

ISSN (print): 2421-6798
ISSN (on line): 2421-7158



Consiglio Nazionale delle Ricerche

IRGIES

ISTITUTO DI RICERCA SULLA CRESCITA ECONOMICA SOSTENIBILE
RESEARCH INSTITUTE ON SUSTAINABLE ECONOMIC GROWTH

Working Paper

Numero 4/2018

Le tecnologie di Industria 4.0 e le PMI

Angelo Bonomi

Direttore Secondo Rolfo


Direzione CNR-IRCRES
Istituto di Ricerca sulla crescita economica sostenibile
Via Real Collegio 30, 10024 Moncalieri (Torino), Italy
Tel. +39 011 6824911 / Fax +39 011 6824966
segreteria@ircres.cnr.it
www.ircres.cnr.it


Sede di Roma Via dei Taurini 19, 00185 Roma, Italy
Tel. +39 06 49937809 / Fax +39 06 49937808

Sede di Milano Via Bassini 15, 20121 Milano, Italy
Tel. +39 02 23699501 / Fax +39 02 23699530

Sede di Genova Università di Genova Via Balbi, 6 - 16126 Genova
Tel. +39 010 2465459 / Fax +39 010 2099826

Redazione Secondo Rolfo (direttore responsabile)
Antonella Emina
Diego Margon
Anna Perin
Isabella Maria Zoppi

 redazione@ircres.cnr.it

 www.ircres.cnr.it/index.php/it/produzione-scientifica/pubblicazioni

WORKING PAPER CNR-IRCRES, anno 4, numero 4, marzo 2018



Copyright © marzo 2018 by CNR - IRCRES

Le tecnologie di Industria 4.0 e le PMI

Technologies of Industry 4.0 and SMEs

ANGELO BONOMI

^a CNR-IRCRES, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di ricerca sulla crescita economica sostenibile, via Real Collegio 30, Moncalieri (TO) – Italy

corresponding author: abonomi@bluewin.ch

ABSTRACT

This paper concerns a study on the next production revolution called Industry 4.0 based on confluence of various technologies, mainly digital, with far reaching consequences especially for productivity and employment. This study considers the implementation of Industry 4.0 in SMEs and industrial districts that represent a great part of Italian industry. The latter represents certainly a major challenge to such implementation because of the existence of various obstacles constituted by availability of investment capitals, small scale productions and tendency to develop and to adopt only incremental innovations rather than radical ones typical of Industry 4.0. In this work we study the technologies involved in Industry 4.0, taking account of existence of specific technologies, called enabling technologies, whose confluence in the manufacturing industry determines the implementation of Industry 4.0. Such enabling technologies originate from the major fields of R&D activities such as nanotechnologies, biotechnologies, digital technologies and artificial intelligence (AI). In this paper we study the dynamic and possible evolution characterizing the formation of the various enabling technologies in a sort of ramification process, using specific models of technology, technology innovation and R&D, and their relation with manufacturing in SMEs and industrial districts. The results of the study underlines the importance of AI in determining possibilities and limits to Industry 4.0, the necessity to disrupt the tendency of SMEs in adopting only incremental innovations, the existence of “intranality effects” raising difficulties from the supply chain, and the importance of technology consulting firms in the integration of ICT in operating technologies of a manufacturing activity.

KEYWORDS: Industry 4.0, SMEs, industrial districts, technology innovation.

JEL CODES: O14, O25, O33

DOI: 10.23760/2421-7158.2018.004

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Bonomi A., 2018. “Le Tecnologie di Industria 4.0 e le PMI”, *Working Paper IRCrES*, 4(4), 1-27, <http://dx.doi.org/10.23760/2421-7158.2018.004>.

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
2. PROCESSI INNOVATIVI E INDUSTRIA 4.0.....	4
2.1 Tecnologia e innovazione tecnologica.....	4
2.2 Ricerca & sviluppo e innovazione tecnologica.....	7
2.3 Ramificazione delle tecnologie e Industria 4.0.....	8
3. TECNOLOGIE E INDUSTRIA 4.0.....	9
3.1 Intelligenza artificiale e Industria 4.0.....	9
3.2 Nanotecnologie e Industria 4.0.....	11
3.3 Biotecnologie e Industria 4.0.....	12
3.4 Tecnologie digitalizzanti e Industria 4.0.....	14
4. TECNOLOGIE ABILITANTI E INDUSTRIA 4.0.....	15
4.1 Robotica.....	16
4.2 Additive manufacturing.....	16
4.3 Realtà aumentata.....	16
4.4 Digital manufacturing.....	17
4.5 Digital Twin.....	17
4.6 Internet of Things.....	17
4.7 Big Data.....	18
4.8 Cloud computing.....	18
4.9 Cybersecurity.....	18
4.10 Uso ed evoluzione delle tecnologie abilitanti.....	19
5. INDUSTRIA 4,0 E PMI.....	20
6. BIBLIOGRAFIA.....	21
7. FIGURE.....	23

Le tecnologie di Industria 4.0 e le PMI

ANGELO BONOMI

1. INTRODUZIONE

La trasformazione dell'industria manifatturiera verso una fase detta Industria 4.0 rappresenta una sfida attuale per l'industria italiana, e in particolare per la piccola e media impresa (PMI) che svolge attività nei distretti industriali, e che contribuisce in maniera importante all'economia del paese. Il termine Industria 4.0 è nato in Germania e rivolto in particolare a una trasformazione industriale che coinvolge macchine intelligenti, interconnesse e collegate a Internet e che comporta trasformazioni digitali e innovazioni imprenditoriali. Un aspetto generale che riguarda la trasformazione in Industria 4.0 è sicuramente rappresentato da un bisogno accresciuto d'innovazione tecnologica che deve accompagnare questo cambiamento, e quindi anche il problema di come affrontarlo nel caso dell'industria manifatturiera italiana costituita principalmente da PMI. Questo lavoro non pretende di affrontare lo studio dell'enorme mole di tecnologie e processi innovativi che sono coinvolti in Industria 4.0, ma piuttosto di studiare le dinamiche e l'evoluzione che caratterizza la formazione delle principali tecnologie che accompagnano la trasformazione industriale 4.0. L'idea di base di questo studio tecnologico di Industria 4.0 risiede nel fatto che l'implementazione di questa rivoluzione industriale è determinato dall'introduzione di una combinazione di tecnologie specifiche, dette abilitanti (Vitali 2016), che determinano la trasformazione della tecnologia manifatturiera. Queste tecnologie abilitanti trovano origine dai grandi campi di ricerca come le nanotecnologie, le biotecnologie, le tecnologie digitalizzanti e in particolare dal campo dell'intelligenza artificiale (AI) che ne determina le possibilità tecnologiche di sviluppo nell'automazione e gestione del processo produttivo. Un aspetto importante delle tecnologie di Industria 4.0 riguarda l'integrazione tra tecnologie informatiche (IT) e tecnologie operative (OT) che è molto più spinta rispetto all'introduzione delle tecnologie informatiche, avvenuta in passato, e destinate alla comunicazione (e-commerce) e all'automazione dei processi produttivi. In Industria 4.0 la massa d'informazioni di natura operativa, da integrare con le tecnologie di tipo informatico, è molto più grande e diversificata e richiede un'integrazione tra un'ingegneristica di tipo informatico con una di tipo produttivo. Questo costituisce una difficoltà importante nell'implementazione caratterizzata anche dai costi elevati di questa integrazione poiché essa comporta uno studio dettagliato dei processi produttivi accompagnato da un esame delle numerose tecnologie abilitanti disponibili. L'importanza di questa fase preparatoria alla scelta delle tecnologie abilitanti e alla loro integrazione può essere un ostacolo in un'introduzione piena di Industria 4.0 nella PMI. Lo studio descrive l'evoluzione tecnologica coinvolta in Industria 4.0 come un insieme di processi, visti da un modello che considera l'innovazione tecnologica come un cambiamento nella struttura delle tecnologie composte da operazioni tecnologiche (Bonomi, Marchisio 2016). L'obiettivo dello studio è quello di fornire le prospettive di evoluzione delle tecnologie abilitanti, prendendo in considerazione anche campi di ricerca tuttora allo stadio iniziale, come ad esempio il computer quantistico e la biologia sintetica, ma che, visti i tempi di trasformazione industriale che non si

prospettano realizzabili in pochi anni, potrebbero influenzare le future tecnologie. Inoltre lo studio dell'evoluzione tecnologica può mettere in luce l'esistenza di processi evolutivi specifici, come ad esempio la ramificazione tecnologica e il regime di Regina Rossa, caratterizzato dallo sviluppo di sole innovazioni incrementali accompagnato da situazioni di stagnazione o declino economico (Bonomi, Marchisio 2016), e la cui conoscenza è utile per affrontare i problemi d'implementazione delle tecnologie abilitanti. Dopo il capitolo introduttivo in un secondo capitolo si descrivono i processi innovativi di Industria 4.0 alla luce dei modelli di tecnologia e R&S e delle dinamiche di ramificazione tecnologica. In un terzo capitolo si descrivono i campi generatori delle tecnologie abilitanti che sono in particolare l'intelligenza artificiale, le nanotecnologie, le biotecnologie e le tecnologie digitalizzanti. Nel quarto capitolo si descrivono le tecnologie abilitanti e la loro possibile evoluzione, e nel quinto capitolo si traggono alcune conclusioni derivate dallo studio sul rapporto tra Industria 4.0 e PMI.

2. PROCESSI INNOVATIVI E INDUSTRIA 4.0

La trasformazione tecnologica di Industria 4.0 può essere vista come introduzione di particolari tecnologie abilitanti e le loro innovazioni nelle tecnologie attuali di manifattura. In un recente rapporto dell'OCSE su quella che è chiamata quarta rivoluzione industriale, e le sue implicazioni governative ed economiche (OECD 2017), si considera questa rivoluzione come risultato di una confluenza di tecnologie come la digitalizzazione delle produzioni, la stampa 3D, l'Internet of Things (IoT), l'intelligenza artificiale (AI), la biologia sintetica, ecc. I tempi di trasformazione e i passi precisi con cui potrà avvenire questa rivoluzione sono per ora sconosciuti ma la competitività e la prosperità dei vari paesi dipenderà molto probabilmente dalle loro capacità tecnologiche, da una migliore formazione e dal loro funzionamento istituzionale. Il rapporto dell'OCSE considera inoltre la diffusione delle tecnologie, sia in termini di hardware che di know-how, sia importante per il loro sfruttamento, il tutto accompagnato da nuovi modelli di business. Inoltre considera la diffusione di queste tecnologie a livello delle PMI, che non hanno avuto un'origine digitale, come una sfida maggiore alla trasformazione. Il rapporto nota infine come la complessità delle tecnologie emergenti possano necessitare di capacità di R&S che eccedono quelle disponibili anche nelle grandi imprese e che siano quindi necessarie cooperazioni tra il pubblico e il privato. In un'opera recente che tratta specificatamente l'industria manifatturiera italiana è stato dato un primo elenco di tecnologie abilitanti (Vitali 2016) che comprendono la robotica, le stampanti 3D, la realtà aumentata, l'interconnessione macchine e base dati (Big Data interni o su sistemi aperti) che riguardano direttamente la manifattura, ma anche tecnologie che relazionano la manifattura con l'esterno come l'integrazione della catena di valore dal fornitore al consumatore e la comunicazione tra processi produttivi e prodotti e infine le tecnologie di cybersecurity. Non è compito di questo lavoro, come abbiamo già detto, di entrare nel dettaglio delle varie tecnologie abilitanti e delle loro potenziali applicazioni, tuttavia, per gli obiettivi dello studio, che sono limitati alle prospettive dell'evoluzione tecnologica e ai suoi canali di sviluppo per Industria 4.0, è possibile applicare un approccio, già citato nell'introduzione, che riguarda sia modelli generali della struttura delle tecnologie e dei loro cambiamenti (Bonomi, Marchisio 2016), sia dei processi d'innovazione tecnologica, in particolare la R&S (Bonomi 2017) per interpretare l'evoluzione tecnologica e i processi innovativi che possono avvenire in questo campo. I modelli usati possono suggerire utili considerazioni generali su come avviene lo sviluppo di nuove tecnologie e la loro proliferazione, le confluenze tecnologiche che formano il complesso manifatturiero di Industria 4.0 e, per quanto riguarda la R&S, dare un'idea della complessità del processo innovativo con suoi effetti autocatalitici, e i suoi rapporti con la ricerca scientifica e gli investimenti.

2.1 Tecnologia e innovazione tecnologica

Le tecnologie possono essere viste come un insieme strutturato di operazioni tecnologiche rappresentabili sotto forma di grafi orientati (Bonomi, Marchisio 2016). Nella Fig. 1 abbiamo riportato un esempio di struttura semplificata della tecnologia di produzione di rubinetti e valvole.

La struttura che descrive una tecnologia non è unica ma può essere più o meno dettagliata, considerando che le operazioni tecnologiche hanno anch'esse la natura di tecnologia, a seconda degli scopi del modello. Nella Fig. 1 si può notare come ad esempio l'operazione di cromatura sia composta a sua volta da sub-operazioni come lo sgrassaggio, la nichelatura e il deposito di cromo. La struttura delle operazioni di una tecnologia è molto importante poiché è su di essa che può essere studiata l'implementazione di Industria 4.0 attraverso l'integrazione della IT con l'OT e le necessarie ristrutturazioni. Ogni operazione tecnologica è poi caratterizzata nel modello da un insieme di parametri che possono assumere ognuno un insieme di valori o scelte in un certo campo (ricette tecnologiche), e che devono essere fissate per operare la tecnologia. Sviluppando matematicamente il modello della struttura operativa, l'insieme delle operazioni di una tecnologia può essere rappresentato in uno spazio, detto *spazio tecnologico*, in cui ogni punto rappresenta una particolare ricetta tecnologica (Auerswald, Kauffman, Lobo, Shell 2000). Se associamo a ognuno di questi punti un valore di efficienza (economica, energetica, ecc.) avremo un paesaggio di fitness detto *paesaggio tecnologico*. L'ottimizzazione delle condizioni operative di una tecnologia nel modello può essere vista come la ricerca di un "picco" di efficienza nel paesaggio tecnologico, attività tipica del learning by doing. La struttura di una tecnologia è per sua natura dinamica poiché è sottoposta a un'esternalità tecnologica che modifica nel tempo le condizioni in cui opera, come cambiamenti di costi o della natura dei materiali che usa, ovvero nuove normative o esigenze commerciali che necessitano una nuova ottimizzazione delle condizioni operative o addirittura innovazioni. L'innovazione tecnologica è vista nel modello come un cambiamento delle operazioni e/o della struttura operativa di una tecnologia preesistente. Se consideriamo un insieme di tecnologie destinate a uno stesso scopo, sviluppando matematicamente la loro rappresentazione come grafi, equivalenti a matrici, è possibile rappresentarle come punti di uno spazio detto *spazio delle tecnologie* (Bonomi, Marchisio 2016). Questo spazio risulta utile per rappresentare evoluzioni e competizioni tecnologiche che possono riguardare il campo di Industria 4.0. Una tecnologia sarà radicale o incrementale rispettivamente se in questo spazio si trova a grande distanza o a corta distanza da una tecnologia di riferimento preesistente. Questa distanza può essere vista anche come il grado di radicalità della tecnologia e quindi dell'innovazione. In questo spazio è possibile rappresentare fenomeni evolutivi di una tecnologia iniziale, tipicamente radicale, che sviluppa un gran numero di applicazioni attraverso ulteriori innovazioni incrementali e collegabile ad essa attraverso una ramificazione che si sviluppa nello spazio delle tecnologie e che parte dalla tecnologia iniziale. Nel modello la tecnologia è considerata come un'attività atta a soddisfare uno scopo umano che risulta da combinazioni di tecnologie preesistenti in grado di sfruttare nuovi fenomeni scoperti dalla scienza (Arthur 2009). In realtà nuove tecnologie, anche radicali, si possono formare da una combinazione di tecnologie preesistenti senza sfruttare direttamente fenomeni scoperti dalla scienza. Due esempi importanti illustrano questa differenza: uno è dato dal caso della tecnica della fotocopiatrice, che sfrutta il fenomeno della carica elettrica indotta dalla luce su certi materiali, e l'altro dal caso del PC inventato combinando componenti elettronici commerciali in grado di collegare una tastiera con una TV domestica ed eseguire operazioni logiche ed aritmetiche usando un microprocessore commerciale. Anche l'attività di learning by doing può essere sorgente di nuove tecnologie incrementali quando, oltre a un'ottimizzazione delle condizioni operative, suggerisce cambiamenti minori delle operazioni tecnologiche e/o della loro struttura (Bonomi, Marchisio 2016). Il modello di tecnologia esposto, applicato al caso di Industria 4.0, prevede due possibili fenomeni di natura tecnologica che possono interessare le PMI dei distretti industriali e le aziende di consulenza che forniscono loro le tecnologie IT. Questi fenomeni riguardano il cosiddetto regime della Regina Rossa e un effetto interattivo tra le operazioni delle tecnologie chiamato intranaltà tecnologica (Bonomi, Marchisio 2016).

2.1.1 Regime della Regina Rossa

Questo regime trae origine dall'esistenza di competenze specifiche necessarie per condurre le operazioni tecnologiche. Queste possono cambiare in maniera più o meno importante a causa dell'innovazione. Le aziende di un distretto o settore industriale, che fabbrica uno stesso tipo di prodotto, utilizzano in generale tecnologie di produzione simili che richiedono competenze simili.

Se un'azienda sviluppa un'innovazione incrementale acquista un vantaggio competitivo, tuttavia esso è effimero poiché le aziende concorrenti hanno competenze simili, e possono facilmente imitare o trovare alternative con un bisogno nullo o limitato di nuove competenze. Il risultato è un distretto o settore industriale che innova nel suo insieme le tecnologie, senza però la nascita di aziende veramente dominanti, e con un'evoluzione economica stagnante o di crescita limitata per la natura solo incrementale delle innovazioni. Si tratta di una situazione che viene chiamata regime della Regina Rossa (Bonomi, Marchisio 2016). Il termine è stato usato all'origine per spiegare la competizione genetica tra prede e predatori in cui un miglioramento nelle prede trovava risposta in un miglioramento nei predatori (Van Valen 1973). La Regina Rossa è un personaggio di "Alice nel Paese delle Meraviglie" che dice ad Alice "In questo paese bisogna correre forte ma molto forte per restare fermi". Questo regime rappresenta un problema serio da affrontare nell'introduzione di Industria 4.0 nelle PMI dei distretti che tendono infatti a restare in regime di Regina Rossa con le loro tecnologie tradizionali, restie a prendere in considerazione nuove tecnologie radicali tipiche di Industria 4.0. Il pericolo è rappresentato per un distretto industriale da aziende concorrenti, esterne al distretto, che sviluppano innovazioni radicali dirompenti, che possono riguardare ad esempio l'implementazione di Industria 4.0, e che possono così distruggere la competitività tecnologica del distretto. Vi è un importante esempio storico di questo fenomeno che si è manifestato nel distretto orologiero svizzero, alla metà degli anni 70 del secolo scorso, minacciato nella sua esistenza da un emergente orologeria giapponese, basata sulle proprietà piezoelettriche del quarzo e indicazione con cristalli liquidi, in alternativa alle tecnologie meccaniche delle aziende svizzere che operavano in regime di Regina Rossa (Bonomi, Marchisio 2016). Per quanto riguarda l'implementazione di Industria 4.0 è interessante considerare il ruolo delle aziende di consulenza tecnologica che si occupano dell'introduzione dell'IT nella OT delle aziende manifatturiere. Esiste infatti una certa analogia tra il processo d'implementazione di Industria 4.0 da parte di queste aziende, e quello storico delle imprese di informatica che implementavano l'uso di Internet, e tecnologie associate, nelle aziende con la creazione di siti con funzioni pubblicitarie e commerciali a partire dalla fine degli anni 90. Anche se l'implementazione di Industria 4.0 è molto più complessa e articolata, in ambedue i casi vi è l'apporto indispensabile di competenze che le aziende non hanno o hanno solo in una parte limitata. Le aziende che fornivano siti Internet, e ora quelle di tecnologie IT per la manifattura, avevano più o meno le stesse competenze formando un sistema concorrenziale in regime di Regina Rossa. Nel caso delle aziende di Internet vi fu un grande numero di creazioni d'aziende in previsione di un grande sviluppo, di natura però tecnologicamente incrementale con accesso a nuove tecnologie disponibili commercialmente a tutti, portando il sistema a una bolla speculativa, chiamata delle dot.com, che scoppiò agli inizi degli anni 2000. Oltre al regime della Regina Rossa le aziende di consulenza tecnologica potrebbero dover affrontare un ulteriore problema, osservato anche questo nel passato con le dot.com dovuto a una competizione e una selezione per la sopravvivenza basata su problemi gestionali piuttosto che tecnologici causati dalla rapidità con cui apparivano nuove tecnologie disponibili per i progetti IT per l'industria. Queste dinamiche possono essere presenti anche nel caso di Industria 4.0 con la comparsa di nuove tecnologie o alternative tecnologiche valide già durante lo svolgimento di un progetto di implementazione per un'industria manifatturiera, rendendo così le scelte tecnologiche fatte obsolete o quasi alla fine del progetto. Questo tipo di fenomeno venne osservato e studiato alla fine degli anni 90 nel campo delle imprese informatiche che fornivano sviluppo di siti Internet o altri servizi informatici alle aziende. Il fenomeno fu studiato nel caso della Silicon Alley, una zona di New York in cui si erano concentrate numerose aziende informatiche per questo servizio (Girard, Stark 2001). Lo studio, di tipo etnografico, aveva come obiettivo di osservare i vari modi con cui le aziende affrontavano questo problema, e quale poteva essere la soluzione ottimale risultante da una selezione darwiniana dei vari tentativi fatti. Gli autori descrivevano così un nuovo modo organizzativo vincente, detto *eterarchico*, in opposizione al modo gerarchico usato nella gestione convenzionale dei progetti, e caratterizzato dalla disponibilità di una ricchezza diversificata di competenze, interdipendenza e una certa eterogeneità organizzativa. Questo nuovo modo di vedere la gestione di un progetto potrebbe diventare importante con lo sviluppo dell'implementazione di Industria 4.0 da parte delle aziende di consulenza tecnologica.

2.1.2 Intranalità tecnologica

Il modello di tecnologia definisce come *intranalità* il fatto che la modifica dei valori dei parametri di un'operazione, per ottimizzare la sua efficienza, può ridurre l'efficienza di altre operazioni e che quindi l'ottimizzazione dell'efficienza di una tecnologia debba avvenire attraverso una sintonizzazione delle efficienze di tutte le varie operazioni (Bonomi, Marchisio 2016). Il termine di intranaltà tecnologica è stato introdotto all'origine nella descrizione del processo di ottimalizzazione tecnologica derivato da un modello di tecnologia (Auerswald, Kauffman, Lobo, Shell 2000). Questo fenomeno si manifesta, non solo a livello dei parametri delle operazioni, ma anche nei cambiamenti delle operazioni o strutture di una tecnologia. Se le modifiche delle operazioni o strutture possono avvenire all'interno di una stessa azienda il problema può essere facilmente risolto. Se invece le operazioni di produzione non sono condotte tutte nella stessa azienda ma subappaltate in parte ad altre aziende, sistema produttivo molto diffuso nei distretti industriali, possono nascere difficoltà per utilizzare nuove tecnologie che potrebbero richiedere investimenti o modifiche operative alle ditte subfornitrici. Queste potrebbero rifiutare di fare gli investimenti o modificare le condizioni operative perché potrebbero influenzare negativamente l'attività per altri suoi clienti, con il risultato di non poter utilizzare la nuova tecnologia. Questo fenomeno è stato descritto ad esempio nel caso del distretto delle piastrelle di Sassuolo (Russo 2003). L'intranalità tecnologica può quindi costituire un ostacolo nell'introduzione di nuove tecnologie di Industria 4.0 nei distretti industriali in cui è diffuso il subappalto di specifiche operazioni produttive. Inoltre potrebbe produrre difficoltà in un'implementazione parziale di Industria 4.0 che ha effetti d'intranalità su altre operazioni manifatturiere che non sono coinvolte nell'implementazione. Nel caso delle PMI dei distretti il problema del subappalto può essere risolto attraverso la cooperazione dell'innovazione tra le PMI, che comprenda sia ditte produttrici che subfornitrici, e di cui esiste già qualche esempio (Rolfo, Bonomi 2014).

2.2 Ricerca & sviluppo e innovazione tecnologica

Lo studio utilizza un modello del processo di R&S che riguarda soprattutto gli aspetti tecnologici di questa attività (Bonomi 2017). Il modello considera la R&S come un doppio flusso circolante di capitali e conoscenze ed è riportato schematicamente nella Fig. 2. La figura mostra che l'attività di R&S produce nuove tecnologie ma anche conoscenze generali legate sia a progetti che sboccano in nuove tecnologie o che sono abbandonati, e definite con l'acronimo GRDK (General R&D Knowledge). Queste conoscenze, combinate con altre conoscenze di natura scientifica, tecnica o altro, portano a idee innovative che si trasformano in proposte di progetti di R&S che, se finanziate, compongono l'attività di progetti della R&S. Nel modello la GRDK è considerata la forza trainante della R&S che gli conferisce un comportamento autocatalitico. I modelli di tecnologia e R&S considerano il processo d'innovazione tecnologica come composto da varie tappe dalla generazione dell'idea innovante, agli studi di fattibilità, sviluppo e industrializzazione e termina con i miglioramenti dovuti al learning by doing. Particolarmente importante è la fase generativa che dipende dall'efficienza del sistema innovativo territoriale nel trovare idee innovative a partire dalla GRDK disponibile. Una simulazione matematica del processo di R&S (Bonomi 2017a) ha mostrato che l'attività di progetti, quindi gli investimenti in R&S, devono superare valori critici in un territorio perché si inneschi uno sviluppo tecnologico e quindi economico. Quando questi valori critici sono superati le crescite sono esponenziali e possono essere limitate dai capitali disponibili ma in certi casi addirittura dalle risorse umane e le strutture per la R&S esistenti. Vi sono poi i rapporti della ricerca scientifica con la R&S. Per il modello la ricerca scientifica rappresenta una sorgente di risultati utilizzabili per applicazioni tecnologiche. Tuttavia il modello non considera la R&S come semplice conseguenza della ricerca scientifica, ma come attività che può indurre per i suoi bisogni anche nuove attività di ricerca formando un intreccio tra attività scientifica e attività di R&S. Il modello tecnologico del processo di R&S può essere utile nello studio dell'attività innovativa che accompagna l'implementazione di Industria 4.0 soprattutto nello studio del rapporto tra ricerca universitaria e industria, in

particolare le relazioni che la ricerca può avere anche con le aziende di consulenza IT nello sviluppo dei loro servizi e nel fornire centri di competenza utilizzabili anche dalle PMI.

2.3 Ramificazione delle tecnologie e Industria 4.0

Abbiamo già visto come lo spazio delle tecnologie può rappresentare l'evoluzione tecnologica in termini di ramificazioni a partire da una tecnologia iniziale radicale che innesca ulteriori tecnologie meno radicali o semplicemente incrementali. L'esistenza di questa ramificazione tecnologica può essere dimostrata indirettamente da studi topologici di brevetti dipendenti da un'invenzione iniziale, come ad esempio nel caso dei brevetti della tecnologia diagnostica della tomografia computerizzata in cui è stata studiata l'evoluzione che si è avuta tra il 1975 e il 2005, e rappresentata nella Fig. 3 (Valverde, Solé, Bedau, Packard 2007). Le ramificazioni hanno delle loro dinamiche di crescita per le tecnologie che entrano in uso, o di esaurimento delle ramificazioni per le tecnologie che sono abbandonate. Il sistema tecnologico che compone l'attività di Industria 4.0 può essere visto come un ecosistema di tecnologie che competono o collaborano tra di loro rappresentabile nello spazio delle tecnologie con varie ramificazioni tecnologiche per vari scopi, che provengono dai grandi campi di ricerca che hanno generato le tecnologie abilitanti. Le tecnologie abilitanti, a loro volta, si combinano tra di loro per formare un complesso tecnologico che costituisce il risultato dell'implementazione di Industria 4.0 per una specifica manifattura. Il complesso tecnologico utilizzabile per la manifattura in Industria 4.0 può essere differente da manifattura a manifattura a seconda dei modi con cui vengono fatte confluire le varie tecnologie abilitanti che meglio si adattano alla sua intranaltà ed esternalità tecnologica. Occorre notare che questo processo evolutivo di ramificazione tecnologica non è identico alla tipica ramificazione vegetale o genetica della biologia perché a differenza delle ramificazioni biologiche essa può avere connessioni anche tra i vari rami (Basalla 1988). Questo poiché la generazione di nuove tecnologie può avvenire anche da combinazioni con tecnologie sviluppate per scopi differenti appartenenti a ramificazioni differenti. Ad esempio, nel caso specifico di una tecnologia abilitante per Industria 4.0, come le stampanti 3D, la situazione attuale può essere vista come il risultato di un'evoluzione ramificata, a partire dalla stampante a getto d'inchiostro su carta, nettamente radicale rispetto alla stampa che allora esisteva ad aghi o con caratteri preformati, che ha poi generato la stampa a 3D. Questa ha uno scopo differente da quello della stampa su carta che ha avuto poi un suo sviluppo ad esempio con la stampante laser. La stampa 3D si è sviluppata dapprima a bassa temperatura utilizzando materiali facili come la plastica, ramificandosi poi ulteriormente in stampa 3D a media e alta temperatura, permettendo l'uso di metalli e altri materiali. In Industria 4.0 la stampa 3D deve poi combinarsi con altre tecnologie, come le tecnologie digitalizzanti o anche altre tecnologie abilitanti perché si integri nel complesso tecnologico utilizzabile dalla manifattura. Le ramificazioni tecnologiche non solo si possono osservare attraverso i brevetti, come nell'esempio citato, ma anche essere, per le relazioni tecnologiche esistenti, all'origine di ramificazioni di startup ad esempio con spin off da un'azienda madre iniziale. Un esempio è quello della Fairchild Semiconductor con le 35 start up generate tra il 1959 e il 1971 e rappresentato nella Fig.4. Attualmente sono un totale di 92 le società che possono essere tracciate a partire da questa industria elettronica (Morris 2014). In linea generale nel processo di ramificazione tecnologica si possono notare due livelli, il primo corrisponde alla ramificazione iniziale indotta in particolare dalla R&S condotta in laboratori e che forma innovazioni con un certo grado di radicalità, il secondo con una ramificazione secondaria molto più sviluppata che corrisponde alla massa d'innovazioni tipicamente incrementalmente realizzate nell'industria o in aziende di servizi che diffondono in larga misura le varie applicazioni della tecnologia. Questa differenza è importante poiché è collegata ai vari tipi di vie innovative e alle loro peculiarità e limiti. Il numero delle innovazioni combinatorie di natura incrementale delle ramificazioni secondarie è enormemente superiore a quello delle innovazioni tecnologiche radicali iniziali. Il processo finale in cui avviene la formazione del complesso tecnologico specifico di una manifattura non deve però essere considerato come un semplice processo di diffusione di tecnologie. Nel processo di diffusione tradizionale nuove tecnologie, tipicamente in forma di attrezzature e macchine, sviluppate spesso esternamente alle aziende e

commercialmente disponibili, migliorano o sostituiscono operazioni tecnologiche della manifattura, tuttavia a livello dell'azienda non vi è una vera e propria attività innovativa ma solo learning by doing che ottimizza l'inserimento e l'uso della tecnologia. Nel caso di implementazione di Industria 4.0 è invece necessaria una scelta di nuove tecnologie disponibili che devono essere poi combinate tra di loro in modo specifico secondo la manifattura coinvolta richiedendo una vera propria attività d'innovazione tecnologica che non solo cambia operazioni tecnologiche ma anche le collega tra di loro con tecnologie specifiche. In definitiva possiamo osservare che il complesso di tecnologie utilizzabili per l'implementazione di Industria 4.0 nella manifattura risulteranno da scelte tecnologiche fatte nelle ramificazioni in funzione delle esternalità e intranaltà esistenti per l'impianto produttivo, con bisogni innovativi specifici che dovranno essere affrontati caso per caso. La R&S può dare un contributo importante nelle ramificazioni tecnologiche intermedie che portano a un miglioramento e diversificazione delle tecnologie abilitanti per Industria 4.0, tuttavia, l'impatto socio-economico di un'innovazione, non dipende tanto da attività di ricerca di alto livello, ma quanto piuttosto dal numero elevato di innovazioni incrementali più esterne nella ramificazione che permettono la diffusione e l'adattamento della tecnologia iniziale ai vari casi specifici delle manifatture. Questo è il lavoro tipico dei tecnici che si occupano d'innovazione nell'industria. Il successo quindi dell'implementazione di Industria 4.0 dipenderà fortemente da questa attività innovativa, ma non necessariamente definita come R&S, condotta da tecnici con un livello di formazione adeguata non necessariamente di alto livello scientifico. Nel campo dell'innovazione la formazione in generale è stata infatti dimostrata più importante per la crescita economica che non la protezione della proprietà industriale o la crescita dei redditi (Wang 2010).

3. TECNOLOGIE E INDUSTRIA 4.0

Le tecnologie di Industria 4.0 coinvolgono i grandi campi di ricerca tecnologica che a loro volta generano l'asse tecnologico portante della trasformazione in Industria 4.0 rappresentato dalle cosiddette tecnologie abilitanti che sono oggetto di una continua attività innovativa. L'implementazione di Industria 4.0 avviene quindi secondo un'evoluzione che parte dai grandi campi di ricerca che generano le tecnologie abilitanti, che a sua volta si combinano ramificandosi e formando specifici complessi tecnologici che operano poi nella manifattura delle varie aziende. In questo studio abbiamo preso in considerazione come campi di ricerca scientifica e tecnologica generatori delle tecnologie abilitanti: l'intelligenza artificiale (AI), le nanotecnologie, le biotecnologie e le tecnologie digitalizzanti cercando di descrivere anche ricerche in questi campi ancora allo stato iniziale ma che, visti i tempi sicuramente non brevi dell'implementazione di Industria 4.0, potrebbero diventare in futuro un'importante sorgente di tecnologie abilitanti con un forte grado di radicalità. Vi sono anche altri campi tecnologici che entrano in gioco come la mecatronica, che risulta dalla confluenza di tecnologie elettromeccaniche e informatiche, ma che esiste da molto tempo e non sembra essere di per se stessa sorgente di importanti nuove tecnologie abilitanti. Un altro campo di ricerca che influenza Industria 4.0 è quello dei nuovi materiali, che è stato trattato nel recente rapporto dell'OCSE per Industria 4.0 (McDowell 2017), sottolineando anche l'importanza delle tecnologie digitalizzanti per il loro sviluppo, tuttavia le innovazioni più radicali di questo settore sono collegate alle nanotecnologie e verranno discusse in questa sezione. Nella Fig. 5, abbiamo schematizzato la dipendenza delle tecnologie abilitanti dai grandi campi della ricerca citati, e la loro confluenza nel complesso tecnologico specifico per ogni manifattura che si svilupperà nel quadro dell'implementazione di Industria 4.0.

3.1 Intelligenza artificiale e Industria 4.0

L'intelligenza artificiale (AI) non è di per se stessa una tecnologia, ma piuttosto una disciplina che coinvolge vari campi come la matematica, l'informatica, la filosofia e le neuroscienze e che si è materializzata per le sue applicazioni usando varie tecnologie, dapprima meccaniche ed elettromeccaniche e infine elettroniche. Sovente l'AI è considerata come una tecnologia digitalizzante, poiché normalmente è implementata con tecnologie elettroniche e informatiche.

Tuttavia, la grande importanza della AI nello stabilire le possibilità e i limiti dell'implementazione di Industria 4.0 giustificano la sua presentazione in un capitolo separato dalle tecnologie digitalizzanti. La AI può essere classificata in funzione dei suoi potenziali obiettivi come AI forte o debole, o secondo la tecnologia come AI classica o moderna (Warwick 2012). Per AI forte s'intende la possibilità che l'AI si possa sviluppare fino a uno stadio del tutto comparabile con la mente umana mentre nella AI debole si considera che le macchine possano dimostrare intelligenza ma non necessariamente coscienza come la mente umana. Questa distinzione è più che altro d'interesse filosofico e scientifico. Nel caso di Industria 4.0, l'AI che ci interessa è quella che è in grado di condurre e gestire fabbricazioni, controllare e intervenire per correggere malfunzionamenti e infine gestire le relazioni esterne che interessano le fabbricazioni. La distinzione tra AI classica e moderna è invece importante poiché porta nel primo caso a macchine AI in grado di apprendere e condurre operazioni per le quali sono state istruite, nel secondo caso a macchine che hanno invece capacità di autoapprendimento e che si istruiscono anche con l'esperienza affrontando con successo situazioni più complesse in un modo simile a quello umano. Attualmente l'hardware necessario per le macchine AI sia classiche che moderne si basa su tecnologie elettroniche, tuttavia in futuro potrebbero diventare utili anche nuove tecnologie di AI che combinano elettronica e biologia, o anche non elettroniche, come quella del computer quantistico o del computer biologico descritte più avanti nei campi delle tecnologie digitalizzanti e le biotecnologie.

3.1.1 Intelligenza artificiale classica

L'AI classica è basata prevalentemente su un approccio *top down* nel riprodurre comportamenti intelligenti umani usando fondamentalmente l'operazione logica *if... then...* (se... allora...) e introducendo poi ulteriormente alla logica booleana anche la logica *fuzzy* attribuendo un valore di probabilità alle asserzioni logiche (Warwick 2012). La AI classica si è sviluppata in particolare a partire dagli anni 80 del secolo scorso con realizzazioni che riguardano principalmente i cosiddetti *sistemi esperti*, il *problem solving* e il *data mining*. I sistemi esperti implicano una macchina AI in grado di ragionare in un campo specifico in modo simile a quello umano e si sono sviluppati negli anni 80 del secolo scorso, e si basano sulla logica di condizioni (*if*) che portano a una conclusione (*then*). I limiti dei sistemi esperti riguardano la raccolta di tutte le regole necessarie per operare su sistemi complessi, e un miglioramento delle loro possibilità può essere fatto introducendo anche una logica fuzzy. Il *problem solving* è un aspetto dell'AI basato sull'immissione di un insieme di regole che può coprire tutte le eventualità di un sistema da cui ricavare la soluzione ricercata. Il *data mining* offre invece la possibilità di ricavare informazioni specifiche, correlazioni ricercate, ecc. da un grande insieme di dati non necessariamente della stessa natura. Il campo dell'AI classica che interessa la trasformazione in Industria 4.0 è soprattutto quella della robotica destinata alle fabbricazioni, Un robot può essere istruito facendogli memorizzare i movimenti che deve eseguire che poi farà sulla base di istruzioni ricevute da un computer. In linea generale questo robot non potrà però eseguire operazioni per le quali non è stato istruito anche se l'AI classica ha comunque anche una certa capacità di apprendimento con l'esperienza attraverso il cosiddetto *machine learning*, modificando e adattando il comportamento. Tuttavia queste capacità sono limitate e, per ovviare a questo, sono state sviluppate tecnologie basate su reti neurali artificiali, e non semplici circuiti logici, e che costituiscono l'AI moderna che permettono un apprendimento autonomo attraverso l'esperienza e che è chiamato anche *deep learning*.

3.1.2 Intelligenza artificiale moderna

A differenza dell'AI classica in quella moderna l'approccio è di tipo *bottom up*, e prevede l'uso di alcuni elementi fondamentali dell'intelligenza, assemblarli, condurre una fase di apprendimento lasciandoli sviluppare per un certo tempo per poi valutare la validità o no dei risultati (Warwick 2012). In pratica si è cercato di imitare il sistema biologico umano di apprendimento basato su una rete di neuroni esistenti nel cervello. Il neurone è una cellula collegata ad altri neuroni attraverso una struttura chiamata sinapsi costituita da un certo numero di dendriti che gli trasmettono impulsi di natura chimica o elettrica da altri neuroni. Questi impulsi

vengo amplificati o indeboliti (secondo il valore dei pesi corrispondenti adottati dal neurone) e, se il loro livello totale di intensità supera una certa soglia, il neurone emette a sua volta un impulso attraverso l'assone che poi si dirama in dendriti che raggiungono altri neuroni. Si forma quindi una rete di neuroni che comunicano tra di loro e che ricevono segnali sensoriali che sono elaborati dalla rete che emette a sua volta segnali attuatori risultanti di risposta. Gli algoritmi e l'elettronica di base necessaria per realizzare una rete di neuroni artificiale non è recente e risale al 1957 con la realizzazione del *perceptron* da parte di Frank Rosenblatt del Cornell Aeronautical Laboratory, la ricerca in questo campo però stagnò fino alla pubblicazione nel 1969 di un lavoro di Minsky e Papert sul machine learning. In realtà un grande interesse applicativo è nato solo recentemente per importanti sviluppi come ad esempio le vetture a guida autonoma. Il funzionamento dell'apprendimento da parte di una rete di neuroni biologici o artificiali si può spiegare in maniera molto semplificata in questo modo: a ogni reazione della rete a degli stimoli si ottiene una risposta che ha un certo livello di *fitness* (efficienza). Questa, se è bassa, tenderà a ridurre i pesi con cui i neuroni biologici o artificiali considerano gli stimoli inibendoli, mentre, se essa è alta, tenderà ad aumentare i pesi amplificando gli stimoli. In questo modo solo nel secondo caso il neurone tenderà a emettere un impulso. Dopo un certo periodo di apprendimento si formerà così un comportamento in cui la rete tenderà a dare risposte efficienti ai vari stimoli favorendo gli impulsi che risultano in una fitness elevata, inibendo invece quelli che risulterebbero in una fitness bassa. In questo modo una macchina AI moderna può affrontare la gestione di situazioni per le quali non sarebbe possibile prevedere a priori tutte le casistiche necessarie per una programmazione top down tipica dell'AI classica, procedendo invece a un addestramento diretto sul campo con processi bottom up. Occorre dire che mentre con le macchine AI classiche si conoscono esattamente i processi logici usati dalla macchina e ciò che ha imparato, nelle macchine AI moderne ciò non è possibile e la verifica di ciò che hanno imparato deve essere provata analogamente alla verifica delle capacità di una persona a eseguire un certo compito. Infine possiamo citare, nel campo delle reti neurali, studi sul collegamento di circuiti elettronici con le reti di neuroni del cervello umano, e anche l'inverso con coltivazioni di reti di neuroni biologici collegati a circuiti elettronici. Il primo caso è studiato soprattutto per eliminare disabilità umane, più che potenziare le abilità del cervello, cosa che potrebbe anche avere applicazioni nel rapporto uomo-macchina. Il secondo caso, ancora allo stadio di sviluppo iniziale, è basato sulla coltivazione biologica di neuroni che, moltiplicandosi, formano naturalmente una rete che può essere stimolata e collegata ad elettrodi per la raccolta di output destinati ad attuatori, formando in questo modo macchine biologiche intelligenti (Warwick 2012).

3.1.3 Applicazioni dell'intelligenza artificiale in Industria 4.0

L'AI classica è già usata largamente nell'automazione e nella robotica destinata alle fabbricazioni e si presta ad ulteriori sviluppi che portano anche a una digitalizzazione dell'attività di tecnici ed operai che lavorano con queste macchine creando nuove esigenze di formazione e nuove figure professionali (Magone, Mazzali 2016). L'AI moderna è usata comunque in molte applicazioni che riguardano tecnologie IT, in particolare nella gestione delle connessioni tra le varie operazioni di una tecnologia. Lo sviluppo dell'AI moderna potrebbe portare anche nel medio o lungo termine a modifiche ancora più radicali dove le macchine AI possono svolgere anche compiti di controllo, gestione e manutenzione e di relazioni esterne riducendo il bisogno di personale qualificato che ora ci si preoccupa di introdurre per la trasformazione di Industria 4.0. Questa idea che la manifattura possa diventare alla fine un'attività completamente autonoma è stata espressa anche nel recente rapporto dell'OCSE sulla futura rivoluzione produttiva (Reimsbach-Kounatze 2017). La conseguenza sarebbe una tendenza a un bisogno di personale aziendale quasi esclusivamente per attività di innovazione e progettazione subappaltando in certo senso l'intera attività di fabbricazione alle macchine AI.

3.2 Nanotecnologie e Industria 4.0

Con il nome di nanotecnologie si intende un complesso di attività che riguarda ricerca scientifica (nanoscienza) e applicazioni tecnologiche basata su fenomeni particolari esistenti per

la materia di dimensioni nanometriche. Particelle nanometriche o superfici di spessore nanometrico sono state usate e fabbricate anche prima dell'avvento delle nanotecnologie come risultato di certi processi chimici o di depositi elettrochimici, tuttavia il grande sviluppo in questo campo è avvenuto per la disponibilità di nuove strumentazioni, in particolare la microscopia come nel caso del microscopio elettronico a scansione e poi dei nuovi microscopi a forza atomica e ad effetto tunnel ma anche a nuovi metodi di assemblaggio molecolare a livello nanometrico. Questo ha permesso di indagare e manipolare direttamente particelle e superfici di dimensione nanometrica e scoprire nuovi fenomeni di interesse applicativo. I settori in cui le nanotecnologie hanno dato i maggiori contributi innovativi sono sicuramente quelli dei nuovi materiali che si possono dividere in materiali strutturali come i metalli nanostrutturati, i compositi contenenti nanoparticelle, i nanotubi di carbonio e ultimamente il grafene, struttura grafitica di spessore molecolare, e i materiali funzionali come il silicio nanocristallino per il solare. Le nanotecnologie danno quindi un contributo che entra nell'importante campo dei nuovi materiali che, pur non essendo direttamente collegato alle tecnologie abilitanti di Industria 4.0, rappresenta un importante fattore di innovazione e per questo è stato anche trattato nel rapporto dell'OCSE (McDowell 2017) mostrando come il suo sviluppo dipenda fortemente anche dall'uso di tecnologie digitalizzanti. Esistono comunque alcuni collegamenti diretti tra le nanotecnologie e le tecnologie abilitanti come l'additive manufacturing in cui le nanotecnologie realizzano nanocompositi basati su materiali polimerici con proprietà funzionali per applicazioni specifiche, inoltre la stampa 3D si è mostrata in grado di produrre nanostrutture come nel prodotto stampato. Un altro campo delle nanotecnologie è rappresentato dalle superfici attive di spessore nanometrico che presentano proprietà interessanti come quelle adesive, autopulenti o sensoriali. Infine vi è il settore collegato alle biotecnologie con le nanostrutture biologicamente attive, utilizzate ad esempio in campo medico. Interessante è anche il campo delle macchine molecolari, esistenti naturalmente nelle strutture biologiche ma che si potrebbero ingegnerizzare come motori e macchine molecolari artificiali (Davis 1999), che per ora però non hanno trovato possibilità di sfruttamento. Un altro campo delle nanotecnologie che interessa le tecnologie digitalizzanti riguarda la miniaturizzazione attraverso l'elettronica molecolare detta *crossbar* che permette di avere celle di memoria con una dimensione di una decina di nanometri (Narducci 2008). Per quanto riguarda Industria 4.0 il più importante uso a medio e lungo termine delle nanotecnologie potrebbe essere nel campo della *green technology* e dello sviluppo di sensori e rivelatori ad alta sensibilità a livello atomico e molecolare (Steffi 2017) per una varietà di applicazioni che collegano il mondo fisico a quello digitale chiamate con il nome di *digital twin*. discusso più avanti nel paragrafo riguardante le tecnologie di digitalizzazione, e che può essere considerato come una vera e propria nuova tecnologia abilitante.

3.3 Biotecnologie e Industria 4.0

Le biotecnologie sono un campo in cui sono particolarmente attive le grandi imprese agroalimentari e farmaceutiche, in particolare per applicazioni di ingegneria genetica. Esistono anche nuovi approcci che vanno oltre le applicazioni genetiche come il campo della progettazione computerizzata di enzimi che potrebbero portare a funzioni completamente nuove (OECD 2017a). Le biotecnologie coinvolgono anche numerose startup e PMI specializzate in campo agroalimentare, medico e della *green technology*. In effetti molti paesi dell'OCSE promuovono cluster d'impresе specializzate in biotecnologie come Australia, Belgio, Canada, Danimarca, Irlanda, Paesi Bassi, Nuova Zelanda, Polonia, Spagna, Svizzera, USA e Singapore, fornendo un supporto alle PMI con una serie di servizi come accesso al venture capital, assistenza strategica per normative e certificazioni e accesso a strutture per prove e dimostrazioni (OECD 2017a). Come campo di ricerca le biotecnologie sono collegate alle nanotecnologie attraverso le nanostrutture bioattive e le macchine molecolari che abbiamo già citato. Più interessante per Industria 4.0 è il collegamento delle biotecnologie con le tecnologie digitalizzanti e l'intelligenza artificiale, e abbiamo già citato per questo campo l'integrazione di circuiti elettronici con il cervello umano o l'integrazione di reti neurali biologiche con circuiti elettronici. Due argomenti

sono particolarmente importanti nel campo delle biotecnologie per le loro potenzialità innovative e sono la biologia sintetica e il computer biologico.

3.3.1 Biologia sintetica

Le biotecnologie si occupano tipicamente dello sviluppo degli OGM, organismi geneticamente modificati, attraverso l'introduzione di geni specifici del DNA di un organismo nel DNA di un altro organismo per qualche scopo. Ad esempio si può introdurre un gene proveniente da un pesce nel DNA di un pomodoro per migliorare la sua resistenza al gelo. La biologia sintetica ha invece come scopo di progettare e introdurre geni destinati a scopi specifici negli organismi viventi che potrebbero chiamarsi OGS, cioè organismi geneticamente sintetizzati. Nella biologia sintetica si cerca di realizzare un organismo con un DNA progettato per raggiungere uno scopo determinato. Tipicamente il metodo consiste nell'eliminare in un organismo semplice come il batterio *Escherichia coli* (e. coli) o il lievito, la parte di DNA che non serve alle funzioni vitali del batterio e aggiungere un pezzo di DNA progettato per dare qualche funzione voluta al batterio e tutta una serie di enzimi e molecole biologicamente attive per iniziare, catalizzare o terminare il processo (Freemont et al. 2016). Il cuore della biologia sintetica consiste quindi nella progettazione del DNA per uno scopo specifico e assomiglia più a una scienza ingegneristica che biologica. Il sistema che realizza i compiti previsti per la cellula si compone di parti, tipicamente pezzi di DNA che codificano istruzioni, e dispositivi composti da parti che implementano le funzioni biologiche richieste. Il sistema è progettato secondo regole ingegneristiche analoghe a quelle usate nella realizzazione di circuiti elettronici o negli impianti chimici, e come per questi si usano simbologie specifiche di natura biologica. Per questi compiti si sono inoltre formate procedure standard per l'assemblaggio del DNA e liste di parti e dispositivi disponibili di natura biologica e chimica utilizzabili per la progettazione. La grande differenza che esiste tra i circuiti della biologia sintetica e i circuiti elettronici o le strutture d'impiantistica chimica risiede nel fatto che i vari elementi del circuito biologico non sono collegati fisicamente tra di loro ma agiscono nel mezzo cellulare attraverso processi molecolari o macromolecolari. Le applicazioni della biologia sintetica sono molteplici, già da tempo esiste la produzione microbiologica di insulina per scopi farmaceutici che costituisce un esempio di fabbrica cellulare, più recentemente è stata realizzata la produzione di acido artemisinico, precursore per farmaci antimalarici, da lievito opportunamente ingegnerizzato. Oltre alla produzione di proteine, enzimi, prodotti chimici e farmaceutici, la biotecnologia si interessa anche alla produzione di biofuel, materiali e tessuti proteici e biosensori in grado ad esempio di produrre proteine fluorescenti o colorate come segnali (Marchisio, Rudolf 2011). Vi sono anche studi per produrre proteine o molecole elettrochimicamente attive che permetterebbe al biosensore di generare direttamente un segnale di potenziale collegabile a un circuito elettronico. Infine la biologia sintetica si occupa anche della sintesi di molecole artificiali in grado di sostituirsi alle molecole biologiche naturali per aumentare l'efficienza del sistema. Si tratta di un campo di studi molto difficile ma recentemente si sono potute sintetizzare due basi artificiali che si possono accoppiare in una struttura di DNA come le coppie delle basi azotate naturali e formare triplette che le contengono. In questo caso è stato dimostrato che queste triplette artificiali possono introdurre aminoacidi differenti dai venti usati in natura ottenendo proteine artificiali per varie applicazioni biologiche o tecnologiche (Callaway 2017).

3.3.2 Computer biologico

Un computer biologico è realizzabile sfruttando fenomeni cellulari e di biologia molecolare realizzabili attraverso la biologia sintetica che possono essere utilizzati come circuiti logici (Benenson 2014). Questo potrebbe essere collegato a sensori e attuatori biologici o elettronici. Anche se la realizzazione di un computer biologico presenta attualmente difficoltà nella sicurezza, affidabilità e riproducibilità dei circuiti logici biologici, che tra l'altro però esistono e funzionano in natura, non ci sono ragioni per credere che questi problemi siano insormontabili (Benenson 2014). Si potrebbe così immaginare un uso del computer biologico per il controllo di processo costituito da un sistema di biosensori che comunicano con un computer biologico che elabora i dati e invia segnali ad attuatori biologici o a un'interfaccia elettronica di un attuatore.

3.3.3 Applicazione delle biotecnologie in Industria 4.0

Le applicazioni della biotecnologia in Industria 4.0 possono riguardare sistemi di controllo o fabbricazioni legate a imprese coinvolte nelle biotecnologie e quindi molto meno coinvolte nel caso della manifattura prevalentemente meccanica salvo forse in futuro per applicazioni di tipo informatico descritte qui di seguito. Nel campo delle biotecnologie si potrebbe immaginare un'applicazione del digital twin, discusso più avanti, in cui si simula virtualmente al computer i vari e complessi processi biologici e molecolari che potrebbero essere interessanti per sistemi biotecnologici. Per quanto riguarda i collegamenti con le tecniche di digitalizzazione vi sono ricerche sull'uso delle sequenze del DNA per la memorizzazione di dati studiato al Politecnico di Zurigo. Questa memorizzazione avrebbe il vantaggio di ridurre in grande misura gli spazi necessari per lo stoccaggio e assicurare una durata dei dati memorizzati anche di migliaia di anni (Stock 2016). Le difficoltà attuali di questo procedimento, rapido nella lettura, ma lento nella scrittura del DNA, sono i costi della sua sintesi secondo la sequenza da memorizzare. Un'altra tecnica di memorizzazione biologica, chiamata CRISPR (Shipman et al. 2017), si basa su un processo cellulare naturale in cui nucleotidi (elementi componenti un DNA) di un virus vengono incorporati nel DNA della cellula per avere funzioni immunitarie. Questo processo può essere orientato a scrivere nel DNA sequenze arbitrarie e infine è possibile collegare queste sequenze con pixel di immagini o segnali audio trasformando il DNA in un registratore. La biologia sintetica potrebbe in futuro addirittura realizzare un DNA sintetico con solo due basi artificiali per la trascrizione, invece della tripletta di basi azotate attuale, con un'equivalenza molecolare diretta dei numeri binari 1 e 0 usati nei sistemi elettronici. Tutto queste tecniche potrebbero influenzare in futuro il campo dei Big Data che sono una tecnologia abilitante di Industria 4.0.

3.4 Tecnologie digitalizzanti e Industria 4.0

Le tecnologie digitalizzanti rappresentano il campo che coinvolge più ampiamente le tecnologie per Industria 4.0. Esso è collegato al campo dell'intelligenza artificiale che, per la sua importanza, è stato discusso a parte, e quindi ai vari sistemi dell'automazione industriale. Vi sono poi per queste tecnologie sviluppi radicali che riguardano l'hardware come l'uso di circuiti logici biologici, alternativi a quelli elettronici, che portano al computer biologico, oppure l'uso di computer basati su una logica differente da quella booleana, basata sull'uso di due stati elettrici ben distinti, con fenomeni di natura quantistica che permettono capacità di calcolo enormemente superiori nel cosiddetto computer quantistico. Un altro aspetto dello sviluppo dell'hardware riguarda la miniaturizzazione dei circuiti, campo collegato alle nanotecnologie. Le tecnologie digitalizzanti intervengono sulle tecnologie abilitanti di Industria 4.0 in modo vario e complesso, sia sul piano del software come dell'hardware, necessario per implementarle attraverso l'introduzione e convergenza delle tecnologie informatiche IT nelle tecnologie operative OT della manifattura. Si realizza così un collegamento intelligente tra le varie operazioni manifatturiere e la loro possibile connessione a Internet nel *clouding*, mettendo disponibile una grande capacità di memorizzazione (Big Data), ma anche di algoritmi e applicazioni specifiche (Cloud Computing). Sul piano dell'hardware delle tecnologie digitalizzanti, oltre al caso del computer biologico descritto precedentemente abbiamo il caso del computer quantistico e della miniaturizzazione dei circuiti descritti qui di seguito.

3.4.1 Computer quantistico

Il computer quantistico costituisce un'alternativa ai sistemi elettronici di calcolo basati sulla logica booleana. In questo caso si sfruttano fenomeni quantistici in alternativa agli stati elettrici presenti nei circuiti elettronici. Questi fenomeni seguono però una fisica molto differente: in elettronica si hanno stati con due possibili valori di potenziale ben distinti e che sono misurati dal punto di vista informatico in bit, nei fenomeni quantistici possono invece coesistere fisicamente due stati opposti in una situazione chiamata di sovrapposizione quantistica, misurati in termini di qbit, e che può essere sfruttata per aumentare enormemente le capacità di calcolo. Si può spiegare in maniera molto semplificata la grande capacità di calcolo dei computer quantistici in questo

modo: nei computer elettronici la capacità di calcolo è approssimativamente proporzionale al numero di bit disponibili, nel computer quantistico con l'aumento del numero di qbit, per effetto della sovrapposizione quantistica, la capacità di calcolo aumenta su una base combinatoria, e cioè in modo esponenziale. Tipicamente i computer quantistici usano i fenomeni di natura magnetica come gli spin dei nuclei atomici, ma anche altri come lo spin elettronico e un fenomeno detto di ricottura quantistica, gli ultimi sviluppi sono orientati anche sull'uso della polarizzazione dei fotoni che sembra molto promettente. Le realizzazioni fatte finora sono ancora limitate a capacità di poche decine di qbit, e l'applicazione più considerata è quella che riguarda i problemi di crittografia. Un'altra applicazione riguarda la sicurezza della trasmissione dati. Dati inviati in condizioni di sovrapposizione quantistica sono leggibili dal ricevente, se però vi è un'intercettazione di questi dati avviene un fenomeno di decoerenza con distruzione della sovrapposizione quantistica che può essere facilmente rilevata dal ricevente. Un'importante limitazione di questi computer è la necessità di operare a bassissime temperature, sia per rendere accessibili i fenomeni quantistici che per realizzare in certi casi i necessari forti campi magnetici con superconduttori raffreddati alla temperatura dell'elio liquido. Questo rende possibile una realizzazione solo come mainframe piuttosto che come PC o minicomputer. Tuttavia è possibile immaginare la realizzazione di centri di servizio basati su computer quantistici che potrebbero ad esempio essere utili, attraverso le capacità crittografiche e quelle di controllo della sicurezza di una trasmissione di dati collegate quindi alla cybersecurity che è una delle tecnologie abilitanti di Industria 4.0.

3.4.2 Miniaturizzazione dei circuiti

Un ultimo aspetto importante di hardware delle tecnologie digitalizzanti riguarda la miniaturizzazione. In questo campo si è passati dalle dimensioni micrometriche iniziali dei circuiti integrati alle dimensioni nanometriche attuali. Le dimensioni minime realizzabili attualmente per gli elementi dei circuiti è di 7-10 nanometri ed è considerata un limite molecolare della miniaturizzazione. Per un'ulteriore riduzione dimensionale dei circuiti integrati occorrono altre soluzioni progettuali come ad esempio la realizzazione di circuiti integrati multistrato, o la realizzazione futura di memorie biologiche, a livello molecolare, che potrebbero fornire un ulteriore ordine di grandezza nella riduzione dimensionale. Una possibilità futura potrebbe riguardare anche la manipolazione diretta di atomi e molecole semplici che potrebbe interessare la computazione quantistica. In effetti con il microscopio a effetto tunnel è possibile non solo vedere gli atomi e le molecole ma anche spostarle e posizzionarle. Questo fatto è stato dimostrato già negli anni 80, nei laboratori di ricerca dell'IBM a Zurigo, dove con questo microscopio si sono posizionati atomi di xeno su un letto di atomi di nichel formando la scritta IBM. I laboratori di ricerca IBM di San José nella Silicon Valley stanno studiando attualmente il posizionamento di molecole di ossido di carbonio su un letto di atomi di rame forse per questi scopi. I limiti di questa tecnologia sono attualmente nella lentezza dei posizionamenti e la necessità di operare alla bassissima temperatura dell'elio liquido e quindi avere comunque computer quantistici con dimensioni di mainframe.

4. TECNOLOGIE ABILITANTI E INDUSTRIA 4.0

Le tecnologie abilitanti rappresentano il nucleo tecnologico alla base dell'implementazione di Industria 4.0 la cui confluenza forma il complesso tecnologico dell'attività manifatturiera di un'azienda (Vitali 2016). Le tecnologie abilitanti si possono classificare in quelle interne all'azienda, come i robot collaborativi interconnessi, le stampanti 3D, tecnologia chiamata anche *Additive Manufacturing*, la realtà aumentata per processi produttivi, l'ottimizzazione dei processi tra macchine interconnesse come il caso del *Digital Manufacturing* e del *Digital Twin*, o anche comprendente connessioni esterne come la comunicazione tra processi produttivi e prodotti detta anche *Internet of Things*, le tecnologie di gestione esterna di grandi quantità di dati chiamate *Big Data*, e di utilizzo di applicazioni esterne nel cosiddetto *Cloud Computing*, e infine quella per la sicurezza informatica detta *Cybersecurity*. Occorre notare che una caratteristica delle tecnologie

abilitanti di Industria 4.0, pur coinvolgendo le tipiche tecnologie informatiche e di automazione già presenti nella cosiddetta Industria 3.0, esse si caratterizzano in particolare per l'esistenza di connessioni tra macchine, cioè tra le operazioni tecnologiche della manifattura, gestibili da macchine AI. L'elenco dato delle tecnologie abilitanti è naturalmente indicativo, ed è possibile che nuove tecnologie abilitanti siano disponibili in futuro, esse costituiscono comunque un primo nucleo che merita di essere descritto.

4.1 Robotica

I robot industriali non sono una tecnologia recente e sono già utilizzati da molti anni. In Industria 4.0 tuttavia questa tecnologia assume caratteri differenti come quello collaborativo con esseri umani in condizioni di autonomia e sicurezza. Inoltre l'evoluzione dell'AI verso l'autoapprendimento delle macchine con l'esperienza diretta porta alla possibilità per i robot di assumere facoltà di controllo e gestione della manifattura attualmente compito dei tecnici. In realtà in Industria 4.0 i robot non avrebbero necessariamente bisogno di AI di alto livello ma potrebbero essere gestiti invece nel loro insieme a distanza da una macchina o una rete di macchine AI che ne assicura l'operatività e l'interconnessione.

4.2 Additive manufacturing

Con questo termine si indica un insieme di tecnologie che si rifanno alla cosiddetta Stampa 3D di cui abbiamo già accennato le origini e l'evoluzione nel capitolo dedicato alla ramificazione tecnologica. L'additive manufacturing si pone come tecnologia in competizione con la messa in forma di materiali che avviene con tecnologie tradizionali come l'estrusione, lo stampaggio a freddo o a caldo, la lavorazione meccanica e la fonderia. Molti aspetti sulle caratteristiche della Stampa 3D e la sua competitività tecnologica ed economica e i relativi risvolti ambientali sono riportati nel rapporto dell'OCSE (Faludi, Cline-Thomas 2017). I vantaggi più importanti della stampa 3D riguardano la possibilità di costruire rapidamente forme anche complesse con un minimo spreco di materiale sulla base di istruzioni informatiche riguardo alla forma voluta. Essa risulta particolarmente economica per la costruzione di prototipi e per piccole serie di produzione. La sua tecnologia si è evoluta permettendo di utilizzare una vasta gamma di materiali lavorando non solo a bassa ma anche a media e alta temperatura. Un vantaggio delle stampanti 3D può esistere anche nelle tecniche di messa in forma di materie plastiche o anche metalli evitando la costosa fabbricazione di attrezzature per lo stampaggio, in particolare quando si hanno produzioni limitate o soggette a frequenti variazioni di forma. Per quanto riguarda l'industria meccanica e l'uso di materiali metallici, la stampante 3D non sembra competitiva con operazioni come lo stampaggio che realizzano in genere geometrie semplici con poche perdite di materiale e sono adatte alla produzione in grande serie. Anche la lavorazione meccanica, nonostante che in questo caso la perdita di materiale sia più elevata rimane al momento competitiva per le velocità di esecuzione e per le produzioni di grandi serie di pezzi (Faludi, Cline-Thomas 2017). Un'altra limitazione che può esistere con la stampa 3D riguarda la struttura interna del materiale che è simile a quella ottenibile con le tecniche di fonderia o di metallurgia delle polveri ma manca di strutture interne cristalline orientate (fibratura), ottenibili con la laminazione a caldo e conservate con lo stampaggio a caldo, e che possono influenzare positivamente le proprietà meccaniche del pezzo. Nelle parti ottenute per fonderia, in cui in molti casi si affronta la produzione di forme complesse che generano molto materiale da riciclare, La stampa 3D potrebbe diventare competitiva, ma ciò dipenderà molto dalle caratteristiche e costo del metallo usato e dal numero di pezzi da produrre. In conclusione la stampa 3D sembra piuttosto una tecnologia in grado di estendere le possibilità di fabbricazione piuttosto che sostituire le tecnologie già esistenti.

4.3 Realtà aumentata

In campo manifatturiero per realtà aumentata ci si riferisce in genere a dispositivi indossabili o comunque in grado di aumentare le informazioni disponibili in ambiente reale. Le applicazioni, tuttora in sviluppo, possono interessare in particolare le manutenzioni e le riparazioni guidate, magazzini e centri logistici (Vitali 2016).

4.4 Digital manufacturing

Nel digital manufacturing si ha l'applicazione di varie tecnologie di software, alcune volte accompagnate da hardware specifico. Il rapporto dell'OCSE cita una serie di sistemi che sono usati per l'automazione delle produzioni industriali e che usano come hardware sistemi di sensori e di attuatori (Reimsbach-Kounatze 2017) mentre per il software abbiamo sistemi di controllo logici programmabili PLC (Programmable Logic Controller), controllo di supervisione e acquisizione dati SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), sistemi di esecuzione manifattura MES (Manufacturing Execution System) e di pianificazione risorse dell'impresa ERP (Enterprise Resource Planning). Tutte queste tecniche digitali hanno in fondo la funzione di collegare le varie operazioni tecnologiche della manifattura in modo da coordinarle e ottimizzarle nel suo insieme per il processo produttivo.

4.5 Digital Twin

Un'altra tecnologia digitalizzante importante è poi quella dal cosiddetto *digital twin* consistente in una rappresentazione digitale di un sistema fisico, che può essere un oggetto ma anche un processo, e che si basa sul feed back di sensori del sistema reale come mezzi di monitoraggio e controllo delle risposte della rappresentazione virtuale. Il digital twin può essere considerata come la tecnologia più avanzata dell'integrazione tra le tecnologie IT e quelle OT delle manifatture. Il rapporto dell'OCSE parla del digital twin soprattutto a proposito dello sviluppo di nuovi materiali (McDowell 2017) ma può essere utilizzato come rappresentazione virtuale di processi manifatturieri, realtà aumentata, processi di degradazione o rottura e costruzione o prove di attrezzature o manufatti in ambiente virtuale. Nel digital twin acquistano importanza gli algoritmi computazionali che possono gestire grandi quantità di dati di processi o materiali e che possono interessare anche l'innovazione tecnologica e le attività di R&S. In questo caso si può assistere a una sostituzione parziale o di aiuto dell'attività di esperti in particolari campi della R&S con questi algoritmi e con le possibilità di apprendimento offerte dall'AI moderna. Così ad esempio per lo sviluppo di un prodotto mentre gli esperti trattano vari aspetti che riguardano materiali e processi produttivi suggerendo in genere innovazioni incrementali da verificare, nel digital twin lo sviluppo del prodotto avviene usando un suo modello digitale i cui algoritmi e capacità di apprendimento sono continuamente alimentate con dati risultanti dalla R&S, simulando i materiali ideali e i parametri di fabbricazione e i loro valori, che vengono aggiustati continuamente alla ricerca di un optimum. In questo modo in futuro il digital twin potrebbe costituire una parte importante del processo innovativo. Un'altra possibilità del digital twin potrebbe essere quella di poter simulare il cambiamento di un processo produttivo utilizzando parametri e loro valori legati cambiamento tecnologico, ragionevolmente ipotizzati o, se possibile, estrapolati da cambiamenti simili già sperimentati. Anche se questa simulazione può apparire grossolana, essa potrebbe essere comunque utile per risparmiare costi del learning by doing ed evitare errori di progettazione nell'implementazione reale di un cambiamento tecnologico indotto da Industria 4.0.

4.6 Internet of Things

In Industria 4.0 per Internet of Things (IoT) si intende soprattutto la possibilità di incorporare nel prodotto sensori, elementi di memoria, capacità computazionali, GPS e sistemi di trasmissione via Internet che lo collegano all'azienda che lo produce. In questo modo si ha disponibile una massa d'informazioni utili per migliorare le produzioni e i prodotti e la progettazione di nuove fabbricazioni e prodotti. Inoltre questo sistema di connessione può essere usato anche per effettuare manutenzioni e riparazioni a distanza attraverso l'hardware presente nel prodotto. L'IoT ha già una certa diffusione in vari campi tra cui quello automobilistico dove i dati di funzionamento del motore sono trasmessi alla fabbrica o registrati e trasmessi in occasione delle manutenzioni periodiche del veicolo. Nel caso di veicoli fortemente digitalizzati, come la TESLA, sono registrati e trasmessi non solo i dati di funzionamento ma anche la posizione del veicolo con il GPS permettendo all'azienda di avere dati in funzione anche del percorso fatto. Un'altra

applicazione importante dell'IoT consiste anche nel fabbricare nuovi prodotti con sensori e memorie in grado di dialogare con l'utilizzatore per avere un miglior uso del prodotto. Viene sviluppato anche un sistema di colloquio tra i prodotti, che segnala malfunzionamenti o limiti di durata di materiali, che permettono ai prodotti di ottimizzare essi stessi il loro funzionamento. Occorre infine notare che si può avere, non solo il collegamento tra produzione e prodotti, ma anche tra materiali e semilavorati usati e la produzione creando un possibile collegamento di IoT ininterrotto tra questi, la produzione e i prodotti.

4.7 Big Data

La tecnologia dei Big Data riguarda lo stoccaggio di quantità enormi di dati, la loro conservazione e il loro accesso rapido per i bisogni informativi o loro elaborazione come nel caso del data mining già citato nel capitolo sull'IA. I social media come Facebook o LinkedIn e le sorgenti d'informazioni come Google o Wikipedia necessitano uno stoccaggio enorme d'informazioni in grandi centri memorizzatori. Una volta stabilita la dimensione fisica per lo stoccaggio di un bit, lo spazio per lo stoccaggio è praticamente proporzionale alla quantità di bit o dati da memorizzare. La superficie necessaria per i grandi mainframe di stoccaggio è enorme, e può essere dell'ordine delle migliaia o decine di migliaia di m². Inoltre può essere necessario per la sicurezza dei dati stoccare gli stessi in più centri. In Industria 4.0 molte applicazioni delle tecnologie abilitanti producono e usano enormi quantità di dati che possono essere gestite solo come big data. Queste sono in particolare l'Internet of Things, il digital manufacturing e il digital twin. Per un'azienda si pone il problema di valutare lo stoccaggio interno dei dati o in alternativa ricorrere allo stoccaggio esterno via Internet in centri di servizio. Questo dipende dalle dimensioni dell'azienda e dalla quantità di dati da stoccare. Lo stoccaggio esterno può essere meno costoso ma solleva problemi di sicurezza e questo può portare allo stoccaggio interno almeno dei dati sensibili. Inoltre lo stoccaggio fisico esterno avviene in vari paesi del mondo che qualche volta possono dare problemi di sicurezza per ragioni politiche.

4.8 Cloud computing

Per cloud computing si intende una connessione esterna via Internet che non si limita allo stoccaggio di dati ma fornisce anche algoritmi e applicazioni che possono essere utilizzati nel digital manufacturing. Pur essendo una possibilità d'interesse per l'azienda, poiché il cloud computing fornisce continuamente nuove applicazioni e aggiornamenti, vi possono essere nella pratica problemi di accesso ed esecuzione rapida nel cloud necessari per certe operazioni della manifattura. Questo ha portato allo sviluppo di software e hardware utilizzabile come intermediario tra l'azienda e il cloud computing come nel caso ad esempio del *fog computing*. Questo sistema è costituito da un hardware specifico che si pone come ponte tra le tecnologie digitalizzanti della produzione e il cloud computing in modo da evitare i rallentamenti nella trasmissione e calcolo nella connessione diretta con il cloud conducendo lui stesso una serie di operazioni.

4.9 Cybersecurity

Per cybersecurity si intende la tecnologia abilitante necessaria per proteggere il sistema informatico dell'azienda che, con Industria 4.0, si ingigantisce sia verso l'esterno con l'Internet of Things e il clouding, sia all'interno con le varie tecnologie digitalizzanti. Per queste ragioni la cybersecurity è implementata sia per i processi interni all'azienda, proteggendo dati sensibili e identificando malfunzionamenti informatici, che verso l'esterno da attacchi di malware o minacce. La cybersecurity è tipicamente un servizio che viene offerto all'azienda. Questo servizio non si limita in genere alla protezione ma esamina anche i processi informatici in modo da scoprirne eventuali debolezze e porvi rimedio, inoltre cerca di ridurre il tempo tra la scoperta del comportamento anomalo e la sua eradicazione.

4.10 Uso ed evoluzione delle tecnologie abilitanti

Le tecnologie abilitanti si prestano a vari usi per raggiungere differenti scopi nelle tecnologie manifatturiere che sono riassunte qui di seguito:

- Riduzione della manodopera e i suoi costi, e superamento dei limiti del lavoro umano attraverso la robotica collaborativa e l'uso dell'AI che in futuro potrebbe toccare anche il personale addetto al controllo e gestione della produzione.
- Miglioramento delle velocità di produzione attraverso il collegamento tra le operazioni tecnologiche con le varie tecnologie hardware e software del digital manufacturing
- Riduzione degli scarti attraverso la comunicazione tra le operazioni con tecnologie digitalizzanti, il cloud computing e l'uso dei big data.
- Migliore conoscenza delle usure dei macchinari con aumento dei loro tempi di utilizzazione attraverso l'uso di sensori e la simulazione virtuale con il digital twin dei materiali delle parti soggette a usura, nonché maggiore assistenza da parte del fornitore di macchinari
- Ottimizzazione generale dei processi manifatturieri attraverso la raccolta di dati dai sensori e simulazione virtuale dei processi con il digital twin e uso dei big data.
- Miglioramento del lavoro di sviluppo per nuovi materiali e processi attraverso l'uso del digital twin con il trasferimento e studio in ambiente virtuale di un materiale in sviluppo o di un nuovo processo da sviluppare o valutare.
- Collegamento della manifattura con il prodotto attraverso l'Internet of Things per conoscere meglio il comportamento del prodotto e introdurre eventuali migliorie, ed effettuare controlli, manutenzione e riparazioni a distanza sul prodotto con uso dei big data
- Possibilità di produrre parti geometricamente complicate in sostituzione di tecniche come la fonderia e la fabbricazione di stampi attraverso l'additive manufacturing.
- Miglioramento dell'efficienza di controllo e gestione umana attraverso strumenti di realtà aumentata.
- Necessità di introdurre tecniche di cybersecurity per le comunicazioni interne o esterne alla manifattura.

Bisogna infine considerare il fatto che l'obiettivo finale di Industria 4.0 è quello dello sviluppo di una gestione ed esecuzione completa di una fabbricazione da parte dell'AI sostituendosi all'apporto umano sia per la produzione che per il suo controllo e gestione. Anche se non abbiamo un'idea precisa dei tempi in cui si completerebbe questa evoluzione, la tendenza è quella di cedere sempre di più le operazioni di manifattura alle macchine AI, in una specie di condizioni di subappalto, tendenza segnalata anche nel rapporto dell'OCSE (Reimsbach-Kounatze 2017). Questo significherebbe che i bisogni di personale digitalizzato, indispensabile per l'implementazione di Industria 4.0, diverrebbe a lungo termine inutile in quanto sostituito dalle macchine AI, mentre il lavoro umano si concentrerebbe in attività di progetto e innovazione. Questo sviluppo dell'implementazione di Industria 4.0 sarà accompagnato necessariamente da un'evoluzione delle tecnologie abilitanti in cui alcune prenderanno importanza mentre per altre si ridurrà l'utilizzazione. In queste condizioni, tecnologie abilitanti come i robot collaborativi interconnessi potrebbero semplificarsi non avendo più bisogno di essere "collaborativi" ricevendo istruzioni e controlli da una macchina o rete di macchine AI. Così anche le tecnologie di realtà aumentata perderebbero d'importanza sostituite direttamente da input di dati da sensori per le macchine AI. Prenderebbe importanza invece l'Internet of Things e soprattutto le tecnologie digitalizzanti e il digital twin che si occupano del collegamento tra operazioni tecnologiche di manifattura, progettazione, gestione, controllo e manutenzione, mentre aumenterebbe il bisogno dei Big Data, del Cloud Computing e dei servizi di Cybersecurity.

5. INDUSTRIA 4.0 E PMI

Lo studio delle tecnologie coinvolte nella trasformazione di Industria 4.0 ha messo in evidenza l'esistenza di tecnologie specifiche, dette abilitanti, che sono alla base dell'implementazione di Industria 4.0 nell'industria manifatturiera. Queste tecnologie traggono origine dai grandi campi della ricerca come le nanotecnologie, le biotecnologie e le tecnologie digitalizzanti, e in particolare dall'intelligenza artificiale, che gioca un ruolo di *core technology*, stabilendo potenzialità e limiti all'implementazione di Industria 4.0, e quindi alla possibilità per le tecnologie abilitanti di sostituirsi al lavoro umano attraverso macchine AI. L'implementazione delle tecnologie abilitanti nella trasformazione dell'industria manifatturiera avviene attraverso una confluenza e combinazione di queste per costituire un complesso di tecnologie specifico per ogni manifattura che necessita un'opera di innovazione e non solamente di adozione di nuove tecnologie assimilabili con una semplice attività di learning by doing. Infatti una delle caratteristiche di Industria 4.0 è quella di collegare le varie operazioni tecnologiche di una manifattura per una piena trasformazione integrata e coordinata del processo. Nel caso dell'implementazione di Industria 4.0 nell'industria manifatturiera, e in particolare nelle PMI organizzate in distretti industriali, esistono problemi specifici da affrontare. Il primo riguarda la rottura del regime di Regina Rossa e cioè della tendenza delle PMI dei distretti a innovare su una base puramente incrementale senza sfruttare i vantaggi di competitività tecnologica legati all'adozione di innovazioni più radicali come quelle delle tecnologie abilitanti. Un secondo problema riguarda gli effetti dell'intranalità tecnologica che si manifesta nei distretti in cui molte operazioni sono subappaltate. In questo caso l'introduzione di un'innovazione potrebbe essere ostacolata da subfornitori che, per varie ragioni, non vogliono o non possono adottare le modifiche necessarie indotte dall'innovazione. Questi problemi potrebbero essere risolti attraverso una maggiore cooperazione tra PMI, maggiori relazioni con la ricerca universitaria, anche attraverso centri di competenza che favoriscono informazione e assistenza nell'utilizzo delle tecnologie abilitanti nelle PMI. Un ruolo importante per la soluzione di questi problemi può anche essere assunto dalle startup che possono per prime sfruttare le nuove tecnologie dimostrandone la validità senza essere ostacolate da attività preesistenti nell'azienda. Un'altra considerazione riguarda gli importanti investimenti necessari per ristrutturare le fabbricazioni con le tecnologie abilitanti, e se questi siano affrontabili o no da singole PMI, o siano necessarie forme di cooperazione produttiva comuni, o addirittura fusioni societarie per avere singole grandi capacità produttive economicamente valide. Inoltre ci si può chiedere se tutto questo non debba essere accompagnato anche da nuove concezioni di prodotto, non solo per prodotti digitalizzati con l'IoT, ma anche modifiche ai prodotti per permettere la digitalizzazione della loro produzione con una conseguente richiesta di ulteriori sforzi d'innovazione tecnologica. Vi è infine un'ultima considerazione che riguarda la questione della perdita o guadagno di posti di lavoro e come l'evoluzione tecnologica associata a Industria 4.0 possa influenzare questo aspetto. Vi è un dibattito in atto tra sostenitori della creazione di posti di lavoro, che compenserebbe largamente quelli persi per l'automazione, per analogia con quanto avvenuto nelle altre rivoluzioni industriali caratterizzate dall'introduzione di macchine al posto del lavoro umano. Altri invece pensano che la perdita di posti di lavoro sia reale e questo perché Industria 4.0, a differenza delle rivoluzioni industriali precedenti, non crea nuovi settori tecnologici industriali, come quelli della meccanica e dell'elettrotecnica avvenuti nel passato, ma semplicemente estende un settore industriale già formatosi nel campo dell'elettronica, informatica e telecomunicazione. Dal punto di vista dello studio delle tecnologie di Industria 4.0, presentato in questo lavoro, la relazione tra evoluzione tecnologica e posti di lavoro si presenterebbe a lungo termine divisa in due fasi: la prima caratterizzata da una domanda di personale con nuove competenze adatte all'operatività delle tecnologie abilitanti che vengono implementate, la seconda controllata dagli sviluppi dell'AI che tenderebbe a ridurre i bisogni di queste competenze attraverso l'uso di macchine che operano con elevate capacità d'intelligenza permesse dall'AI moderna, verso una tendenza alla completa automazione, controllo e gestione della manifattura in cui l'apporto umano tenderà verso le sole attività d'innovazione e progettazione. Si tratta sicuramente di un'evoluzione a lungo termine con tempi tuttora sconosciuti, in particolare nel caso della PMI dove l'introduzione di Industria 4.0 è

solo agli inizi, o neppure cominciata, e dove non si ha ancora un'idea realistica di come la PMI sarà in grado di poter utilizzare le varie tecnologie abilitanti, e quanto tempo potrebbe durare questo processo di riorganizzazione.

6. BIBLIOGRAFIA

- Arthur B., 2009. *The Nature of Technology*, New York, Free Press.
- Auerswald P. Kauffman S. Lobo J. Shell K., 2000. "The Production Recipe Approach to Modeling Technology Innovation: An Application to Learning by Doing", *Journal of Economic Dynamics and Control*, 24, 389-450.
- Basalla G., 1988. *The Evolution of Technology*, Cambridge University Press.
- Benenson Y., 2014. "Biomolecular computing systems: principles, progress and potential", *Nature Reviews, Genetics*, 13, June 2014, 422-468.
- Bonomi A. Marchisio M., 2016. "Technology Modelling and Technology Innovation: how a technology model may be useful in studying the innovation process", *IRCrES Working Paper No. 3/2016*.
- Bonomi A., 2017. "A Technological Model of R&D Process, and its implications with scientific research and socio-economic activities", *Working Paper IRCrES No. 2/2017*.
- Bonomi A., 2017a. "A Mathematical Toy Model of the R&D Process: how this model may be useful in studying territorial development", *IRCrES Working Paper No. 6/2017*.
- Callaway E., 2017. "Cells use "alien" DNA to produce protein" *Nature*, 551, p. 550-551.
- Davis A., 1999. "Synthetic Molecular Motors", *Nature* Vol. 401, Sept. 9, 1999, <http://www.nature.com>
- Faludi J. Cline-Thomas N., 2017. "3D printing and its environmental implications", in *The Next Production Revolution: implications for governments and business*, Paris, OECD Publishing, 171-213.
- Freemont P.S. et al., 2016. *Synthetic Biology: a Primer*, Imperial College Press, World Scientific Publishing Co.
- Girard M. Stark D., 2001. "Distributing Intelligence and Organizing Diversity in New Media Projects", *Santa Fe Institute Working Paper 01-12-082*.
- Magone A., Mazali T., 2016. *Industria 4.0. Uomini e macchine nella fabbrica digitale*, Edizioni Guerini e Associati.
- Marchisio M. Rudolf F., 2011. "Synthetic biosensing systems", *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 45, 310-319.
- McDowel D., 2017. "Revolutionising product design and performance with materials innovation" in *The Next Production Revolution: implications for governments and business*, Paris, OECD Publishing, 215-359.
- Morris R., 2014. "The First Trillion-Dollar Startup", *Endeavour Insight Monthly Newsletter*, Jul. 26, 2014.
- Narducci D., 2008. *Cosa sono le nanotecnologie*, Sironi Editore.
- OECD, 2017. *The Next Production Revolution: implications for governments and business*, Paris. OECD Publishing.
- OECD, 2017a. "Bioproduction and the bioeconomy" in *The Next Production Revolution: implications for governments and business*, Paris, OECD Publishing, 119 -155.
- Reimsbach-Kounatze C., 2017. "Benefits and challenges of digitalizing production", in *The Next Production Revolution: implications for governments and business*, Paris, OECD Publishing, p. 73-117.
- Rolfo S., Bonomi A., 2014. "Coopération pour l'innovation au niveau local: un exemple italien de succès", *Innovations*, 44, 57-77.
- Russo M., 2003. *Innovation processes in industrial districts*, ISCOM Project, Venice November 8-10, 2002, revised version 07.02.2003.
- Shipman S.L., Nivala J., Jeffrey D., Macklis J.D. & Church G.M., 2017. "CRISPR-Cas encoding of a digital movie into the genomes of a population of living bacteria", *Nature*, 547, 345-349.

- Steffi F., 2017. “Tapping nanotechnology’s potential to shape the next production revolution” in *The Next Production Revolution: implications for governments and business*, Paris, OECD Publishing, 157-239.
- Stock M., 2016. “DNA data storage could last thousands of years”, *Technology*, Tue Mar 22, 2016, Thomsonreuters.com
- Valverde S., Solé R., Bedau M., Packard N., 2007. “Topology and Evolution of Technology Innovation Networks”, *Phys. Int. Rev. E* 76, 032767.
- Van Valen L., 1973. “A New Evolutionary Law”, *Evolutionary Theory* 1, p. 1-30.
- Vitali G., 2016. “Le tecnologie abilitanti” in Magone A. e Mazali T. (a cura di), *Industria 4.0. Uomini e macchine nella fabbrica digitale*, Edizioni Guerini e Associati, 69-76.
- Wang E.C., 2010. “Determinants of R&D investment: The Extreme Bound-Analysis approach applied to 26 OECD countries”, *Research Policy* 39, 103-116.
- Warwick K., 2012. *Artificial Intelligence – The Basics*, Routledge, Taylor & Francis Group. Traduzione italiana: *Intelligenza Artificiale – Le Basi*, Dario Flaccovio Editore, 2015.

7. FIGURE

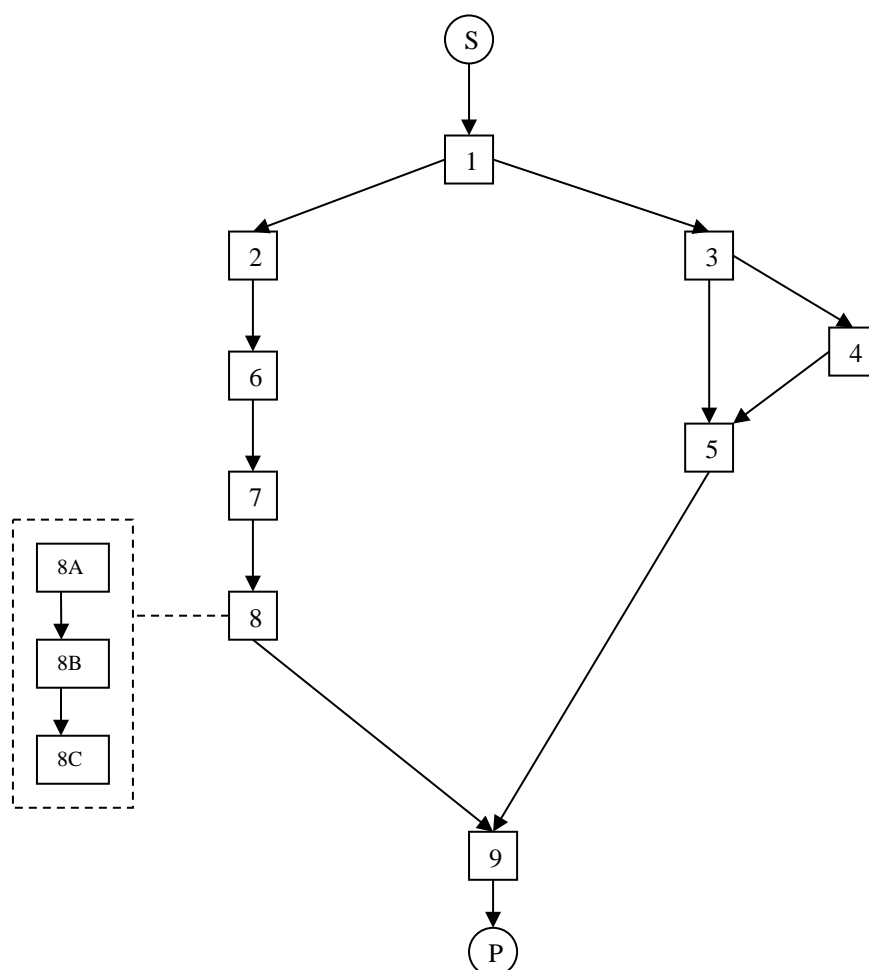


Figura 1. Esempio di struttura di tecnologia: produzione di valvole e rubinetti.

Operazioni

- S. Minerali di rame e zinco
- 1. Produzione di ottone fuso
- 2. Produzione di lingotti di ottone
- 3. Produzione di barre di ottone
- 4. Stampaggio a caldo
- 5. Lavorazioni meccaniche
- 6. Fonderia
- 7. Finitura
- 8. Cromatura
- 8A. Sgrassaggio
- 8B. Nichelatura
- 8C. Deposito di cromo
- 9. Assemblaggio
- P. Valvole e rubinetti

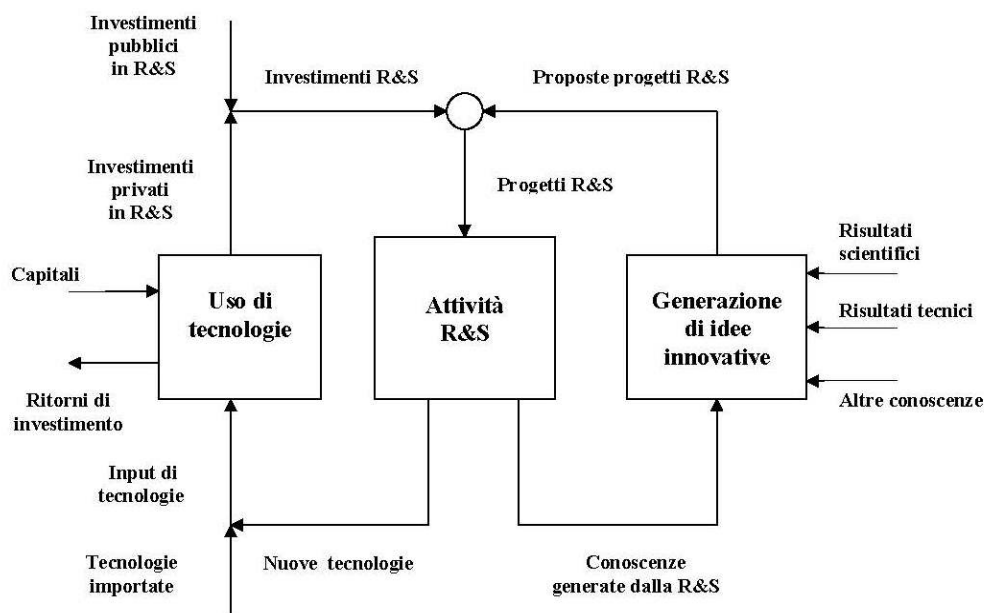


Figura 2. Modello a doppio flusso del processo di R&S.

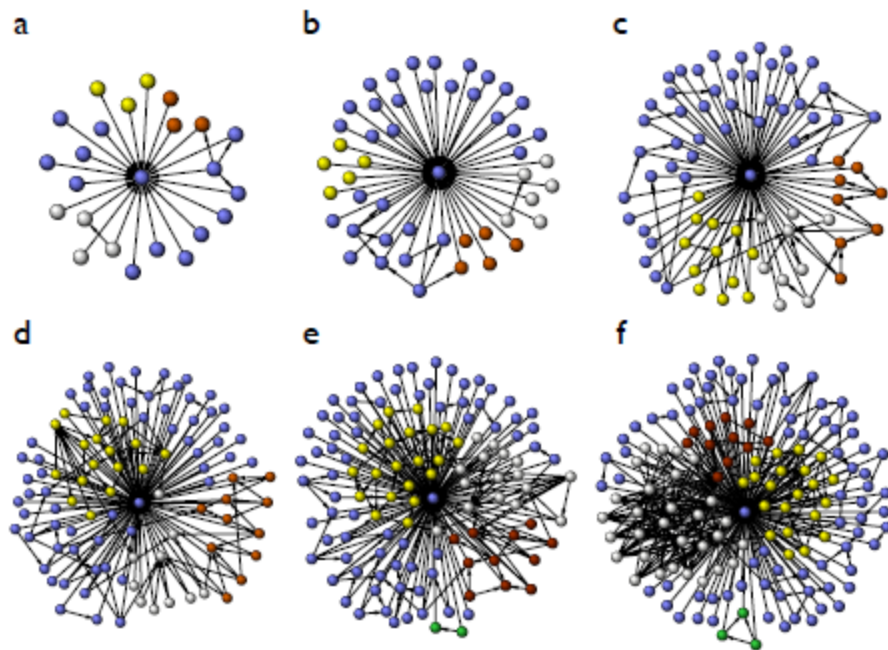


Figura 3. Esempio di ramificazione tecnologica: evoluzione dei brevetti sulla tomografia computerizzata dal 1975 al 2005 (Valverde, Solé, Bedau, Packard 2007).

THE CREATION OF SILICON VALLEY: GROWTH OF THE LOCAL COMPUTER CHIP INDUSTRY

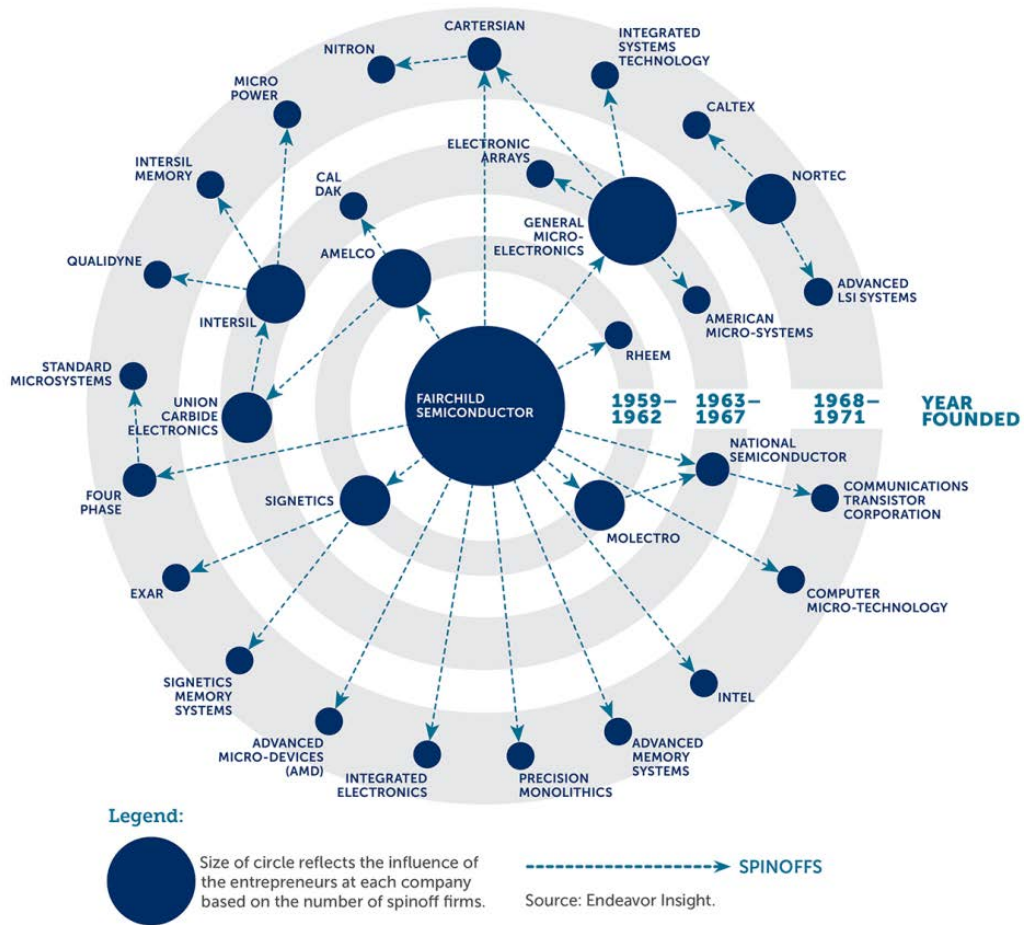


Figura 4. Esempio di ramificazione di startup: caso della Fairchild Semiconductor tra il 1959 e il 1971 (Morris 2014).

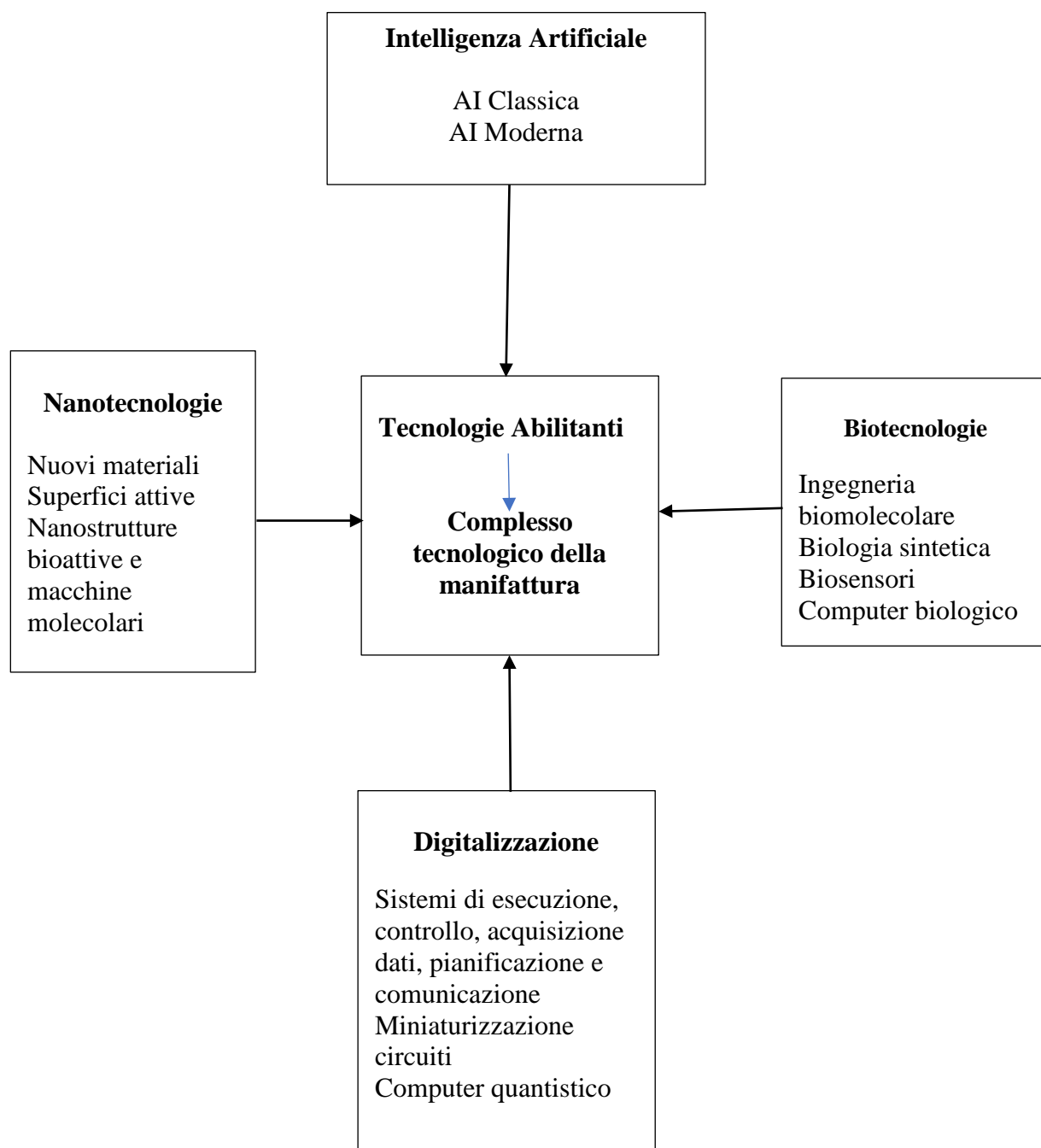


Figura 5. Campi di ricerca e tecnologie abilitanti di Industria 4.0.