Fong *et al.*, 2003), Feil-Sefer e Mataric (2005), Huber *et al.* (2014). Per una prima rassegna si veda Dautenhahn (2007) e più di recente Dautenhan (2015).

D'altronde dispositivi computazionali in grado di apprendere, attualmente soprattutto con meccanismi di apprendimento supervisionato ma con esiti promettenti anche in quello non supervisionato, sono sviluppati da una serie imprese: *DeepMind* (Google), *MetaMind* (startup rilevata da Salesforce, un gigante del Cloud Computing), NVIDIA (azienda californiana produttrice di processori grafici e schede per il visual computing), BAIDU (il "Google" cinese, che ha recentemente assunto Andrew Ng, uno dei maggiori esperti californiani di *Deep Learning*, già al lavoro su un progetto di Google denominato "Google Brain"), startup come QUID, Numenta e Geometric Intelligence, le quali occupano uno spazio importante nel campo dell'IA.

È interessante sapere che *Deep Mind* ha creato il sistema *Alpha-Go*, vincitore al gioco *Jeopardy* e che consiste di molti moduli interconnessi, incluse due "deep neural net" con un numero elevato di strati. *Deep learning systems* con 20-30 strati (*layers*) sono piuttosto diffusi e Microsoft ne ha creati alcuni con 152 layer. Gum Banavan dell'IBM ha annunciato che più di 300 società appartenenti a numerose industrie hanno creato App di IA sulla piattaforma Watson.

I sistemi di *deep learning* sono particolarmente efficaci nel riconoscimento delle immagini, come dimostra tra gli altri la startup Enlitic, che li applica in medicina con prestazioni frequentemente superiori a quelle degli specialisti umani. Analogamente accade per E-discovery, che analizza "montagne di documenti" con una rapidità e una capacità di scoprire pattern e aspetti reconditi largamente superiori a quelle di operatori legali umani.

In uno scenario di questo tipo, fortemente evolutivo e contraddistinto da un'incertezza di fondo, è logico che le visioni degli economisti non possano essere univoche. A fronte delle tesi di Frey e Osborne (2013), già esposte, vi è la previsione di Bessen (2015) che non ritiene si possa parlare di "fine del lavoro", perché le nuove tecnologie dell'informazione "spiazzano" molte tipologie di lavoratori, creando forti asimmetrie di competenze e retribuzioni ma, analogamente a quanto accaduto negli ultimi due secoli, se cambiano le competenze delle persone in modo appropriato possono non nel complesso verificarsi perdite occupazionali. Lo *Special Report* dell'*Economist*, nel contributo intitolato "*Automation and anxiety*", indica ad esempio che è già in corso uno spostamento delle occupazioni verso ambiti basati sull'interazione sociale: dottori, terapisti, *hairdresser*, *personal trainer*, lavori di cura e assistenza alle persone. Bisogna d'altronde evitare di cadere nella trappola cognitiva cosiddetta del *lump of labor fallacy*, cioè che vi sia un ammontare fisso di lavoro. Anzi, secondo gli studi di Bessen (2015) può ripetersi quanto già accaduto in passato, ovvero la diffusione delle nuove tecnologie crea occupazione proprio negli ambiti dove vengono utilizzati, "riallocando" lavoratori più che "spiazzandoli". Per esempio, l'introduzione del software che analizza documenti legali non ha affatto portato alla diminuzione dell'occupazione: dal 2000 al 2013 il numero degli addetti in attività legali è salito dell'1,1%. Inoltre, come sostiene Joel Mokyr (2013), storico economico della Northwestern University, "*it seems plausible that the future too will create occupations we cannot imagine, let alone envisage*".

In realtà la verità forse sta nel mezzo tra "tecno-ottimisti", la maggior parte dei quali sono economisti e storici dell'economia, e tecno-pessimisti, molti dei quali sono particolarmente versati nelle analisi delle traiettorie tecnologiche (Kurzweil, Bostrom, Sennett, Katz).

Come si sostiene anche nello *Special Report* dell'*Economist*, in effetti l'IA avrà implicazioni per i *policy makers*, sulla formazione, sul welfare e sulla geopolitica.

Naturalmente esula dai limiti di questo lavoro effettuare un'analisi esaustiva, ma è nondimeno opportuno segnalare che preoccupazioni sugli sviluppi dell'IA sono stati recentemente sollevati da Stephen Hawking⁷⁶ e Elon Musk (Tesla Motor, grande innovatore⁷⁷),

⁷⁶ Hawking ha recentemente detto alla BBC: "The development of full artificial intelligence could spell the end of the human race." (Cellar Jones, BBC, 2-12.2014).

ma elementi più rassicuranti sono stati contemporaneamente sottolineati da esperti di IA. Yoshua Bengio, professore di IA all'Università di Montreal ha messo in evidenza che siamo ben lontani da "macchine intelligenti" (Technology Review, 29-1-2016): quello che stiamo facendo è renderle meno stupide; per imparare qualcosa le macchine hanno ancora bisogno di migliaia e milioni di esempi, perché l'apprendimento non supervisionato è ancora lontano, così come una comprensione soddisfacente del linguaggio umano. Jeff Dean, inventore di MapReduce e attualmente direttore di una avveniristica linea di ricerca di Google denominata "Google Brain", parla di grandi progressi nel *natural language processing* e nel riconoscimento visivo, ma l'obiettivo è di mettere a disposizione delle persone le potenzialità del ML, senza indicare grandi sconvolgimenti (*Machine Learning for Everyone*, intervista di Simonite, Tehnology Review, 28-3-2014). Analogamente Robert D. Hoff, in *Man and Machine* sempre sullo stesso numero di *Technoogy Review*, mette in luce come IA e ML ripendono sempre dall'intelligenza umana e dalla matematica, sulla base di un grande lavoro di "allenamento" e valutazione della qualità del lavoro svolto. Questi aspetti sono ulteriormente enfatizzati da Bochner, (*AI's unspoken problem*, Technology Review, 28-2-2014), che mette in luce i limiti di fondo di Deep Learning, AlphaGo ecc., nonostante i grandi progressi aggiunti.

L'analisi sviluppata in questo paragrafo ha mostrato le grandi potenzialità che la dinamica tecnico-scientifica sembra dischiudere, ma anche le sfide per il mondo del lavoro e la società nel suo insieme. Possono dunque liberarsi forze molto potenti, che hanno in sé i presupposti di un ulteriore avanzamento dell'umanità e al tempo stesso rischi di involuzione per la società. Ancora una volta la capacità di elaborare scelte strategiche efficaci può orientare la direzione dei processi, ma bisogna essere consapevoli che siamo in un periodo di transizione come ben pochi nella storia più recente dell'evoluzione sulla terra.

⁷⁷ Musk ha detto alla CBS News: "Artificial intelligence may be more dangerous than nukes" (2-8-2014).

6.

STRATEGIE DI POLITICA INDUSTRIALE PER “LA FABBRICA INTELLIGENTE” NELL’ERA DELLA TRANSIZIONE SOCIO-TECNICA

6.1

Fabbrica intelligente negli scenari della transizione alla post-fuel economy. Problemi e sfide globali nella traiettoria verso l’Energiewende (transizione energetica) (Europa Usa, Cina)

6.1.1 *Dinamica innovativa e transizione socio-tecnica*

Già nel capitolo 2 sono stati discussi alcuni temi e schemi concettuali innovativi per la riprogettazione di processi e prodotti, la cui digitalizzazione assume priorità e vincoli posti dalle sfide a livello globale. In questo capitolo cercheremo di approfondire la transizione odierna e analizzare lo spazio per interventi strategici, ponendo al centro il concetto di sistema socio-tecnico, che “comprende produzione, diffusione e impiego di tecnologie sulla base di una definizione funzionale e astratta di legami e connessioni tra elementi, al fine di adempiere a funzioni sociali (trasporti, comunicazioni, offerta di beni, nutrizione, ...)” (Geels, 2004: 900). Esso assume logicamente centralità nell’era caratterizzata da *UbiComp*, ecosistemi digitali innovativi, interdisciplinarietà dei processi di ricerca tecnico-produttiva e di produzione di output *multi-technology*, pervasività dei *cyber-physical systems*. Interdipendenze e complementarità tra sistemi, attori, regole e istituzioni sono gli elementi fondamentali dei sistemi socio-tecnici, basati su “*large technological systems*” (Hughes, 1987), ovvero le connessioni tra una serie di componenti: infrastrutture, beni, organizzazioni, risorse naturali, input e output scientifici, istituzioni, centri di ricerca e Università (Hughes, 1987; Geels, 2004, 2005). I sistemi socio-tecnici sono l’esito di complessi processi di coordinamento tra ambiti e livelli, tra i quali si deve realizzare l’interazione e l’adattamento reciproco affinché un “regime tecnologico”, inteso come insieme di regole o grammatica che organizza le attività di ricerca ingegneri, esperti, politici, agenti tecno-economici in genere (Van den Ende e Kemp, 1999). In un regime tecnologico operano reti di agenti che interagiscono a seconda delle forme organizzative assunte. Tra le regole che strutturano il “regime” si distinguono le *core rules*, che sono il nucleo basilare di un regime tecnologico, le *peripheral rules*, complementari ma essenziali rispetto alle prime, stabili e transitorie⁷⁸. Le regole, espressione di uno “stile di pensiero”, hanno la funzione di guidare la progettazione e lo sviluppo di una particolare tecnologia sulla base di un’organizzazione cognitiva “gerarchica”: cambiamenti in quelle basilari comportano mutamenti di regime (Van de Poel, 2003)⁷⁹.

Il Multiverso in cui i sistemi economico-produttivi sono entrati o sono in procinto di farlo mostra chiari segnali di un cambiamento di regime tecnologico: regole tecnico-scientifiche basilari e paradigmi tecno-economici tradizionali stanno cambiando profondamente. Appare fondato ritenere che siamo all’interno di una transizione socio-tecnica, la quale investirà le economie di tutto il mondo, costrette nel corso del XXI secolo ad affrontare una serie di sfide epocali: riscaldamento del clima, scarsità delle risorse naturali (*Water, Food, Energy Nexus*), processi di urbanizzazione sempre più spinti, invecchiamento della popolazione nei Paesi di più antica industrializzazione, *hypercompetition* a livello globale, diffusione delle tecnologie

⁷⁸ Esse designano rispettivamente: aspetti come standard di prodotto e di compatibilità, oltre che regolamentari; regole concernenti le relazioni clienti-fornitori, regole di progettazione, e così via (Van den Ende e Kemp, 1999: 837).

⁷⁹ Esempio a questo proposito è il passaggio al regime tecnologico basato sui computer (dal calcolo analogico a quello digitale) (van den Ende e Kemp 1999).

“dirompenti”, robotizzazione e Intelligenza Artificiale, *Quantum Computing*. I meccanismi e i processi di trasformazione sono talmente numerosi e interdipendenti che la dinamica tecno-economica non potrà che essere complessa e non lineare, con una pluralità di traiettorie possibili ed esiti necessariamente imprevedibili. Al contempo autorevoli Centri studi internazionali argomentano la tesi della nascita dell’Antropocene, un’epoca in cui le attività umane iniziano ad avere un impatto significativo e irreversibile sulla geologia e gli ecosistemi terrestri⁸⁰.

La “transizione socio-tecnica” implica che una serie di fattori e processi multi-dimensionali sono soggetti a cambiamenti sostanziali su scala globale. Nel Dicembre 2015, alla fine della riunione dei rappresentanti di 195 Paesi di tutto il mondo, è stato approvato un documento che impegna alla riduzione della temperatura globale entro i limiti di 1,5 gradi Celsius al di sopra dei valori dell’era preindustriale. Il punto essenziale dell’accordo è il riconoscimento “che il cambiamento climatico rappresenta una minaccia urgente, e potenzialmente irreversibile, alla civiltà umana e al pianeta” (trad. nostra). L’attuazione dell’accordo richiede che almeno 50 Paesi firmino l’accordo stesso.

L’importanza storica del cosiddetto “*Paris Agreement*” è espressa da Joseph Stiglitz (2016): “Il mondo si sta inesorabilmente spostando verso una economia ecosostenibile” ed è confermata dalla recente ratifica dell’accordo sia degli Usa che della Cina (3-9-2016). Altri importanti Nazioni dovrebbero seguire a breve (India, Russia, Germania, Italia) sulla base di dichiarazioni ufficiali da parte di autorità governative. In effetti già da tempo alcune economie si stanno muovendo in questa direzione, mentre studiosi e Centri di Ricerca internazionali sviluppano interessanti linee di ricerca nell’orizzonte di una *post-fuel economy*, cioè di superamento dell’era fondata sul petrolio.

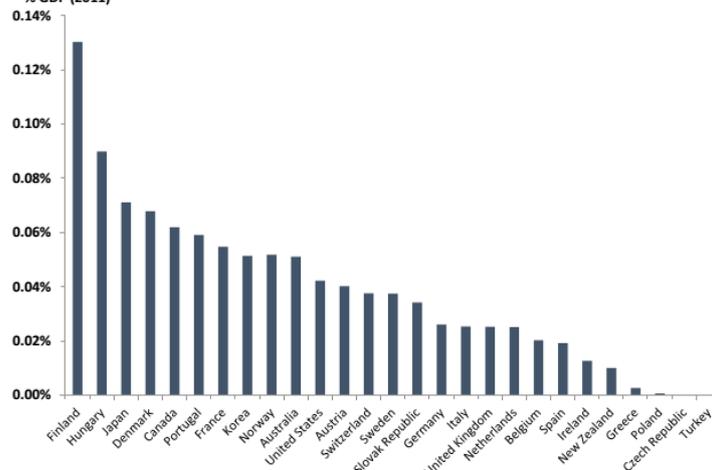
Prendiamo in esame alcuni dati per comprendere come vari Paesi stanno affrontando le sfide del passaggio ad un’economia basata su energie rinnovabili (*clean energy*).

Secondo dati IEA (International Energy Agency, 2013; Stepp e Nicholson, 2014) i Paesi ad alto reddito hanno nel 2011 investito in media 15 miliardi di dollari a partire dal 2009 in “energia pulita”, che comprende nucleare (fissione e fusione), cattura del carbonio, celle a combustibile, tecnologie per *smart grid*, veicoli elettrici, pannelli fotovoltaici, energia eolica ed efficienza energetica.

La figura 71 mostra la spesa in RD&D in percentuale del PII nei Paesi ad alto reddito e in quelli emergenti nel 2011

⁸⁰ Smithsonian Institute, <http://www.smithsonianmag.com/science-nature/what-is-the-anthropocene-and-are-we-in-it-164801414/?no-ist>.

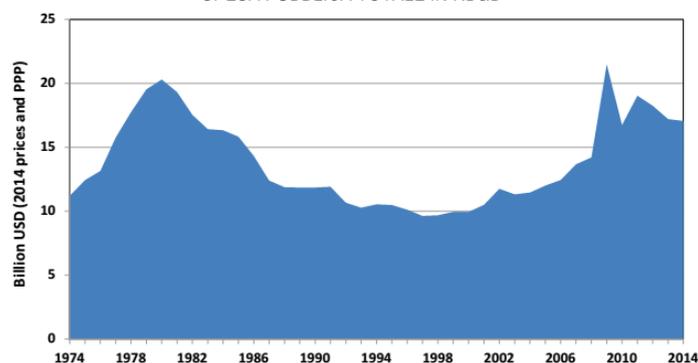
Figura 71
 SPESA IN RD&D SUL PIL NEI VARI PAESI EMERGENTI E IN QUELLI AD ALTO REDDITO
 % GDP (2011)



Fonte: Stepp e Nicholson (2014), Fig. 5

La spesa in Research, Development & Demonstration (RD&D) era di 20 miliardi di dollari nel 2009, con risorse addizionali impiegate al fine di stimolare la spesa, ma è poi diminuita a 17 miliardi nel 2011 e ancora ulteriormente nel 2014 (Fig. 72).

Figura 72
 SPESA PUBBLICA TOTALE IN RD&D



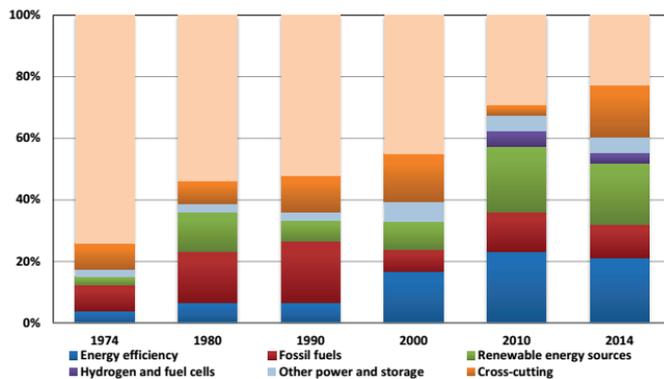
Fonte: IEA (2015), Fig. 1

Sommato alla spesa dei Paesi emergenti l'investimento pubblico in RD&D è approssimativamente 23 miliardi di dollari, ma secondo calcoli dell'IEA dovrebbe essere almeno tre volte tanto (70 miliardi) per affrontare le sfide tecnologiche e consentire costi energetici più bassi. Recenti stime dell'IEA (2016) indicano che il budget complessivo dei Paesi membri dell'IEA per il 2014 sia ancora 17 miliardi di dollari ma, anche se quasi raddoppiato rispetto al 1998, il trend dal 2009 in poi è in diminuzione.

L'evoluzione delle varie componenti di spesa negli ultimi 40 anni è molto significativa: vede da un lato una forte contrazione del nucleare e una consistente riduzione dei combustibili fossili, dall'altro un marcato aumento dell'efficienza energetica e un forte incremento delle energie rinnovabili, insieme all'emergere dell'idrogeno, celle a combustibile, *cross-cutting R&D* (R&S trasversale a molte aree tecnico-scientifiche con finalità energetiche).

Figura 73

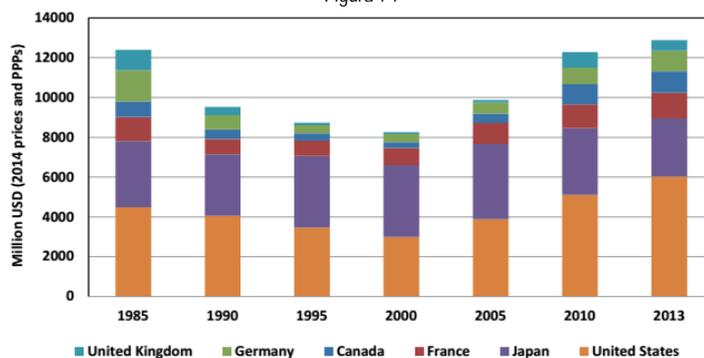
DISTRIBUZIONE DELLA SPESA PUBBLICA TOTALE IN RD&D



Fonte: IEA (2015), Fig. 2

L'esame degli andamenti della spesa in RD&D nei vari Paesi vede un incremento diffuso, con Giappone e Usa che investono di più in termini assoluti, seguiti da Francia, Inghilterra e Germania (Fig. 74). Queste ultime destinano maggiori quote di risorse ad investimenti negli anni post-crisi.

Figura 74

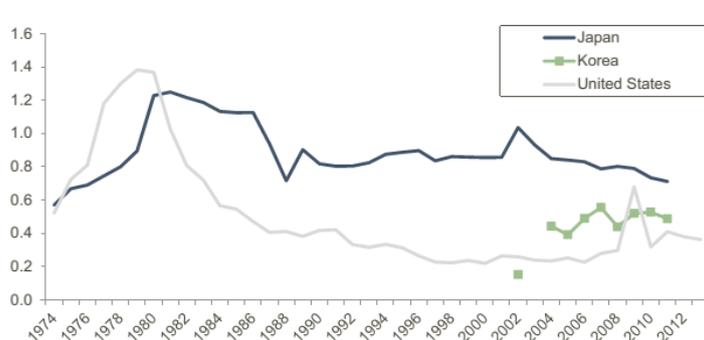


Fonte: IEA (2016), Fig. 3

Elementi interessanti emergono dall'analisi dell'intensità di spesa energetica nei vari Paesi (Miller e Atkinson, 2015): il totale della spesa in R&S a fini energetici, rapportata al PIL (GNP), mostra il gap tra il Giappone e la Corea da un lato, gli Stati Uniti dall'altro (Fig. 75).

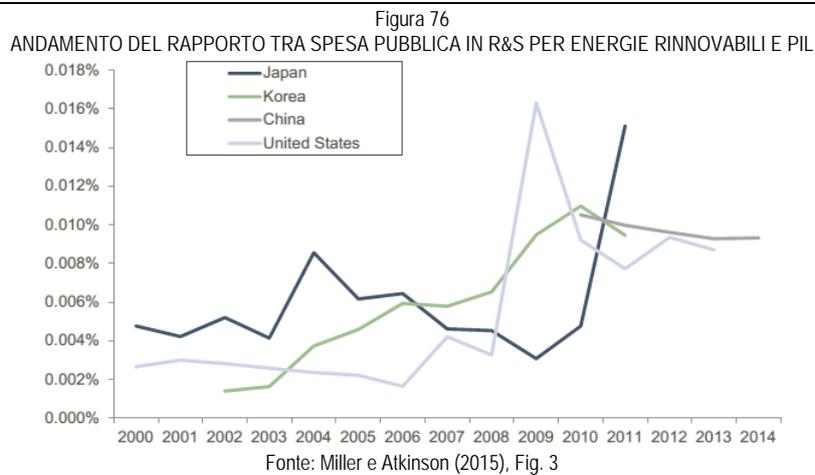
Figura 75

RAPPORTO TRA SPESA PUBBLICA IN R&E PIL



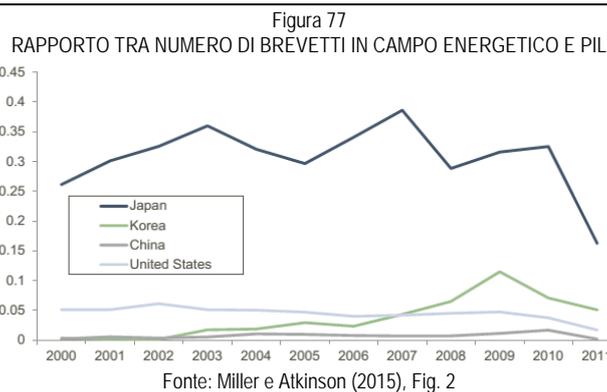
Fonte: Miller e Atkinson (2015), Fig. 1

L'esame della sola spesa in energie rinnovabili, scorporate dal totale della figura precedente, fa emergere il trend in aumento, diffuso in tutti i Paesi qui considerati, pur se con andamenti diversi tra loro (Fig. 76).



Come si vede, negli Usa il dopo-crisi è caratterizzato da un forte sussulto durante il biennio 2008-2009, dopo il quale inizia un trend decrescente, che però vede la spesa ad un livello quadruplo di quello pre-crisi, mentre la Corea quadruplica anch'essa le risorse investite, con una flessione nel 2010-2011, ma la traiettoria crescente dura da un decennio. La Cina oramai si colloca a livelli di spesa superiori a quello degli USA sia in termini relativi che assoluti, lo stesso dicasi per Giappone e Corea. Il Giappone, infine, presenta un deciso impulso di crescita nel periodo più recente, dopo anni di spesa in diminuzione.

Prendendo in considerazione il numero di brevetti a fini energetici richiesti simultaneamente negli Usa, in Giappone Cina e Corea (Fig. 77), si vede come Giappone e Corea sono nettamente al di sopra di Cina e Usa in termini di rapporto tra brevetti e PIL. Va comunque osservato che i Paesi in questione mostrano trend in diminuzione durante gli anni di crisi, ma la Corea e soprattutto il Giappone hanno attraversato un decennio di forte espansione brevettuale. È sorprendente l'evoluzione degli USA, che non riescono a raggiungere i trend dinamici degli altri tre Paesi.



Dai grafici emerge che, nonostante il buon ecosistema di organismi preposti alla progettazione strategica in campo energetico, tra cui soprattutto il *Department of Energy* (DOE),

il *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), l'*Advanced Research Projects Agency-Energy's* (ARPA-E's) (Atkinson, 2015), gli Usa hanno attuato in campo ambientale strategie innovative non molto efficaci. Analisti accreditati come Atkinson, che fanno capo al *Center for Clean Energy Innovation* e all'*Information Technology and Innovation Foundation* (ITIF) argomentano la necessità di una svolta nell'impostazione generale da parte degli Usa: la maggior parte dei fondi destinati all'ecosistema in questione non sono appropriati per le necessità strategiche, cioè attività di R&S per innovazioni radicali in tema di ambiente. L'impiego delle risorse è eminentemente incentrato sul *deployment*, ovvero sulla diffusione delle tecnologie esistenti, più che sullo sviluppo di innovazioni dirette a modificare il potenziale tecnico-scientifico, per poi dispiegare strumenti di varia natura (fiscali, monetari) diretti a stimolare investimenti privati per processi di spillover e diffusione. Investimenti soprattutto a fini di *deployment* sono giustificati, secondo Atkinson, sulla base della convinzione che strategie di sussidio fiscale e finanziario alla diffusione possano abbassare i costi e innescare un circolo virtuoso di innovazioni verso le rinnovabili. Secondo gli analisti dei due Centri occorrono invece strategie di medio-lungo periodo con obiettivi di trasformazione radicale, a partire dalle esigenze emergenti in materia ambientale e nell'intento di preservare così la leadership americana a livello internazionale nel rispondere ad una delle sfide più importanti del XXI secolo. La sintesi della svolta necessaria può essere trovata in questo brano di Atkinson (2015: 4): "Noi non abbiamo sviluppato computer perché era aumentato il prezzo della carta carbone per le macchine da scrivere, ma perché dovevamo decifrare i codici dei Paesi dell'Asse per vincere la Seconda Guerra Mondiale. In altre parole, noi abbiamo sviluppato computer perché abbiamo deciso che ne avevamo bisogno, e il governo ha finanziato la ricerca in modo tale da renderlo possibile. A quel punto il settore privato è intervenuto alla guida del settore e lo ha traghettato nel mercato. Il processo dovrà essere simile anche per il settore dell'energia pulita".

Riprenderemo tra breve l'esame delle strategie attuate negli Usa, perché appare opportuno mettere in evidenza un punto cruciale: la comparazione tra Paesi contiene dei *bias* nascosti, in quanto le transizioni socio-tecniche nell'uso di energia, ma anche di altre tecnologie *general purpose* come l'elettricità, richiedono lunghi periodi di tempo: la sostituzione del legno con il carbone è durata circa 60 anni (dal 1840 al 1900) (Yergin, 2015), per non citare il dibattito sul celebre "paradosso di Solow"; "You can see the computer age everywhere but in the productivity statistics" (We'd better watch out, The New York Times Books Review, 1987). David (1990) ha indicato fattori esplicativi delle difficoltà che insorgono nelle transizioni tra paradigmi, quelle che sono qui definite transizioni socio-tecniche: persistenza di componenti fisiche e infrastrutturali in via di superamento, lentezza nell'acquisire "nuove pratiche" e metodologie operative, *sunk costs* degli investimenti effettuati in passato, vischiosità dei sistemi finora dominanti. I motivi per cui vi è ciò che David chiama "*diffusion lag*", sono rafforzati nel caso delle energie rinnovabili per il fatto che il processo di trasformazione richiede grandi investimenti in infrastrutture, mentre sono necessarie ancora delle *breakthrough innovations* in tema di *energy storage* e tecnologia delle batterie, motori basati sull'idrogeno, e così via. D'altra parte la realizzazione di condizioni perché le nuove fonti energetiche divengano competitive non può avvenire in breve tempo, perché sono necessari altri mutamenti socio-tecnici attinenti ai modelli di consumo, agli stili di vita e alla riprogettazione di processi e prodotti (si vedano i capitoli 2 e 3) specie nelle parti concernenti i nuovi paradigmi di progettazione: Life Cycle Analysis, Industrial Symbiosis, Cradle to Cradle.

Fattori inerziali di natura culturale, politica, istituzionale, economica (interessi consolidati) rendono i processi di trasformazione vischiosi, se non addirittura paralizzati da fenomeni di

lock-in: in sostanza l'insieme di forze sistemiche che hanno favorito la stabilizzazione di un sistema socio-tecnico ne impediscono la trasformazione⁸¹.

Il passaggio ad un'economia basata sulle energie rinnovabili non sarà breve né indolore. Le rinnovabili comprendono l'energia idroelettrica, quella da biomassa (legno, emissioni del regno animale), i bio-carburanti, l'energia generata da fonti geo-termiche, onde oceaniche, sole e vento. Nelle pagine che seguono tratteremo in particolare l'energia eolica e quella solare, soprattutto in riferimento alle strategie attuate a riguardo in alcuni Paesi leader a livello mondiale, per i seguenti motivi: 1) esse sono le fonti energetiche maggiori per ordine di grandezza. 2) Possono essere considerate domini di conoscenza in cui si realizzano convergenze e complementarità interdisciplinari tra molte e differenti sfere tecnico-scientifiche: stoccaggio di energia, Big Data, *smart grid*⁸². 3) Il loro potenziale innovativo è considerato "dirompente" (Atlantic Council, 2015).

Per quanto concerne l'energia eolica e solare non appare arbitrario affermare che stiamo assistendo a qualcosa di analogo a quello che avviene nella potenza computazionale, anche se a ritmi esponenziali, ovvero la costante diminuzione del costo di entrambe dagli anni '80 e il continuo aumento della capacità produttiva installata in tutti i Paesi, insieme ad un aumento del rendimento energetico di dispositivi e materiali. Il loro ulteriore sviluppo va sempre incontro a dei limiti importanti, dati dall'intermittenza con cui i flussi energetici arrivano dal sole o dal vento e dal fatto che il loro pieno successo implica una transizione fondamentale: passaggio da sistemi centralizzati di produzione e distribuzione di energia a sistemi decentralizzati di produzione e distribuzione (*smart grid*). Tutto ciò comporta una completa riorganizzazione del sistema e dei meccanismi di monitoraggio e programmazione dei flussi, in stretta connessione con nuove tecnologie di *energy* e *data storage*. Un altro elemento importante è che la produzione viene decentralizzata, eventualmente associata anche a processi di co-generazione e alla rielaborazione strategica degli stili di produzione e di vita. Le connessioni con il Multiverso, la "fabbrica intelligente", la creazione di ecosistemi intelligenti sono evidenti: le piattaforme digitali esistenti⁸³ e quelle in corso di progettazione in vari Paesi sono applicabili alle città viste come sistemi (informativi, energetici, idraulici, infrastrutturali diversificati) e alle imprese, quindi sia ai modelli di organizzazione ed evoluzione urbana⁸⁴, sia a modelli di business di imprese e sistemi di imprese.

Approfondiamo brevemente la dimensione innovativa della transizione energetica, ovvero le direttrici tecnologiche per lo sviluppo del potenziale innovativo, in modo da mettere in risalto il ruolo dei vari attori e le strategie poste in essere da alcuni Paesi leader.

Sul piano delle tecnologie, prendendo in esame il solare, occorre tenere presente che sono nella fase della ricerca quelle che negli Usa sono definite celle solari di seconda generazione, basate sulle cosiddette *thin-film*, composte di silicio amorfo, oppure di materiali silicati come tellururo di cadmio (*cadmium telluride*) (MIT News, 2015). Si tratta di celle solari a fili sottili,

⁸¹ Per un'analisi interessante del consolidamento del sistema socio-tecnico incentrato sui combustibili fossili e sulla sua trasformazione in una serie di lock-in si veda Unruh (2000, 2002). Unruh (2002) descrive lock-in tecnologici, organizzativi, industriali, istituzionali.

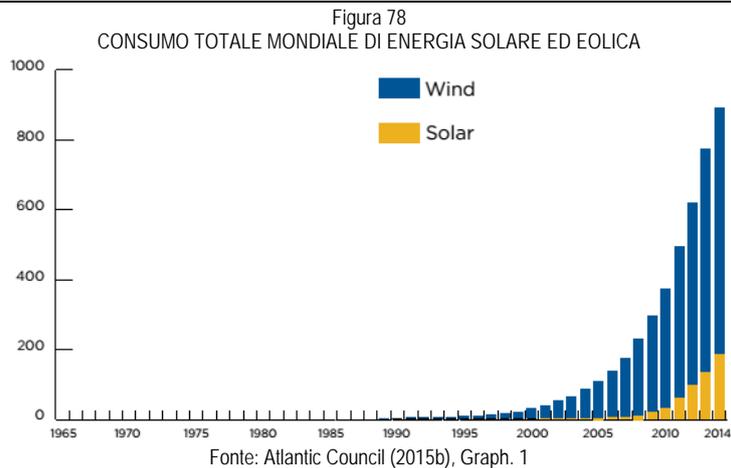
⁸² "A *smart grid* is a digitized infrastructure of the electricity system, transforming electricity systems much the same way that the smartphone transformed telecommunications from the use of landlines. It uses computer technology to create two-way between all nodes of the electricity network-supply, transmission, distribution, and consumption-creating a more efficient, reliable, and resilient system. Automated technology relays information from sensors and smart meters employed at homes and offices, allowing the utility to adjust and control power flows in real time in each individual device, or in millions of devices, from a central location", (Atlantic Council, 2015b: 7).

⁸³ Si ricordi la piattaforma Predix di GE utilizzata da PSEG, entità erogatrice di energia a New York, indicata nel cap. 3.1.

⁸⁴ Due filoni di ricerca molto interessanti a riguardo sono: 1) Elaborazione di modelli di analisi della "Senseable City" sviluppato dal "Senseable City Lab" del MIT attraverso un sistematico impiego di tecnologie dell'informazione (Martino *et al.*, 2010; Claudel *et al.*, 2016). 2) Analisi dei sistemi urbani come "sistemi viventi" ("*Living Cities*") (Geshenson, 2015; Dirks e Kelling, 2009; Dodgson e Gann, 2011).

che impiegano strati di materiali semiconduttori spessi pochi micrometri (un milionesimo di metro). Sono però anche allo studio di sviluppo celle di terza generazione, basate su materiali *nano-manufactured* (Atlantic Council, 2015). Ulteriori, complementari direttrici di ricerca sono in corso presso la Yale University (*blog environment 360*), con uno sviluppo delle attività in R&S per output che potrebbero abbassare sostanzialmente il costo dell'energia solare per gli anni dal 2030 in poi.

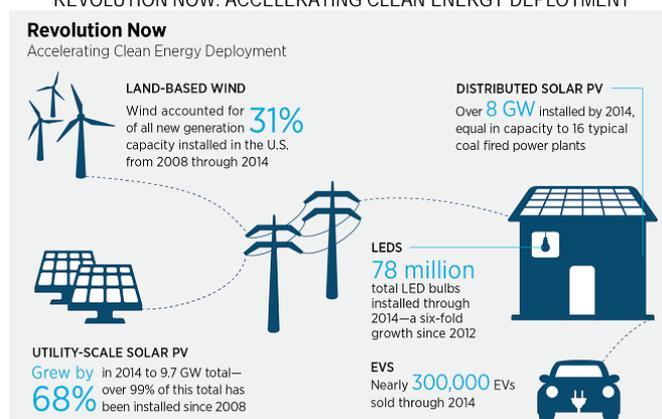
Per quanto riguarda l'energia eolica, l'ammontare di energia attualmente consumata, quindi anche prodotta, è molto maggiore di quella solare (Fig. 78).



A differenza dell'energia solare, quella *eolica* beneficia di rendimenti di scala nella produzione, con l'ulteriore vantaggio di ottenere costi sempre più bassi con impianti più grandi (economie di scala) ed è interessata da una serie di innovazioni tecnologiche, che hanno generato elevati aumenti di produttività ed un'espansione delle possibilità di impiego anche in aree geografiche in passato trascurate a causa della presenza di condizioni di vento meno favorevoli: miglioramento nei materiali (ceramica, grafene, fibre di carbonio), aumento delle dimensioni delle pale e ottimizzazione del loro design, ampliamento del diametro dei rotori e innalzamento del livello dal terreno del rotore centrale della turbina. L'integrazione tra una pluralità di fonti energetiche e il loro management può indurre cambiamenti tecno-economici di grande importanza (Fig. 79): emerge ancora una volta l'importanza di una visione sistemica e quindi dell'elaborazione di conseguenti strategie multidimensionali, che affrontino la complessità della transizione socio-tecnica.

Figura 79

REVOLUTION NOW. ACCELERATING CLEAN ENERGY DEPLOYMENT



Fonte: riportato da Atlantic Council (2015b), riprodotto da "Revolution... now" (Us Department of Energy, 2015b)

I cambiamenti climatici, il processo di industrializzazione di intere aree del mondo (l'Estremo Oriente e nei prossimi decenni l'Africa), le emissioni di CO₂ e l'effetto serra pongono grandi sfide all'intero Pianeta Terra, mentre si sta sviluppando un grande potenziale tecnico-scientifico, come abbiamo ribadito più volte nei capitoli precedenti. La conferenza di Parigi del Dicembre 2015 e gli sviluppi prima accennati indicano che, anche se forse in modo lento e contraddittorio, la transizione è iniziata ed è rilevabile un divario molto marcato tra potenzialità e azioni avviate dagli attori sul piano internazionale. È quindi opportuno analizzare, sia pure brevemente, le strategie già avviate e in corso di formazione di alcuni Paesi leader: Usa, Germania, Cina e le *Rising Tigers, Sleeping Giants* (Nazioni asiatiche).

In realtà i Governi dei vari Paesi hanno fatto ricorso a una serie molto ampia di iniziative, al fine di stimolare l'impiego delle energie rinnovabili e l'investimento in questo ampio e diversificato settore. Data la riluttanza a tassare le emissioni di CO₂ (*full price of carbons*), in genere i Governi preferiscono sussidi e regolamentazioni, dirette ad aumentare la profittabilità delle fonti energetiche alternative. Proprio il tipo di politiche rispetto alle quali Atkinson, precedentemente citato, richiede una svolta negli Usa, con un differente mix di assegnazione delle risorse: la quota maggiore all'ecosistema di Centri di Ricerca, che costituiscono un *hub* in campo ambientale.

Steer (2013) analizza le pratiche d'incentivazione in 50 Paesi, mostrando che sono preferiti strumenti quali le tariffe onnicomprensive (*feed-in tariffs*) oppure standard per le rinnovabili, tutte soluzioni altamente costose. Ripercorriamo allora con Rodrik (2014) le strategie e le misure adottate in Germania, Cina, India e negli Usa. Le principali conclusioni del suo lavoro sono che la Germania e la Cina stanno sviluppando le politiche più aggressive e mirate, mentre le altre impiegano un set di strumenti più diversificato.

Più precisamente, come si vede nella tabella 6, oltre alla riduzione delle emissioni di CO₂, le direttrici di azione maggiormente privilegiate sono: milioni di euro a supporto della spesa in R&S, prestiti a lungo termine con bassi tassi di interesse, fondi per finanziare programmi di ricerca per l'efficienza energetica, l'*energy storage*, la *smart grid*; iniziative per le tecnologie del clima, nell'intento di mobilitare la cooperazione tecnologica bilaterale con Paesi che rappresentano un alto potenziale per l'export tedesco.

Tabella 6

POLITICHE DI CRESCITA "VERDE" IN GERMANIA

Important laws and policies
 Energy Transition (2011): policy document phasing out nuclear energy by 2022, renewable energy and energy efficiency targets
 Energy Concept (2010): road map and commitment to reduce GHG emissions by 40 per cent by 2020 and 80-95 per cent by 2050
 Integrated Energy and Climate Programme (IEKP, 2007): defined primary and secondary legislation and support programmes for GHG reduction
 Adherence to EU Energy and Climate Package (20/20/20), including:
 - EU Emission Trading Directive
 - EU Effort Sharing Decision: binding annual GHG reduction targets for sectors not covered by the EU Emissions Trading System (ETS)
 - EU Renewable Energy Directive: binding national targets for raising the share of renewable energy in energy mix by 2020
 - EU Energy Service Directive
 - EU Energy Efficiency Directive
 2007 Biofuels Quota Act (mandates minimum percentage of biofuel-petroleum blend) and the 2011 Fuel Quality Ordinance
 Renewable Energies Heat Act (2009)
 Energy Saving Ordinance (2009): regulates energy performance of new buildings and provides energy certification of buildings
 Energy Industry Act (2005)

Tools used
 Direct funding to R&D in renewable energy and energy efficiency
 Feed-in tariff for renewable energy, together with 'market premium' allowing plant operators to sell renewable energy directly back into the grid and keep the premium
 Concessional lending/subsidies for renewable energy projects and energy efficiency improvements
 Insurance against non-discovery risk for geothermal energy
 Quotas for minimum percentage of biofuel in fuel
 New vehicle tax depending on vehicle carbon-dioxide emissions and type/size of engine
 Energy performance standards for buildings, appliances
 Participation in EU ETS
 Taxes on electricity and fuel use, but controversial exemption of energy-intensive industries if they commit to annual energy efficiency improvements
 State (Länder) support to renewable energies (varies by state)

Significant government programmes
 Sixth Energy Research Programme (€3.5 billion for research on low-carbon technologies)
 German Special Fund on Energy and Climate ("EKF")
 KfW Renewable Energies Programme
 KfW Offshore Wind Energy Programme
 Energy Efficiency Fund

Fonte: Rodrik (2014), Tab. 2

La Cina (Tab. 7) concentra i propri sforzi nella produzione di pannelli fotovoltaici per il mercato mondiale: per es. il *Golden Sun Program* con 20 miliardi di yuan a sostegno del mercato interno e il finanziamento del programma di dimostrazione all'estero. Parallelamente, dal 2008 è stato avviato un programma di incentivazione, che prevede 20 yuan per watt. La *China Development Bank* ha inoltre aperto linee di credito per 282 miliardi di yuan (pari a 45 miliardi di dollari) per l'industria delle energie rinnovabili. Non bisogna poi trascurare il fatto che Province e Municipalità cinesi hanno intrapreso autonome iniziative di incentivazione fiscale per promuovere investimenti nell'energia solare.

Important laws and policies

Renewable Energy Law (2006)

12th Five Year Plan (2011–2015): energy efficiency, carbon emissions reduction, and new energies are priorities

12th Five Year Plan for Energy Development

12th Five Year Plan for Solar Power

12th Five Year Work Plan on Controlling GHG Emissions

Energy Saving and New Energy Vehicle Development Plan (2011–2020)

National Medium- and Long-term Development Plan for Renewable Energy (2007)

Medium- and Long-term Energy Conservation Plan (2004)

Tools used

Feed-in tariffs for solar, wind (at the national and provincial levels)

Fiscal incentives to support R&D or manufacturing in renewable energies (including VAT and income tax breaks, exemptions from custom duties and import VATs)

Concessional lending for renewable energy projects

Subsidies to green technologies (including to solar photovoltaic (PV) manufacturers)

Mandated energy reductions for largest firms (~17,000 MW)

National cap on energy consumption, coal output

Forthcoming national emissions trading system (envisaged for 2016–20, following the pilot projects)

Forthcoming fuel economy standards for automotive industry

Direct funding to R&D

Significant government programmes

Pilot cap-and-trade programmes in Beijing, Tianjin, Shanghai, Chongqing, Shenzhen, and Guangdong and Hubei provinces, covering 256m people and accounting for 3.5 per cent of global economy

Solar Roofs Program and Golden Sun Program: provide investors with financial incentives and scientific and technological support for solar energy projects

Large R&D programmes, parts of which support clean tech development:

- National Basic Research Program ("Program 973")
- MOST's innovation fund for small technology-based firms
- MOST's National High-tech R&D Program ("863")
- Key Technologies R&D Program

Top 10,000 Enterprises Energy Efficiency Program

City-based pilot projects to construct low-carbon transport systems

Fonte: Rodrik (2014), Tab 3

Negli Stati Uniti (Tab. 8) l'American Recovery and Reinvestment Act del 2009 ha introdotto garanzie, incentivi fiscali, sussidi per attività di R&S e investimenti nelle rinnovabili con un ammontare di risorse finanziarie pari a 20 miliardi. Il Presidente Obama, nel 2013, ha annunciato un *Climate Action Plan*, basato su cinque direttrici, ulteriormente dettagliate nel Dicembre 2015 con stime abbastanza precise di risorse, target e step di realizzazione. L'Amministrazione Usa sta peraltro impiegando un ampio set di strumenti, come si vede dalla tabella 9.

Tabella 8
POLITICHE DI CRESCITA "VERDE" NEGLI USA (I)

Important laws and policies

Clean Air Act; National Energy Conservation Policy Act; Energy Policy Act of 2005
Energy Independence and Security Act of 2007; Energy Improvement and Extension Act of 2008
Food, Conservation, and Energy Act (2008 Farm Bill)
Executive Orders 13423 and 13514
American Recovery and Reinvestment Act of 2009: over \$80 billion to support clean energy R&D and deployment
Environmental Protection Agency (EPA)'s Final Greenhouse Gas Tailoring Rule (2010) and *proposed* Carbon Pollution Standard for New Power Plants

Tools used

Federal Production Tax Credit (PTC; about to expire) and Investment Tax Credit (ITC; or direct grants): the PTC reduces the federal income taxes of renewable energy facility owners per kWh produced, and ITC reduces federal income taxes for investments in renewable energy projects
Tax credits for energy efficiency upgrades (both for commercial entities and individuals) and purchases of electric vehicles
EPA standards for GHG emissions from mobile and stationary sources under the Clean Air Act (in process of being implemented but facing legal challenges)
Loan guarantees and concessional lending for projects that reduce GHG emissions
Grant funding for R&D in renewable energy, energy efficiency, carbon capture and storage, electric vehicle, fuel cell technologies
Grants to support training of 'green-collar' workers
Government procurement policies (e.g. purchasing energy-efficient vehicles)
Renewable fuel standards, fuel efficiency standards (Corporate Average Fuel Economy, or 'CAFE', standards), and a 'gas guzzler tax' on new cars
Accelerated deductions for renewable energy investments
Energy efficient mortgages
Qualified Energy Conservation Bonds
Manufacturing Tax Credits for manufacturers of energy efficient appliances; tax credits for gas stations/fuelling centres that install alternative fuel pumps; tax credits for alternative fuels
Federal appliance standards
Cap-and-trade (at the state level)
State-level Renewable Portfolio Standards

Fonte Rodrik (2014), Tab. 1, prima parte

Tabella 9
POLITICHE DI CRESCITA "VERDE" NEGLI USA (II)

Significant government programmes

Federal

Department of Energy (DOE)'s Office of Energy Efficiency and Renewable Energy programmes, including: Wind (including Wind Powering America), Solar (including SunShot Initiative), Bioenergy, Geothermal Technology, Hydrogen & Fuel Cell Technologies, Vehicle Technologies, Buildings, Energy Efficiency and Conservation Block Grant, and Weatherization and Intergovernmental programmes
Renewable Fuel Standard Program
DOE Section 1703 and Advanced Technology Vehicles Manufacturing Loan Programs
Energy Star
Federal support to states for renewable energy and energy efficiency programmes: DOE's State Energy and EPA's State Climate and Energy Partnership Programs
Renewable portfolio standards (RPS) in a majority of states (at least 33 have RPS standards or goals in place)
California cap-and-trade programme created regulations and market mechanisms to reduce the state's GHG emissions to 1990 levels by 2020, with mandatory caps beginning for significant emissions sources
Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI): mandatory cap-and-trade programme for fossil-fuel-fired power plants, consisting of Connecticut, Delaware, Maine, Maryland, Massachusetts, New Hampshire, New York, Rhode Island, and Vermont.
California's Alternative and Renewable Fuel and Vehicle Technology Program; California Solar Initiative, Go Solar California
New York State Energy Plan; Western Climate Initiative

Fonte Rodrik (2014), Tab. 1, seconda parte

L'India, infine, impiega un ampio set di incentivi fiscali, prestati a basso tasso di interesse, progetti-pilota (Tab. 10).

Tabella 10
POLITICHE DI CRESCITA "VERDE" IN INDIA

Important laws and policies

National Action Plan on Climate Change (2008), consisting of eight missions, including the National Solar Mission
Integrated Energy Policy (2006)
National Electricity Policy (2005)
Energy Conservation Act (2001)
Air (Prevention and Control of Pollution) Act (1981)
Environment (Protection) Act (1986)

Tools used

Renewable portfolio standard
Renewable Energy Certificates for wind, solar, and biomass power plants (but market near collapse)
Generation-based Incentives for wind and solar (providing payment per kWh) targeting large-scale independent power producers (on and off)
Accelerated depreciation for wind investments, targeting smaller investors (currently on hold)
Set of feed-in tariffs, varying by state and source type:
- State-level feed-in tariff for wind power for 13+ states
- National feed-in tariff only for federal or inter-state power generators (few)
- Gujarat has a feed-in tariff for solar-generated electricity, with at least two other states possibly following suit
Fiscal incentives (e.g. reduction of tariffs on solar imports and concessional lending)
Subsidies to R&D in renewable energy
(Planned) Insurance for solar power producers against default by state utilities ("Solar Payment Security Account")
(Planned) Pilot Emissions Trading Schemes in three states

Significant government programmes

Jawaharlal Nehru National Solar Mission
National Mission for Enhanced Energy Efficiency
National Clean Energy Fund (funded by coal tax)
Solar Cities Development Programme (forthcoming)

Fonte: Rodrik (2014), Tab. 4

Soffermiamoci brevemente su ciò che viene realizzato in un Paese cruciale per l'Europa, cioè la Germania, che è tra i Paesi leader quello con uno dei Programmi più ambiziosi in termini di strategie per la transizione energetica (*Energiewende*). Il punto di partenza dell'*Energiewende* è stato il *Renewable Energy Act (EEG)* del 2000, che introdotta il cambiamento strategico verso le rinnovabili (soprattutto solare ed eolico) con politiche basate su tariffe fisse, garanzia di acquisto e priorità e tariffe onnicomprensive per le rinnovabili (BMW, 2014, 2016a; EEG, 2014).

Le rinnovabili, nell'arco di alcuni anni, sono così passate dal ruolo di "nicchie" al 25% della produzione di elettricità, mentre nello stesso periodo il nucleare è diminuito ma l'incidenza del carbone e della lignite non è praticamente cambiata, anzi ha forse realizzato un leggero aumento. L'EEG è stato riformato nel 2014, anche per far fronte ad uno degli effetti dell'*Energiewende 1.0*, cioè l'aumento dei costi dell'energia, con ripercussioni negative sulla competitività dell'apparato industriale⁸⁵. Tra gli aspetti più importanti delle politiche tedesche in campo energetico, a partire dalla fine degli anni '90, è il progressivo abbandono del nucleare, nonostante la sequenza di coalizioni e i differenti orientamenti politici, con un'accelerazione dopo il disastro di Fukushima. Nel 2014 inizia l'*Energiewende 2.0*, che vede un'accentuazione delle misure per le rinnovabili e con la fissazione di obiettivi piuttosto ambiziosi: 40-45% della produzione di elettricità da rinnovabili nel 2025, sulla base dello stesso schema di supporto, incentrato sul *feed-in-tariff*. Nel luglio 2016 Bundestag e Bundesrat hanno approvato nuovi provvedimenti, che "scrivono un nuovo capitolo dell'*Energiewende*" (BMW, 2016b). Dopo le liberalizzazioni degli anni '90 e la creazione di un mercato dell'elettricità, integrato con le rinnovabili, i capisaldi della strategia per la nuova fase sono: 1) creazione di un vero mercato per le rinnovabili, in cui si confrontino liberamente domanda e offerta. 2) Costruzione di

⁸⁵ Per una analisi dell'evoluzione delle strategie tedesche in campo energetico, si veda DBR (2013, 2014)

un'infrastruttura digitale capace di connettere più di 1,5 milioni di produttori e grandi consumatori. 3) Adozione di un approccio europeo per la transizione energetica (*Pan European approach*).

In Germania la centralità di un approccio europeo è ormai un tratto cruciale della regolazione di più alto livello: un documento importante, redatto da tre meritorie istituzioni culturali e scientifiche (German National Academy of Sciences Leopoldina, Acatech National Academy of Science and Engineering, Union of the German Academies of Sciences and Humanities, 2015) ha sottolineato la rilevanza di alcuni fattori: 1) creazione di un mercato europeo delle rinnovabili. 2) Armonizzazione delle politiche energetiche nazionali. 3) Determinazione di nuovi standard per infrastrutture energetiche (ancora sottosviluppate in Germania ed Europa). 4) Estensione degli ETS (*emissions trading systems*, cioè il mercato delle emissioni⁸⁶) a settori non inclusi: trasporti, riscaldamento.

Nel dibattito sviluppatosi in Germania non mancano obiezioni e critiche a *Energiewende 1.0 e 2.0*, che si incentrano soprattutto sul fatto che -specie con *Energiewende 2.0*- sembra si stia tornando indietro rispetto alla liberalizzazione del mercato (BCG, 2014c), mentre aumenta il divario tra ciò che si sta raggiungendo e gli obiettivi prefissati (DBR, 2016).

Da questo breve excursus sulle esperienze di Paesi di primo piano nello scenario mondiale dei prossimi decenni si evince chiaramente che la digitalizzazione dei processi e dei prodotti non può essere disgiunta dall'orizzonte della *green economy*, vista non tanto come risposta a vincoli crescenti sul piano delle risorse e dell'alterazione delle condizioni di vita, quanto e soprattutto come “potenziale tecno-economico” da “liberare”.

A tal fine riteniamo che occorra riflettere attentamente sui processi decisionali e sul ruolo e la funzione dello Stato e delle Istituzioni in genere nella dinamica innovativa incentrata su quella che abbiamo chiamato transizione socio-tecnica.

Sorgono evidentemente questioni di grande rilevanza, sulle quali rifletteremo traendo ispirazione da autorevoli studiosi quali Mazzucato, Perez, Rodrik, Stirling.

6.2

Una visione strategica per le sfide del XXI secolo

La sintetica rassegna delle strategie e delle politiche attuate in Paesi importanti per l'economia mondiale induce ad alcune riflessioni di carattere generale.

Non esiste una soluzione taumaturgica, ovvero una ricetta univoca (*one size fits all*) con ingredienti ben definiti; tantomeno appare esistere uno strumento in grado di risolvere le questioni che sorgono nel corso di una transizione energetica. Il mix variabile di componenti delle visioni strategiche e delle azioni progettate, quindi intraprese, necessariamente riflette la inerente complessità delle transizioni in sistemi socio-tecnici, dove fattori e processi coinvolti, interdipendenze e complementarità sono tali da rendere fallimentari le visioni unidimensionali, esclusivamente focalizzate su “interesse pubblico” oppure all'opposto sul “libero mercato”.

I punti emersi in questo capitolo e in quelli precedenti portano a ritenere molto interessante e degno di un'accurata riflessione il framework teorico ed empirico proposto nel “A New

⁸⁶ Per una spiegazione degli ETS a livello europeo si veda il contenuto del sito ufficiale https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm.

Manifesto for Innovation, Sustainability and Development”, elaborato da un gruppo di studiosi inglesi⁸⁷.

Tra i punti salienti del *New Manifesto*, del documento preparatorio (Stirling, 2009) e dei contributi successivi (Stirling, 2011) è innanzitutto la consapevolezza che occorre superare una visione del progresso “singola, apparentemente unitaria”, per adottare invece una prospettiva pluralistica, perché non esistono direzioni univoche nella dinamica tecno-economica, bensì una molteplicità di possibili direttrici di lungo periodo, correlate alla co-evoluzione di tecnologie, culture, Istituzioni, come è avvenuto dall’inizio della Rivoluzione Industriale (Freeman e Louça, 2002).

Nell’evoluzione di lungo periodo delle economie sono individuabili patterns evolutivi, con shift e salti da un sistema all’altro, a seconda delle forze socio-economiche che convergono nell’influenzare le scelte verso l’una o l’altra delle potenziali configurazioni. Difatti una pluralità di attori si misurano e coordinano energie e sforzi strategici per sviluppare processi di scelta consapevoli, commisurati a una “molteplicità di opzioni tecnicamente fattibili ed economicamente potenzialmente ragionevoli, ognuna delle quali possa rappresentare il fulcro di una transizione di sistema” (trad. nostra di Stirling, 2009: 15-16).

Un aspetto basilare è pertanto uno schema concettuale basato sul futuro come set di possibilità, potenzialità da conoscere e valorizzare-sviluppare. A tal fine, come si afferma nel *New Manifesto* (nota 78), stiamo vivendo in un mondo sempre più interconnesso e globalizzato, dove la povertà è ancora un fenomeno generalizzato e la crisi ambientale è incombente, ma al tempo stesso si stanno realizzando progressi tecnico-scientifici senza precedenti (ivi, p. 1). Per cogliere le opportunità e le sfide “È necessario un cambiamento radicale nel modo in cui pensiamo e realizziamo l’innovazione” (p. 2); in particolare “ci stiamo muovendo verso una più ampia comprensione dei sistemi di innovazione- includendo in essi le policy implementate, le capabilities istituzionali, i processi organizzativi e le relazioni sociali” (ivi, p. 8).

In tale quadro il futuro non è un percorso obbligato verso la sostenibilità, con strumenti ben definiti per raggiungerla, bensì un set di possibilità, potenzialità da realizzare attraverso tentativi di definire strategie e strumenti appropriati a contesti caratterizzati da una pluralità di agenti e interessi di varia natura. Tutto questo accade mentre l’evoluzione tecnologica si sviluppa con una sequenza inarrestabile di successive diramazioni dell’“albero della ricerca tecnico scientifica” (*branching process of technology*), e più in generale dell’“albero della conoscenza” umana (*knowledge tree*), nella ricerca incessante di trovare soluzioni ai problemi che via via emergono nella dinamica della società. Proprio questo continuo *branching process* conferisce all’evoluzione tecno-economica caratteristiche importanti: indeterminatezza (*open-endedness*), molteplicità di sentieri socio-tecnici e di cambiamenti possibili, multi-dimensionalità dei processi che evolvono in modo non sempre convergenti. Anzi il susseguirsi di sequenze di fasi contraddistinte da convergenze interrotte da discontinuità è proprio una caratteristica dell’evoluzione capitalistica degli ultimi due secoli. Pattern ricorrenti di nascita e diffusione di nuovi paradigmi tecno-economici, sostenuti e al tempo stesso “minati” da bolle finanziarie di varia intensità, sono interrotti da discontinuità più o meno rilevanti, con l’esplosione di “micro-bolle speculative” nelle fasi intermedie della dinamica di una data traiettoria tecno-economica e di “macro-bolle” nel *crash* finale della stessa traiettoria (Perez, 2013)⁸⁸. Pattern ricorrenti, discontinuità e molteplicità delle configurazioni possibili portano a caratterizzare l’innovazione come “un vettore piuttosto che una quantità scalare. Diversamente dai semplici numeri scalari, i vettori includono parametri

⁸⁷ “‘*New Manifesto*’ on innovation, sustainability and development” è stato elaborato nell’ambito di una iniziativa del *UK Economic and Social Research Council Centre at the University of Sussex on Social, Technological and Environmental Pathways to Sustainability (STEPS)*. Uno dei principali animatori è il prof. Andrew Stirling.

⁸⁸ Perez (2013) ricostruisce in modo puntuale questi pattern ricorrenti, con particolare riferimento alla traiettoria basata sulle ICT, caratterizzata attraverso la crisi del 2001 e il *crash* finale odierno, preparatorio di una transizione socio-technica dalle grandi potenzialità (*unleashing the potential*), che però richiedono appropriate strategie di medio-lungo periodo.

di direzionalità addizionali che rendono sempre più difficile sostenere un unico e verosimilmente univoco obiettivo “modo di procedere” (Stirling, 2009: 17).

La concezione dei processi innovativi come vettori implica che le direttrici delle transizioni socio-tecniche non sono univoche, perché possono emergere ed essere prese in considerazione nuove dimensioni proprio per la *multiply-branching nature* del cambiamento tecno-economico.

Indeterminatezza e talvolta ambiguità, quindi, ma ciò non comporta paralisi decisionale, perché significano apertura di nuovi scenari per la società e le sue varie componenti. Il problema di fondo è che queste ultime devono essere in grado di sviluppare culture e competenze tali da consentire l’elaborazione di strategie in grado di scoprire “*hidden pathways*”. Da questi ultimi possono infatti derivare avanzamenti socio-tecniche più o meno rilevanti a seconda della validità delle scelte e delle congruenze tra queste e le possibilità di sviluppo multi-dimensionale.

Non esistono dunque, di fronte ai sistemi economici e sociali, soluzioni univoche, frutto di processi lineari e unidirezionali, bensì una molteplicità “nascosta” di direzioni possibili, che occorre conoscere attraverso sforzi sistematici di ricerca ad ampio spettro, per poi prendere decisioni di lungo respiro, che orientino l’evoluzione sociale nel prossimo futuro alla luce delle sfide emergenti.

Sulla base di queste riflessioni, data l’esistenza di una pluralità di possibili direttrici nelle transizioni socio-tecniche, l’incertezza intrinseca agli scenari evolutivi dovrebbe indurre ad adottare un *portfolio approach*: non scelte unidimensionali, bensì un set di opzioni alternative, che possono generare effetti positivi, potenzialmente esclusi dalla selezione di qualsiasi singola opzione.

In scenari di tale natura i processi innovativi devono essere ripensati, partendo dal concetto di sistema innovativo e dall’esistenza di una molteplicità di agenti e strategie che interagiscono, in relazione a ruoli e funzioni che possono anche essere tra loro contraddittorie, ma tra le quali occorre sviluppare congruenza e compatibilità mediante la partecipazione e la condivisione delle scelte. In mancanza di queste ultime non possono realizzarsi circuiti virtuosi e feedback positivi tali da consentire transizioni socio-tecniche con esiti favorevoli in termini di crescita sociale ed economica.

Entro un orizzonte così definito il ruolo e la funzione dello Stato e delle Istituzioni assumono un rilievo peculiare, tenendo sempre presente che, dato uno schema concettuale di fondo, le specificità storiche e tecnico-economiche (cosiddette *contingencies*) non possono essere trascurate, ma devono costituire una parte importante delle strategie di cambiamento sistemico.

Ai nostri fini è di particolare rilievo il dato che l’aumento del potenziale tecnico-scientifico e l’altezza delle sfide ci devono indurre ad affrontare una serie di interrogativi, connessi ad un “*pluralising progress*”: “*Which way? What alternatives? Who says? Why?*” (Stirling, 2009: 5).

L’evoluzione socio-economica non è predeterminata dalla dinamica tecnologica: essa è la risultante della combinazione sinergica di una serie di fattori, processi e ruoli svolti dagli agenti. Così è ad esempio accaduto nelle fasi immediatamente post-belliche, quando il trentennio di sviluppo a livello internazionale si è basato su elementi fondamentali come il *welfare state*, i contratti di lavoro stabili, la sindacalizzazione, l’intervento pubblico anticiclico e gli investimenti pubblici in settori strategici.

Ciò che abbiamo messo in evidenza nelle pagine precedenti spinge a condividere la tesi di Carlota Perez (2014)⁸⁹ per cui siamo in un momento storico equivalente a quello del dopoguerra: globalizzazione, paradigma dell’ICT, crescenti sfide ambientali, insieme alle tecnologie dirimpenti e alle discontinuità tecnologiche in gestazione (*quantum computing*) delineano un orizzonte di grandi potenzialità: “*What is lacking is a set of policies to tilt the*

⁸⁹ *A New Age of Technical Progress*, Policy Network, http://www.policy-network.net/pno_detail.aspx?ID=4717, editor.

playing field in a clear direction in order to generate synergies -suppliers, distribution, skills and other shared factors- as occurred with suburbanisation in the post-war boom” (Perez, 2014, 23-24).

Occorre allora concepire e progettare un futuro in cui esistano le condizioni affinché innovazioni e investimenti possano essere motori dello sviluppo globale. In tale prospettiva “*The most promising direction for a global boom is a green growth*” (Perez, 2014: 24), da intendersi in questo modo: tecnologia, globalizzazione e sfide ambientali da ostacoli e vincoli devono diventare direttrici di ricerca per la soluzione dei problemi odierni di crescita, competitività e occupazione. *Green growth* deve essere quindi concepita come elaborazione di traiettorie e metodi di sviluppo che convergono sulla base di strategie, progetti, meccanismi e strumenti che creino esternalità positive per tutti. Il potenziale tecnico-scientifico esistente e in preparazione può fornire un ampio set di possibilità per modificare profondamente i pattern di consumo e di produzione, con mix di beni tangibili e intangibili che oggi non possono essere nemmeno immaginati, ma di cui nei capitoli precedenti abbiamo indicato alcuni possibili componenti basilari: progettazione di reti elettriche e città intelligenti, *smart grid*, *smart homes*, C2C, simbiosi industriale, controllo e miglioramento degli stili di vita della popolazione. Trasformare la globalizzazione in una “*global sustainable age*” (Perez, 2014: 24) è possibile se si attuano scelte “coerenti e mutualmente rinforzantesi tra Paesi”. Ciò implica che una funzione molto importante compete all’operatore pubblico.

Bisogna essere altresì consapevoli del fatto che, come sostengono Hallegatte (2011) e Hallegatte *et al.* (2012), il passaggio *from growth to green growth* è necessario, perché le politiche per l’ambiente possono migliorare i fattori ambientali e produrre tre tipologie di effetti: 1) *effetti di efficienza*, in quanto capaci di migliorare l’impiego delle risorse ai fini dell’efficienza energetica, ovviando così ai “fallimenti del mercato” (Gillingham *et al.*, 2009). 2) *Effetti di stimolo*, perché gli investimenti in energie rinnovabili possono accrescere le potenzialità occupazionali e la produzione di ricchezza, specialmente durante le fasi recessive come quella odierna, caratterizzata da insufficiente utilizzazione delle risorse. 3) *Effetti di innovazione*, perché la fissazione di standard e di vincoli sulla base di esigenze di protezione dell’ambiente, può generare spinte e pressioni verso uno spostamento della frontiera di produzione, accrescendo il potenziale di output di un’economia, attraverso l’accelerazione dello sviluppo e della disseminazione di innovazioni e di spillover della conoscenza.

Un altro aspetto molto significativo è poi il fatto che le politiche per l’ambiente possono anche migliorare il benessere mediante il loro cosiddetto *impatto distributivo*, cioè le conseguenze positive dell’adozione di strumenti e meccanismi idonei a far sì che gli effetti benefici sulle condizioni di vita e di salute non ricadano solo sulle fasce di popolazione più agiate, ma anche su quelle meno abbienti.

In presenza di processi dinamici come quelli odierni appare allora opportuno riprendere le riflessioni sviluppate in Mazzucato (2015a) circa il ruolo dei *policy makers*, cui compete “comprendere come particolari strade e direzioni possono essere scelte e determinare come mobilitare e gestire attività che possono portare al superamento delle sfide della dinamica sociale e tecnologica” (Mazzucato, 2015a: 122).

La *green economy* come occasione, dunque, di *green growth*, definita “come una traiettoria dello sviluppo economico basata sull’utilizzo sostenibile delle risorse non rinnovabili e che internalizza interamente i costi ambientali, inclusi quelli più critici relativi al cambiamento climatico” (Rodrik, 2014: 469).

La molteplicità delle scelte possibili, la pluralità degli agenti, le ragioni delle scelte consapevoli e partecipate dovrebbero pertanto costituire i temi centrali e i principi ispiratori

dell'intervento pubblico specie nell'odierna fase storica, caratterizzata dall'espansione del Multiverso e dalla transizione socio-tecnica.

In questa prospettiva, in merito alle grandi questioni trattate nella Conferenza di Parigi del Dicembre 2015 e alla digitalizzazione di processi e prodotti, i contributi di Mariana Mazzucato (2013, 2014a,b) sembrano molto pertinenti. È necessario superare l'orizzonte teorico e pratico, incentrato sulla concezione statica dello Stato che interviene con l'analisi di costi e benefici per rimediare ai fallimenti del mercato nell'allocazione delle risorse date, per assumere invece una visione che ponga al centro la natura intrinsecamente dinamica dello sviluppo economico e quindi il rischio di *mismatch* tra esso e gli strumenti statici, impiegati da una parte consistente della teoria economica per valutare l'allocazione delle risorse (Mazzucato, 2015a: 122-123). Durante i processi di trasformazione, specie se di intensità quasi senza precedenti, come quelli odierni, gli interventi pubblici puramente *correttivi* sono non solo limitanti, ma anche rischiosi perché ad elevato rischio di inefficacia, data l'intensità della dinamica tecno-economica e quindi la variabilità dei contesti entro cui si sviluppano i processi decisionali.

Bisogna adottare un differente punto di vista: durante le fasi di cambiamento radicale, come quelli sintetizzati per esempio nel *New Manifesto*, lo spazio di azione per l'operatore pubblico si amplia, perché lo Stato "può trasformare e creare nuovi orizzonti mai esistiti prima" (Mazzucato, 2015a: 122).

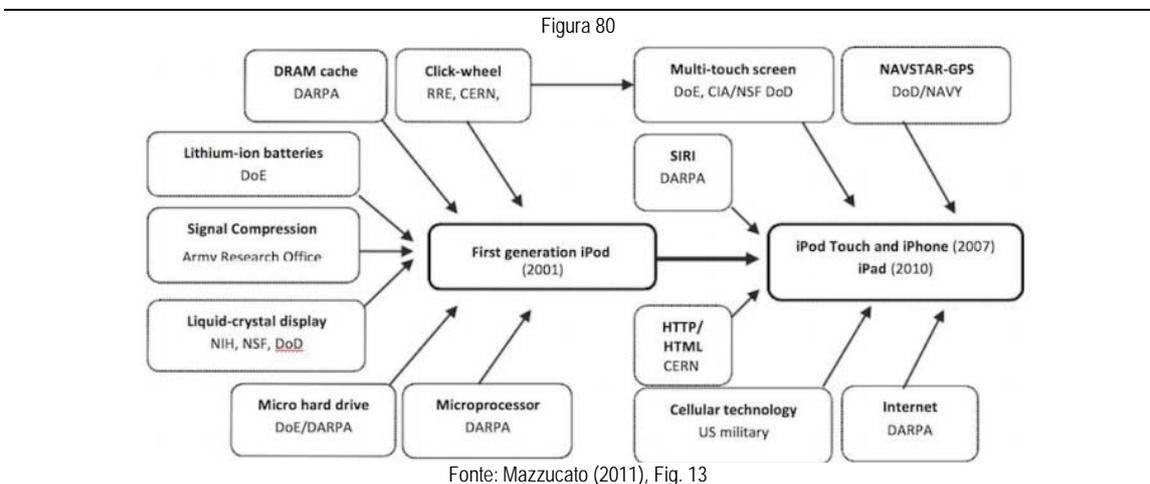
In contesti dinamici, specie quando occorre lavorare per obiettivi di medio-lungo periodo e di portata rilevante, è necessario che le Istituzioni adottino comportamenti dinamici e siano in grado di "modellare" nuovi mercati, creandone le condizioni basilari, come è avvenuto nel caso di Internet, delle nanotecnologie, delle biotecnologie e come avviene attualmente per l'Intelligenza Artificiale e le energie rinnovabili.

Proprio in periodi caratterizzati da profonda incertezza, ambiguità degli orizzonti strategici e rischi più o meno alti di effettuare errori il ruolo del potere pubblico non può consistere nell'assistere passivamente alla dinamica del mercato, adottando strategie cosiddette "*topick the winner*", ovvero ottiche di valutazione ex post degli esiti, per poi eventualmente correggere i "fallimenti del mercato". Con tale tipo di strategie, infatti, si corre il rischio di accettare l'unidirezionalità determinata da uno o pochi attori della complessa dinamica dei sistemi socio-tecnici, con il rischio di dover accettare spinte e pressioni evolutive eterodirette, rispetto alle quali si perde il controllo, pagandone però i costi sociali ed economici, sempre prodotti da processi di cambiamento.

Le sfide globali dell'epoca attuale e le discontinuità che dovrebbero verificarsi nel rispondere ad esse richiedono un cambiamento del paradigma tecno-economico, come quello avvenuto con il passaggio dalla produzione di massa al *flexible network model* (Perez, 2001), reso possibile dall'esistenza di infrastrutture materiali e immateriali quali le ICT, che hanno alla base grandi investimenti pubblici Usa e rilevanti partnership pubblico-privato. Il ruolo svolto da organismi pubblici come il DARPA (*Department Advanced Research Projects Agency*), il NIH (*National Institute of Health*), la NAS (*National Academy of Science*), il DoD (*Department of Defense*), quindi dalle strategie pubbliche e dalle ingenti risorse investite negli Usa per grandi progetti tecnico-scientifici nell'elettronica, nell'aeronautica, nella sanità, nella chimica, nelle biotecnologie, ecc. La capacità dell'operatore pubblico di definire obiettivi innovativi di medio-lungo termine e lo sviluppo di progetti congiunti con attori privati (imprese americane e di altri Paesi) sono stati gli elementi fondamentali, che hanno consentito agli Usa di produrre innovazioni tecnico-scientifiche ed economico-produttive di grande portata. La diffusione di queste ultime è stata poi alimentata da altri fattori convergenti: mercato dei capitali molto dinamico, attori peculiari come *venture capitalist* e figure imprenditoriali peculiari, insieme

all'esistenza di alcuni *hub* universitari e territoriali particolarmente dinamici nel disseminare conoscenze e culture creative dalla California, al Texas, al Massachusetts.

Una rappresentazione efficace dell'intreccio di fattori che sono alla base della capacità innovativa statunitense nell'era dell'*information age* è contenuta nella figura 80 da cui si evince la funzione propulsiva degli attori pubblici nell'innescare nuove direttrici strategiche e traiettorie tecno-economiche innovative.



Siamo così di fronte a soggetti pubblici in grado di svolgere funzioni cruciali in “*leading radical innovation*” (Mazzucato, 2013) attraverso grandi investimenti in traiettorie di ricerca basilari, sulle quali si sono poi realizzati cambiamenti tecno-economici diffusi a livello internazionale (Mazzucato, 2014b), grazie appunto all’azione di una serie di attori privati e di dinamiche configurazioni di mercato (deregolamentazione e globalizzazione dei mercati), che hanno innescato circuiti di feedback positivi tali da portare allo spazio connettivo globale, creando quindi a loro volta le premesse per una incombente nuova discontinuità tecno-economica: Multiverso, tecnologie dirompenti, sviluppi dell’intelligenza artificiale.

Possiamo guardare a interventi di questo tipo secondo un’altra prospettiva, cioè inquadrarli come tentativi riusciti di influenzare direttrici evolutive di lungo termine dell’economia, mediante l’elaborazione di linee strategiche e la conseguente realizzazione di progetti basati sulla *co-creation* di nuovi itinerari di ricerca da parte di una pluralità di soggetti. Non pianificazione dall’alto, quindi, bensì mix di processi top-down e bottom-up al fine di modellare la dinamica tecno-economica in relazione a finalità strategiche chiaramente enunciate.

Cerchiamo allora di argomentare come la *green growth* comporti nuovi spazi per le politica industriale, intesa come intervento pubblico diretto a promuovere e favorire processi di ristrutturazione delle economie in modo complementare e non sostitutivo rispetto alle “forze di mercato”. Ciò è possibile se si supera l’approccio standard di politica industriale, secondo il quale il focus della politica industriale sono le “esternalità” tecnologiche ed economico-sociali in genere, oggetto di misure correttive per ovviare ai “fallimenti del mercato”, che si hanno quando il sistema produttivo non riesce a raggiungere soluzioni efficienti, cioè ottimali, dal punto di vista del benessere economico-sociale. Asimmetrie informative e contratti incompleti dei diritti di proprietà, nella visione standard, possono far sì che il mercato non raggiunga soluzioni efficienti, per cui lo Stato deve intervenire con l’imposizione fiscale (imposte, sussidi). Questo schema teorico ed operativo colloca gli attori in una prospettiva statica, ovvero di utilizzo di stock di risorse date.

Per contro nei processi di intensa trasformazione e di forte dinamica innovativa, oppure ancora quando le società devono affrontare enormi sfide come quelle indicate nel corso di tutto questo lavoro, siamo di fronte all'ignoto, a potenzialità solo in parte conosciute, a scenari in gran parte da definire. In un orizzonte di questo tipo la politica industriale deve essere pensata come un "processo di scoperta" (Rodrik, 2004), all'interno del quale imprese e Istituzioni devono sviluppare processi di apprendimento circa costi e opportunità e quindi impegnarsi in scenari incentrati sul coordinamento strategico. In queste situazioni, infatti, la strategia tradizionale basata su "to pick the winner" diviene velleitaria se non controproducente, perché non in grado di individuare e "liberare" il potenziale tecnico-produttivo delle fasi di transizione socio-tecnica.

Partiamo allora da un'assunzione di base: nessun attore possiede perfetta informazione, né le imprese private né lo Stato. Proprio l'"ignoranza" crea lo spazio per l'intervento pubblico, perché in tali situazioni, contraddistinte dal possibile innesco di traiettorie di ristrutturazione e diversificazione produttiva, è importante sviluppare processi strategicamente coordinati di sperimentazione e scoperta di quali nuove attività produttive possono essere avviate e a quali costi.

Sperimentazione e direttrici innovative determinano, però, condizioni di elevata incertezza, connessa alla rischiosità degli esiti e, aspetto da non trascurare, ad una alta probabilità di errore, quindi di *failure*. Tali aspetti e le loro potenziali conseguenze negative sono poi amplificate quando sia necessario intraprendere iniziative che richiedono un grande ammontare di risorse, unite a profondi mutamenti di competenze tecnico-produttive e dei modelli di produzione e consumo. I processi decisionali di investimento privato divengono allora più contenuti e il "processo di scoperta" meno dinamico, con il rischio che a tutto il sistema economico-produttivo sfugga la possibilità di attingere ad un potenziale esistente, ma incognito. In tali casi diviene quindi elevato il rischio di *system failure* e non solo di *market failure*.

In tale eventualità spetta allora allo Stato favorire e sviluppare *esternalità informative*, cioè interventi diretti a sostenere e rafforzare un set di alternative tecnico-scientifiche e produttive, stimolando dinamiche di diffusione, il cui pieno dispiegamento dipende da come evolvono le *contingencies*, cioè dalle tipologie di fattori economici-sociali, culturali, istituzionali entro cui essi si inseriscono.

Bisogna precisare che non si tratta di richiedere l'azione pubblica perché lo Stato possiede l'informazione completa sugli "stati del mondo" e sul futuro, bensì il contrario: essa è resa necessaria dal fatto che, proprio l'"ignoranza generale", richiede che si valorizzino le esternalità informative derivanti dalle azioni di sperimentazione intraprese da una pluralità di attori. Su questa base anzi l'intervento pubblico diviene essenziale, perché la sua funzione principale consiste nell'effettuare investimenti in grado di orientare direttrici di trasformazione, svolgendo un cruciale funzionamento di coordinamento e indirizzo strategico verso la pluralità degli attori coinvolti.

Nei periodi storici caratterizzati da incertezza e rischiosità delle scelte non si deve procedere "alla cieca"; proprio per ridurre i rischi di *failures* è fondamentale acquisire il maggior volume possibile di informazioni, elaborare il massimo di conoscenza possibile sviluppando nuove basi conoscitive e accrescendo la consapevolezza diffusa delle scelte da compiere.

Digitalizzazione di processi e prodotti, insieme alla *green economy*, costituisce da questo punto di vista un ambito di intersezione nodale tenendo sempre presente che, proprio per le sue caratteristiche, questa fase non implica un percorso lineare e unitario, bensì la presenza potenziale di una molteplicità di itinerari possibili. Bisogna peraltro rilevare che, come abbiamo precedentemente visto, in vari Paesi si sta già investendo un rilevante ammontare di risorse.

Di qui la necessità che lo Stato svolga una funzione decisiva, sulla base di principi e criteri operativi del tutto nuovi. La funzione a cui ci riferiamo è quella di "catalizzatore" dei processi

innovativi, sulla base di attività di coordinamento strategico tra una pluralità di attori. Si tratta infatti di accelerare in modo efficace ed efficiente processi di collaborazione e partnership strategico-progettuali pubblico-privato, inserite in uno scenario di elevata incertezza e ad alto rischio. Sulla base delle riflessioni precedenti è importante che si adotti un *portfolio approach*, proprio per la molteplicità delle traiettorie possibili e delle opzioni che possono essere teoricamente conosciute⁹⁰.

I due principi di fondo (funzione catalizzatrice e *portfolio approach*) possono essere concretizzati attraverso appropriati criteri operativi, che con Rodrik (2014: 483-488) possiamo così sintetizzare: 1) *embeddedness*, cioè collaborazione strategica e coordinamento tra settore privato e agenti pubblici nel “processo di scoperta”, che è il filo conduttore della “*green industrial policy*”, tenendo ben fermo il punto che “*Government agencies need to be embedded in, but non in bed with, business*” (p. 485). 2) *Discipline*, che significa evitare abusi mediante chiarezza di obiettivi misurabili, anche se in tema di innovazioni tecnologiche il monitoraggio e la valutazione sono molto difficili, ma non impossibili, specie se si adotta un mix di strumenti quali: A) riduzione dei costi, per esempio nel produrre energia; B) attività di brevettazione; C) sviluppo di cluster; D) indicatori di spillover tra imprese; E) Impiego di audit da parte di specialisti. 3) *Accountability*, che richiede agli attori pubblici di spiegare chiaramente e con adeguati flussi informativi “cosa stanno facendo e come operano”.

Gli indicati principi e criteri operativi potrebbero essere estremamente utili affinché il potenziale tecnico-scientifico, ancora noto solo in parte, possa essere progressivamente colto e valorizzato attraverso un processo di “sperimentazione e scoperta”, che veda una molteplicità di protagonisti in grado di sviluppare interazioni strategiche proficue per il futuro del sistema economico-produttivo.

Lo schema concettuale di fondo è quello proposto da Rodrik (2014: 3), che applica il concetto di politica industriale “alla ridefinizione di politiche in generale a favore delle attività più dinamiche, senza considerare se esse appartengano o meno all’industria manifatturiera. Questa espressione significa che si tratta di strategie dirette a promuovere e favorire i processi di trasformazione economico-produttiva, che coinvolgono una pluralità di soggetti, pubblici e privati. In questo senso la politica industriale può essere concepita come “*a discovery process*”, che vede il coinvolgimento di una pluralità di attori, i quali devono misurarsi con le sfide generate da un universo tecnico-scientifico ed economico-produttivo in continua espansione, perché alimentato da processi inarrestabili di generazione e diffusione delle conoscenze. Questo schema concettuale, cioè la politica industriale come processo di scoperta e trasformazione consapevole del sistema socio-economico, appare molto utile per interpretare sia i meccanismi e le modalità con cui si sono evolute le logiche generali d’intervento nell’Europa del periodo post-bellico, sia i ruoli e le funzioni esercitate da protagonisti di primo piano (Stati, Imprese, Centri di ricerca). Lo schema concettuale si rivela fecondo anche ai fini dell’analisi del processo di transizione energetica del prossimo futuro, ove la complessità e l’incertezza degli scenari richiedono scenari e comportamenti appropriati da parte dei vari agenti tecno-economici.

⁹⁰ Sono a nostro avviso evidenti i nessi logici tra il *portfolio approach* e il framework teorico sviluppato nel cap. 4 in tema di elaborazione strategica in condizioni di incertezza e turbolenza ambientale (mix di *short and long jump* di cui tratta Beinhocker, 1999).

6.3

Una politica industriale per il XXI secolo?

Dobbiamo a questo punto della nostra elaborazione affrontare direttamente un quesito relativo al Multiverso e alla transizione socio-tecnica: occorre una politica industriale per le sfide del XXI secolo? Se sì, quale?

In questo paragrafo finale cercheremo di fornire spunti di riflessione, alla luce dei framework teorici e pratici dibattuti nella letteratura economica e poi adottati in esperienze significative a livello internazionale.

Per affrontare la questione è necessario chiarire preliminarmente che il punto di partenza non può che essere una chiara enunciazione del concetto di politica industriale, che può essere definita in vari modi. Uno studio elaborato in sede OECD (Warwick, 2013) elenca ben 17 definizioni, proponendone poi una diciottesima: “La Politica Industriale si sostanzia in ogni tipo di intervento o di politica di governo che cerca di sviluppare l’ambiente imprenditoriale o di alterare la struttura dell’attività economica nella direzione di settori, tecnologie, singoli task che ci si attende possano offrire migliori prospettive di crescita o di benessere sociale in confronto a quelle che si sarebbero avute senza l’intervento” (trad nostra di Warwick, 2013: 16).

Il Trattato di Maastricht del 1992 introduce una precisa definizione di politica industriale, che deve creare le condizioni necessarie per promuovere la competitività dell’Unione Europea. A tal fine la Politica Industriale dell’UE mira “1) ad accelerare l’adattamento dell’industria alle trasformazioni strutturali, 2) a promuovere un ambiente favorevole all’iniziativa e allo sviluppo delle imprese di tutta l’unione, segnatamente delle piccole e medie imprese, 3) a promuovere un ambiente favorevole alla cooperazione tra le imprese, 4) a favorire un miglior sfruttamento del potenziale industriale delle politiche di innovazione, di ricerca e di sviluppo tecnologico”.

Ai fini del presente contributo adottiamo la definizione proposta da Owen (2012: 4), che comprende “*measures taken by governments to bring about industrial outcomes different from those that would result if markets were allowed free rein. These measures may be horizontal in character, affecting all firms, or specific to particular sectors or companies*”

Owen poi distingue due tipi di politica industriale: 1) “orizzontale” (per es. incentivi fiscali per attività di R&S), 2) “settoriale” o diretta a particolari segmente settori, ad es. biotecnologie e tecnologie dell’informazione.

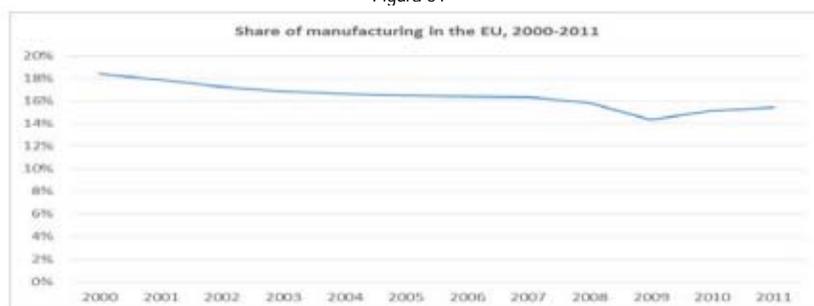
Dopo una interessante e ampia analisi delle politiche industriali attuate nei vari Paesi europei dagli anni ‘50 ad oggi, l’autore in questione ritiene che le prime siano da preferire, dati i non brillanti risultati conseguiti nell’attuazione delle seconde. Questa argomentazione va chiaramente in direzione opposta rispetto alle enunciazioni di Mazzucato e Perez, ma soprattutto non affronta le questioni illustrate nella letteratura teorica ed empirica degli ultimi anni in tema di transizione socio-tecnica e di digitalizzazione dei processi produttivi.

Non ripercorremo, comunque, l’evoluzione delle politiche strategiche per l’industria a livello europeo, molto ben ricostruita in European Parliament (2016), ma riteniamo utile esporre preliminarmente le conclusioni molto interessanti di un capitolo sul dibattito internazionale concernente le politiche industriali delineate nello studio di Warwick (2013): 1) non esiste un modello valido per tutte le situazioni (“*one size fit for all*”), perché gli approcci variano a seconda del livello di sviluppo dei Paesi e dei settori produttivi. 2) Alcuni Stati adottano politiche “orizzontali”, altri quelle “settoriali”. 3) C’è una generale convergenza verso l’idea di una “quarta generazione” di politiche industriali incentrata sui concetti di sistemi, reti, Istituzioni, *capabilities*. 4) Occorre individuare e valutare i rischi di *government failure*, legami indebiti tra politica e business, protezionismo.

Sulla base di questi punti, esaminiamo alcune informazioni esposte nel documento redatto per l'*European Parliament*, dove si argomenta come il manifatturiero, nonostante l'aumento di incidenza del terziario, rimanga un settore cruciale, di cui un'economia non può fare a meno, perché è una fonte basilare di innovazione.

L'industria manifatturiera assorbe il 20% dell'occupazione europea, 34 milioni di persone in 25 differenti settori industriali e in più di 2 milioni di imprese, prevalentemente piccole e medie. Vi sono dati interessanti sull'andamento del valore aggiunto del manifatturiero, sceso dal 18% del 2000 al 14% del 2009, per poi risalire al 16% nel 2011 (Fig. 81).

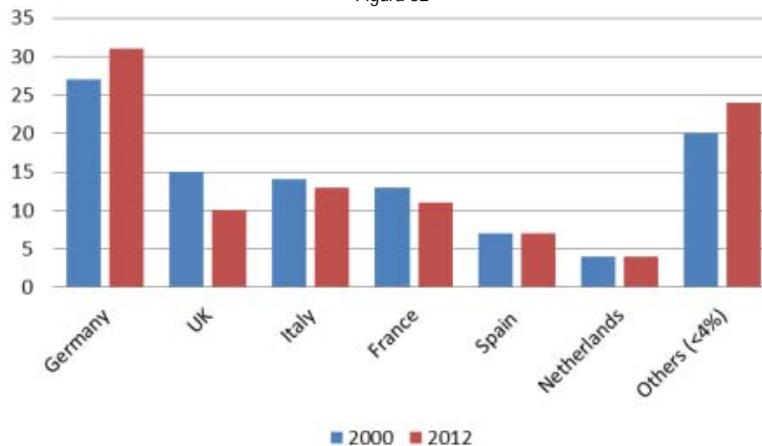
Figura 81



Fonte: European Parliament (2016), chart 2.2

Le quote sul totale del VA manifatturiero a livello europeo vede un aumento di quello Tedesco e una diminuzione di quello inglese (-6%), francese (-2%) e italiano (-1%), mentre i Paesi nuovi entrati nell'UE mostrano un incremento del 4% (Fig. 82).

Figura 82



Fonte: European Parliament (2016), chart 2.2

Premesso che nella maggioranza degli Stati membri le grandi imprese incidono per più del 50% sul valore aggiunto totale e le PMI dominano solo in Italia, Lituania, Grecia e Cipro, bisogna rilevare che l'industria europea è competitiva a livello globale in 15 su 23 settori ad alta e media intensità tecnologica: chimica, meccanica ed elettronica, veicoli a motore e altri mezzi di trasporto, prodotti in metallo, legno e prodotti in legno, carta. Nonostante il declino dell'industria europea espresso in termini di quote sul PIL, l'Europa conserva un vantaggio competitivo a livello internazionale in settori ad elevata complessità e alto livello qualitativo. Inoltre l'Europa è uno dei maggiori produttori di conoscenze nelle *Knowledge enabling*

technologies (KET) quali biotecnologie e materiali avanzati, dove i produttori europei competono direttamente con quelli asiatici e statunitensi.

Sulla base di una ricca analisi, che comprende anche il posizionamento competitivo dell'industria europea rispetto allo scenario di *Industria 4.0*, lo European Competitiveness Report (ECR, 2013) sostiene la richiesta di una "politica industriale urgente e con obiettivi molto precisi per costruire su ben individuati punti di forza e migliorare la competitività del comparto manifatturiero europeo. *urgent and welltargeted industrial policy measures to build on the identified strengths and upgrade the competitiveness of EU manufacturing*". Nel rispondere alla crisi di competitività dell'industria manifatturiera, la Commissione Europea, oltre alle politiche incentrate su "Framework" generali, ha avviato azioni strategiche supplementari, con obiettivi specifici settoriali, ancorati all'individuazione di prioritarie linee direttrici: *Advanced Manufacturing Technologies, Enabling Technologies, Bio-based products, sustainable industrial and construction policy and raw materials, clean vehicles, smart grids*(EC, 2012: 3). Uno dei punti fondamentali della visione europea è la stretta complementarità e interdipendenza tra industria e servizi (Nordås e Kim, 2013) fino a parlare di "*servitization*" del manifatturiero. L'elevata intensità di conoscenze è, infatti, un fattore fondamentale dell'odierna evoluzione dell'apparato produttivo, come abbiamo cercato di mostrare nel corso di questo contributo. Ciò induce a vedere una delle basilari ragioni per cui l'esistenza di un nucleo di industria manifatturiera è essenziale per la competitività dell'economia: costituisce un motore propulsivo, generatore di innovazione per far fronte alle sfide del XXI secolo; senza di esso l'economia di un Paese perde o ha scarsa capacità di produrre effetti amplificati sul tessuto socio-economico in termini di concorrenzialità a livello internazionale, quindi di creazione occupazionale di livelli qualitativi sempre più elevati. Aspetti cruciali dell'esistenza di un meccanismo dinamico, basato su complementarità e interdipendenze tra manifattura e servizi, sono la capacità di generare impulsi verso l'aumento di produttività del sistema e un profondo cambiamento della natura dei due settori, dato che nello scenario tecno-economico attuale processi e prodotti diventano set variabili di sequenze di funzioni ad alta intensità di conoscenza a vari livelli e a scala territoriale molto diversificata.

Da uno scenario così definito nelle linee generali discende il disegno europeo sul terreno della politica industriale, che con la strategia "*Horizon 2020*" da un lato ha rafforzato la sua impostazione "orizzontale" e orientata al mercato, ma dall'altro ha introdotto direttrici specifiche settoriali. Uno degli elementi più importanti della visione strategica di Politica Industriale a livello europeo è che essa deve essere diretta a fini di crescita quantitativa e qualitativa, al tempo stesso producendo effetti sulla composizione delle attività e delle industrie e influenzando sia la direzione di sviluppo delle tecnologie e la loro diffusione nelle varie attività, sia la distribuzione delle imprese a seconda delle loro performance (ECR, 2013: 129). In tale orizzonte la strategia significa puntare su segmenti di attività industriali in grado di generare effetti di spillover nei processi "*backward and forward*" di apprendimento settoriali e intersettoriali. A questo fine viene anche introdotto un elemento a nostro avviso di notevole importanza: è avanzata l'ipotesi di una politica industriale fondata sulla domanda (*demand-side*) e ispirata alle strategie Usa di *public procurement* legate alle esigenze della Difesa. In Europa una strategia analoga potrebbe essere possibile, ma il *public procurement* dovrebbe essere connesso a grandi obiettivi di protezione ambientale, cioè a strategie incentrate su *clean products and technologies* (ECR, 2013: 130)⁹¹.

⁹¹ Una delle direttrici più interessanti ai nostri fini è l'*Advanced Manufacturing for Clean Production*, su cui è operante una task force della Commissione Europea, <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/regional-innovation-monitor/link/european-task-force-advanced-manufacturing>.

Tale visione strategica acquista un'importanza ancora maggiore se viene immediatamente collegata alla strategia definita per lo scenario denominato Industry 4.0 (*European Parliament*, 2016), dal momento che si propugna l'assunzione di centralità dell'interdisciplinarietà tecnico-scientifica per riprogettare processi e prodotti, evitando sia il “*pick the winner*” oppure il “*backing the wrong horse*” (puntare sul cavallo sbagliato).

Il ruolo del settore pubblico è ritenuto essenziale per la creazione di un eco-sistema che aiuti le PMI nella transizione verso *Industria 4.0* e quindi per affrontare le molteplici sfide ad essa collegate, sia sul piano della trasformazione degli skills e delle competenze che su quello dello sviluppo di rapporti di collaborazione e cooperazione innovativa in catene globali del valore, specie nell'ottica di una valutazione dell'impatto ambientale di I/4.0, materia sulla quale l'informazione è ancora carente (*European Parliament*, 2016: 56).

Gli effetti della digitalizzazione e dell'inserimento nel Multiverso per le PMI non sono forse solo positivi. È vero che per esse si aprono nuove prospettive di modelli di business, perché con le tecnologie dell'*Advanced Manufacturing* si inseriscono in catene globali del valore e quindi si profilano grandi opportunità di sviluppare le proprie attività con molteplici tipologie di prodotti (*product portfolio*). Vi sono, però, anche aspetti meno positivi, che attengono agli effetti della riduzione dell'indipendenza operativa e strategica delle PMI, a causa della loro appartenenza a catene del valore controllate esogenamente a livello globale. Ciò implica nuove importanti sfide per le PMI.

L'analisi sviluppata in questo lavoro consente di trarre alcuni orientamenti generali, utili sul piano dell'elaborazione strategica e della progettazione di strumenti operativi sia dal punto di vista dell'operatore pubblico che di quello privato.

Nell'esposizione dei punti seguiremo una precisa struttura logica, che ripercorre sinteticamente il percorso dell'intero contributo: 1) sfide, 2) rilevanza dell'industria manifatturiera, 3) mutamento della natura e dei confini tra le attività economiche, 4) orientamenti strategici di politica industriale, 5) iniziative intraprese a livello nazionale, 6) linee di progettazione operativa degli interventi.

1. Le Sfide

I Centri di Ricerca a livello internazionale convergono nel delineare un insieme di sfide globali, con cui le economie di tutto il mondo si dovranno misurare nei prossimi decenni: emergenza climatica, fabbisogni energetici, energie rinnovabili, scarsità di risorse primarie (acqua, energia, cibo), metalli e minerali strategici, infrastrutture e mobilità, digitalizzazione di processi e prodotti in conseguenza del potenziale tecnico-scientifico accessibile alle società a livello planetario.

In questo scenario generale sono destinati a cambiare profondamente la natura e le modalità di svolgimento di molti processi socio-economici, in misura tale da comportare una drastica revisione di culture, strategie e comportamenti. Non si tratta quindi di variazioni significative, ma secondarie, degli assetti economico-produttivi, bensì di trasformazioni degli elementi basilari, che richiederanno una mobilitazione di risorse materiali e immateriali di grande portata. In particolare, cambieranno sostanzialmente i meccanismi propulsori in conseguenza del fatto che la capacità di elaborazione di dati, informazione e conoscenza diverrà una caratteristica pervasiva di qualsiasi tipo di oggetto e processo. Tutte le attività umane tenderanno ad essere ad alta intensità di conoscenza, a partire da quelle di produzione di beni e servizi. Un ulteriore tratto caratteristico dell'orizzonte futuro, ma che sarebbe forse più opportuno definire già in atto, è la tendenziale permeabilità dei tradizionali confini tra le attività economiche, con il venir meno delle consolidate tassonomie (secondario, terziario, agricoltura), dal momento che obiettivi e output potranno essere ottenuti solo attraverso sempre nuove combinazioni di spazi e domini conoscitivi.

2. Rilevanza dell'industria manifatturiera- Why Manufacturing matters. Permeabilità dei confini settoriali

La digitalizzazione dei processi e dei prodotti, che segna l'ingresso in quello che nel capitolo 1 abbiamo definito il Multiverso, ha come ambito cruciale di esplicazione l'insieme di attività tradizionalmente definite industria manifatturiera, ma che ora sono definite in vari modi: Advanced Manufacturing (PCAST, 2014), Industrie 4.0 (Acatech, 2013), L'usine du Futur (Alliance du Futur, 2016), High Value Manufacturing (TSB, 2012), Fabbrica Intelligente (Governo Italiano, Ministro Calenda, 2016),

È fondato allora chiedersi se e *Why Manufacturing matters* (ASME, 2013). Ci limitiamo a mettere in evidenza due elementi cruciali: 1) stime riferite agli Usa indicano che l'effetto moltiplicativo dell'industria manifatturiera sia piuttosto rilevante. Il *Bureau of Economic Analysis* stima che ogni dollaro speso nel manifatturiero genera 1,48 dollari sull'attività economica (ASME, 2013). Le stime della MAPI (*Manufacturers Alliance for Productivity and Innovation*) indicano un moltiplicatore meno elevato in termini assoluti (1,34 dollari di output negli altri settori per ogni dollaro impiegato), ma più alto di quello attribuito a tutte le altre attività (55 e 58 cents rispettivamente alle vendite al dettaglio e all'ingrosso). La NAM (*National Association of Manufacturers*, 13.11.2015) stima invece un moltiplicatore più alto (1,81). Calcoli più recenti (Mackstroth, 2016) arrivano ad un impatto occupazionale ed economico superiore (rispettivamente 3,4 e 3,6), con un'incidenza del manifatturiero sull'export al di là del 50% e livelli di efficienza nettamente superiori a quelle di altre attività economiche: un valore aggiunto di 1 milione di dollari è ottenuto con 5,8 posti di lavoro full-time equivalenti, a fronte di 7,7 per il settore dei trasporti e 16,9 per le vendite al dettaglio. 2) Produttività, efficienza e capacità di generare effetti moltiplicativi nel resto dell'economia sono dunque elementi che legittimano l'attribuzione di grande rilevanza al settore manifatturiero. Ad essi vanno poi aggiunti aspetti che portano a ritenere obsoleto il termine appena usato (settore): le attività manifatturiere sono il motore fondamentale dei processi innovativi dell'intera economia, perché in esse si concentra la maggioranza della spesa privata in R&S (quasi i 2/3 secondo ASME, 2013). L'analisi sviluppata nei capitoli precedenti ha d'altronde mostrato come la prevalente macro-traiettoria tecno-economica sia costituita da processi di produzione composti da sequenze variabili di funzioni ad alta intensità di conoscenza. Queste ultime richiedono combinazioni trasversali di competenze e skills, insieme a nuovi modelli di organizzazione dei cicli economico-produttivi. La digitalizzazione e l'*ubiquitous connectivity* delineano la prospettiva di un ulteriore passaggio cruciale dallo *smart manufacturing* ad un nuovo paradigma, quello del "*cognitive manufacturing, in cui produzione e misurazioni sono unite allo scopo di costruire un ambiente controllato e flessibile. Quando si verificano cambiamenti non previsti o alterazioni significative, il sistema di programmazione del processo di produzione acquisisce i risultati delle misurazioni direttamente on line, prende decisioni e conseguentemente modifica in tempo reale le operazioni produttive.*" (Noor, 2013, 37)⁹²

3. Quali orientamenti strategici?

Gli elementi indicati delineano non solo un orizzonte in evoluzione accelerata, ma anche mutamenti di entità tale da rendere del tutto insufficienti processi di aggiustamento superficiale e comunque non radicali. Di qui deriva l'esigenza di assumere una prospettiva dinamica di sistema, che ponga al centro dell'elaborazione strategica componenti idonee ad esercitare un effetto-leva, cioè con capacità di generare un impatto profondo e generalizzato. Prospettiva sistemica e perseguimento di *leverage* implicano che non si possa prescindere da un *mission*

⁹² Noor sviluppa anche una serie di temi legati al *cognitive computing*, che è a sua volta connesso alla creazione di ecosistemi dinamici innovativi (vedi i precedenti capitoli 2 e 3)

oriented approach, come viene sottolineato dal BMF (2010), che enfatizza l'importanza di definire un set di priorità essenziali (*central missions*), sulle quali elaborare progetti strategici (*forward looking projects*). L'esplicitazione di tali priorità progettuali deve essere a sua volta chiaramente correlata alle grandi sfide globali con cui i sistemi socio-economici devono misurarsi⁹³, ma un set di priorità non dissimili è definito anche in riferimento agli Usa, dove si enfatizza l'importanza di una strategia nazionale e del coordinamento tra operatori pubblici e privati in una serie di iniziative strategiche, mirate su “*top emerging manufacturing technologies*” (PCAST, 2014).

Uno dei tratti comuni alle visioni espresse nei documenti americani e tedeschi è la rilevanza dell'adozione di un approccio multi-scala, su cui ci siamo soffermati nel capitolo 1 e nel paragrafo 2.6, nel senso che occorrono interventi strategici a vari livelli (micro, meso, macro) con lo sviluppo di progettualità diffusa incentrata su partnership pubblico-privato.

Nell'odierno scenario di trasformazione ciò è essenziale perché non si tratta solo di generare grandi impulsi, ma anche e soprattutto di catalizzare forze endogene in sistemi a differente scala economico-territoriale, al fine di trasformare in modo generalizzato culture tecnico-produttive, assetti manageriali, modelli di business, come abbiamo sostenuto nei capitoli concernenti gli eco-sistemi innovativi e le piattaforme digitali.

La multiscalarità delle strategie e degli interventi è d'altronde un correlato logico-strutturale delle proprietà più volte sottolineate (*digital connectivity, ubiquitous computing*), che rendono accessibili spazi conoscitivi continuamente rinnovati e quindi grandi potenzialità di connessioni strategiche a qualsiasi apparato tecno-economico, pubblico e privato. Conseguentemente visione sistemica, *mission oriented approach* e approccio multi-scala sono ingredienti basilari per sistemi socio-economici che intendano misurarsi mediante strumenti all'altezza delle sfide del XXI secolo.

4. Visioni e strategie a livello nazionale

Germania

Come è noto la locuzione *Industria 4.0* è stata coniata dall'*Industrie Working Group* istituito dal Governo tedesco. Nel paragrafo 6.1 abbiamo già esposto i lineamenti strategici in tema di transizione energetica e ambientale. Global Production Networks tedeschi sono già protagonisti dei processi di digitalizzazione: Siemens, ABB; case automobilistiche, multinazionali della chimico-farmaceutica. In questa sede ripercorriamo sinteticamente i passaggi essenziali degli sviluppi strategici incentrati su Industrie 4.0. Sulla base di una dotazione iniziale di 200 milioni di euro del BMF e del BMWi, il Governo tedesco ha messo in moto una *High Tech Strategy*, il cui elemento fondamentale è costituito dalla creazione della *Platform Industrie 4.0*. La piattaforma è una rete di attività nazionali e internazionali che coinvolge attività tecno-economiche di varie nazionalità (americane, francesi, cinesi, giapponesi) (BMWi, 2016b). I filoni di intervento sono stati organizzati in 5 Working Group, riguardanti *Reference Architectures, Research and Innovation, Security of Networked Systems, Legal Framework, Work, Education and Training*. I numerosi lavori di analisi e progettazione prodotti sono liberamente disponibili in una biblioteca on line⁹⁴.

Nei documenti possono essere trovate analisi finalizzate a roadmap per il futuro, stime del grado di digitalizzazione dell'apparato produttivo tedesco (VDMA, 2015), studi settoriali e individuazione di un'ampia serie di problematiche, linee guida per le Piccole e Medie Imprese, comparazioni internazionali.

⁹³ 13 grandi sfide nel caso della Germania (BMF, 2010, 6-7)

⁹⁴ <https://www.bmwi.de/English/Redaktion/Pdf/digitalisierung-der-ndustrie,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=en,rwb=true.pdf>

Occorre poi segnalare che una particolare linea di attività nell'ambito della strategia tedesca di industria manifatturiera concerne lo sviluppo di cooperazioni internazionali (Cina, Africa), a partire da relazioni sistematiche con i produttori americani. In questa prospettiva VDI e ASME hanno nel 2015 iniziato una collaborazione stabile nell'intento di definire congiuntamente fabbisogni di skills e competenze necessarie per lo sviluppo dell'Advanced Manufacturing-Industrie 4.0 e, al tempo stesso, per delineare processi formativi in campo non solo ingegneristico, bensì anche sul terreno formativo nell'intero arco di studi dalla scuola superiore alla formazione universitaria (VDI-SME, 2015). Dal confronto tra i due modelli (tedesco e americano) sono poi scaturite proposte di linee di trasformazione appropriate per l'Advanced Manufacturing.

Francia

La Francia ha recentemente unito le sue risorse umane e materiali, organizzate nell'*Alliance Industrie du Futur*, alla tedesca *Platform Industrie 4.0* (Alliance du Futur, 2016). Più in generale il Governo francese ha elaborato una visione relativa alla *Nouvelle France Industrielle* (NFI, 2016), che ha già visto un cospicuo investimento di risorse: 1000 progetti di innovazione industriale sostenuti dal 2013 con un impegno di 1,9 miliardi di euro in sovvenzioni pubbliche; 7 "grandi priorità di azione" con 240 progetti di R& finanziati per 100 milioni di euro, dedicati a "*Projets Industrie du Futur*" (in NFI 2016 un'analisi puntuale dei membri dell'Alliance e di importanti realizzazioni).

Priorità per l'elaborazione di progetti

- *Digitalisation, virtualisation et Internet des objets*
- *Place de l'homme dans l'usine, robotique, réalité augmentée*
- *Fabrication additive (impression 3D);*
- *Monitoring et contrôle*
- *Composites, nouveaux matériaux et assemblage*
- *Automatique et robotique*
- *Efficacité énergétique.*

Inghilterra

Preparato da uno studio dell'*Institute for Manufacturing* (Università di Cambridge) e dall'EPRC (TSB, 2012) il Governo inglese ha enunciato nel 2012 la Strategia in tema di *High Value Manufacturing (HVM)* (TSB, 2014a), con l'indicazione di circa 15 settori industriali prioritari e di criteri per l'erogazione delle risorse: opportunità di mercato, esistenza di "*real capabilities*", livello di realizzazione dell'idea, possibilità di creare "*additional difference*".

Le cinque aree in cui l'innovazione nell'HVM può generare un ampio impatto sono così definite⁹⁵:

- *resource efficiency*
- *manufacturing systems*
- *integration of new materials with manufacturing technologies*
- *manufacturing processes*
- *new business models*

La strategia pubblica punta a raddoppiare investimenti nell'HVM fino a 50 milioni di dollari all'anno, concentrando le risorse in settori e tecnologie tali da produrre benefici per l'apparato economico-produttivo inglese sui mercati mondiali, mediante l'impiego di un set di 22

⁹⁵ <https://www.gov.uk/government/publications/high-value-manufacturing-strategy-2012-to-2015>

competenze manifatturiere e soprattutto attraverso l'impiego della cosiddetta HVM *Catapult*. Quest'ultima è lo strumento principale della strategia inglese ed è costituito da una rete organizzata di competenze che coinvolge 7 Centri di Ricerca con 1260 elevate professionalità (ingegneri, scienziati, tecnici, staff di supporto) e 7 Università. La sua operatività consente un impatto moltiplicativo di 3,9 per ogni sterlina investita dal Governo, dal momento che sono stati attratti investimenti addizionali per 219 milioni di sterline. Solo nell'ultimo anno sono stati coinvolti mille clienti industriali, 850 progetti innovativi, 1600 contratti con piccole e medie imprese (TSB, 2014b).

USA

Negli Usa le iniziative strategiche hanno concentrato nell'*Advanced Manufacturing* risorse per 128 milioni di dollari all'anno, nel tentativo di dare risposte alle domande sul futuro e alla necessità di una strategia nazionale sul terreno dell'Industria Manifatturiera, come richiesto dai Consiglieri Economici del Presidente e dalle Associazioni dei Produttori Manifatturieri (PCAST, 2010, 2014; NAMRI-SME, 2014). Uno dei capisaldi della strategia Usa è la creazione di una rete di eccellenze con Centri di Ricerca specializzati (*National Network of Manufacturing Institutes* NNMI), secondo il modello del Fraunhofer Institute tedesco, più volte richiamato pubblicamente dal Presidente Obama, che nel 2014 ha proposto la creazione di 15 *Regional Institutes for Manufacturing Innovation* (IMIs). Un ruolo di primo piano a tale scopo è stato svolto dal NIST (National Institute of Standards and Technology), il quale ha catalizzato processi di creazione di Centri di Competenza per l'accesso alle risorse stanziato a livello federale. L'ultimo Report disponibile ad oggi, quello per il 2015 (NMI, 2016), documenta la costituzione di 7 Istituti, più altri due in gestazione, con l'obiettivo di promuovere e sostenere dinamiche di collaborazione pubblico-privato e privato-privato, cioè partnership estese e distribuite sul territorio degli States, massimizzando al contempo le risorse per infrastrutture condivise.

I punti principali della strategia Usa per l'*Advanced Manufacturing* sono espressi in modo dettagliato nei documenti elaborati dal *Council of Economic Advisors on Science and Technology*: 1) creare un ambiente fertile per l'innovazione attraverso robusti finanziamenti alla ricerca di base, politiche di business e appropriate misure fiscali di incentivazione. 2) Attuare strategie formative di skills e competenze adatte alle sfide tecnico-produttive. 3) Erogare supporti finanziari a programmi di ricerca applicata e promuovere partnership pubblico-privato. 4) Sviluppare un'infrastruttura di ricerca estesa a livello nazionale e arricchita da interazioni a scala internazionale, per favorire la dinamica strutturale verso l'*Advanced Manufacturing*.

Italia

Nel nostro Paese il Ministro Calenda ha recentemente presentato il "Piano Nazionale Industria 4.0"⁹⁶. Il pdf in questione fa riferimento come analisi di base al Rapporto finale, redatto per la X Commissione Attività produttive, Commercio e Turismo della Camera dei Deputati, presieduta da Epifani. Il suddetto Rapporto contiene i risultati dell'Indagine conoscitiva su "Industria 4.0". Quale modello applicare al tessuto industriale italiano. Strumenti per favorire la digitalizzazione delle filiere industriali nazionali».

Partiamo da questo documento per poi introdurre i temi fondamentali contenuti nelle slide del Ministro.

Il "Rapporto Epifani", che fa da sfondo al Piano Industria 4.0, è l'esito di un ampio lavoro di ricognizione, svolto in Italia e all'Estero, presso Centri di Ricerca pubblici e privati, Imprese

⁹⁶ 18 slide dal sito web del Ministero: <http://www.sviluppoeconomico.gov.it/index.php/it/per-i-media/comunicati-stampa/2035187-il-ministro-dello-sviluppo-economico-carlo-calenda-illustra-il-piano-nazionale-industria-4-0>, ultimo aggiornamento 21-9-2016.

leader e global player. Esso contiene un'analisi dell'evoluzione dell'apparato economico-produttivo italiano, con particolare riferimento all'industria manifatturiera, per definire successivamente direttrici strategiche per l'Italia, alla luce di coordinate generali dello scenario incentrato su Industria 4.0 (I4.0). Tale Rapporto peraltro contiene una sintetica rassegna degli interventi strategici in corso di realizzazione presso numerosi Paesi Europei: Belgio, Danimarca, Francia, Germania, Inghilterra, Paesi Bassi, Svezia.

Per quanto riguarda l'orizzonte strategico possibile, i punti salienti del documento in questione mette in evidenza aspetti molto interessanti: 1) frammentarietà delle iniziative strategiche nel nostro Paese, unita alla temporaneità del credito d'imposta per attività di R&S. 2) Misure di semplificazione e sostegno finanziario alle Piccole e Medie Imprese e alle *startup*. 3) Emanazione nel 2015 di norme per attuare il “*patent box*”, concernenti agevolazioni fiscali per redditi derivanti da attività immateriali. 4) Nuova normativa per il *crowdfunding* azionario. 5) Istituzione di un Fondo da 50 milioni di euro (gestito da INVITALIA) per investimenti in capitali rischio con cofinanziamento privato. 6) Fondi per l'assunzione di professori e ricercatori. 7) Adesione dell'Italia ad un accordo internazionale per una cooperazione rafforzata nella tutela brevettuale.

L'efficacia di queste misure rischia di essere depotenziata, secondo lo stesso Rapporto (p. 72) alla “mancanza di una strategia globale per l'innovazione”.

Il “Piano I4.0” del Governo intende evidentemente colmare questa carenza con un approccio di politica industriale esplicitamente di tipo “orizzontale” (si veda la definizione di Owen riportata nel precedente paragrafo 6.3). Prendendo in esame le 18 slide del Piano e il testo della sua audizione presso la Camera dei Deputati (15-6-2016), vediamo che viene innanzitutto svolta una sintetica illustrazione della 4° Rivoluzione Industriale, delle tecnologie abilitanti per l'I4.0, dei benefici attesi, delle linee strategiche molto generali avviate negli Usa, in Francia e Germania. Si passa quindi ad illustrare l'architettura del Piano nazionale I4.0, incentrato su una “cabina di regia” tecnico-economica, composta da 6 Ministri, 3 Politecnici (Bari, Milano, Torino), Scuola Superiore S. Anna, CRUI, Centri di Ricerca (CREA, IIT), Cassa Depositi e Prestiti, Associazioni Imprenditoriali e Sindacali,

Alla luce dei risultati dell'analisi del modello italiano (vedi Rapporto Epifani), cioè delle caratteristiche del settore industriale, sono indicate le “linee guida del Governo” con al centro l'orizzontalità degli interventi, il rifiuto di un “ruolo dirigista” e la scelta di intervenire sui “fattori abilitanti”, quali Banda Larga e Ultra Larga, definizione degli standard e criteri di interoperabilità per l'Internet of things⁹⁷.

La “Direttrici chiave” sono così definite: 1) incentivi agli investimenti innovativi privati finalizzati a I4.0, rafforzamento della finanza a sostegno di I4.0 *venture capital* e *startup*. 2) Strategie formative di competenze I4.0 a tutti i livelli del sistema educativo, creazione di Centri di Competenze e *Innovation Hubs*.

Le “Direttrici di accompagnamento” sono incentrate sui fattori abilitanti e strumenti pubblici a supporto quali: garanzie agli Investimenti, Rafforzamento e innovazione nel presidio di mercati internazionali, modifiche alla contrattazione decentrata con il focus sul rapporto salario-produttività.

Per quanto riguarda le risorse impiegate, vengono ipotizzati investimenti privati pari a 23,6 miliardi di euro + 200.000 studenti universitari, 3000 manager e +100% iscritti a Istituti Tecnici superiori (ITS), tutti finalizzati a I4.0, oltre a circa 1400 dottorati di ricerca sempre finalizzati a I4.0.

⁹⁷ Desta un po' stupore la quasi totale assenza di temi legati alla cybersecurity, che è cruciale nella prospettiva della digitalizzazione di processi e prodotti, come si evince da numerosi studi e progetti a livello internazionale. Il tema non viene qui approfondito, ma per una introduzione alla problematica si veda ERCIM (2016).

Per quanto riguarda le infrastrutture abilitanti, sono ipotizzate risorse pubbliche così ripartite: 0,9 Mld di euro per il Fondo Centrale di Garanzia, 1Mld di euro per contratti di sviluppo focalizzati su I4.0, 0,1Mld per investimenti in catene digitali di vendita (Piano- Made in Italy).

Gli interventi “orizzontali” che dovrebbero innescare investimenti privati di tale consistenza sono i crediti d’imposta con il raddoppio dell’aliquota dal 25% al 50% per le spese in R&S. Sono poi previste risorse per agevolazioni fiscali (iperammortamento e superammortamento) e fondi di investimento dedicati sia all’industrializzazione di idee e brevetti ad alto contenuto che per start-up e co-matching. In definitiva, quindi, viene stimato (slide 10) un impegno privato pari a 13mld di euro, mentre la stima di quello pubblico è di 23 mld, oltre a risorse per 100 milioni nei processi formativi a vari livelli.

Come si vede, è previsto l’impiego di risorse ingenti da parte privata, ma non è facilmente accessibile una spiegazione compiuta del processo moltiplicativo che legittima ipotesi di tale consistenza. In merito all’impegno pubblico non sono indicate le fonti effettive di provenienza, cioè le poste reali di bilancio⁹⁸. La Legge di Bilancio 1917, approvato agli inizi di Dicembre, contiene (art. 3) un elenco abbastanza dettagliato dei beni oggetti della nuova disciplina di maggiorazione della deduzione di ammortamenti, mentre gli articoli 43-45 prevedono l’istituzione, a decorrere dal 2018, di una speciale sezione del Fondo per il Finanziamento ordinario delle Università Statali (FFO) con una dotazione annua di 271 milioni di euro, diretti a finanziare Dipartimenti di Eccellenza per la qualità della ricerca e la progettualità scientifica, organizzativa e didattica, anche in riferimento ad Industria 4.0.

Il Piano I4.0 del Governo italiano presenta una chiara differenziazione rispetto a quanto sta accadendo negli altri Paesi europei e negli Usa. Dall’analisi precedentemente svolta emerge, infatti, che un framework esclusivamente orizzontale come quello italiano è di fatto assente in tutte le altre esperienze nazionali. Abbiamo visto che in tutti i Paesi sono enunciate priorità strategiche ben definite, sulle quali sono organizzate iniziative mirate con reti coordinate di attori nazionali e internazionali. Prendendo ad esempio due Paesi che hanno sempre adottato paradigmi strategici, per così dire, molto differenti, cioè la Germania e l’Inghilterra, il breve excursus prima effettuato ha messo in evidenza come in entrambi siano presenti linee strategiche *bottom-up e top-down* all’interno di un quadro delineato con relativa precisione e arricchito da connessioni con processi multi-scala: spazio dell’industria inglese nelle supply chain internazionali, internazionalizzazione nella Industrie Platform tedesca e accordi strategici VDI-ASME, oltre alla congiunta azione strategico-progettuale di key players in entrambi i casi.

Il focus quasi esclusivo su agevolazioni fiscali e infrastrutture digitali, pur essenziali, corre il rischio di una dispersione delle risorse, in assenza di orientamenti di medio-lungo periodo elaborati mediante partnership pubblico-privato, come insegnano le altre esperienze europee e americana. In queste esiste infatti la consapevolezza che lo scenario delle trasformazioni connesse all’universo fisico-digitale richiede visioni e metodologie multi-scala a livello federale e di singolo Stato o area territoriale negli Usa, a livello europeo e nazionale o di agglomerazione economico-territoriale nell’UE. Ai fini della loro elaborazione uno schema unidimensionale è ritenuto riduttivo, per cui viene adottato un framework orientato a combinazioni di direttrici *top-down e bottom-up*. In pratica appare evidente la scelta di un mix tra approcci *mission oriented* e quelli di tipo “orizzontale”.

Le differenze tra l’approccio italiano e quello adottato in altri Paesi emergono anche in relazione alla scelta di creare una “Cabina di regia”: è difficile ipotizzare che un’unità

⁹⁸ È comunque probabile che i documenti giustificativi a riguardo siano disponibili negli Uffici preposte delle Istituzioni citate in nota alla slide 18: PCM (Presidenza Consiglio dei Ministri), MIPAAAF, MISE. Comunque la ricerca di materiali appropriati sui rispettivi siti web non ha dato (20-11-2016) risultati esaurienti.

strategico-operativa così nutrita possa costituire un agente di coordinamento strategico in assenza di un saldo ancoramento a direttrici progettuali.

Queste considerazioni acquistano ancora più forza se pensiamo alle caratteristiche del sistema economico-produttivo italiano, opportunamente messe in risalto all'inizio dell'esposizione del Ministro Calenda, ovvero la peculiare struttura dimensionale, la composizione merceologica, la tipologia delle imprese operanti nel nostro Paese richiederebbero un framework strategico-operativo composito: *top-down e bottom-up*, multi-scala con macro- e micro- progettualità, e l'azione di agenti catalizzatori.⁹⁹

Sembra a questo punto opportuno ampliare la base conoscitiva al fine di delineare scenari di intervento strategico, sulla base di informazioni aggiuntive.

L'Indagine Industria 4.0, svolta da Federmeccanica (21-9-2016) presso un campione di 527 imprese contiene spunti interessanti, utili ai nostri fini. Il 28% delle aziende considererà "alto" il proprio livello di digitalizzazione, mentre il 62% e il 9% lo valuta rispettivamente "medio" e "basso". Tra 11 tecnologie fondamentali per Industria 4.0 (precedentemente indicate) il 50% degli intervistati dichiara di conoscere - in ordine decrescente di notorietà- le seguenti: sicurezza informatica (8%), robotica (85%), mecatronica (76%), stampa 3D (75%), *cloud computing* (72%), simulazione (71%), IoT (55%). Per quanto concerne le intenzioni di investimento in tecnologie a medio termine (1 anno) prevale la sicurezza informatica (45%), seguita dalla simulazione (28%), il *cloud computing* (21%), la robotica (20%). I benefici attesi dalle nuove tecnologie sono essenzialmente costituiti dall'aumento di produttività, dalla personalizzazione del prodotto e dalla riduzione del *time to market*.

Ulteriori spunti interessanti ai fini di un'approfondita e sistematica riflessione sul sistema produttivo italiano possono essere desunti dai *Report* elaborati nell'ambito della Piattaforma *Regional Innovation Monitor Plus* (d'ora in poi RIM), creata per condividere conoscenze e know-how relativi ai maggiori trend nel campo dell'innovazione e dell'industria nelle principali regioni europee (<https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/regional-innovation-monitor/>).

Dai Report disponibili per alcune regioni italiane trarremo elementi utili per l'elaborazione strategica degli agenti (pubblici e privati) nello scenario della Fabbrica Intelligente.

Iniziamo con la Lombardia e l'Emilia Romagna, le regioni italiane con il maggior numero di imprese manifatturiere attive nell'automazione e nei sistemi *smart*. Gli elementi di forza dell'apparato industriale lombardo sono individuati nella elevata capacità di *customization of products*, grazie alla quale si sono create nicchie di mercato in cui le imprese sono anche leader mondiali. Il secondo fattore fondamentale è l'esistenza di un'infrastruttura di ricerca di buon livello, con Centri di Ricerca molto attivi nelle tematiche relative a I4.0: robotica, automazione, ottica e fotonica, bio-materiali. Il terzo elemento propulsivo è l'operatività di numerose Istituzioni intermedie a supporto del settore manifatturiero.

In realtà gli elementi di forza devono affrontare specifiche sfide competitive nell'odierno scenario tecno-economico. La "customizzazione" ha come risvolto frenante la limitatezza dimensionale che non consente alle imprese, così dinamiche dal punto di vista tecnico-produttivo, di superare soglie critiche nella disponibilità delle risorse necessarie per affermarsi compiutamente sui mercati internazionali.

Unito al primo aspetto, appena indicato, ve ne è un secondo, che costituisce una sorta di paradosso, ed è l'estrema frammentazione del sistema innovativo regionale, dove molte imprese -anche nelle componenti *high tech*- hanno problemi di transizione intergenerazionale e dell'impossibilità di avviare processi di aggregazione strategico-progettuale. Siamo quindi in

⁹⁹ Un viaggio suggestivo in realtà dinamiche del sistema produttivo italiano, con spunti interessanti in merito alle prospettive di transizione verso Industria 4.0, è contenuto nel volume di Magone e Mazali (2016).

presenza di evidenti limiti dei modelli manageriali, depotenziati rispetto alle grandi opportunità a portata di mano.

Il terzo aspetto problematico viene individuato nell'esistenza di barriere naturali e manageriali, che rallentano o impediscono dinamiche di *open innovation*, oggi essenziali nella trasformazione socio-tecnica incentrata su I4.0.

In tale quadro si comprende come le attività di trasferimento tecnologico dal mondo della ricerca all'apparato economico-produttivo (contratti industria-ricerca, brevettazione, creazione di *spinoff*) siano considerate al di sotto delle potenzialità insite nella breve descrizione iniziale dei tre elementi propulsori.

Sulla base degli aspetti indicati è comprensibile che la Lombardia sia classificata dalla Regional Innovation Survey (2014) classificata come “*moderate innovator*”, dati il modesto livello di collaborazione tra piccole imprese e della spesa pubblica e privata in R&S, unitamente alla bassa percentuale di popolazione con titoli di studio universitari e il numero contenuto di richieste di brevetti. A fronte di tutto ciò la politica innovativa regionale è stata improntata ad un “ibrido” modello di governance con iniziative strategiche *top-down* e *bottom-up*.

L'Emilia Romagna è una delle regioni leader in Europa per dinamismo imprenditoriale e innovativo. Il sistema economico regionale presenta un alto livello di integrazione sia nella distribuzione geografica che nella specializzazione settoriale, con unità manifatturiere molto dinamiche in segmenti importanti del manifatturiero. Possiamo aggiungere a questi elementi conoscitivi, informazioni acquisite direttamente durante la partecipazione a workshop e seminari con operatori. Numerosi global player europei (quasi duecento), specie nel campo dell'industria dei veicoli a 2 e 4 ruote e nella meccatronica, hanno rilevato o partecipano al capitale azionario di imprese emiliane. Occorre al tempo stesso segnalare un fatto interessante: vi sono alcune decine di imprese emiliane che hanno effettuato scelte strategiche simmetriche, cioè di rilevazione o partecipazione azionaria in imprese soprattutto tedesche.

L'esistenza in ER di Centri di ricerca e trasferimento tecnologico molto attivi e dinamici, insieme ad una strategia incentrata sullo sviluppo di *High Tech network*, inducono a ritenere che l'ER abbia un ottimo posizionamento nella traiettoria verso I4.0, in special modo attraverso la stimolazione della domanda di innovazione.

Particolarmente attivo nelle regioni del Nord Italia è il “Cluster Fabbrica Intelligente”, che riunisce circa 300 imprese di un ampio insieme di attività economico-produttive e numerosi Centri di ricerca (<http://www.fabbricaintelligente.it/>). Obiettivo dell'attività del CFI (2015) è quello di sviluppare progetti congiunti tra imprese e centri di ricerca. Al momento sono attivi quattro progetti: *sustainable manufacturing*, *Adaptive Manufacturing*, *Smart Manufacturing*, *High Performance Manufacturing*. Gli importi delle risorse attivate sono piuttosto consistenti (intorno ai cinquanta milioni di euro complessivi), con l'intervento di global player internazionali in varie filiere (meccatronica, elettrodomestici, elettronica).

I Report Monitor Plus su Marche e Umbria (RIM Marche, 2014; RIM Umbria, 2014) possono essere di particolare interesse per la Toscana perché, andando oltre logiche specifiche, presentano tratti strutturali comuni, che connotano anche la nostra regione.

Entrambe hanno negli ultimi anni vissuto una profonda dinamica strutturale, data la composizione merceologica delle attività manifatturiere in seguito all'introduzione dell'euro, su cui si è poi innestata la dinamica tecnico-produttiva al centro del presente contributo. Si sono innescati omologhi processi nelle due regioni (deindustrializzazione, espansione del terziario) con sfide che si profilano molto simili: 1) diversificazione e cambiamento del sistema economico regionale. 2) Aumento della competitività attraverso la formazione di capitale umano appropriato per le nuove sfide competitive e lo sviluppo di cooperazioni e interazioni

strategiche tra mondo della ricerca e quello produttivo. 3) Organizzazione di servizi efficienti *ICT-based* per cittadini e imprese.

Un elemento molto interessante emerge dall'analisi delle Marche, dove gli aspetti problematici appena descritti sono declinati in una prospettiva futura con una *New Smart Specialization Strategy*, incentrata su 4 aree strategiche intersettoriali: *house automation, mechatronics, sustainable manufacturing, health and well-being*. Alle cinque aree strategiche sono poi connessi 10 principi di politica industriale (p. 27).

Un aspetto generale, che accomuna tutti i Report considerati finora, è l'esigenza di *integrazione sistemica* a vari livelli, al fine di conferire unitarietà di visione e orizzonti temporali condivisi a processi decisionali di investimenti pubblici e privati secondo coordinate ritenute sufficientemente solide.

Il *Report* sulla Provincia Autonoma di Trento presenta un micro-universo estremamente dinamico nell'orizzonte tecno-economico odierno per l'azione sinergica di fattori basilari, generati da idonee azioni strategiche pubbliche e private: 1) livello medio-alto di formazione del capitale umano, in seguito ad opportune strategie formative dell'Università e Centri di Ricerca. 2) La vicinanza con aree extra-nazionali ha favorito lo sviluppo di interdipendenze dinamiche a scala molto ampia, di cui hanno beneficiato anche 2 key global player industriali (nazionali e internazionali). 3) Il Trentino, caratterizzato da Piccole e Medie Imprese in un'area territoriale circoscritta, ha un elevato addensamento di competenze, organizzate innanzitutto nel Polo della Meccatronica, centrale nella prospettiva dell'I4.0, e poi in aree strategiche: robotica e *human-computer interaction, mechatronics and microsystems, sensors*. L'Università di Trento e due Fondazioni a partecipazione pubblica, come la Bruno Kessler, che ha unità di ricerca internazionali (ICT, Materiali e micro-sistemi, Fisica nucleare, Ricerca Matematica, Analisi delle sequenze bio-molecolari) e la Edmund Mach, centro di ricerca in agricoltura-cubo-ambiente, sono i principali soggetti pubblici che hanno potuto sviluppare, insieme a key player privati, circuiti di feedback a livello internazionale con lo sviluppo di progetti ad alto contenuto innovativo nei rispettivi ambiti di indagine.

In estrema sintesi, l'elevato dinamismo del Trentino è basato su alcune componenti basilari: 1) creazione e di un'infrastruttura della ricerca di rilievo internazionale. 2) Individuazione chiara di priorità strategiche, con funzioni manageriali svolte da adeguate tecnostutture. 3). Framework istituzionale con elevate capacità di elaborazione strategica a medio-lungo termine e propensione all'interazione a livello internazionale. 4) Pre-esistenza di un ambiente fortemente propenso ad interagire, rispetto al quale sono state attuate strategie di *upgrading* qualitativo molto lungimiranti ed efficaci. 5) Elevata dotazione di risorse sia di fonte nazionale che di matrice internazionale, grazie alla partecipazione a progetti di cooperazione tecnico-scientifica a livello internazionale.

Pensiamo a questo punto della nostra lunga analisi che si possano trarre alcuni insegnamenti per il futuro, nel senso di dedurre indicazioni al fine di favorire processi di elaborazione strategica mirati a stimolare dinamiche di trasformazione e adattamento dei sistemi produttivi a varia scala.

7.

14.0. IPOTESI DI LAVORO PER AZIONI STRATEGICHE COORDINATE E IL MANAGEMENT DI SISTEMI PRODUTTIVI COMPLESSI IN FASE DI TRANSIZIONE SOCIO-TECNICA

Dalle esperienze sinteticamente esaminate emerge innanzitutto che la formulazione di strategie può o deve avvenire simultaneamente a differenti livelli: nazionale, meso- regionale, micro-progettuale in imprese singole oppure in network. È la conferma che uno dei fili conduttori dello scenario evolutivo odierno, che abbiamo chiamato Multiverso, è la *multiscalarità*. Una seconda lezione da trarre, sia dai risultati più positivi che dalle realtà con maggiori problemi, è l'importanza dell'*integrazione sistemica*: la messa in opera di un apprezzabile insieme di iniziative e la diffusione di interazioni tra imprese e centri di ricerca non garantisce l'effettuazione di salto qualitativo, in mancanza di efficaci strutture connettive stabili sul piano strategico-operativo.

La terza lezione utile consiste nell'importanza da attribuire al funzionamento di un'adeguata *infrastruttura istituzionale* (*soft infrastructure* nel gergo dei teorici del management), cioè un set di agenti Istituzionali e non, con visioni strategiche e priorità di medio-lungo termine, individuate attraverso analisi sistematiche di scenari e traiettorie evolutive.

In questo orizzonte la partnership tra soggetti istituzionali e key player privati (nazionali e internazionali) è cruciale, come dimostra in modo esemplare l'esperienza trentina e a scala più ampia quello che accade in Germania e negli Usa. Un'infrastruttura istituzionale di questo tipo è basilare non solo per contribuire al riorientamento dinamico dell'apparato produttivo, ma anche al fine di internazionalizzare le azioni e quindi perseguire più alti livelli di efficienza ed efficacia.

Il quarto insegnamento desumibile è che per affrontare il problema, tuttora rilevato in alcune regioni italiane, del divario tra potenziale tecnico-scientifico e composizione tecnico-economica dell'apparato produttivo, occorre svolgere azioni strategiche nel campo tradizionalmente definito del trasferimento tecnologico. L'analisi svolta e la letteratura internazionale in tema di business induce a ritenere che non di "semplice" trasferimento si tratti, bensì di un complesso processo di riprogettazione su nuove basi di processi, prodotti, funzionalità socio-economiche, modelli e stili di vita. In questa prospettiva l'esistenza di agenti catalizzatori in grado di stimolare dinamiche di *co-creation*, partnership strategiche e progettuali multi-scala è decisiva. Occorre enfatizzare ancora un punto molto significativo. La multidimensionalità degli interventi strategici implica che sia necessario realizzare mix tra approcci orizzontali e *mission-oriented*, come avviene sia in Paesi "liberisti" come Inghilterra e Stati Uniti, sia in Paesi europei con una lunga tradizione più "interventista" da parte dello Stato (Germania in primis). Questa affermazione vale sia per le realtà che si muovono necessariamente sulla frontiera tecnico-scientifica (esigenze di preservazione di leadership globale) sia per coloro che non possono permettersi di perdere eccessivamente terreno rispetto alla *shifting frontier*, specialmente durante le fasi storiche di turbolenza e di accelerazione tecnico-scientifica come quella odierna.

Sulla base di questi insegnamenti effettuiamo una sorta di esperimento mentale. Alla luce di tutta l'analisi svolta nei vari capitoli, proponiamo un semplice esercizio di elaborazione strategica, che raccoglie e sistematizza –sia pure sinteticamente– gli spunti di riflessione desunti via via.

Il framework che proponiamo è direttamente operativo, ma si basa sul background teorico più volte esplicitato nel corso dei capitoli precedenti. Una sua caratteristica importante è la natura "frattale", ovvero la possibilità di riprodurlo a macro- meso- e micro- scala.

Il punto di partenza è logicamente l'individuazione delle sfide descritte all'inizio di questo paragrafo, che divengono mega-trend con cui misurarsi in un'ottica di medio-lungo periodo.

In riferimento all'Italia e alle sue specificità ne ipotizziamo uno come puro "esperimento mentale", cercando di discriminare al suo interno alcune componenti prioritarie, veri e propri punti di ancoramento strategico.

Il *mega-trend assunto è la ristrutturazione del patrimonio edilizio esistente*, per far fronte a vincoli ambientali ed energetici, nonché emergenze conseguenti ad eventi naturali.

Punti di ancoramento strategico per *direttrici progettuali* sono così individuate: 1) *smart buildings and smart homes*, concepite come case dotate di un insieme di dispositivi di controllo di set predefiniti di parametri rilevanti per le condizioni vita all'interno: controllo e gestione delle risorse (energia, acqua, cibi). Ciò implica lo studio e la messa in opera di nuovi materiali appropriati rispetto agli obiettivi, la ridefinizione di assetti estetico-funzionali e strutturali. 2) Risparmio e produzione di energia, perché si tratta di modificare le abitazioni pensandole come "sistemi energetici", quindi come flussi integrati di materiali, energia e informazioni concernenti gli stili di vita della varie tipologie di abitanti, rispetto ai quali viene modellato l'impiego delle risorse materiali e immateriali. Dopo quanto è stato più volte analizzato e discusso nei capitoli precedenti, la riprogettazione dei modelli di produzione consumo, il ri-orientamento degli stili di vita assumendo la priorità del contenimento dei fabbisogni energetici e il rispetto di vincoli ambientali sempre più stringenti potrebbero costituire un ancoramento strategico non difficilmente parametrizzabile per abitazioni, prodotti e modalità di erogazione di molti servizi. 3) Prevenzione di eventi catastrofici (naturali, provocati da errori umani), il che comporta la modellazione computazionale di macro e micro- scenari ambientali alternativi, mirati sulle singole realtà economico-territoriali e abitative, per definire i progetti e gli strumenti più idonei per scegliere le opzioni progettuali più appropriate a seconda degli schemi di riferimento. Parallelamente dovrebbero essere sviluppati modelli di simulazione e di management sia per realizzare la resilienza (Acatech, 2014) di macro- e micro- sistemi abitativi urbani e territoriali che per organizzare modelli di gestione delle emergenze post-eventi. 4) Ristrutturazione energetico-ambientale degli edifici pubblici e delle maggior installazioni di pubblica utilità. In questo caso si va dalla manutenzione e controllo, al recupero di funzionalità, alla valorizzazione economica. È chiaro che sono interessati da questo tipo di attività di valenza strategica sia il patrimonio artistico che quello rimasto inutilizzato, nell'ipotesi complementare di promuovere la creazione di società ad hoc (start-up, piccole imprese innovative) con competenze multiple di giovani provenienti da più corsi di Laurea (Ingegneria, Architettura, Informatica, Economia).

I quattro ancoramenti strategici, introdotti come esperimento mentale, portano a concepire alcuni *addensamenti di conoscenze interdisciplinari*, da realizzare a supporto di una progettazione multi-scala. In questo orizzonte è da ritenere importante la formazione, nell'ambito di un framework sistemico, di un insieme composito di competenze che comprendono elettronica, energetica, sensoristica, ingegneria civile, economia e management di sistemi innovativi complessi. L'intersezione tra campi disciplinari e le interazioni tra competenze possono essere innescate da un'*architettura strategica*, composta da due elementi funzionali: 1) creazione di team di scenario, cioè gruppi interdisciplinari (Università, Centri di Ricerca, imprese leader) che elaborino modelli rappresentativi dei processi in atto e potenziali per gli ambiti di riferimento già indicati. 2) Costituzione di una struttura flessibile per l'elaborazione strategica, composta da una pluralità di team di progetto, miranti ad affrontare temi e questioni tecno-economiche connesse agli ancoramenti strategici qui introdotti a titolo esemplificativo.

Un altro nodo essenziale dell'architettura per l'elaborazione delle strategie è l'esistenza di un *nucleo strategico-operativo*, al cui interno siano presenti *key player* (global leader, imprese particolarmente innovative, soggetti pubblici in grado di catalizzare risorse e processi interattivi)

e agenti di *second and third tier*, ovvero entità economico-produttive operanti in più settori, le quali siano attratte dalla pubblicazione degli orientamenti strategici, dall'esistenza di un'architettura funzionale. Il nucleo strategico dovrebbe muoversi in prima istanza verso la creazione di nuove piattaforme tecnologiche, oppure verso il rafforzamento di quelle esistenti, nell'intento di dare origine a veri e propri eco-sistemi digitali (urbani, produttivi, geologici, economico-territoriali). È evidente che la prospettiva degli eco-sistemi digitali è particolarmente rilevante per l'attivazione di filiere settoriali e funzioni trasversali a più filiere in modo tale che, partendo da un ancoramento strategico prescelto, possano realizzare diramazioni in qualsiasi direzione, con intrecci e scambi conoscitivi non calcolabili a priori. Si pensi agli impieghi possibili e non ancora conosciuti della meccatronica, alla realizzazione di vere *smart cities* (al di là delle enfattizzazioni pubblicitarie di linee generali), ai flussi multidirezionali che si interconnettono nella bio-economia.

Dal framework strategico così delineato possono essere dedotte indicazioni operative di *policy* con un solido e ben definito sistema di punti di riferimento per lo sviluppo dell'approccio multi-scala, che potrebbe essere sviluppato pienamente grazie ad una serie di strumenti: 1) misure che abbiano come target micro-interventi progettuali direttamente connessi allo schema esplicitato e definiti dall'Architettura strategico-operativa. 2) Cambiamento delle strutture degli incentivi per gli operatori, al fine di orientarli mediante attività informative mirate e soprattutto con la predisposizione di servizi funzionali di progettazione, supporto finanziario specifico e solidi collegamenti con scenari di medio-lungo periodo. 3) Contributi a fondo perduto per investimenti, in questo caso strettamente connessi ad un quadro strategico condiviso tra operatori pubblici e privati.

Ultimo e fondamentale punto è che il tutto richiede l'assunzione sostanziale di due principi di fondo: 1) partnership pubblico-privato. 2) Esistenza di agenti catalizzatori.

Per quanto riguarda il primo, bisogna enfatizzare che il funzionamento concreto delle partnership dipende in modo cruciale dall'esistenza di una tecnostruttura pubblica con le caratteristiche e gli propensioni comportamentali ben sintetizzate da Rodrik (2014, cfr § 6.2).

Per quanto concerne il secondo, infine, è chiaro che i processi e i sistemi multi-scala potranno utilizzare proficuamente l'enorme potenziale esistente nel Multiverso se si mettono in moto meccanismi tali da rendere congruenti gli orizzonti strategici ed operativi dei vari agenti tecno-economici. La predisposizione di strumenti e meccanismi adatti a favorire attività di micro-progettazione correlata agli ancoramenti strategici è importante, ma deve essere sostenuta e favorita dalla funzione svolta da agenti catalizzatori, che possono essere pubblici e privati, come abbiamo già visto in precedenza. È chiaro, però, che una tecnostruttura pubblica sarebbe un perno essenziale nell'attivare interazioni feconde all'interno dell'architettura qui ipotizzata come semplice esperimento mentale.

La funzione catalizzatrice richiede un mix di ingredienti: competenza, potere decisionale, controllo dei processi di attuazione, indipendenza e autonomia progettuale¹⁰⁰. Lo scenario odierno dell'*Ubiquitous computing* e della *digital connectivity* spinge a ridefinire continuamente le regole del gioco competitivo e lo spazio degli agenti. Sta a ciascuno di essi lo sviluppo della capacità di essere all'altezza delle sfide.

¹⁰⁰ Esiste una letteratura specialistica importante in merito, sviluppata da soggetti pubblici nell'economia maggiormente *market-oriented* del mondo cioè quella Usa. Esula dagli scopi di questo contributo l'approfondimento di temi in materia, ma è comunque disponibile (a richiesta) una vasta bibliografia di natura ingegneristica ed economico-manageriale con trattazioni sia di tipo teorico che con puntuali riferimenti a progetti specifici, ricostruiti nelle varie fasi realizzative.

BIBLIOGRAFIA

- ABB Contact (2014), “Connecting the world - Industry 4.0”, *Contact the Customer Magazine*, n. 3
- Acatech (National Academy of Science and Engineering) (2011), *Cyber-Physical Systems Driving force for innovation in mobility, health, energy and production*
- Acatech (National Academy of Science and Engineering) (2013), *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*, Final report of the Industrie 4.0 Working Group
- Acatech (National Academy of Science and Engineering), Thomas K. (a cura di) (2014), *Resilience by Design: a strategy for the technology issues of the future*
- Acemoglu D., Autor D. (2012), “What Does Human Capital Do? A Review of Goldin and Katz’s The Race between Education and Technology”, *Journal of Economic Literature*, vol. 50, n. 2, pp. 426-463
- Adner R., Kapoor R. (2010), “Value creation in innovation ecosystems: how the structure of technological interdependence affects firm performance in new technology generation”, *Strategic Management Journal*, n. 31, pp. 306–333
- Agneeswaran V.S. (2012), “Big-Data - Theoretical, Engineering and Analytics Perspective”, in Srinivasa S., Bhatnagar V. (a cura di), *Big Data Analytics*, Springer, pp. 8-15
- Alexander C. (1973), *Notes on the Synthesis of Form*, Harvard University Press
- Alliance du Futur, Industrie 4.0 (2016), Plan d’Action Commun Gemeinsamer Aktionsplan, 26 April
- Alpaydin E. (2010), *Introduction to Machine Learning*, MIT Press MA
- Amitt R., Zott C. (2012), “Creating Value through business model innovation”, *MIT Sloan Management Review*, vol. 53, n. 3, pp. 40-49
- Arthur W. B., (2011), *The Second Economy*, McKinsey Global Institute, October
- ASME (The American Society of Mechanical Engineers) (2013), *Why Manufacturing Matters*
- Atkinson R.D. (2015) *An Innovation-Based Clean Energy Agenda for America*, Center for Clean Energy Innovation, June
- Atlantic Council (2013), *Envisioning 2030: US Strategy for the Coming Technology Revolution*, December
- Atlantic Council (2015a), *Technology Will Keep Changing Everything* *Technology Will Keep Changing Everything and Will Do It Faster and Will Do It Faster*, July
- Atlantic Council (2015b), *Renewable Energy’s Coming of Age: A Disruptive Technology?*, Issue Brief, December
- Autor D. H., (2010), *The Polarization of Job Opportunities in the U.S. Labor Market Implications for Employment and Earnings*, Center for American Progress, The Hamilton Project
- Autor D. H., Levy F., Murnane R.J. (2003), “The Skill Content of Recent Technological Change: An Empirical Exploration”, *Quarterly Journal of Economics*, vol. 116, n. 4, pp. 1279-1334

- Autor D., Katz L.F., Krueger A. (1998), "Computing Inequality: Have Computers Changed the Labor Market?", *Quarterly Journal of Economics*, vol. 113, n. 4, pp. 1169-1214
- Autor D.H. (2015), "Polanyi's Paradox and the Shape of Employment Growth", Federal Reserve Bank of St. Louis: Economic Policy Proceedings, *Reevaluating Labor Market Dynamics*, pp. 129-177
- Autor D.H., Dorn D., (2013), "The Growth of Low-Skill Service Jobs and the Polarization of the US Labor Market", *American Economic Review*, vol. 103, n. 5, pp. 1553-1597
- Bacci L., Labory S., Lombardi M. (2010), "The evolution of external linkages and relational density in the Tuscan leather industry", in Belussi F., Sammarra A. (a cura di), *Business Networks in Clusters and Industrial Districts*, Routledge, pp. 146-171
- Bacci L. (2004) (a cura di), *Distretti e Imprese nel sistema moda della Toscana*, FrancoAngeli, Milano
- Badlwin C.Y. (2012), "Organization Design for Business Ecosystem", *Journal of Organization Design*, vol. 1, n. 1, pp. 20-23
- Baldwin C.Y., Clark K.B. (1997), "Managing in the age of nodularity", *Harvard Business Review*, September-October, pp. 84-93
- Baldwin C.Y., Clark K.B. (2000), *Design Rules*, Volume 1, *The Power of Modularity*, MIT Press, Cambridge MA.
- Baldwin C.Y., Clark K.B. (2006), "Modularity in the Design of Complex Engineering Systems", in Braha D., Minai A.A., Bar,-Yam Y. (a cura di), *op. cit.*, pp. 175-205
- Baldwin C.Y., Hiennerth C., von Hippel E. (2006), "How user innovations become commercial products: A theoretical investigation and case study", *Research Policy*, n. 35, pp. 1291-1313
- Baldwin, C.Y, Woodard C.J. (2009), "The architecture of platforms: a unified view", in Gawer A. (a cura di), *Platforms, Markets and Innovation*, Elgar, pp. 19-45
- Baldwin, Carliss Y. (2012), "Organization Design for Business Ecosystems", *Special Issue on The Future of Organization Design*, *Journal of Organization Design*, vol. 1, n. 1
- Ballon P. (2014), "Old and New Issues in Media Economics" in Donders K., Pauwels C.J. Loisen (eds.), *The Palgrave Handbook of European Media Policy*, Palgrave Macmillan, pp. 70-95
- Banterle F., Cardillo F.A., Malomo L., Lecce A.R (2015), "An Augmented Reality App for Cultural Heritage", *ERCIM News*, n. 103, pp. 16-17
- Baran P. (1967), *The future of computer utility*, Rand Corporation
- Bar-Yam Y. (1997), *From human being to human civilization, a complexity profile*, NECSI Technical Report. Also appeared in the Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2002
- Bar-Yam Y. (2003), "When Systems Engineering Fails - Toward Complex Systems Engineering", *IEEEExplore*, 17 November 2003, pp. 2021-2028
- Bar-Yam Y. (2004), "Multiscale variety in complex systems", *Complexity*, pp. 37-45
- Bar-Yam Y. (2006), "Engineering Complex Systems: Multiscale Analysis and Evolutionary Engineering", in Braha, Minai A.A., Bar,-Yam Y. (a cura di), *op. cit.*, pp. 22-39

- BCG (Boston Consulting Group) (2010) “Signal Advantage”, *BCG Perspectives*
- BCG (Boston Consulting Group) (2013), “Managing the *Unmanageable*”, *Radical Innovation*, September
- BCG (Boston Consulting Group) (2014a), *Time-Based_Compensation_with_Fast_Data*, April
- BCG (Boston Consulting Group) (2014c), *Germany’s Energiewende. The End of Power Market Liberalization?*
- BCG (Boston Consulting Group, Sanders A., Wolfgang M, authors) (2014), “The Rise of Robotics”, *BCG Perspectives*, August
- BCG (Boston Consulting Group, Sirkin H.L., Zinser M., Rose J.R., Authors), (2015), “Why Advanced Manufacturing will Boost Productivity”, *BCG Perspectives*, January
- Becattini G., Bellandi M., De Propris L. (2009), *Handbook of industrial districts*, Elgar
- Beinhocker E. D. (1999), “Robust Adaptive Strategies”, *MIT Sloan Management Review*, vol. 40, n. 3, pp. 94-106
- Beinhocker E. D. (2006), *The origin of wealth: Evolution, complexity and the radical remaking of Economics*, Harvard Business School Press
- Bell G., Hey T., Szalay S. (2009), “Beyond the Data Deluge”, *Science*, n. 363, March, pp. 1297-1298
- Bertoen e van der Heijden, Deloitte (2016), *Exponential Organizations. Innovate Organizations instead of only products or business model*
- Bessen J. (2015), “Toil and Technology”, *Finance & Development*, March, pp. 16-19
- Beyer D. (2016), *The Future of Machine Intelligence*, O’Reilly Ed.
- BMF (Federal Ministry of Education and Research) (2010), *Ideas. Innovation. Prosperity. High tech Strategy 2020 for Germany*
- BMWi (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy) (2014), *Renewable Energy Sources Act*
- BMWi (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy) (2016a), *The next phase of the energy transition can now begin*
- BMWi (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy), 2016b, *Digitization of Industrie - Platform Industrie 4.0*, Progress Report, April
- Bohn R.E. (1994), “Measuring and Managing Technological Knowledge”, *MIT Sloan Management Review*, vol. 36, n. 1, pp. 60-73
- Bohte S., Nguyen H.S. (2016), “Modern Machine Learning: More with Less, Cheaper and Better”, *ERCIM News*, n. 107, October, pp. 16-17
- Bourzac C. (2013); “The First Carbon Nanotube Computer”, *Technology Review*, 25September
- Bowles J. (2014), *The computerisation of European jobs*, Bruegel Center, 17 July
- Braha D., Minai A.A., Bar-Yam Y. (a cura di) (2006), *Complex Engineered Systems*, Springer

- Braungart M., McDonough W. (2002), *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, North Point Press
- Braungart M., McDonough W., Bollinger A. (2007), "Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design Business model Innovation", *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, Issues 13-14, September, pp. 1337-1348
- Broderick S., Rajan K. (2015), Informatics derived materials databases for multifunctional properties", *Science and Technology of Advanced Materials*, n. 16, pp. 1-8
- Brown J. (2000), *Menti, machine e multiverso*, Einaudi
- Buenstorf G. (2006), "Sequential production, modularity and technological change", *Structural Change and Economic Dynamics*, n. 16, pp. 221-241
- Callebaut W., Rasskin-Butman D. (2005), *Modularity. Understanding the Development and Evolution of Natural Complex Systems*, The MIT Press
- Campagnolo D., Camuffo A. (2010), "The Concept of Modularity in Management Studies: A Literature Review", *International Journal of Management Reviews*, pp. 259-283
- Capgemini Consulting (2014), *Industry 4.0 - The Capgemini Consulting View*
- Caspin-Wagner K., LeWin M.L., Massini S., Peeters C. (2013), "The Underexplored role of Managing Interdependencies fit in Organization Design and Performance", *Journal of Organizational Design*, vol. 2, n. 1, pp. 34-41
- CFI (Cluster Fabbrica intelligente) (2015), *Roadmap per la ricerca e l'innovazione*
- Chandler A. D. Jr (1973), "Decision Making and Modern Institutional Change", *The Journal of Economic History*, vol. 33, n. 1, pp.1-15
- Chandler A.D. (1992), "Organizational Capabilities and the Economic History of the Industrial Enterprise", *Journal of Economic Perspectives*, vol. 6, n. 3, pp. 79-100
- Chandler A.D. Jr (1986), "The Beginnings of the Modern Industrial Corporation", *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 130, n. 4, pp. 382-389
- Chandler A.D. Jr (1977), *The Visible Hand The Managerial Revolution in American Business*, MIT University Press MA
- Chandler A. D. Jr. (2005), *Shaping the Industrial Century*, Harvard University Press, Cambridge, MA
- Charniak E., McDermott D. (1985), *Introduction to Artificial Intelligence*, Addison-Wesley
- Chen H., Chiara R.H., Storey V.C. (2012), "Business Intelligence and Analytics: Fro Big Data to Big Impact", *MIS Quarterly*, vol. 36, no. 4, pp. 1165-1188
- Chertow M.R. (2000), "Industrial Symbiosis: Literature and Taxonomy", *Annual Review of Energy and the Environment*, n. 25, pp. 313-337
- Chertow M.R., Lombardi R. D. (2005), "Quantifying Economic and Environmental Benefits of Co-Located Firms", *Environmental Science and Technology*, vol. 39, n. 17, pp.6535-6541

- Chesbrough H.W. (2003), *Open Innovation. The new Imperative for Creating and Benefiting from Innovation*, Harvard Business School Press
- Cisco (2012), *Unlocking Value in the Fragmented World of Big Data Analytics How Information Infomediaries Will Create a New Data Ecosystem*, June
- Clark K. B. (1985), “The interaction of design hierarchies and market concepts in technological evolution”, *Research Policy*, vol. 14, n. 5, pp. 235-251
- Claudel M., Nagel T., Ratti C. (2016), “From Origins to Destinations: The Past, Present and Future of Visualizing Flow Maps”, *Built Environment*, vol. 42, n. 3, pp. 338-355
- Cusumano M.A. (2010) “The Evolution of Platform Thinking”, *Communications of the ACM*, vol. 53, n. 1, pp. 32-34
- Cusumano M.A., Gawer A. (2002), “The Elements of Platform Leadership”, *MII Sloan Management Review*, Spring, pp. 51-57
- Cyert R.M., March J. G. (1963), *A Behavioral Theory of the Firm*, Wiley-Blackwell
- D’Aveni R. A., Canger J.M., Doyle J.J. (1995), “Coping with Hypercompetition: Utilizing the New 7S’s Framework”, *The Academy of Management Executive*, vol. 9, n. 3, pp. 45-60
- D’Aveni R.A., Dagnino G.B., Smith K.G. (2010), “The Age of Temporary Advantage”, *Strategic Management Journal*, n. 31, pp. 1371-1385
- Dapp T. (2014), *Fintech - The digital (r)evolution in the financial sector: Algorithm-based banking with the human touch*, Deutsche Bank Research, Frankfurt am Main
- Darvas Z., Wolff G. (2016), *An anatomy of inclusive growth in Europe*, Bruegel Blueprint Series, n. 26
- Dashchenko O. (2006), “Analysis of Modern Factory Structures and Their Transformability”, in: Dashchenko A.I. (a cura di), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Springer, pp. 27-43
- Dautenhann K. (2007), “Socially intelligent robots: dimensions of human-robot interaction”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, n. 362, pp. 679-704
- Dautenhann K. (2015), “Human-Robot Interaction”, in *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction*, Interaction Design Foundation
- David P.A. (1990), “The Dynamo and the Computer: An Historical Perspective on the Modern Productivity Paradox”, *American Economic Association Papers and Proceedings*, May, pp. 365-372
- Davis J. (2011), *Smart Manufacturing, Manufacturing Intelligence and Demand Dynamic Performance*, FOCAPO2012 (Foundations of Computer Aided Process Operations), pp. 1-17
- DBR (Deutsche Bank Research) (2013), *Energiewende 2.0 - don’t risk competitiveness*
- DBR (Deutsche Bank Research) (2014), *The changing energy mix in Germany The drivers are the Energiewende and international trends*
- DBR (Deutsche Bank Research) (2016), *German ‘Energiewende’: Many targets out of sight*

- Deloitte (2011), *Performance ecosystems A decision framework to take performance to the next level*, Deloitte University Press
- Deloitte (2013), *From exponential technologies to exponential innovation*, Deloitte University Press
- Deloitte (2014), *Demystifying artificial intelligence. What business leaders need to know about cognitive technologies*, Deloitte University Press
- Deloitte (2015), *Disruption ahead: Deloitte's point of view on IBM Watson*, March
- Desmet D., Duncan E., Scanlan J., Singer M. (2015), *Six building blocks for creating a high-performing digital enterprise*, McKinsey Global Institute, September
- Deustch D. (1997), *La trama della realtà*, Einaudi
- Dirks S., Keeling M. (2009), *A vision of smarter cities. How cities can lead the way into a prosperous and sustainable future*, IBM Global Business Services
- Dodgson M., Gann D., (2011), "Technological Innovation and Complex Systems in Cities", *Journal of Urban Technology*, vol. 18, n. 3, pp. 101-113
- Dokko J., Mumfrod M., Schanzenbach D. W. (2015), *Workers and the Online Gig Economy*, A Hamilton Project Framing Paper, Brookings Institution
- EC (European Commission) (2012), *A Stronger European Industry for Growth and Economic Recovery*, COM (2012.10.10)
- EC (European Commission) Commission Staff Working Document (2014), *Advancing Manufacturing - Advancing Europa' - Report of the Task Force on Advanced Manufacturing for Clean Production*, ECR, European Competitiveness Report 2013
- Edelman G.M., Gally J-A. (2001), "Degeneracy and complexity in biological systems", *PNAS*, 20 November, vol. 98, n. 24, pp. 13763-13768
- EEG (2014), *Act on the Development of Renewable Energy Sources (Renewable Energy Sources Act - RES Act 2014)*.
- El Haggag S. (2010), *Sustainable Industrial Design and Waste Management Cradle-to-cradle for Sustainable Development*, Elsevier
- Eliasson G. (2005), "The nature of economic change and management in a new knowledge based information economy", *Information Economics and Policy*, 17, pp. 428-456
- ElMaraghy H., Schuh G., ElMaraghy W., Piller F., Schonsleben P., Tseng M., Bernard A. (2013), "Product variety management", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, n. 62, pp. 629-652
- ElMaraghy W., ElMaraghy H., Tomiyama T., Monostori L. (2012), "Complexity in engineering design and manufacturing", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, n. 61, pp. 793-814
- Elragal A., Haddara M. (2014), "Big Data Analytics: A text Mining-Based Literature Analysis", Conference Paper, Available from: Moutaz Haddara
- ENEA (2014), Cutaia L., Mancuso E., Scaffoni S., Luciano A., Barberio G. (Technical Group), *First results of the implementation of the Industrial Symbiosis Platform in Italy*

- ENEA (2015), "The experience of the first industrial symbiosis Platform in Italy", *Environmental Engineering and Management Journal*, vol.14, n. 7, pp. 1521-1533
- Eppinger S. (2011), "The Fundamental Challenge of Product Design", *Journal of Innovation Product Management*, n. 28, pp. 399-400
- ESB Business School Reutlingen / Fraunhofer Austria Research/TU Vienna (2015), *Implications for Learning Factories from Industry 4.0 Challenges for the human factor in future production scenario*, (Authors: Sihh W., Hammel V.)
- European Parliament, Directorate General for International Policies, Policy Department A: Economics and Scientific Policy (2016), *Industry 4.0*, February
- Feil-Seifer D., Matari' M.J. (2005), *Defining Socially Assistive Robotics*", Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, June 28 - July 1, pp. 465-468
- Ferrucci D., Brown E., Chu-Carroll J., Fan J., Gondek D., Kalyanpur A.A., Lally A., Murdock J.W., Nyberg E., Prager J., Schlaefler N., Welty C. (2010), "Building Watson: An Overview of the DeepQA Project", *Artificial Intelligence Magazine*, Fall, pp. 51-79
- Finnveden G., Hauschild M-Z., Ekvall T., Guinee J., Heijungs R., Hellweg S., Koehler A., Pennington D., Suh S. (2009), "Recent developments in Life Cycle Assessment", *Journal of Environmental Management*, n. 91, pp. 1-21
- Fong T, Nourbakhsh I., Dautenhahn K. (2003), "A survey of socially interactive robots", vol. 42, n. 3-4, pp. 143-166
- Freeman C., Louça F. (2002), *As Time goes by. From the Industrial Revolutions to the Information Revolution*, Oxford University Press
- Freeman S. (2013), "It's in Your Own Best Interest", *The New York Review of Books*, 24 October
- Frey C.B., Osborne M.A. (2013), *The Future of Employment: How susceptible are Jobs to Computerisation?*, Oxford Martin School WP
- Galle P. (2009), "The ontology of Gero's FBS model of designing", *Design Studies*, n. 30, pp. 321- 339
- Gausemeier J., Stollt G., Wenzelmann C. (2006), "Future Scenarios, Describing Consistent Networks of Influences from Markets, Technologies and Business Environment", in: Dashchenko A.I. (a cura di), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Springer, pp. 697-717
- Geels F. W. (2004), "From sectoral systems of innovation to socio-technical systems. Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory", *Research Policy*, n. 33, pp. 897-920
- German National Academy of Sciences Leopoldina, Acatech - National Academy of Science and Engineering, Union of the German Academies of Sciences and Humanities (2015), *Incorporating the German Energiewende into a comprehensive European approach*, Position Paper
- Gero J. S. (1990), "Design prototypes: a knowledge representation schema for design", *AI Magazine*, vol. 11, n. 4, pp. 26-36
- Gero, J. S., Kannengiesser U. (2004), "The situated function-behaviour-structure framework", *Design Studies*, vol. 25, pp. 373-391
- Gershenson C. (2013), "Living in Living Cities", *Artificial Life*, n. 19, pp. 401-420

- Gershenson J.K., G.J.Prasad G.J., Zhang Y. (2003), "Product modularity: definitions and benefits", *Journal of Engineering Design*, vol. 14, n. 3, September, pp. 295-313
- Gertner J. (2014), "Behind GE's Vision For The Industrial Internet Of Things", *Fast Company*, pp. 18-6
- Ghemawat P. (2002), "Competition and Business Strategy in Historical Perspective", *The Business History Review*, vol. 76, n. 1, pp. 37-74
- Gibney E. (2015), "2d or not 2D", *Nature*, vol. 522, n. 24, June
- Gillingham K., Newell R. G., Palmer K. (2009), *Energy Efficiency Economics and Policy*, NBER National Bureau of Economic Research, Working Paper n. 15031
- Goldin C., Katz L. (2010), *The Race between Education and Technology*, Mass, Cambridge, Belknap Press of Harvard University Press
- Goos M., Manning A., Salomons A. (2014), "Explaining Job Polarization: Routine-Biased Technological Change and Offshoring", *American Economic Review*, vol. 104, n. 8, pp. 2509-2526
- Govindarajan S: (2013), "Finding your place in the competitive jungle", *Harvard Business Review*, Blog, pp. 18-4
- Grieves M.W. (2014), "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication", Copyright © Michael W. Grieves, LLC 2014, pp. 1-7
- GTAI (German Trade & Invest) (2015), *Industrie 4.0. Smart Manufacturing for the Future*
- Guinee J. B. (a cura di), *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*, Kluwer
- Hagel III J., Brown J. S., Davison L. (2009), "The big shift. Measuring the Forces of Change", *Harvard Business Review*
- Hagel III J., Brown J. S., Davison L. (2010), *The Power of Pull: How Small Moves, Smartly Made, Can Set Big Things in Motion*, Basic Books
- Hallegatte S., Heal G., Fay M., Treguer D. (2012), *From growth to green growth. A framework*, NBRS National Bureau of Economics Research, Working Paper n. 17841, <http://www.nber.org/papers/w17841>
- Hallegatte, S. (2011), *How economic growth and rational decisions can make disaster losses grow faster than wealth*, *Policy*, Research Working Paper n. 5617, The World Bank
- Hartmann B., King W.P., Narayan S. (2015), *Digital manufacturing: The revolution will be virtualized*, McKinsey&Company, August
- Hausmann R., Rodrik D. (2003), "Economic development as self-discovery", *Journal of Development Economics*, n. 72, pp. 603-633
- Helbing D. (2015a), *The Automation of Society is Next. How to survive the Digital Revolution*, Helbing Copyright
- Helbing D. (2015b), "Societal, Economic, Ethical and Legal Challenges of the Digital Revolution, From Big Data to Deep Learning, Artificial Intelligence, and Manipulative Technologies chapter 7 of D. Helbing", *Thinking Ahead-Essays on Big Data, Digital Revolution, and Participatory Market Society*, Springer, Berlin

- Hermann M., Pentek T., Boris O. (2015), "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review", Working Paper n. 2015, Technische Universität Dortmund Fakultät Maschinenbau Audi Stiftungslehrstuhl Supply Net Order Management www.snom.mb.tu-dortmund.de
- Hertzman A., Fleet D. (2010), *Machine Learning and Data Mining. Lecture Notes*, CSC 411/D11, Computer Science Department University of Toronto
- Hey T., Tansley S., Tolle K. (2009), *The Fourth Paradigm. Data-Intensive Scientific Discovery*, Microsoft Research Richmond
- Hippel E.V. (2006), *Democratizing Innovation*, Cambridge, MIT Press
- Huber A. Lammer L., Weiss A, Vincze M. (2014), "Designing Adaptive Roles for Socially Assistive Robots: A New Method to Reduce Technological Determinism and Role Stereotypes", *Journal of Human-Robot Interaction*, vol. 3, n. 2, pp. 100-115
- Iansiti M., Lakhani K.R. (2014), "Digital Ubiquity. How Connections, Sensors, and Data Are Revolutionizing Business", *Harvard Business Review*, November, pp. 91-99
- IBM (2012), *Analytics: The real-world use of big data*, October
- IBM, Kelly III J.E. (2015), *Computing, cognition and the future of knowing*
- IDC (International Data Corporation) (2010), *The Digital Universe Decade - Are You Ready?* May
- IDC (International Data Corporation) (2013), *The Digital Universe in 2020: Big Data Bigger Digital Shadows, and Biggest Growth in the Far East - The United States*, February
- IDC (International Data Corporation) (2014), *The Digital Universe of Opportunities*, April
- IDC (International Data Corporation) (2015), *Human Conduct Risk: Opportunities for Cognitive Thinking*, June
- IEA, International Energy Agency (2013), *Tracking Clean Energy Progress*
- IEA, International Energy Agency (2015), *Tracking Clean Energy Progress*
- IEA, International Energy Agency (2016), *Tracking Clean Energy Progress*
- ILCD (International Reference Life Cycle Data System) (2010), *General guide for life cycle assessment (LCA)-detailed guidance*. Ispra, Italy: Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability
- Immelt J., Govindarajan S., Trimble C. (2009), "How GE is disrupting itself", *Harvard Business Review*, October, pp. 56-69
- INCOSE (International Council on Systems Engineering) (2015), *A Complexity Primer for Systems Engineers*
- IRPET, Unioncamere Toscana (2013), *La situazione economica della Toscana. Consuntivo anno 2012 Previsioni 2013 - 2014*, Giugno
- Ismail S., Malon M.S., Vna Geest Y., Diamandis P.H. (2014), *Exponential Organizations: Why new organizations are ten times better, faster, and cheaper than yours (and what to do about it)*, Singularity University Books

- ITU (International Communication Union) (2016), *Facts and Figures*
- Jaimovich N, Siu H. E. (2012) *The Trend is the Cycle: Job Polarization and Jobless Recovery*, NBER National Bureau for Economic Research, Working Paper n. 18334
- Jiao L, Simpson T. W., Siddique Z. (2007), “Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, n. 18, pp. 5-29
- Johansson D., (2010), “The theory of the experimentally organized economy and competence blocs: an introduction”, *Journal of Evolutionary Economics*, n. 20, pp. 185-201
- Jorgensen A. (2013), “Social LCA-a way ahead?”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, n. 18, pp. 296-299
- Karabarbounis L., Neiman L. (2014), “The Global Decline of the Labor Share”, *The Quarterly Journal of Economics*, December, pp. 61-103
- Kim W.C., Mauborgne R. (2005), “Blue ocean strategy”, *Harvard Business Review*, October, pp. 74-84
- Kim W.C., Mauborgne R. (2006), *How to create Uncontested Market and Space and Make the Competition Irrelevant*, Harvard Business Press.
- Kirzner I.M. (1997), “Entrepreneurial Discovery and the Competitive Market Process: An Austrian Approach”, *Journal of Economic Literature*, vol. 35, Issue I, pp. 60-85
- Knowledge Wharftn School (2009), *The Mindset of a Problem-Finder*
- Koren Y. (2006), “General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems”, in: Dashchenko A.I, (a cura di), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Springer, pp. 27-43
- Koren Y., Heisel U., Jovane F., Moriwaki T., Pritschow G., Ulsoy G., Van Brussel H. (1999), “Reconfigurable Manufacturing Systems”, *Annals of the CIRP*, vol. 48, n. 2, pp. 527-540
- Lavie D., Stettner U., Tushman M.L. (2010), “Exploration and Exploitation Within and Across Organizations”, *The Academy of Management Annals*, vol. 4, n. 1, pp. 109–155.
- LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. (2015), “Deep learning”, *Nature*, n. 521, pp. 436-444
- Lenfle S., Baldwin C.Y. (2007), *From Manufacturing to Design: An Essay on the Work of Kim B. Clark*, Harvard Business School WP, n. 07-057
- Leonard T. J. (2008), “Book Review: Richard H. Thaler, Cass R. Sunstein, Nudge: Improving decisions about health, wealth, and happiness”, *Constitutional Political Economy*, pp. 313-317
- Levis A.H., Wagenhals L.W. (2008), “System architectures for life support systems”, in: EOLSS - Systems Engineering and Management for Sustainable Development, vol. I, EOLSS Publisher, Unesco, pp. 261- 281
- Lombardi M. (2003), “The Evolution of Local Production Systems: the emergence of the “invisible mind” and the evolutionary pressures towards more visible “minds”, *Research Policy*, vol. 32, issue 18, pp. 1443-1462

- Lombardi M. (2010), “Dinamiche tecno-economiche e strategie per i processi di transizione socio-tecnica”, in Perrone C., Zetti I (2010), *Il valore della terra. Teoria e applicazioni per il dimensionamento della pianificazione territoriale*, FrancoAngeli, Milano
- Lombardi M. (2011), “The production process as a complex, dynamic and ordered world”, in: De Liso N. Leoncini R. (a cura di), *Internationalization, Technological Change and the Theory of the Firm*, Routledge, pp. 31-65
- Lombardi M. (a cura di) (1999), *Evoluzione delle conoscenze e decisioni economiche*, FrancoAngeli, Milano
- Lombardi M., Macchi M. (2012), “Dinamica tecnico-economica, processi multi-scala, evoluzione degli agenti”, in Bellandi M., Caloffi A. (a cura di), *Innovazione e trasformazione industriale: la prospettiva dei sistemi di produzione locale italiani*, Il Mulino, Bologna, pp. 43-62
- Lombardi M., Macchi M. (2014), “Traiettorie di declino e di rinnovamento nell’organizzazione dell’industria tessile pratese”, in Bellandi M., Caloffi A. (a cura di), *I nuovi distretti*, Il Mulino, Bologna
- Lombardi M., Macchi M. (2016), *I processi decisionali. Ricerca e innovazione per l’esplorazione dell’ignoto*, Nerbini
- Lombardi R.D., Laybourn P. (2012), “Redefining Industrial Symbiosis Crossing Academic-Practitioner Boundaries”, *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, n.1, pp. 28-37
- Mackstroth D.J. (MAPI; Manufacturers Alliance for Productivity and Innovation) (2016), *The Manufacturing Value Chain Is Much Bigger Than You Think!*, PA-165, February
- Magone A., Mazali (a cura di) (2016), *Industria 4.0. Uomini e macchine nella fabbrica digitale*, Guerini e associati
- MAPI (Manufacturers Association for Productivity and Innovation) (2012), *Facts about Manufacturing*
- March J.G. (1991), “Exploration and Exploitation in Organizational Learning”, *Organizational Science*, vol. 2, n. 1, pp. 71-87
- Mariani M., Pirani E., Radicchi E. (2012), *Dinamiche di selezione dell’industria manifatturiera durante gli anni della crisi: alcune evidenze su microdati*, WP Irpet
- Markoff J. (2015), “Korean Robot Makers Walk Off With \$2 Million Prize”, *The New York Times*, n. 5, June
- Marples D.L. (1961), *The decisions of engineering design*, IRE Transactions on Engineering Management, pp. 35-71
- Martino M., Britter R., Outram C., Zacharias C., Biderman A., Ratti C. (2010), *Senseable city*, WP MIT SENSEable City Lab
- Mattila T., Lehtoranta S., Sokka L., Melanen, M., Nissinen A. (2012), “Methodological Aspects of Applying Life Cycle Assessment to Industrial Symbioses”, *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, n.1, pp. 51-60
- Mattman C.A. (2014), “Cultivating a research agenda for data science”, *Journal of Big Data*, vol. 1, n. 6, pp. 1-8

- Maugeri L. (2016), *The Global Oil Market: No Safe Haven for Prices*, Harvard Kennedy School, Belfer Center for Science and International Affairs, February
- Mazzucato M. (2011), *The Entrepreneurial State*, DEMOS; The Open University
- Mazzucato M. (2014a), *Lo Stato Innovatore*, Laterza, Bari
- Mazzucato M. (2014b), *The entrepreneurial State: Debunking private vs. public sector myths*, Anthem Press
- Mazzucato M. (2015a), “Which Industrial Policy Does Europe Needs”, *Intereconomics Forum*, ZBW - Leibnitz Information Center for Economics
- Mazzucato M. (2015b), *Building the Entrepreneurial State: A New Framework for Envisioning and Evaluating a Mission-oriented Public Sector*, Levy Economics Institute, Working Paper n. 824
- Mazzucato M. Penna C.C.R. (a cura di) (2015), *Mission-oriented finance innovation*, Rowman & Littlefield International
- Mazzucato M. (2013), *Finance, innovation and growth: finance for creative destruction vs. destructive creation*, in special issue of *Industrial and Corporate Change*, Mazzucato M. (ed.), vol. 22, n. 4, pp. 869-901
- McAfee A., Brynjolfsson E. (2011), *The Second Machine Age*, self-published
- McAfee A., Brynjolfsson E. (2015), “The Great Decoupling”, *Harvard Business Review*, June, pp. 66-74
- McArthur Foundation (Ellen), McKinsey Global Institute (2015), *Growth within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe*
- McCarthy I.P., Lawrence T.B., Wixted B., Gordon B.R. (2010), “A multidimensional conceptualization of environmental velocity”, *Academy of Management Review*, vol. 35, n. 4, pp. 604-626
- Mehrabi M.G., Ulsoy A. G.; Koren Y. (2000), “Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 11, n. 4; pp. 403-419
- MGI- McKinsey Global Institute (2011), *Big Data: the next frontier for innovation, competition, and productivity*, May
- MGI- McKinsey Global Institute (2013), *Disruptive technologies: advances that will transform life, business, and the global economy*, May
- Mies D., Marsden W., Warde S. (2016), “Overview of Additive Manufacturing Informatics: “A Digital Thread””, *Integrating, Materials and Manufacturing Innovation*, n. 5-6, pp. 1-29
- Miles RE, Snow CC. (1984), “Fit, failure, and the hall of fame”, *California Management Review*, vol. 26, n. 3, pp. 10-28
- Milgrim P., Kishino F. (1994), “A Taxonomy of mixed reality visual displays”, *IEICE Transactions on Information Systems*, vol. E77-D, n.12, December, pp. 1-15
- Miller R., Atkinson R.D. (2015), *Rising Tigers, Sleeping Giants II: Asian Nations Outpacing the United States in Clean Energy*, Center for Clean Energy Innovation, July
- Minai A.A., Braha D., Bar-Yam Y. (2006), “Complex Engineered Systems: A New Paradigm”, in Braha D., Minai A.A., Bar-Yam Y. (a cura di), *op. cit.*

- Mishel L., Bivens J., Gould E., Shierholz H. (2012), *The State of Working America, 12th Edition. An Economic Policy Institute book*, Ithaca, N.Y. Cornell University Press
- Mishel L., Shierholz H., Schmitt J. (2013), *Don't Blame Robots. Assessing the Job Polarization Explanation of Growing Wage Inequality*, *Economic Policy Institute and Center for Economic and Policy Research*, 19 November
- MIT News (2015), *Study assesses solar photovoltaic technologies*, 16 December
- Mitchell T.M. (1997), *Machine Learning*, McGraw-Hill
- Mohri M., Rostamizadeh A., Talwalkar A., (2012), *Foundations of Machine Learning*, MIT Press MA
- Mokyr J. (2013), *Is technological progress a thing of the past?*, VOX CEPR's Policy Portal, 8 September
- Morozov E. (2011), *The Dark side of Internet. The Net Delusion*, Public Affairs, New York
- Morozov E. (2013), "The Real Privacy Problem", *Technology Review*, 22 October
- Morozov E. (2015), "Digital Technologies and the Future of Data Capitalism", *Social Europe*, May
- Mouret J.B. (2016), "Micro-data learning: The Other End of the Spectrum", *ERCIM News*, n. 107, 18-19 October
- Mowery D. C. (2010), "Chandler and knowledge management within the firm", *Industrial and Corporate Change*, vol. 19, n. 2, pp. 483-507
- Mowery D.C., Rosenberg N. (2001), *Il Secolo dell'Innovazione*, Egea
- Murmann J.P., Tushman M. L. (1998), "Dominant designs, technology cycles and organizational outcomes", *Research in Organizational Behavior*, n. 20, pp. 231-266
- Naisbitt J. (1982), *Megatrends: Ten New Directions Transforming Our Lives*, Warner Books
- NAM (National Association of Manufacturing) (2016), *Top 20 Facts about Manufacturing*, <http://www.nam.org/Newsroom/Top-20-Facts-About-Manufacturing/>
- NAMRI/SME (The North American Manufacturing Research Institution of SME - Society of Mechanical Engineering) (2014), *Advanced Manufacturing Initiatives: A National Imperative*
- NAP (National Academy Press) (2013), *Frontiers of Massive Data Analysis*
- Nee A.Y.C., Ong S.K., Chryssolouris G., Mourtzis D (2012), "Augmented reality applications in design and manufacturing", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, n. 61, pp. 657-679
- Newell A., Simon H.A. (1972), *Human Problem Solving*, Prentice-Hall
- NFI (Nouvelle France Industrielle) (2016), *Construire l'industrie française du futur*, #NFI www.economie.gouv.fr/nouvelle-france-industrielle
- Nightingale P. (1998), "A cognitive model of innovation Paul Nightingale", *Research Policy*, n. 27, pp. 689-709
- Nilsson N.J. (1998), *Artificial Intelligence: a New Synthesis*, Morgan Kaufman Publisher, (ed. It.: Intelligenza Artificiale, Ed. Apogeo)

- Nissen M. (2014), "Organization Design for dynamic fit", *Journal of Organization Design*, vol. 3, n. 2, pp. 30-42
- NNMI (National Network for Manufacturing Innovation) (2016), *Program Annual Report*, National Science and Technology Council Advanced Manufacturing National Program Office, Executive Office of the President
- Nolan R.L. (2012), "Ubiquitous IT: The case of the Boeing 787 and implications for strategic IT research", *Journal of Strategic Information Systems*, n. 21, pp. 91-102
- Noor A. K. (2013), *Putting Big Data at work*, ASME
- Noor A. K. (2015), "Potential of Cognitive Computing and Cognitive Systems", *Open Engineering*, n. 5, pp.75-88
- Nordås, H. K., Kim Y. (2013), "The Role of Services for Competitiveness in Manufacturing", *OECD Trade Policy Papers*, n. 148, OECD Publishing
- O'Reilly C.A., Tushman M.L. (2011), "Organizational Ambidexterity in Action: How Managers explore and exploit", *California Management Review*, vol. 53, n. 4, pp. 5-22
- Olson S. (National Academy of Engineering) (2016), *Grand Challenges for Engineering: Imperatives, Prospects, and Priorities: Summary of a Forum*, National Academy Press
- Ong S.K., Pang Y., Nee A.Y.C. (2007), "Augmented Reality Aided Assembly Design and Planning", *Annals of the CIRP*, vol. 56, n. 1, pp. 49-52
- Owen G. (2012), *Industrial policy in Europe since the Second World War: what has been learnt?*, London School of Economics Research and Political Science, Occasional Paper
- OWL (OstWestfalenLippe) (2014), *The Technology Network. Intelligent Technical Systems*
- Ozman M. (2010), "The Knowledge Base of Products: Implications for Organizational Structures", *Organization Studies*, n. 31, pp. 1129-1154
- Ozman M. (2011), "Modularity, Industry Life Cycle and Open Innovation", *Journal of Technology Management & Innovation*, vol. 6, issue 1, pp. 26-37
- Park S., Oh W., Han S. (2012), "A social network-based inference model for validating customer profile data", *MIS Quarterly*, vol. 36, n. 4, pp. 1217-1237
- Patel P., Pavitt K. (1997), "The technological competencies of the world's larger firms": complex and path-dependent, but not much variety", *Research Policy*, n. 26, pp. 141-156
- Pavitt K. (1998), "Technologies, Products and Organization in the Innovating Firm: What Adam Smith Tells Us and Joseph Schumpeter Doesn't", *Industrial and Corporate Change*, vol. 7, n. 3, pp. 433-452
- PCAST (President's Council of Advisors on Science and Technology) (2010), *Report to the President and the Congress. Designing a Digital Future: Federally Funded Research and Development in Networking and Information Technology*, December
- PCAST (President's Council of Advisors on Science and Technology) (2014), *Report to the President. Accelerating US Advanced Manufacturing*, October

- Perez C. (2001), *Technological change and opportunities for development as a moving target*, CEPAL Review, pp. 109-130
- Perez C. (2010), "Technological revolutions and techno-economic paradigms", *Cambridge Journal of Economics*, vol. 34, n. 1, pp. 185-202
- Perez C. (2014), *A New Age of Technological Progress*, in Umunna, C. ed. *Owning the Future*. London, Policy Network & Rowman & LittleField International, pp. 19-30
- Perez C. (2013), "Unleashing a golden age after the financial collapse: Drawing lessons from history", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, n. 6, pp. 9-23
- Petti L., Serreli M., Di Cesare S. (2016), "Systematic literature review in social life cycle assessment", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, June, published on line
- Pisani-Ferry J. (2015), *The End Of Work As We Know It*, Social Europe, August
- Porter M. E., Heppelman J.E. (2014), "How smart connected products are transforming competition", *Harvard Business Review*, November, pp. 65-88
- Provost F., Fawcett T. (2013), *Data Science for Business*, O'Reilly Com
- Puranam P., Raveebdram M. Knudsen T. (2012), "Organization Design: The epistemic interdependence perspective", *Academy of Management Review*, vol. 37, n. 3, pp. 419-440
- PWC (2014), *Industry 4.0. Opportunities and challenges of the industrial internet*
- Pyle D., San Jose C. (2015), "An executive's guide to machine learning", *McKinsey Quarterly*, June, pp. 1-9
- QUINN (Consortio Universitario in Ingegneria della Qualità e l'innovazione) (2015), *Report. Analisi degli ambiti prioritari di domanda e offerta di tecnologie per la "Fabbrica Intelligente"*, Dicembre
- Rajkumar R., Insup Lee I., Sha L., Stankovic J. (2010), *Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution*, Design Automation Conference 2010, Anaheim, California, USA, pp. 731-736
- Randelli F., Lombardi M. (2014), "The Role of Leading Firms in the Evolution of SME Clusters: Evidence from the Leather Products Cluster in Florence", *European Planning Studies*, vol. 22, n. 6, pp. 1199-1211
- Reeves M., Deimler M. (2011), "Adaptability: the new competitive advantage", *Harvard Business Review*, July-August, pp. 135-143
- Reeves M., Haanaes K., Sinh J., (2015), *Your Strategy needs a Strategy: How to Choose and Execute the Right Approach*, Harvard Business Review Press
- Reeves M., Love C., Tillmans P. (2012), "Your Strategy Needs a Strategy", *Harvard Business Review*, September, pp.76-83
- Reich R. (2015), *The Upsurge In Uncertain Work*, Social Europe, August
- Rodrik D. (2004), *Industrial Policy for the Twenty-first Century*, John F. Kennedy School of Government, WP, September

- Rodrik D. (2014), "Green industrial policy", *Oxford Review of Economic Policy*, vol. 30, n. 3, pp. 469-491
- Roland Berger (2015), *What will the future look like under Industry 4.0 and digital transformation in the healthcare space?*
- Rumelhart D., McClelland J. (1986), *Parallel Distributed Processing*, vol. I, Cambridge, MIT Press MA
- Rus D. (2015), "The Robots Are Coming How Technological Breakthroughs Will Transform Everyday Life", *Foreign Affairs*, July-August, pp. 2-6
- Sahoo N., Virsingh P., Mukhopadhyay T. (2012), "A hidden Markov model for collaborative filtering", *MIS Quarterly*, vol. 36, n. 4, pp. 1329-1356
- Sala S., Vasta A., Mancini L., Dewulf Jo, Rosenbaum E. (2015), *Social Life Cycle Assessment Report*, Joint Research Center
- Sawhney M.S. (1998), "Leveraged High Variety Strategies: From Portfolio Thinking to Platform Thinking", *Journal of the Academy of Marketing Science*, vol. 26, n.1, pp. 54-61
- Schilling M. (2000), "Toward a General Modular Systems Theory and Its Application to Interfirm Product Modularity", *The Academy of Management Review*, vol. 25, n. 2., pp. 312-334
- Schuh G., Potente T., Wesch-Potente C., Weber A.R., Prote J-P (2014), "Collaboration Mechanisms to increase Productivity in the Context of Industrie 4.0", *Procedia CIRP*, n. 19, pp. 51-56
- Schuh G., Schröder S., Schön N., Kabasci P., Drescher T. (2015), "Concept for Structuring and Derivation of Technology Fields in the Context of Cyber-Physical Production Systems (CPPS)", *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 11, issue 12, pp. 10-15
- SERI (Samsung Research Institute) (2010), *Cradle to Cradle: A New Paradigm for Environmental Protection*
- Shimomura Y, Takeda H., Yoshioka M., Umeda Y., Tomiyama T. (1995), *Representation of design object based on the functional evolution process model*, Proceedings of Design Theory and Methodology, ASME
- Shubhendu S., Vijay J. (2013), "Applicability of Artificial Intelligence in Different Fields of Life", *International Journal of Scientific Engineering and Research*, vol. 1, issue 1, pp. 28-35
- Shulaker M.M., Hills C., Patil N., Wei H., Chen Hong-Yu, Wong H-S., Mitra S. (2013), "Carbon nanotube computer", *Nature*, n. 501, September, pp. 526-535
- Siggelkow N. (2011), "Firms as Systems of Interdependent Choices", *Journal of Management Studies*, vol. 48, n. 5, pp. 1126-1140
- Silver D., Huang A., Maddison C.J., Guez A., Sifre L., van den Driessche G., Schrittwieser J., Antonoglou J., Panneershelvam V., Lanctot M., Dieleman S., Grewe D., Nham J., Kalchbrenner N., Sutskever I., Lillicrap T., Leach M., Kavukcuoglu K., Graepel T., Hassabis D. (2016), "Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search", *Nature*, vol. 529, pp. 484-491
- Simon H. (1962), "The Architecture of Complexity", *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 106, n. 6, pp. 467-482

- Simonite T. (2012), “The CIA and Jeff Bezos Bet on Quantum Computing”, *Technology Review*, 4 October
- Simonite T. (2014), “Microsoft’s Quantum Machine”, *Technology Review*, 10 October
- Simonite T. (2015a), “Google Say It Has Proved Its Controversial Quantum Computer really Works”, *Technology Review*, 8 December
- Simonite T. (2015b) “Google’s Quantum Dream Machine”, *Technology Review*, 18 December
- SOGETI (2013), *No more secrets with data analytics*, The Sogeti Trend Lab VINT, @Creative Commons
- Steer G. (2013), *Resource Depletion, Climate Change, and Economic Growth*, Global Citizen Foundation, June
- Stapp M., Nicholson M. (2014), *Beyond 2015: An Innovation-based framework global climate policy*, Center for Clean Energy Innovation
- STEPS-ESRC Center (Economic and Social Research Center) (2009), *Innovation, Sustainability, Development: A New Manifesto*
- Stiglitz J. (2016), *The New Geo-Economics*, Social Europe, 11 January
- Stirling A. (2011), “Pluralising progress: From integrative transitions to transformative diversity”, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, n. 1, pp. 82-88
- Stirling A., (2009), *Direction, Distribution and Diversity! Pluralising Progress in Innovation, Sustainability and Development*, ESRC, Economic & Social Research Council
- Sull D. (2010), “Competing through organizational agility”, *McKinsey Quarterly*, December
- Sun R., Gregor S. (2015), “Information Technology Platforms: Conceptualisation and a Review of Emerging Research in the IS Discipline”, *Australasian Conference on Information Systems*, Adelaide
- Teece D.J. (2010), “Business Models, Business Strategy and Innovation”, *Long Range Planning*, n. 43, pp. 172-194
- Thaler R.H., Sunstein C.R. (2014), *La spinta gentile. La nuova strategia per migliorare le nostre decisioni su denaro, salute, felicità*, Feltrinelli
- Thomas D., Nemani J. (2009), *The collaboration curve: Exponential performance improvement in World of Warcraft*, Deloitte Center for the Edge
- Thompson D. (2015), “A World Without Work”, *The Atlantic*, July
- Tiwana A., Konsynski B., Bush A.A. (2010), “Platform Evolution: Coevolution of Platform Architecture, Governance, and Environmental Dynamics”, *Information Systems Research*, vol. 21, n. 4, December, pp. 675-687, Architecture-Centric Model-Based Product Development
- Tomiyama T. (2012), *Architecture-Centric Model-Based Product Development*, Mechatronics Conference, Linz
- Tomiyama T., Meschillinjgijer B.R. (2006), “Directions of Next Generation Product Development”, in ElMaraghy H. & ElMaraghy W.H. (a cura di), *Advances In Design*, Springer, pp. 27-36

- Tononi, G. - Sporns, O. - Edelman, G.M. (1996), "A complexity measure for selective matching of signals by the brain", *Proceedings National Academy of Science*, vol. 93, April
- Tononi, G. - Sporns, O. - Edelman, G.M. (1999), "Measures of degeneracy and redundancy in biological networks", *Proceedings. National Academy of Science*, n. 96, pp. 3257-3262
- TSB (Technology Strategy Board) (2012), *A landscape for the future of high value manufacturing in the UK*, Institute for Manufacturing (Cambridge, UK), EPSRC
- TSB (Technology Strategy Board) (2014), *High Value Manufacturing StrategyCatapult*
- Tushman M., Lakhani K.M., Lfshitz A. (2012) "Open Innovation and Organization Design", *Journal of Organization Design*, vol. 1, n. 1, pp. 24-27
- Ulrich K. (1995), "The role of product architecture in the manufacturing firm", *Research Policy*, n. 24, pp. 419-441
- Ulrich K., Tung K. (1991), "Fundamentals of product modularity", Working Paper WP 3335-91-MSA, MIT Sloan School of Management, Cambridge, MA
- Umeda Y, Takeda H., Tomiyama T. (1995), *FBS Modeling, Modeling Scheme of Function for Conceptual Design* in Working Papers for the Ninth International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems, Department of Social Science Informatics, University of Amsterdam, Amsterdam, the Netherlands, pp. 271-278
- Umeda Y, Tomiyama T., Yoshikawa H. (1995), "Function, Behaviour, and Structure", *Applications of Artificial Intelligence in Engineering V*, vol. 1, pp. 177-194
- UNEP (United Nations Environment Program) (2009), *Guidelines for Socialife Cycle Assessment of Products*
- Unruh G. C. (2000), "Understanding carbon lock-in", *Energy policy*, n. 28, pp. 817-830
- Unruh G. C. (2002), "Escaping carbon lock-in", *Energy Policy*, n. 30, pp. 317-325
- US Army (2014), *Agreement between Army Contracting Command – Redstone and Ui Labs 2201 W. Campbell Park Drive Chicago, Illinois 60612, Agreement for Digital Manufacturing and Design Innovation Institute*
- Van de Poel I. (2003), "The transformation of technological regime", *Research Policy*, pp. 49-68
- Van den Ende J., Kemp R. (1999), "Technological transformations in history: how the computer Regime grew out of existing computing regimes", *Research Policy*, pp. 833-851
- VDI (Association of German Enegineers) ASME (2015), *Industry 4.0 A Discussion of Qualifications and Skills in the Factory of the Future. A German and American Perspective*, Düsseldorf, April
- VDMA (Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau, Mechanical Engineering Association) (2014), *Guideline Industrie 4.0. Guiding principles for the implementation of Industrie 4.0 in small and medium sized businesses*
- VDMA (Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau, Mechanical Engineering Association) (2015), *Impulse. Industrie 4.0 Readiness*, October

- Vermass P.E, Dorst K.(2007), “On the conceptual framework of John Gero’s FBS-model and the prescriptive aims of design methodology”, *Design Studies*, n. 28, pp. 133-157
- Vincenti W. (1999), “Il dispositivo retrattile di atterraggio degli aerei e l’“anomalia” di Northrop: Variazione-Selezione e il processo di formazione della Tecnologia”, in Lombardi M. (a cura di), *op. cit.*; Articolo originale (1994): “The Retractable Airplane Landing Gear and the Northrop “Anomaly”: Variation-Selection and the Shaping of Technology”, *Technology and Culture*, n. 5, pp. 1-33, Society for the History of Technology
- Waldron J. (2014), “It’s All for Your Own Good”, *The New York Review of Books*, 9 October
- Warwick, K. (2013), “Beyond Industrial Policy: Emerging Issues and New Trends”, *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, n. 2, OECD Publishing.
- Weber E.P: (2000), “A New Vanguard for the Environment: Grass-Roots Ecosystem Management as a New Environmental Movement”, *Society & Natural Resources*, n. 13, pp.237-259
- Weiser M. (1991), “Some Computer Science Issues in The computer in the 21st Century”, *Communications of the ACM*, sept., pp. 78-89
- Weiser M. (1993), “Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing”, *Communications of the ACM*, vol. 36, n.7, pp. 75-84
- Westkamper E. (2006), “Factory Transformability: Adapting the Structures of Manufacturing”, in: Dashchenko A.I. (a cura di), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Springer, pp. 371-381
- Westkamper E. (2007), “Strategic Development of Factories under the Influence of Emergent Technologies”, *Annals of the CIRP*, vol. 56, n. 1, pp. 419-422
- Whitney D., Crawley E., deWeck O., Eppinger S., Magee C., Moses J., Seering W., Schindall J., Wallace D. (2004), *The Influence of Architecture in Engineering Systems*, MIT-ESD Paper March
- Wiendahl H.P., ElMaraghy H.A., Nyhuis P., Zäh M.F., Wiendahl H.H.; Duffie N., Brieke M (2007), “Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation”, *Annals of CIRP*, vol. 56, n. 2, pp. 783-809
- Wilf E. (2013), “Sociable robots, jazz music, and divination”, *American Ethnologist*, vol. 40, n. 4, pp. 605-618
- Wing J. M. (2006), “Computational Thinking”, *Communications at the ACM*, vol. 49, n. 3, pp. 33-35
- World Economic Forum (2016), “Global Insight Report”, *The Future of Jobs Employment, Skills and Workforce Strategy for the Fourth Industrial Revolution*, January
- Wynne B. (1992), “Uncertainty and environmental learning Reconceiving science and policy in the preventive paradigm”, *Global Environmental Change*, pp. 111-127
- Yergin D. (2015), “The Power Revolutions”, *The Wall Street Journal*, 21 August
- Yoo Y., Henfridsson O., Lyytinen K. (2010), “The New Organizing Logic of Digital Innovation: An Agenda for Information Systems Research”, *Information Systems Research*, vol. 21, n. 4, pp. 724-735
- Zittrain J.L. (2008), *The Future of the Internet And How to Stop It*, Yale University Press

Zittrain J.L. (2006), "The Generative Internet", *Harvard Law Review*, vol. 119, n. 7, pp. 1974-2040

Zysman J. (2006), "Creating Value in a Digital Era: Exploring the Experimental Economy (How Do Wealthy Nations Stay Wealthy?)", in *How Revolutionary Was the Digital Revolution?: National Responses, Market Transitions, And Global Technology* (Innovation and Technology in the World Economy) (A BRIE/ETLA Project) by Zysman J. and Newman A., June, Stanford University Press