

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Gestionale**

Tesi di Laurea Magistrale

Interazione uomo-macchina per i controlli di qualità nei moderni sistemi di produzione



Relatore

prof. Maurizio Galetto

firma del relatore

.....

Candidato

Renato Mosso

firma del candidato

.....

A.A. 2017-2018

Sommario

Indice delle figure e delle tabelle	3
Figure	3
Tabelle	3
Premessa e scopo del lavoro	5
Introduzione	6
1.1 Iniziative nazionali e private per favorire la Quarta Rivoluzione Industriale	7
1.1.1 USA	7
1.1.2 Europa.....	9
1.1.3 Asia	17
1.2 Tecnologie abilitanti l'Industria 4.0	18
1.2.1 Industrial Internet of things.....	19
1.2.2 Manufacturing Big Data.....	20
1.2.3 Cloud Manufacturing.....	21
1.2.4 Automazione Avanzata.....	22
1.2.5 Interfacce Uomo-Macchina Avanzate	23
1.2.6 Additive manufacturing.....	24
1.3 Dispositivi di supporto dell'Industria 4.0.....	27
1.3.1 Sensori 4.0	27
1.3.2 Dispositivi avanzati di HMI	29
Prospettive per il <i>Quality Management</i> del futuro	34
2.1 Integrazione verticale	35
2.2 Integrazione orizzontale	37
2.3 Integrazione digitale end-to-end dell'Engineering.....	41
2.4 Virtual Quality Management (VQM)	44
Evoluzione dei controlli di qualità futuri nelle diverse tipologie di filiere.....	49
3.1 Produzione per reparti – <i>job shop</i>	50
3.2 Produzione a lotti	61
3.3 Produzione in serie	66
3.4 Additive Manufacturing.....	71
Conclusioni	76
Bibliografia.....	77
Sitografia.....	83
Ringraziamenti.....	85

Indice delle figure e delle tabelle

Figure

Figura 1: Mappa concettuale del Cloud Manufacturing	22
Figura 2: SIMATIC Mobile Panel 277(F) IWLAN	30
Figura 3: Il DAQRI SMART HELMET	32
Figura 4: Scheda tecnica del DAQRI SMART HELMET	33
Figura 5: Piramide dei software utilizzati nei processi produttivi	36
Figura 6: Generica catena di fornitura in un contesto produttivo (Vrijhoef et al., 1999)	39
Figura 7: Struttura di integrazione dei sistemi aziendali proposta da Jain	42
Figura 8: Elementi del Virtual Quality Management secondo M. Bookjans e A. Weckenmann	46
Figura 9: Struttura proposta per lo sviluppo del prodotto ottimizzato (S. Bodi et al.)	47
Figura 10: Layout di un impianto produttivo organizzato a Job Shop	51
Figura 11: Principio di misurazione del rumore di Barkhausen secondo Steffan et al.	58
Figura 12: Installazione del sensore per la rilevazione del rumore di Barkhausen nell’esperimento condotto da Steffan et al.	59
Figura 13: Un reparto dell’impianto di produzione di insulina (Rockwell Automation)	66
Figura 14: Illustrazione schematica del processo di stereolitografia	73

Tabelle

Tabella 1: Strategie proposte dal governo americano nel “Federal Big Data Research and Development Strategic Plan”	8
Tabella 2: Principali obiettivi e ambiti di sviluppo del programma “Factories of the Future” per il triennio 2018-2020	11
Tabella 3: Sfide tecnologiche individuate per il settore industriale del Regno Unito attraverso il programma High Value Manufacturing	16
Tabella 4: Principali tecniche di Additive Manufacturing analizzate da Hoejin Kim, Yirong Lin e Tzu-Liang Bill Tseng	26
Tabella 5: Tipologie di sensori secondo una classificazione di Deloitte	28
Tabella 6: Principali caratteristiche tecniche del dispositivo SIMATIC Mobile Panel 277(F) IWLAN, 6AV6645-0DD01-0AX1. Per maggiori informazioni consultare la scheda tecnica completa	31
Tabella 7: Principali ispezioni nei processi organizzati a job shop prima e dopo l’introduzione di Industria 4.0	55
Tabella 8: Principali ispezioni di qualità nei processi organizzati a lotti prima e dopo l’introduzione di Industria 4.0	64

Tabella 9: Principali ispezioni di qualità nei processi di produzione in serie prima e dopo l'introduzione di Industria 4.0	68
Tabella 10: Classificazione delle fasi che caratterizzano i processi di additive manufacturing e relativi controlli di qualità secondo Kim, Lin e Tseng.....	74

Premessa e scopo del lavoro

Il presente elaborato di tesi si pone l'obiettivo di esaminare le evoluzioni attualmente in corso che caratterizzano i sistemi produttivi e che sono portati dalla cosiddetta Quarta Rivoluzione Industriale. Attraverso un'analisi delle principali iniziative nazionali dei paesi considerati promotori di questa rivoluzione vengono delineati i principali elementi innovativi e i trend tecnologici maggiormente sovvenzionati e con le più ampie possibilità di applicazione industriale. La tematica centrale del testo è costituita dal tentativo di individuare i cambiamenti prospettati per i controlli di qualità all'interno delle realtà industriali in questa rivoluzione, sia tramite lo studio delle tecnologie e dei dispositivi immessi recentemente sul mercato, sia attraverso l'analisi dei modelli creati dagli esperti di questo ambito. La tesi si propone in particolar modo di focalizzarsi sull'evoluzione del coinvolgimento umano in questo genere di mansioni aziendali e di comprendere come l'introduzione di opportuni supporti tecnologici possano portare al miglioramento dei controlli di qualità e dell'efficienza aziendale complessiva.

Introduzione

Da alcuni anni è ormai in atto, nelle realtà più all'avanguardia del panorama mondiale, una profonda rivoluzione dei processi produttivi caratterizzata dall'introduzione di macchinari altamente automatizzati e in grado di dialogare ed interagire con il personale attraverso sistemi di produzione ciberfisici (CPPS, *cyber physical production systems*), che uniscono il mondo fisico e quello virtuale. Tale mutamento è definito Quarta Rivoluzione Industriale, o *Industry 4.0*, poiché ha rilevanza quantomeno eguale rispetto all'introduzione del motore a vapore alla fine del XVIII secolo (Prima), all'introduzione di macchinari elettrici e ai sistemi di divisione del lavoro alla fine del XIX secolo (Seconda) e all'introduzione dell'automazione nei processi produttivi tramite i PLC (*programmable logic controllers*) all'inizio degli anni '70 del secolo scorso¹. I prof. Hermann e Otto dell'Università tecnica di Dortmund e il prof. Pentek dell'Università di San Gallo² definiscono l'*Industry 4.0* come il raggruppamento di tecnologie e concetti organizzativi all'interno della catena del valore. Essi sottolineano che all'interno delle cosiddette fabbriche intelligenti i CPPS monitorano i processi produttivi e sono in grado di generarne copie virtuali che consentono di prendere decisioni decentralizzate; inoltre questi sistemi hanno la possibilità di comunicare in tempo reale con gli esseri umani. Gli stessi autori sottolineano che tramite l'*Internet of Service* le imprese facenti parte di una determinata catena del valore possono usufruire congiuntamente di servizi interaziendali. Questo insieme di innovazioni è il frutto della ricerca di metodi di produzione sempre più efficienti in termini di costi di produzione e di *time to market* e che consente alle imprese di poter competere in un contesto caratterizzato da una continua mutevolezza dei bisogni dei clienti e da esigenze sempre più specifiche degli stessi. Il frutto di questa ricerca sta portando a far interagire a stretto contatto le capacità e l'esperienza umana con le enormi potenzialità espresse dal mondo virtuale e dall'intelligenza artificiale in modo da rendere automatizzati il maggior numero possibile di *task* che caratterizzano il processo produttivo e la possibilità di avere un'informazione sempre più dettagliata e capillare sul prodotto e la filiera che permette di realizzarlo. L'avvento dei robot nei processi produttivi non è una completa novità poiché, come detto in precedenza, essi sono stati introdotti già nel corso degli ultimi

¹ Malte Brettel, Niklas Friederichsen, Michael Keller, Marius Rosenberg, 2014, "How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective", *International Journal of Information and Communication Engineering*, Vol. 8, n.1, p. 37

² Mario Hermann, Tobias Pentek, Boris Otto, 2015, "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review", Technische Universität Dortmund - Fakultät Maschinenbau, Audi Stiftungslehrstuhl Supply Net Order Management, Working Paper No. 01/2015, p. 2

decenni; tuttavia l'utilizzo di questi ausiliari tecnologici aveva in passato una valenza minore rispetto a quella potenziale della attuale Quarta Rivoluzione Industriale, poiché i macchinari si limitavano a svolgere le operazioni per cui erano programmati senza fornire dei *feedback* sull'esito del compito assegnato oppure sullo stato dell'impianto in tempo reale. Nell'ottica 4.0, invece, si prospetta la creazione di impianti industriali interconnessi tra reparti, in grado di fornire una grande quantità di dati durante il ciclo di produzione del prodotto, che consentono la collaborazione sinergica tra l'uomo e la macchina e ancora la possibilità di migliorare continuamente il processo attraverso algoritmi di *machine learning* e di simulare virtualmente i cicli di produzione (soprattutto per le nuove generazioni di prodotti) per ridurre le tempistiche di prototipazione e di immissione sul mercato e per ridurre i costi e gli scarti e numerose altre funzionalità. Nelle pagine seguenti verranno illustrati i principali progetti nazionali e privati che stanno favorendo l'avvento dell'*Industry 4.0*, le tecnologie abilitanti e i dispositivi fisici che consentono di sfruttare a pieno le potenzialità di questa Rivoluzione.

1.1 Iniziative nazionali e private per favorire la Quarta Rivoluzione Industriale

Nei paesi tecnologicamente più all'avanguardia sono in atto molteplici iniziative volte a propiziare la digitalizzazione dei processi produttivi nel settore privato e della erogazione dei servizi pubblici. Per raggiungere tale scopo, seppur con tempistiche, finalità e modus operandi leggermente differenti, le suddette nazioni hanno stanziato ingenti fondi e hanno fissato obiettivi di innovazione di medio e lungo termine. Tra i promotori più attivi si annoverano gli Stati Uniti, la Germania, la Cina, il Giappone, la Francia e il Regno Unito, mentre l'Italia risulta leggermente attardata. In seguito, vengono illustrati i tratti salienti delle politiche volte all'innovazione introdotte dai paesi menzionati.

1.1.1 USA

Negli *States*, in cui il processo in atto prende diffusamente il nome di *Industrial Internet of Things* (IIoT), le iniziative più rilevanti in questo ambito sono portate avanti da alcuni dei colossi dell'industria e delle telecomunicazioni (quali ad esempio General Electric, General Motors, IBM e Cisco) che collaborano con importanti centri di ricerca (come l'Università della Virginia Occidentale e l'Università della California, Los Angeles). Gli obiettivi principali degli studi americani sono lo sviluppo degli *smart sensor*, il *cloud manufacturing* (che consente di gestire la produzione in modo

decentralizzato), il dialogo tra i macchinari all'interno del processo produttivo (*machine to machine*, M2M) e la simulazione e la modellazione tridimensionale dei dati raccolti nella filiera. Da rilevare, inoltre, gli sforzi del Governo Americano nell'istituzionalizzare le innovazioni tecnologiche, come ad esempio il “Federal Big Data Research and Development Strategic Plan”³ del 2016, che delinea sette strategie diverse per il trattamento e lo sviluppo dei Big Data (Tabella 1).

Tabella 1: Strategie proposte dal governo americano nel “Federal Big Data Research and Development Strategic Plan”

Strategia 1	Creare funzionalità di prossima generazione sfruttando fondamenti, tecniche e tecnologie emergenti dai Big Data
Strategia 2	Sostenere R&S per esplorare e comprendere l'affidabilità dei dati e le conoscenze risultanti, prendere decisioni migliori, consentire scoperte straordinarie e agire con sicurezza
Strategia 3	Costruire e migliorare la cyberinfrastruttura della ricerca che consente l'innovazione dei Big Data a sostegno delle missioni di agenzia
Strategia 4	Aumentare il valore dei dati attraverso politiche che promuovono la condivisione e la gestione dei dati
Strategia 5	Comprendere i processi di raccolta, condivisione e utilizzo dei Big Data in relazione alla privacy, alla sicurezza e all'etica
Strategia 6	Migliorare il panorama nazionale per l'istruzione e la formazione sui Big Data per soddisfare la domanda crescente di forte talento analitico e capacità analitica per la forza lavoro più ampia
Strategia 7	Creare e migliorare le connessioni nell'ecosistema nazionale dell'innovazione dei Big Data

La Strategia 1 mira a sfruttare la mole di dati generati nell'ambito produttivo e dalla Pubblica Amministrazione per la creazione di nuovi servizi e funzionalità. Inoltre, gli sviluppi sostanziali nell'informatica, nell'apprendimento automatico e nelle statistiche consentiranno ai sistemi di analisi dei dati futuri di essere flessibili, altamente reattivi e predittivi. La seconda Strategia proposta dal NITRD (*Networking and Information Technology Research and Development*) mira a garantire l'affidabilità delle informazioni e delle conoscenze derivanti dai *Big Data* e la loro replicabilità, anche in caso di utilizzo di dati al di fuori dello scopo originario per cui sono raccolti e a integrare dati provenienti da fonti eterogenee. La strada intrapresa per perseguire tale fine consiste nella ricerca di metodi e approcci automatici per valutare l'incertezza dei dati e tecniche per favorire la trasparenza e la tracciabilità dei processi decisionali e delle operazioni svolte senza tralasciare le informazioni relative al contesto e alla semantica dei dati. La Strategia 3 si focalizza sulla creazione di una cyberinfrastruttura con copertura totale sugli *States* che ha l'obiettivo di supportare la gestione e l'analisi dei Big Data in svariati ambiti, tra cui il commercio, la difesa e la ricerca scientifica e che vede coinvolte anche le agenzie federali. L'istituzione di questa interconnessione necessita di

³ “Federal Big Data Research and Development Strategic Plan”, Networking and Information Technology Research and Development (NITRD), www.nitrd.gov, maggio 2016, pp. 1-3

standard, metriche e confronti condivisi per consentire di poter essere pienamente sfruttata ma contemporaneamente esige meccanismi di preservamento della privacy personale. La quarta Strategia ha come obiettivo di aumentare la qualità dei dati attraverso politiche che promuovono la condivisione e la gestione dei dati: a tal fine le agenzie federali americane competenti stanzeranno finanziamenti per le comunità di ricerca sui Big Data per migliorare la rilevabilità, l'usabilità e la trasferibilità dei dati. La Strategia n° 5 ha lo scopo di garantire la sicurezza e la privacy nello scambio dei Big Data. A tal proposito negli *States* si ricercano soluzioni e tecniche per la valutazione della sicurezza dei dati e metodi complessi per comprendere il ciclo di vita delle informazioni e i rischi legati alla conservazione o alla rimozione delle stesse nel lungo medio e lungo termine. La Strategia 6 invece è orientata alla formazione sulle competenze analitiche umane necessarie per processare i Big Data. Il Governo Americano a riguardo si propone di creare nel paese seminari di sviluppo professionale e programmi di certificazione per apprendere la rilevanza dei Big Data in ambito aziendale, ma anche di approfondire le tematiche della scienza dei dati nei centri universitari (e nei livelli inferiori) e di rendere accessibili tali conoscenze all'intera popolazione attraverso corsi online. La settima ed ultima strategia portata avanti dal *NITRD* si propone di migliorare le interconnessioni tra i vari centri di ricerca informatica per rendere immediatamente fruibili all'intera comunità le innovazioni create dalle singole agenzie e per facilitarne la collaborazione. A tal fine si propone la creazione di *sandbox* (ovvero ambienti di test dedicati) di sviluppo inter-agenzie e centri di *benchmarking* dei Big Data per determinare gli strumenti di analisi e i relativi requisiti di interoperabilità per gli obiettivi nazionali preminenti.

Il modello americano intende dunque, come mostrato anche nel *Federal Big Data Research and Development Strategic Plan*, privilegiare la ricerca orientata ai servizi (anche pubblici) e al processamento dei dati, mentre l'innovazione dei processi produttivi risulta di rilevanza minore.

1.1.2 Europa

Nell'Unione Europea, invece, sono in atto svariate iniziative comunitarie focalizzate sull'innovazione tra cui la capofila è costituita dal programma di ricerca Horizon 2020, promosso dalla *European Factories of the Future Research Association* (EFFRA). Questo programma raggruppa grandi marchi del panorama mondiale del calibro di Daimler, Philips, Comau e Siemens che lavorano su iniziative orientate alla Quarta Rivoluzione Industriale proposte e finanziate dall'UE. Il programma Horizon

2020 dispone di un fondo di circa 80 miliardi di euro per il periodo 2014-2020, oltre ai fondi stanziati dai singoli stati membri dell'Unione⁴. Il programma di lavoro “*Factories of the Future*”, facente parte di Horizon 2020, prevede di focalizzare il Vecchio Continente nel triennio 2018-2020 su 5 aspetti principali⁵ che sono illustrati in Tabella 2.

Il primo punto che il programma intende portare avanti è la customizzazione della produzione che implica la necessità di riconfigurare e aggiornare i macchinari, le celle e le linee di produzione attraverso soluzioni ICT sempre più innovative. Nel contesto comunitario è quindi in atto la ricerca di nuovi metodi e strumenti organizzativi che siano in grado di garantire l'alto livello di flessibilità richiesta agli stabilimenti di produzione⁶. Il secondo aspetto di rilievo illustrato in questo programma è incentrato sugli impianti di produzione del futuro e sulle strumentazioni che devono essere adottate al loro interno per poter garantire alta rapidità e flessibilità di esecuzione. La sperimentazione di nuove tecniche di produzione ad alte prestazioni ha anche l'obiettivo di aumentare l'affidabilità attraverso il monitoraggio dei processi e approcci di modellazione o simulazione, associati a nuove strategie di ottimizzazione e manutenzione che consentano di adattare il comportamento dei sistemi in tempo reale in funzione di vincoli interni o esterni⁷. Il terzo elemento avanzato dall'organizzazione europea è la formazione del personale per garantire le competenze umane necessarie per interagire efficacemente con i dispositivi intelligenti introdotti nelle fabbriche del futuro non solo nelle officine ma anche in tutti i restanti dipartimenti aziendali.⁸ Il quarto punto introdotto dall'EFFRA intende focalizzare la ricerca per migliorare la sostenibilità energetica dei processi produttivi e promuovere l'economia circolare dei materiali utilizzati per riciclare i prodotti, rigenerarli (come nel caso del *demanufacturing*) o favorire processi di *additive manufacturing* al fine di minimizzare gli scarti di produzione.⁹ Il quinto ed ultimo punto introdotto dal programma comunitario mira a racchiudere le 4 precedenti priorità per realizzare la cosiddetta produzione digitale interoperabile. I servizi legati alla produzione che si intendono abilitare attraverso queste piattaforme digitali spaziano

⁴ Direzione generale della Ricerca e dell'innovazione (Commissione Europea), 2014, “Horizon 2020 in breve - Il programma quadro dell'UE per la ricerca e l'innovazione”, p. 5

⁵ EFFRA, 2016, *Factories 4.0 and Beyond- Recommendations for the work programme 18-19-20 of the FoF PPP under Horizon 2020*, 12 settembre 2016, p. 5

⁶ EFFRA, 2016, op. cit., p. 7

⁷ EFFRA, 2016, op. cit., p. 16

⁸ EFFRA, 2016, op. cit., p. 28

⁹ EFFRA, 2016, op. cit., p. 36

dall'ingegnerizzazione della produzione al monitoraggio dei processi produttivi con tecniche innovative, dalla manutenzione predittiva alla simulazione dei processi produttivi e alla realtà

Tabella 2: Principali obiettivi e ambiti di sviluppo del programma “Factories of the Future” per il triennio 2018-2020

Priorità di sviluppo	Principali ricerche correlate
Realizzare produzione agile e lotti di produzione unitari	Additive Manufacturing controllato e integrato di qualità
	Celle riconfigurabili e celle auto-riconfigurabili tramite sensori / dispositivi intelligenti
	Digitalizzazione della supply chain: gestione di reti di valore complesse guidate dal cliente
	Produzione come servizio (Manufacturing as a Service) - Servitizzazione di sistemi di produzione autonomi e riconfigurabili
Creare processi e servizi di produzione avanzati per sistemi produttivi e prodotti innovativi e a difettosità nulla	Produzione per componenti complessi e/o multimateriali
	Produzione di alta precisione in larga scala
	Alta precisione sulla piccola scala
	Fabbricazione senza difetti - Garanzia della qualità - Sistemi di autoapprendimento
	Nuove metodologie per l'introduzione di tecnologie di produzione innovative
Sviluppare competenze umane in sinergia con il progresso tecnologico degli impianti di produzione	Supportare l'uomo nel posto di lavoro - Training di produzione/riqualificazione
	Cooperazione uomo-macchina/robot per fabbriche flessibili e in evoluzione
	Progettazione centralizzata di prodotti e apparecchiature di produzione
	Ingegneria collaborativa
Implementare catene del valore sostenibili che guidano l'economia circolare	Sistemi di demanufacturing e rigenerazione per l'efficienza dei materiali e delle risorse nella produzione
	Efficienza energetica nella produzione
	Piattaforma aperta per l'economia circolare europea
Realizzare piattaforme di produzione digitale interoperabili che includono un ecosistema di servizi di produzione	Modellazione e simulazione della fabbrica digitale
	(Big) Data mining da fonti molteplici e analisi avanzata in tempo reale a livello di fabbrica e rete del valore
	Cyber-Physical System (CPS): integrazione con macchine legacy fisiche nelle fabbriche
	Sicurezza, privacy e responsabilità - Sicurezza informatica e sicurezza industriale
	Interoperabilità della piattaforma digitale

aumentata per supportare operai e ingegneri. Per lo sviluppo di queste piattaforme digitali il programma europeo esprime la necessità di adozione di standard di comunicazione e modelli di architettura (come ad esempio RAMI 4.0) e indica 4 linee guida su cui lavorare:

- 1) introduzione di servizi aggiuntivi *plug-and-play* considerando la morfologia delle catene del valore (erogatori di servizi, fornitori di piattaforme e aziende manifatturiere);
- 2) integrazione fisica e applicativa dei sistemi *legacy*;
- 3) individuazione delle specificità settoriali degli ambiti manifatturieri e le relative esigenze peculiari in merito alla piattaforma digitale;
- 4) generazione automatica di documentazione tecnica e generica accessibile¹⁰.

Nonostante l'esistenza di queste iniziative promosse a livello comunitario, il contributo concreto all'innovazione nell'ambito del manufacturing risulta limitato a poche nazioni del Vecchio Continente, con la Germania in posizione privilegiata. Il Governo Tedesco, infatti, investe ingenti fondi in un progetto denominato *Plattform Industrie 4.0* in cui collaborano sinergicamente i ministeri di Istruzione e Ricerca e di Economia e Tecnologia¹¹, i centri di ricerca (tra cui spiccano il Fraunhofer che raggruppa più di 60 centri di ricerca applicata e il Centro di Ricerca per l'Intelligenza Artificiale, *DFKI*) e rappresentanti del settore privato con associazioni di categoria di telecomunicazioni, elettronica e mecatronica e multinazionali come SAP e Bosch. Lo studio tedesco è organizzato attraverso 5 diversi gruppi di ricerca costituiti come forum di lavoro tra rappresentanti qualificati delle imprese, consigli di fabbrica e membri dei sindacati. I gruppi di lavoro sono così organizzati¹²:

- 1) il Gruppo di Lavoro 1 si occupa delle architetture, degli standard e le norme di riferimento per l'Industria 4.0. L'obiettivo primario di questo team è quello di sviluppare e uniformare il modello di architettura RAMI 4.0 (*Reference Architecture Model of Industrie 4.0*) per introdurlo nei contesti industriali tedeschi. Altra sfida affrontata è quella di collaborare alla strutturazione dei programmi politici ed economici delle normative nazionali al fine di semplificare l'accesso delle imprese tedesche ai consigli di standardizzazione europei e mondiali;
- 2) il Gruppo di Lavoro 2 si occupa di ricerca e innovazione nel contesto della Quarta Rivoluzione Industriale. Una parte del team work si occupa di 5 aree di sviluppo che sono la contrattazione e conclusione di contratti in reti automatizzate, l'ingegnerizzazione di sistemi adattabili, la gestione delle reti sociali (organizzazione del lavoro, sistemi di assistenza e interazione

¹⁰ EFFRA, 2016, op. cit., pp. 44,45

¹¹ Plattform Industrie 4.0, 2018, "Digital Transformation „ Made in Germany """, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), p. 4

¹² Plattform Industrie 4.0, 2016, "Digitization of Industrie- Progress Report April 2016", Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), pp.5-9

cyberfisica), logistica auto-organizzante e infine la nomenclatura dei temi trattati in *Industry 4.0*. Una seconda tipologia di attività è incentrata sull'individuazione e sulla risoluzione degli ostacoli riscontrati dalle PMI nel processo di digitalizzazione delle funzioni aziendali in alcuni contesti sperimentali;

- 3) il Gruppo di Lavoro 3 è organizzato per trattare le tematiche di sicurezza informatica e accessibilità dei dati generate nelle fabbriche del futuro. Il team si concentra sulle modalità di autorizzazione all'accesso dei dati, in special modo per i flussi informativi interaziendali ma anche per l'autenticazione dei lavoratori che si interfacciano con i macchinari intelligenti all'interno degli impianti produttivi e per la comunicazione con gli *smart products*;
- 4) il Gruppo di Lavoro 4 si focalizza sugli aspetti giuridici industriali che potrebbero essere alterati a seguito dell'introduzione di sistemi digitalizzati e macchinari intelligenti che spostano le attività di controllo e le responsabilità dei processi dall'uomo all'intelligenza artificiale. Le tematiche coinvolte nel progetto sono il diritto civile e il diritto processuale civile, la legislazione della sicurezza informatica e della protezione dei dati, la legge sulla responsabilità del prodotto, della sicurezza dei prodotti, della intellettuale proprietà e infine il diritto del lavoro;
- 5) il Gruppo di Lavoro 5 si occupa della Quarta Rivoluzione Industriale dal punto di vista dell'essere umano e, nello specifico, delle competenze e della formazione necessarie per interagire efficacemente nella fabbrica del futuro. Il team tedesco intende identificare, anche grazie all'aiuto dei consigli di rappresentanza dei lavoratori, le sfide attuali e le contromisure da adottare nell'ambito dell'apprendistato e della formazione con l'obiettivo di aumentare la produttività e migliorare le prospettive occupazionali della forza lavoro, scongiurando la problematica del cosiddetto *digital mismatch*.

La ricerca tedesca è dunque orientata all'automazione delle linee produttive e all'integrazione della *supply chain*, e la sfida principale consiste nel far cooperare la componente hardware degli stabilimenti *hi-tech* con le infrastrutture software e le rinnovate competenze umane.

In Francia, invece, è stato lanciato un programma nel 2013 (e razionalizzato ulteriormente due anni più tardi) denominato *La Nouvelle France Industrielle* al fine di ammodernare il settore industriale transalpino attraverso la digitalizzazione dei processi ma anche con lo scopo di rinnovare e rendere

più ecosostenibili alcuni dei servizi pubblici principali tra cui la sanità, la mobilità e i trasporti¹³. All'interno del programma i francesi hanno creato una struttura di supporto chiamata *Alliance pour l'Industrie du Futur* (AIF) che a partire dal 2017 ha iniziato a collaborare con il *Conseil National de l'Industrie* (CNI), un organo di consultazione permanente del governo in materia di politica industriale, al fine di favorire la digitalizzazione dei processi delle 14 principali catene del valore (tra cui le filiere aeronautica, automobilistica e dei beni di consumo) e comprendere l'evoluzione dei modelli di business e le competenze necessarie in questa prospettiva futura¹⁴. Dal punto di vista economico, inoltre, il governo francese per volere dell'ex presidente Sarkozy ha stanziato già a partire dal 2010 un fondo definito *Programme Investissement d'Avenir* (PIA) di 47 miliardi di euro erogati in due istanti differenti al fine di investire nei seguenti campi strategici: formazione, valorizzazione della ricerca, consolidamento delle filiere industriali strategiche e sviluppo di PMI innovative, sviluppo sostenibile, economia digitale e biotecnologie¹⁵.

Nel Regno Unito il panorama di innovazione tecnologica è simile rispetto a quella francese, con l'introduzione del programma *High Value Manufacturing* (HVM) e le correlate iniziative HVM *Catapult* che hanno individuato le sfide del settore industriale attraverso una analisi approfondita organizzata in tre fasi¹⁶. Gli ambiti di ricerca individuati coinvolgono sia settori di uso finale come l'alimentare e il farmaceutico, ma anche settori trasversali quali prodotti chimici, biotecnologie e tematiche trasversali come ad esempio l'automazione e la produzione flessibile. Una sintesi delle sfide individuate dal programma HVM corredata da alcuni esempi¹⁷ è riportata in Tabella 3.

In Italia la prima iniziativa per l'avvicinamento alla Quarta Rivoluzione Industriale è stata segnata dal piano varato dal governo nel 2016 denominato "Industria 4.0" e successivamente rinominato "Impresa 4.0". Il piano prevede per il periodo 2017-2020 di stimolare gli investimenti delle imprese private fino a 11 miliardi di euro in ricerca, sviluppo e innovazione e nell'adozione di driver tecnologici abilitanti l'Industria 4.0 attraverso politiche finanziarie, come ad esempio la detrazione

¹³ Jan Larosse, 2017, "Analysis of national initiatives on digitizing European industry- France: Alliance Industrie du Futur", VANGUARD INITIATIVES Consult&Creation, ottobre 2017, pp. 5-6

¹⁴ Jan Larosse, 2017, op. cit., pp. 7-8

¹⁵ Jan Larosse, 2017, op. cit., p. 6

¹⁶ Institute for Manufacturing, Cambridge University, 2016, "High Value Manufacturing landscape 2016- Interim report", p. 11

¹⁷ Institute for Manufacturing, Cambridge University, 2016, "High Value Manufacturing landscape 2016- Interim report", pp. 11-12

fiscale del 30% per investimenti fino ad 1 milione di euro per startup innovative e PMI e il superammortamento per gli investimenti correlati alle tecnologie di Industria 4.0¹⁸.

¹⁸ Ministero dello Sviluppo Economico, 2017, "Italy's Plan Industria 4.0", pp. 9-13

Tabella 3: Sfide tecnologiche individuate per il settore industriale del Regno Unito attraverso il programma High Value Manufacturing

Sfide identificate	Principali ricerche correlate
Digitalizzazione della filiera produttiva, automazione intelligente e riconfigurabile, integrazione prodotto/elettronica e sfruttamento di nuovi materiali	Sfruttamento delle Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione per favorire maggiore flessibilità nella produzione e customizzazione dei prodotti, l'introduzione di nuovi prodotti e la gestione del fine vita
	Stabilimenti riconfigurabili intelligenti, guidati dalla simulazione e dalla modellazione (ad esempio nel settore aerospaziale, della difesa ed automobilistico per realizzare prodotti e componenti complessi e difficili ad alto valore in termini di costi)
	Sfruttamento dei vari percorsi per la produzione 3D di elettronica stampata per integrare la funzionalità in una nuova generazione di dispositivi intelligenti
	Sviluppo di nuove collaborazioni interdisciplinari in robotica e automazione per aumentare gli investimenti nel Regno Unito nella produzione completamente automatizzata e assistita da robot
	Miglioramento dell'integrazione e dell'innovazione dei dispositivi intelligenti e indossabili, anche attraverso una maggiore convalida e regolamentazione (ad esempio nella diagnosi e nel trattamento dell'assistenza sanitaria)
	Progettazione, qualificazione e integrazione di nuovi materiali, che collegano la catena di innovazione dal laboratorio al mercato per l'appropriazione di maggior valore
Priorità nazionali in materia di investimenti in infrastrutture in settori quali ferrovie, energia, edilizia e costruzioni	Nuove ferrovie, mobilità leggera, infrastrutture e ottimizzazione della rete per ridurre al minimo l'impatto ambientale
	Nuovi dispositivi di accumulo di energia per il livellamento della rete elettrica con l'aumento delle richieste di sicurezza e sostenibilità degli approvvigionamenti
	"Edifici attivi" con acquisizione, stoccaggio e controllo dell'energia, per diminuire l'impatto ambientale
	Rafforzare l'acquisizione del valore del Regno Unito nella progettazione e costruzione di reattori nucleari di piccole e medie dimensioni
Rafforzamento della catena di approvvigionamento e innovazioni di prodotto e di processo che potrebbero avere potenziali vantaggi in termini di spin-out in settori collegati a campi quali l'aerospaziale, l'automobilistico e la difesa	Costruzione di nuovi modelli innovativi attraverso la catena del valore nel settore aerospaziale e della difesa (comprese le PMI), condividendo la responsabilità dell'innovazione su più livelli per aumentare la velocità di introduzione e assorbimento
	Integrazione del design per la produzione e nuovi processi produttivi attraverso la supply chain automobilistica, rafforzando il potenziale di acquisizione di valore da parte dei produttori del Regno Unito
	Unità di propulsione avanzate per veicoli automobilistici a basso consumo di carburante, che sfruttano nuovi materiali e tecnologia intelligente per rispondere alle esigenze di riduzione delle emissioni e di efficienza
	Veicoli automobilistici senza pilota dotati di sensori, capacità analitiche e di modelli per ridurre la congestione del traffico urbano e le emissioni.
Sfide settoriali, in particolare per quanto riguarda la bioeconomia, l'assistenza sanitaria e il cibo, che rispecchiano il continuo e crescente interesse della produzione in quei settori all'interno di un'economia più ampia	Nuovi processi di produzione alimentare sostenibili, che riducono l'utilizzo di energia e acqua attenuando le risorse sempre più volatili nell'economia a basse emissioni di carbonio
	Produzione intensificata, progettazione digitale e analisi sostenibile di prodotti farmaceutici e biofarmaceutici nuovi ed esistenti nel Regno Unito
	Produzione point-of-care, fornitura di prodotti farmaceutici e biofarmaceutici su misura ai singoli pazienti che supportano un'assistenza economicamente vantaggiosa, a causa delle pressioni sull'invecchiamento della popolazione, delle cure primarie e dell'aumento dei costi energetici e di trasporto.

1.1.3 Asia

In Asia i paesi che maggiormente contribuiscono allo sviluppo tecnologico delle *smart factory* sono sostanzialmente Cina, Giappone e, in misura minore la Corea del Sud.

Il Ministero dell'Industria e dell'*Information Technology* cinese in collaborazione con i principali esperti della China Academy of Engineering¹⁹ ha varato nel 2015 un piano decennale denominato *Made in China 2025* che comprende molteplici e avveniristici progetti tra cui l'obiettivo di rivoluzionare l'industria cinese che al momento presenta un grado di automazione piuttosto basso se comparato con le altre superpotenze del pianeta. Nello specifico la Cina ha individuato nel corso del Diciottesimo Congresso Nazionale del Partito e di molteplici Sessione Plenarie del Diciottesimo Comitato Centrale le linee guida del piano²⁰, che sono:

-lo sviluppo guidato dall'innovazione. In tal senso Pechino intende introdurre tecnologie chiave nella produzione e nelle istituzioni, promuovere il dialogo tra le imprese e tra diverse discipline e la digitalizzazione dei processi;

-la qualità in primo piano. Con questo proposito la Cina intende regolamentare e standardizzare le procedure legate alla qualità dei prodotti, favorire l'introduzione nelle imprese di sistemi di monitoraggio e inculcare la cultura della qualità;

-lo sviluppo "verde". Con questa espressione il governo cinese intende incoraggiare l'introduzione di apparecchiature di produzione a risparmio energetico, la riduzione delle emissioni inquinanti durante i processi produttivi e l'espansione dell'economia del riciclo delle risorse;

-l'ottimizzazione della struttura. Il governo di Pechino intende aggiornare le industrie tradizionali, trasformare la manifattura orientata alla produzione in una produzione orientata ai servizi e riorganizzare il sistema industriale;

¹⁹ Andreja Rojko, 2017, "Industry 4.0 Concept: Background and Overview", International Journal of Information Management (IJIM)– Vol. 11, No. 5, 10 giugno 2017, p. 78

²⁰ State Council (Cina), 2015, "Made in China 2025 《中国制造2025》", 7 luglio 2015, pp. 5-6

-lo sviluppo orientato al talento umano. La Cina intende sviluppare meccanismi pragmatici per l'assunzione, il collocamento e la formazione del personale e coltivare personale professionale, tecnico, manageriale e amministrativo per soddisfare le esigenze dell'industria del futuro.

Il governo cinese ambisce inoltre ad un regime quasi autarchico del *manufacturing hi-tech*, che dovrebbe stimolare le imprese nazionali a produrre quasi tutti i dispositivi internamente. In questo orizzonte temporale la Cina, infatti, prospetta di avere l'80% di componenti tecnologici (come ad esempio i semiconduttori) prodotti all'interno delle proprie frontiere; inoltre i robot industriali made in China dovranno aumentare in 5 anni del 20% a partire dal 50% prospettato per il 2020 e la loro componentistica raggiungere l'80% entro il 2030²¹.

In Giappone è in atto dal 2015 la *Industrial Value Chain Initiative* (IVI), ovvero un forum ideato per promuovere le produzioni ad alto valore aggiunto in tutte le dimensioni aziendali, creare un ecosistema che integri anche fornitori di software e servizi e studiare l'evoluzione della produzione umano-centrica in rapporto con l'*Internet of Things* nel contesto delle aziende giapponesi. Tale iniziativa è organizzata attraverso numerosi gruppi di lavoro che hanno 3 obiettivi principali: creare una "produzione connessa" all'interno della catena del valore e all'interno delle fabbriche, valorizzando nel contempo la digitalizzazione dei processi e le capacità umane, "allentare gli standard", ovvero di rendere gli standard aziendali (che nel recente passato erano rigorosi e immutabili) più adattabili e flessibili in relazione ad ogni contesto produttivo con cui vengono a contatto e infine favorire l'esportazione dei beni e dei servizi giapponesi²².

1.2 Tecnologie abilitanti l'Industria 4.0

L'Industria 4.0, come accennato in precedenza, è una realtà caratterizzata da una molteplicità di tecnologie concomitanti che necessita della compresenza di ognuna di esse per consentire lo sviluppo dei CPPS. In merito alla enumerazione e alla classificazione di queste tecnologie abilitanti si hanno molteplici correnti di pensiero in base all'accezione che viene data in merito al termine *Industry 4.0* e in base al contesto nazionale in cui questo fenomeno si sta sviluppando. Secondo il Boston

²¹ Luca Zorloni, "Made in China 2025, il piano di Pechino per diventare una potenza hi-tech", www.wired.it, 15 giugno 2018

²² Business Sweden Tokyo, 2017, "Seizing Industry 4.0 opportunities in Japan – Opportunities & barriers to implementation of Industry 4.0 in Japan", aprile 2017 p. 6

Consulting Group²³, ad esempio, esse sono nove e tra loro viene inserita anche la sicurezza informatica o *cybersecurity*; tuttavia questo elemento è sì una realtà importante del panorama tecnologico contemporaneo ma non caratterizza necessariamente il fulcro di tutti i contesti industriali di quarta generazione. Gli elementi tecnologici salienti che sono congiuntamente riconosciuti come base caratterizzante le *smart factory* (anche se possono prendere nomenclature leggermente differenti a seconda del contesto geografico e aziendale) sono invece soltanto sei: l'*(Industrial) Internet of Things*, i *(Manufacturing) Big Data*, il *Cloud Manufacturing*, l'Automazione Avanzata, le Interfacce Uomo-Macchina Avanzate e l'*Additive Manufacturing*. Queste tecnologie possono essere raggruppate a loro volta in due sottocategorie in base all'ambito a cui sono assimilabili: rispettivamente le prime tre all'ICT (*Information and Communications Technology*) e le restanti legate all'ambito produttivo. In seguito, vengono trattate brevemente le suddette tecnologie.

1.2.1 Industrial Internet of things

Con l'espressione *Industrial Internet of things* si intende l'integrazione tra i singoli sistemi nell'ambiente di produzione industriale e gli altri sistemi IT dell'azienda al fine di gestire globalmente le catene di valore insieme ai cicli di vita del prodotto. Questa interconnessione aziendale porta quindi alla convergenza tra le tecnologie operative (OT) come i robot, i nastri trasportatori, i contatori intelligenti, i generatori, i prodotti stessi e le tecnologie dell'informazione come i software e i sistemi di *back office*²⁴. Le differenziazioni rispetto ai metodi tradizionali che fanno dell'IIoT una prospettiva promettente sono il funzionamento distribuito, l'integrazione di soluzioni software e hardware, la raccolta dei dati e delle informazioni di processo in un ciclo di feedback automatico²⁵. Gli elementi necessari per il pieno funzionamento dell'IIoT secondo l'esperto Eric Farrugia di Schneider Electric²⁶ sono:

1) i dispositivi intelligenti interconnessi muniti di sistemi di rilevamento avanzato e che generano le informazioni e effettuano autonomamente analisi primarie dei dati raccolti;

²³ BCG, "Industry 4.0 – the Nine Technologies Transforming Industrial Production", www.bcg.com

²⁴ Pwc, 2016, "The Industrial Internet of Things: Why it demands not only new technology—but also a new operational blueprint for your business", p. 9

²⁵ Zoltán Pödör, Attila Gludovátz, László Baczárdi, Imre Erdei, Ferenc Nandor Janky, 2017, "Industrial IoT techniques and solutions in wood industrial manufactures", *Infocommunications Journal*, Volume 9, Numero 4, Dicembre 2017, p. 25

²⁶ John Conway, 2015, "The Industrial Internet of Things: An Evolution to a Smart Manufacturing Enterprise", Schneider Electric White Paper, p. 9

- 2) gli *edge gateway*, ovvero sistemi di aggregazione dei dati raccolti da fonti eterogenee per visualizzare in tempo reale le informazioni e per creare connessioni al *cloud* per analisi avanzate;
- 3) metodi, algoritmi e servizi per analizzare approfonditamente i dati e metterli in contesto per coadiuvare il raggiungimento degli obiettivi aziendali;
- 4) un ambiente aperto e collaborativo per consentire la sinergia con altri attori delle filiere produttive e lo sviluppo di una piattaforma comune.

L'applicazione dell'IIoT può essere effettuata in contesti di imprese strutturate e di grandi dimensioni ma anche in realtà produttive più modeste, attraverso alcuni adattamenti. Pödör *et al.*, ad esempio, illustrano le configurazioni Industrial Internet of Things adottate da due imprese ungheresi che si occupano della lavorazione del legno²⁷.

1.2.2 Manufacturing Big Data

La generazione di una considerevole quantità di dati eterogenei tra loro per fonti, strutturazione e finalità di utilizzo nel contesto dell'Industria 4.0, pone diverse sfide sia dal punto di vista dei requisiti degli *hardware* sia dal punto di vista dei *software* da adottare. La complessità nella gestione dei dati nel contesto avveniristico delle fabbriche è stata anche sintetizzata con l'espressione "cinque "v" dei Big Data"²⁸. Tali sfide sono costituite dalla gestione di una grande quantità (Volume) di dati eterogenei (Varietà) che non devono essere distorti rispetto alle grandezze reali misurate (Veridicità), essere raccolti e fruibili rapidamente (Velocità) ed essere utili per l'attività di analisi delle performance aziendali (Valore). L'aumento considerevole della quantità di dati generati rispetto ai contesti produttivi tradizionali è causato sia dall'incremento del numero dei dispositivi utilizzati per le misurazioni fisiche e di processo, sia dall'aumento della frequenza di rilevazioni che questi strumenti riescono a garantire²⁹. Questi Big Data possono essere poi soggetti ad attività di analisi per consentire alle imprese di comprendere profondamente i processi per ricavare informazioni che possano generare progressi nelle attività. Secondo una ricerca di mappatura sistematica condotta da

²⁷ Zoltán Pödör, Attila Gludovátz, László Baczárdi, Imre Erdei, Ferenc Nandor Janky, 2017, op. cit., pp. 27-29

²⁸ Yongkui Liu, Xun Xu, 2017, "Industry 4.0 and Cloud Manufacturing: A Comparative Analysis", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 139, marzo 2017, p. 4

²⁹ Peter O'Donovan, Kevin Leahy, Ken Bruton, Dominic T. J. O'Sullivan, 2015, "Big data in manufacturing: a systematic mapping study", Journal of Big Data, 13 settembre 2015, pp. 1-2

O'Donovan *et al.*³⁰, però, soltanto una percentuale che si aggira intorno al 50% dei Big Data nella ricerca manifatturiera è sfruttato attraverso una qualche forma di analisi: tale fatto implica che le tecnologie di raccolta dei Big Data possono essere utilizzate indipendentemente da una funzione analitica aziendale. Per l'analisi strutturata dei dati integrati durante l'intero ciclo di vita dei prodotti e per ottenere una standardizzazione delle informazioni circolanti all'interno delle aziende innovative, invece, potrebbe essere indicato un ufficio centralizzato per la gestione dei dati³¹.

1.2.3 Cloud Manufacturing

Il *Cloud Manufacturing* è un sistema di produzione in rete che organizza le risorse di produzione su reti (denominate cloud di produzione) a seconda delle richieste effettuate dai consumatori in modo da poter fornire al committente un ventaglio di servizi *on demand* attraverso protocolli standardizzati di scambio di informazione³². Infatti, tramite questa tecnologia, i dati raccolti nelle *smart factories* vengono archiviati su *server* digitali che rendono immediatamente disponibili e fruibili queste informazioni a qualunque dispositivo munito di una connessione internet. Nel *Cloud Manufacturing* gli attori coinvolti sono principalmente di tre tipologie³³ (Figura 1):

- i fornitori che attraverso le loro risorse di produzione generano i prodotti che verranno trasformati in servizi inglobati nella piattaforma di produzione in cloud;
- gli operatori che si occupano di gestire la piattaforma cloud;
- i clienti che inviano i requisiti alla piattaforma in cloud sulla fase del ciclo di vita del prodotto desiderata (ad esempio progettazione, produzione, collaudo).

L'implementazione del *Cloud Manufacturing* necessita inoltre di una architettura multistrato che comprende diverse tipologie di tecnologie e può essere attuato a diversi livelli in funzione delle soluzioni tecnologiche adottate. Le caratteristiche peculiari di questa modalità di produzione che sono ancora in fase di perfezionamento includono l'interconnessione delle risorse di produzione (che

³⁰ Peter O'Donovan, Kevin Leahy, Ken Bruton, Dominic T. J. O'Sullivan, 2015, op. cit., p. 15

³¹ McKinsey & Company, 2016, "Industry 4.0 after the initial hype - Where manufacturers are finding value and how they can best capture it", p. 19

³² Yongkui Liu, Xun Xu, 2017, op. cit., p. 4

³³ Yongkui Liu, Xun Xu, 2017, op. cit., p. 4

devono essere digitalizzate e sempre connesse), rilevamento ubiquitario, sistemi di produzione flessibili, integrati e adattabili in base alle richieste, la focalizzazione sui servizi e la disponibilità permanente di tutti i servizi legati al ciclo di vita del prodotto³⁴.

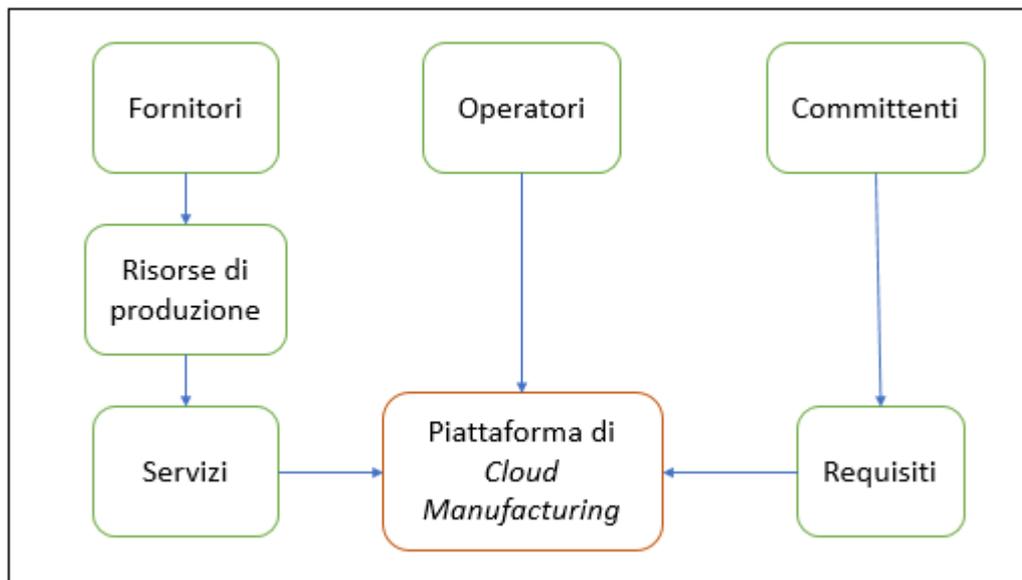


Figura 1: Mappa concettuale del *Cloud Manufacturing*

1.2.4 Automazione Avanzata

Con questa espressione (che in inglese prende il nome di *Advanced Automation*) si intende, nel contesto di Industria 4.0, l'insieme di macchine e robot avanzati che per merito delle innovazioni tecnologiche introdotte (prime tra tutte la miniaturizzazione dei sensori e dei processori, l'incremento delle potenzialità di calcolo degli elaboratori e la presenza dell'*IoT*) sono in grado di interagire con l'uomo e effettuare in autonomia svariate funzioni produttive (come ad esempio attività di assemblaggio) ed essere adattate agilmente tra lavorazioni successive³⁵. Per effettuare l'introduzione di queste strumentazioni è però necessaria, da parte delle imprese manifatturiere, una sostanziale revisione delle competenze digitali: devono essere azionate attività di supporto collaborativo tra i reparti e nell'introduzione delle tecnologie descritte in precedenza (*Big Data, IoT, cloud computing*),

³⁴ Yongkui Liu, Xun Xu, 2017, op. cit., pp. 4-5

³⁵ Oliviero Casale, 2018, "AICQ Industria 4.0 - Roma 30 maggio 2018", Convegno AICQ Industria 4.0, 20 marzo 2018, Torino, pp. 2-3

devono essere adottate piattaforme informatiche e linguaggi di programmazione standardizzati per i processi e infine devono essere allineate le strategie di business aziendale alle evoluzioni tecnologiche³⁶. L'automazione è in lizza per la semplificazione dei processi industriali ormai alcuni decenni ma nell'Industria 4.0 essa rappresenta il fulcro operativo per dotare gli impianti di apparecchiature in grado di creare i prodotti in tempistiche ristrette e con una flessibilità tale da poter esaudire le esigenze di mercato che si avviano ad una customizzazione massiccia soprattutto dei beni di consumo. In questa prospettiva è quindi necessario un alto livello di automazione avanzata in tutti gli ambiti produttivi in cui essa è possibile: un esempio applicativo che sta riscuotendo notevole successo è quello dei *SewBot*³⁷, ovvero robot in grado di produrre capi d'abbigliamento in modo completamente automatizzato ad una velocità impensabile in passato e con una qualità tale da poter rivoluzionare il settore tessile.

1.2.5 Interfacce Uomo-Macchina Avanzate

L'interfaccia uomo-macchina è un sistema tecnologico e dinamico che consente l'interazione e la comunicazione in tempo reale (peculiarità che la distingue dall'interazione uomo-computer, HCI) tra un operatore umano e una macchina³⁸. Nel contesto all'avanguardia dell'Industria 4.0 si assiste ad una evoluzione di questi supporti tecnologici in direzione dell'utente umano: tale strumentazione deve essere in grado di rendere semplice e intuitivo l'utilizzo, tenendo conto delle esigenze dell'essere umano e dei suoi processi cognitivi. L'introduzione di tecnologie software quali display multimediali e computer grafica in concomitanza con la ricerca multidisciplinare in campi come la scienza cognitiva, l'automazione e l'ICT contribuiscono all'efficientamento di questi elementi basilari per le fabbriche del futuro³⁹. Le Interfacce Uomo-Macchina Avanzate sono costituite da elementi presenti già nei dispositivi tradizionali, quali componenti per la presentazione, il controllo lo scambio di dati e la elaborazione preliminare delle informazioni ma sono dotate anche di funzionalità innovative di approfondimento delle informazioni del sistema monitorato su richiesta dell'utente e di guida interattiva all'utilizzo per gli utenti meno esperti⁴⁰. Infine, va specificato che le modalità di controllo delle interfacce nell'Industria 4.0 possono avvenire non solo attraverso dispositivi tattili tradizionali,

³⁶ Oliviero Casale, 2018, "AICQ Industria 4.0 - Roma 30 maggio 2018", Convegno AICQ Industria 4.0, 20 marzo 2018, Torino, p. 4

³⁷ Maurizio Molinari, "Sorpresa robot nel mondo del lavoro", La Stampa, 9 settembre 2018, p. 19

³⁸ Gunnar Johannsen, 2009, "Human-Machine Interaction", Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Vol.XXI, p. 1

³⁹ Gunnar Johannsen, 2009, op. cit. pp. 3-4

⁴⁰ Gunnar Johannsen, 2009, op. cit. p. 8

ma anche per mezzo di altri biosegnali gestuali⁴¹ e neurali⁴². Per un approfondimento sui dispositivi fisici HMI (*human-machine interface*) il lettore è rimandato alla sezione 1.3.2.

1.2.6 Additive manufacturing

Secondo i proff. dell'Università del Texas Kim, Lin e Tseng l'*Additive manufacturing* (AM) “è un processo di creazione di un oggetto tridimensionale basato su deposizione strato su strato di materiali sotto il controllo di un sistema computerizzato”⁴³. Con produzione additiva si intendeva inizialmente l'applicazione industriale della stampa 3D, mentre ora questi termini sono comunemente utilizzati come sinonimi⁴⁴. Tali espressioni raggruppano una serie di tecniche produttive che, a differenza delle tecniche produttive tradizionali che si basano generalmente sull'asportazione oppure sulla deformazione plastica dei materiali, hanno il notevole vantaggio di non produrre scarti di lavorazione e di consentire una notevole flessibilità per quanto concerne la possibilità di personalizzazione del prodotto. I materiali che sono attualmente confacenti alle applicazioni di *Additive Manufacturing* sono in numero limitato, ma in aumento: plastica, gomma, resine, vetro, ceramiche, calcestruzzo e un numero in crescente di metalli sono già stati sperimentati⁴⁵. Un vantaggio che rende particolarmente appetibili queste tecniche è la possibilità di realizzare prodotti a geometria complessa tramite la deposizione strato per strato di materiale che difficilmente riuscirebbe ad essere svolta tramite tecniche ormai consolidate. Per contro, però, l'*Additive Manufacturing* ha al momento scarsa competitività nei lotti di grandi volumi in quanto non beneficia delle economie di cui si avvalgono le produzioni in serie. Altri svantaggi causati soprattutto dal fatto che i metodi di stampa 3D sono ancora in fase di perfezionamento e consolidamento risultano essere la limitata velocità di produzione, le limitazioni dimensionali dei pezzi prodotti (che devono rientrare nei formati dell'involucro delle stampanti), e l'elevato costo di macchinari e materie prime (i filamenti plastici utilizzati in alcuni metodi hanno un range di prezzo che oscilla tra i 25\$ e i 45\$ per chilogrammo)⁴⁶. Una sintesi di

⁴¹ Gunnar Johannsen, 2009, op. cit. p. 10

⁴² Benjamin Blankertz, Matthias Krauledat, Guido Dornhege, John Williamson, Roderick Murray-Smith, Klaus-Robert Müller, 2015, “Advanced Human-Computer Interaction with the Berlin Brain-Computer Interface”, pp. 2-6

⁴³ Hoejin Kim, Yirong Lin, Tzu-Liang Bill Tseng, 2018, "A review on quality control in additive manufacturing", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24 Issue: 3, pp.645-669

⁴⁴ Mohsen Attaran, 2017, “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing”, *Business Horizons*, Agosto 2017, p. 2

⁴⁵ Mohsen Attaran, 2017, op. cit., p. 2

⁴⁶ Mohsen Attaran, 2017, op. cit., p. 4

alcune tra le principali tecniche di produzione additiva analizzate da Kim, Lin e Tseng⁴⁷ è illustrata in Tabella 4. La trattazione sulle tematiche di AM è ripresa successivamente (3.4).

⁴⁷ Hoejin Kim, Yirong Lin, Tzu-Liang Bill Tseng, 2018, op. cit., p. 661

Tabella 4: Principali tecniche di Additive Manufacturing analizzate da Hoejin Kim, Yirong Lin e Tzu-Liang Bill Tseng

Tecnica	Vantaggi	Svantaggi	Importanti parametri di qualità	Capacità avanzate
Processi di lavorazione dei fotopolimeri (PVP)	Eccellente precisione dimensionale	Proprietà meccanica limitata dalla resina polimerica	Viscosità, densità e temperatura della resina	Tecnica di proiezione stereolitografica (SL)
	Buona finitura superficiale	Contaminazione e rifiuti	Profondità di penetrazione	Accurata progettazione
	Processo biocompatibile	Utilizzo esclusivo resina polimerizzabile UV	Velocità di scansione laser	Analitica e algoritmo di dati
	Produzione su microscala (100 µm)	Restringimento termico	Energia di esposizione	Fabbricazione di biomateriali Fabbricazione su scala
Processi material jetting (MJP)	Ottima risoluzione	Ostruzione degli ugelli	Forma delle gocce, velocità, diametro, viscosità e tensione superficiale	Tecnica Drop-on-Demand
	Processo veloce	Danni alle cellule in determinate temperature o frequenze	Frequenza del getto, larghezza del segnale e	Fabbricazione su microscala
	Eccellente precisione dimensionale	Gli agglomerati di nanoparticelle causano l'intasamento	magnitudine di tensione	Fabbricazione di biomateriali
	Capacità di stampa di più materiali	Bassa viscosità	Temperatura del substrato e velocità di evaporazione	Ciclo di feedback in tempo reale per la correzione della stampa attraverso l'elaborazione delle immagini su droplet e mappa di profondità Autocalibrazione della testina di stampa
	Fabbricazione su microscala (~100 µm)		Umidità	Previsione di qualità
Processi binder jetting (BJP)	Ottima capacità di controllo della qualità per la fabbricazione di ceramica e metallo rispetto alla tecnica MJP	Accuratezza più scadente e finitura superficiale rispetto alla tecnica MJP	Trattamento superficiale delle polveri, dimensioni, forma, densità di imballaggio e distribuzione	Tecnica DoD
	Drop-on-Demand	Processo di infiltrazione necessario per il posttrattamento	Viscosità del legante, tensione superficiale, dimensioni delle gocce, velocità e temperatura Stampa dello spessore dello strato, orientamento, saturazione del legante e	Fabbricazione di ceramica e metallo
Processi basati sull'estrusione (EBP)	Processo veloce	Effetto scala	Spessore dello strato, orientamento della costruzione, larghezza e angolo del raster e temperatura di	Tecnica fused deposition modeling (FDM)
	Buone proprietà del materiale	Distorsione termica	Post-elaborazione (tempo di esposizione e temperatura chimica)	Analitica e algoritmo di dati Post produzione Orientamento ottimale della costruzione
		Restringimento termico		
		Bassa precisione		
	Delaminazione			
Processi di fusione del letto di polvere (PBF)	Vasta gamma di materiali	Risoluzione equa limitata dalla dimensione delle particelle	Temperatura del letto di polvere	Tecnica di sinterizzazione laser selettiva (SLS)
	Eccellente precisione dimensionale	Stress residuo	Polvere di uscita laser / raggio	Sistema di monitoraggio della temperatura
	Eccellente ripetibilità	Porosità	Dimensione della polvere	Modellazione termica e elaborazione delle immagini
	Buona proprietà materiale		Atmosfera	Sistema di controllo della retroazione della temperatura Rilevamento dei difetti in tempo reale e correzione in situ
Processi di deposizione di energia diretta (DED)	Vasta gamma di materiali	Stress termico	Temperatura della vasca di fusione	Sistema di controllo ad anello chiuso per feedback in tempo reale di temperatura, uscita laser, altezza placcata e velocità di erogazione
	Buona proprietà materiale		Tasso di consegna materiale	
			Distanza tra la punta dell'ugello e il substrato	
			Densità di potenza del laser	
Processi di laminazione in foglio (SLP)	Processo veloce	Scarsa risoluzione	Temperatura del riscaldatore	Tecnica di fabbricazione degli oggetti laminati (LOM)
	Sufficiente qualità su grande prototipo	Processo di de-cubing o crosshatching	Spessore dello strato	Regola di esaurimento
	Buona resistenza alla trazione in direzione laminata	delaminazione	Velocità / potenza del laser	Analitica e algoritmo di dati
		restringimento	Velocità di rotolamento / pressione	Processo di de-cubing online
		Scarsa resistenza alla trazione in direzione Z.	Temperatura dell'aria della camera	
	Rifiuti generati	Orientamento		

1.3 Dispositivi di supporto dell'Industria 4.0

Come illustrato nel capitolo precedente, la cosiddetta *Industry 4.0* è caratterizzata da un insieme di tecnologie che consentono di ottenere funzionalità inedite rispetto ai contesti precedenti. Tali tecnologie necessitano del supporto di alcuni dispositivi fisici che consentono di rilevare, archiviare e riprodurre informazioni nella *smart factory*. Per questo motivo vengono approfondite in seguito alcune di queste apparecchiature.

1.3.1 Sensori 4.0

I sensori 4.0 prendono il loro nome attraverso una classificazione ideata dall'attuale presidente della *Association for Sensors and Measurement* (AMA) Peter Krause e illustrata da Schütze, Helwig e Schneider⁴⁸. Tale catalogazione considera sensori 1.0 i trasduttori meccanici introdotti sul finire del XVIII secolo, sensori 2.0 i rilevatori elettrici inventati ad inizio del secolo scorso, sensori 3.0 quelli elettronici utilizzati a partire dagli anni Settanta ed infine i sensori 4.0 che nascono con la Quarta Rivoluzione Industriale. Detti anche *smart sensors*, questi dispositivi costituiscono il punto cardine dell'*Industry 4.0* poiché consentono di rilevare le grandezze fisiche di interesse del processo produttivo e di fornirne un feedback, ma a differenza dei rilevatori delle generazioni precedenti, essi sono connessi in tempo reale col *network* aziendale e consentono un monitoraggio semplificato del ciclo produttivo. Se tradizionalmente in un sistema *embedded* costituito da un'unità di controllo e una serie di sensori e attuatori, connessi all'unità di controllo per mezzo di un *fieldbus* (bus di campo), è solamente l'unità di controllo ad elaborare il segnale, con l'adozione degli *smart sensor* anche questi ultimi collaborano a questa funzione⁴⁹. Per convertire gli input fisici in formato digitale sono possibili cinque metodi primari di interfaccia: logico, di tensione, di fase, di corrente e di frequenza. La comunicazione di questi dati digitalizzati ad altri dispositivi facenti parte della piattaforma aziendale o ai *software* per il processamento dei dati avviene tramite standard di trasmissione tra cui Wi-Fi, RFID (*radio frequency identification*) e Bluetooth⁵⁰. Le grandezze fisiche misurabili sono, come si denota in Tabella 5, limitate ma nel contesto dell'Industria 4.0 portano alla possibilità di monitorare

⁴⁸ Andreas Schütze, Nikolai Helwig, Tizian Schneider, 2018, "Sensors 4.0 – smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0", *Journal of Sensors and Sensors Systems (JSSS)*, 9 maggio 2018, p.360

⁴⁹ Nasser Jazdi, 2014, "Cyber Physical Systems in the Context of Industry 4.0", *Institute of Industrial Automation and Software Engineering, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany*, pp. 2-3

⁵⁰ Deloitte, 2018, "Using smart sensors to drive supply chain innovation", p. 4

e interagire proattivamente col sistema produttivo. Non è da escludere, infine, che la ricerca applicata possa portare all'introduzione di nuove tipologie di sensori intelligenti. Una prospettiva di rilievo per gli *smart sensors* nel monitoraggio dei sistemi produttivi automatizzati è costituita dalla tecnologia *Wireless Sensor Network* (WSN), al fine di sostituire l'architettura di controllo centralizzata comunemente usata⁵¹.

Tabella 5: Tipologie di sensori secondo una classificazione di Deloitte⁵²

Tipologia sensore	Funzionamento	Esempio
acustico	Riconosce la vibrazione o la frequenza audio per determinare l'attività, la posizione e l'intensità del suono	Microfoni piezoelettrici, microfoni a condensatore
chimico	Misura la composizione del fluido e la concentrazione di composti biologici e/chimici	Sensori MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems)
ambientale	Monitora e valuta gli scostamenti dello stato fisico o delle condizioni ambientali	Temperatura, umidità, colore, umidità, luce, pressione, flusso d'aria
elettrico	Identifica ed esamina i cambiamenti o le interruzioni dei segnali elettrici o magnetici basati su input o condizioni	Tensione, corrente, potenza
di immagine	Converte le onde luminose in segnali elettrici per costituire in forma ottica digitale il monitoraggio delle condizioni visibili	Telecamera a spettro visibile, a raggi infrarossi, ultravioletti
di movimento e di forza	Misura oggetti statici e dinamici per determinare la quantità, il tipo e la velocità di cambiamento delle proprietà fisiche	Sforzo, peso, vibrazione, accelerometri, accelerometri shock, posizione, movimento, campo magnetico, rotazionale
tattile	Rileva la capacità del corpo durante il contatto fisico tra gli oggetti	Contatto capacitivo, contatto resistivo

⁵¹ Mr. Mohammad Hassan, Mr. M.W.Khanooni, Mr. Naseeruddin Ali, Ms. Madiha Quazi, 2017, "Industrial Automation for Quality Control by SCADA", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume 04, Issue 04, aprile 2017, p. 2049

⁵² Deloitte, 2018, op.cit., p. 5

1.3.2 Dispositivi avanzati di HMI

Come accennato nella sezione precedente (1.2.5), nell'Industria 4.0 vengono modificate non soltanto le tecnologie utilizzate per far funzionare gli impianti industriali, ma anche le modalità con cui uomini e macchinari si scambiano informazioni. L'innovazione dei metodi di comunicazione e l'aumento della qualità e della quantità informazioni generate dai PLC (*Programmable Logic Controller*) con l'introduzione delle cosiddette *Electronic Operator Interfaces* (EOI)⁵³ rendono sempre più indispensabili i supporti per l'interazione uomo-macchina. L'obiettivo prefissato per questi dispositivi è quello di ottenere la *situational awareness* negli operatori, ovvero semplificare lo svolgimento delle mansioni attraverso la visualizzazione di informazioni operative elaborate dai software in un'interfaccia grafica semplice ed intuitiva⁵⁴. Oltre ai già consolidati pannelli dotati di schermi *touch screen* che guidano gli operai ad interfacciarsi con i macchinari, si staglia all'orizzonte la possibilità di eseguire le stesse operazioni con numerose funzionalità aggiunte tramite i cosiddetti dispositivi *wearable*. Occhiali per la realtà aumentata e abbigliamento intelligente sono soltanto due tipologie di dispositivi che vengono adottate dalle imprese più all'avanguardia e che rischiando di modificare in modo permanente le routine industriali. Tra gli innumerevoli vantaggi di questi dispositivi, tra cui si annoverano anche gli *smartwatch*, vi sono anche la possibilità di consentire l'autenticazione elettronica degli addetti che operano all'interno del contesto manifatturiero e svolgere funzioni di sicurezza, consentendo al personale umano di lavorare a stretto contatto con i macchinari, come sperimentato nel progetto FACTOTHUMS⁵⁵.

Un'altra tipologia di supporti fisici particolarmente utile nelle *smart factory* è costituita da visori per la realtà virtuale che consentono di visualizzare e manipolare modelli 3D virtuali. Tale funzione risulta molto utile nelle fasi di progettazione di nuovi prodotti ma non solo: nel caso di visori immersivi è possibile utilizzare questa gamma di supporti per consentire attività di training virtuale per i manutentori degli impianti di produzione con l'ausilio di *controller* che simulano il comportamento degli attrezzi da lavoro⁵⁶. In seguito, sono illustrati brevemente due dispositivi che potrebbero essere integrati in un contesto di Industria 4.0. Il primo è un pannello di controllo mobile

⁵³ Rich Harwell, 2012, "The integrated HMI-PLC", Industry Application, Eaton Corporation, Agosto 2012, pp. 3-5

⁵⁴ Giuseppe Palazzolo, 2017, "Innovazione a tutti i livelli per il mondo HMI", Automazione Oggi, giugno-luglio 2017, p. 21

⁵⁵ Massimiliano Ruggeri, 2016, "Sensori basati su Nanomateriali e Dispositivi MEMS per IoT, Smart Manufacturing e HMI", Consiglio Nazionale delle Ricerche, 3 maggio 2016, p. 39

⁵⁶ Gunnar Johannsen, 2009, op. cit., p. 10

sviluppato da Siemens⁵⁷ per gli operatori che si interfacciano ad impianti e macchinari, mentre il secondo è un casco multifunzione sviluppato da DAQRI⁵⁸ che rientra nei dispositivi *wearable*.

Il SIMATIC Mobile Panel 277(F) IWLAN (Figura 2) fa parte di una serie di pannelli mobili per il controllo di impianti e macchinari dotato di connessione WLAN (*wireless*) secondo IEEE 802.11 e di comunicazione di supporto PROFINET. L'identificazione locale del dispositivo per impianti dotati di tecnologia RFID consente attività di controllo e monitoraggio in totale sicurezza. Il display touch screen presenta una grafica a pixel e colori ad alta luminosità e consente una visualizzazione ottimale dei pezzi o dei processi analizzati. Il dispositivo è inoltre dotato di tasti con funzioni configurabili, un pulsante di arresto di emergenza e etichette personalizzabili. Le batterie di alimentazione sono a lunga durata e dotate di sistemi flessibili di sostituzione per non interrompere il funzionamento. Un elenco delle principali caratteristiche tecniche è fornito in Tabella 6.



Figura 2: SIMATIC Mobile Panel 277(F) IWLAN⁵⁹

⁵⁷ Siemens, 2014, "Human Machine Interface Systems/PC-based Automation", Catalog ST 80/ST PC, pp. 73-94 (2/49-2/70)

⁵⁸ Intel IoT, 2016, "Optimizing Assets, Operations and the Workforce with Smart Manufacturing", Fiera di Hannover 2016, p. 6

⁵⁹ Siemens, 2014, op. cit., p. 86 (2/62)

Tabella 6: Principali caratteristiche tecniche del dispositivo SIMATIC Mobile Panel 277(F) IWLAN, 6AV6645-0DD01-OAX1. Per maggiori informazioni consultare la scheda tecnica completa⁶⁰

Display	
Dimensione	7.5"
Tipo di visualizzazione	TFT, 65536 colors
Risoluzione (WxH in pixel)	640 x 480
Processore	
Processore	ARM, 520 MHz
Memoria	
Tipologia	Flash / RAM
Interfacce	
Interfacce	1 x Ethernet (RJ45)
Numero di interfacce USB	1
Porte USB	1
Interfacce Ethernet Industriale	1 x Ethernet (RJ45)
Protocolli	
PROFINET	si
PROFINET IO	si
PROFIsafe	no
Funzionalità sotto WinCC (Portale TIA)	
Trasferimento (upload / download)	USB, Ethernet, riconoscimento automatico del trasferimento
Trasferimento di configurazione	
Wireless LAN	
Condizioni ambientali	
Temperatura di esercizio	da 0 °C a 40 °C
Umidità relativa di esercizio (max)	80%
Sistemi operativi	
Sistema operativo	Windows CE
Lingue	
Numero di lingue online / runtime	16
Peso	
Peso (senza involucro)	2,2 Kg

Il DAQRI SMART HELMET (Figura 3) è un dispositivo *wearable* che consente il supporto degli operatori nei contesti manifatturieri attraverso applicazioni di realtà aumentata in 4D⁶¹. Questo caschetto, dotato di processore Intel Dual-Core, è in grado di fornire informazioni multisensoriali agli utenti industriali. La dotazione di un microfono e un audio jack consente la comunicazione verbale da remoto tra l'utilizzatore e altri operatori dell'impresa. L'integrazione all'interno del dispositivo di telecamere, sensori e telecamera termica offrono invece all'operatore un set di informazioni più esaustivo per la valutazione dei fenomeni che coinvolgono gli impianti e i macchinari. La scheda tecnica del DAQRI SMART HELMET è illustrata in Figura 4.

⁶⁰ Siemens, 2014, op. cit., pp. 86-93 (2/62-2/69)

⁶¹ Intel IoT, 2016, op. cit., p.6



Figura 3: Il DAQRI SMART HELMET⁶²

⁶² Immagine disponibile al link <http://donar.messe.de/exhibitor/hannovermesse/2017/U208979/dsh-data-sheet-eng-495327.pdf>, p.2

Prospettive per il *Quality Management* del futuro

La gestione della qualità, così come gli altri elementi che costituiscono un'impresa manifatturiera, hanno la prospettiva di subire alcune modifiche sostanziali con l'avvento della Quarta Rivoluzione Industriale. Con l'ausilio delle tecnologie abilitanti descritte in precedenza, potrebbero essere modificati o, in alcuni casi, completamente reinterpretati alcuni aspetti e alcune procedure che caratterizzano la gestione della qualità. Innanzitutto, la gestione della qualità (o *Quality Management*) può essere intesa come “una disciplina di gestione funzionale che cerca di ottimizzare i processi di business e i flussi di lavoro in considerazione delle restrizioni fisiche e temporali, nonché la conservazione della qualità dei prodotti/servizi e il loro ulteriore sviluppo”⁶⁴. Secondo le normative ISO 9000, inoltre, la gestione della qualità è costituita da quattro branche che sono:

- la pianificazione della qualità, che si occupa di impostare gli obiettivi della qualità e di designare processi e risorse per il raggiungimento di tali obiettivi;
- il controllo qualità, che è incentrato sull'adempimento dei requisiti di qualità;
- la garanzia di qualità, che è focalizzata a garantire che i requisiti di qualità siano soddisfatti;
- il miglioramento della qualità, che cerca di affinare le capacità per soddisfare i requisiti di qualità tramite l'analisi dei risultati pregressi.

Oltre a questo genere di catalogazione, la famiglia di norme ISO 9000 delinea anche un sistema organizzato in otto fasi diverse con cui si intende sviluppare, implementare, mantenere e migliorare continuamente la gestione della qualità che risulta intuitivamente contestualizzabile all'interno dell'Industria 4.0⁶⁵. Tali fasi sono:

- 1) la determinazione delle aspettative e dei bisogni dei clienti e di qualsiasi altra parte interessata (i cosiddetti *stakeholders*);
- 2) la scelta di una politica di qualità aziendale e degli obiettivi di qualità da raggiungere;
- 3) la designazione dei processi e le relative responsabilità atti a raggiungere gli obiettivi di qualità prefissati;
- 4) la selezione e il reclutamento delle risorse necessarie al raggiungimento degli obiettivi di qualità;
- 5) la determinazione di metodi di misura volti a valutare l'efficienza e l'efficacia di ciascun processo;
- 6) l'attuazione dei metodi descritti al punto precedente;

⁶⁴ Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, “Research Challenges of Industry 4.0 for Quality Management”, p. 8

⁶⁵ Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, op. cit. pp. 11-12

- 7) la cernita di metodi e strumenti che consentano di prevenire o eliminare le cause di non conformità;
- 8) stabilire un processo di miglioramento continuo per il sistema di gestione della qualità.

I cambiamenti indotti dall'Industria 4.0 che potrebbero portare ad una riconfigurazione della gestione della qualità e delle quattro ripartizioni che la costituiscono verranno illustrati in questo capitolo. In merito agli aspetti di Integrazione Verticale e di Integrazione Orizzontale è doveroso precisare fin da subito che in letteratura essi hanno significati opposti a seconda degli autori che trattano queste tematiche: nel presente elaborato di tesi con Integrazione Verticale si intende un processo che si verifica all'interno di un'azienda e che ne coinvolge tutti i reparti; con l'espressione di Integrazione Orizzontale invece si richiama un concetto che comprende le connessioni che un'impresa instaura con gli altri attori che costituiscono la *value chain*.

2.1 Integrazione verticale

La Quarta Rivoluzione Industriale, come illustrato nel capitolo precedente, porta con sé l'adozione di nuove tecnologie all'interno del contesto aziendale. Tramite l'*Industrial IoT* sono possibili connessioni informatiche che sconvolgono la concezione tradizionale dei sistemi informatici. Gli strumenti software industriali sono organizzati generalmente in una struttura detta a piramide⁶⁶ (Figura 5) che vede al suo apice gli ERP (o *Enterprise Resource Planning*) per la pianificazione aziendale ad alto livello che viene svolta generalmente in modalità centralizzata. Al secondo livello vi è solitamente il sistema di controllo a livello di processo attraverso sistemi SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), mentre il terzo gradino è costituito dai controllori a livello di macchina e da dispositivi PLC. Il livello più basso di automazione della piramide è costituito da dispositivi distribuiti a livello dei singoli macchinari. Questa struttura piramidale è dunque attiva e consolidata in molte realtà produttive; tuttavia una struttura software così rigida e centralizzata non si presta facilmente al contesto dinamico dell'Industria 4.0, in cui vi è la necessità di avere fitti flussi informativi a livello operativo e la possibilità di cambiare le decisioni strategiche in tempo reale. La creazione di sistemi produttivi flessibili e riconfigurabili grazie alla perfetta integrazione dei sistemi gerarchici nel contesto aziendale prende il nome di Integrazione Verticale⁶⁷. Per effettuare questo genere di trasformazione dell'IT e dell'intera struttura aziendale è richiesta l'introduzione di macchinari e dispositivi in grado di supportare il flusso informativo ad alta velocità, ed è necessaria

⁶⁶ Andreja Rojko, 2017, op. cit., pp. 82-84

⁶⁷ Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, op. cit., p. 5

la standardizzazione dei protocolli di comunicazione e una attività di controllo di sicurezza in merito al flusso dei dati⁶⁸. I benefici che derivano da questo processo sono numerosi. In primis si ha una visione d'insieme più dettagliata dell'impresa ed è possibile disporre la produzione con maggiore coerenza rispetto alla logistica e alla pianificazione finanziaria interna⁶⁹; inoltre le tempistiche di dialogo tra i reparti e di risposta si riducono per qualsiasi azione strategica che si voglia implementare⁷⁰. Un altro notevole vantaggio ottenuto dall'Integrazione Verticale è il passaggio automatizzato di informazioni tra macchinari facenti parte dello stesso ciclo di produzione: con un sistema identificativo dei semilavorati (come ad esempio il RFID) e la comunicazione attraverso l'IIoT, è possibile risolvere le problematiche causate dall'impiego di macchinari fabbricati da produttori diversi che in passato risultavano spesso difficilmente gestibili e con problemi per il setup. Anche i prodotti in relazione ai macchinari, in un'ottica 4.0, possono contribuire in modo significativo alla pianificazione della produzione: alcuni di questi *smart products* hanno la possibilità di trasmettere le informazioni sulla sequenza di lavorazioni che devono subire durante il ciclo produttivo ed in tal modo consentono al network aziendale di generare un sistema di prioritizzazione che elimina o quantomeno riduce le problematiche legate ai cosiddetti “colli di bottiglia”⁷¹.

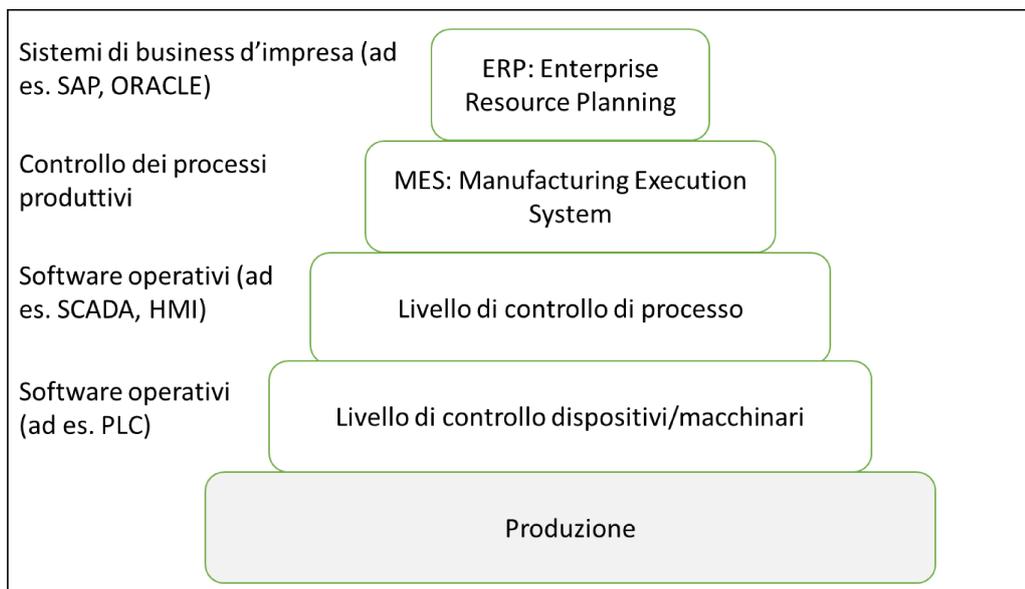


Figura 5: Piramide dei software utilizzati nei processi produttivi

⁶⁸ Yongkui Liu, Xun Xu, 2017, op. cit., p. 2

⁶⁹ Pwc, 2017, “Le opportunità Industry 4.0”, www.pwc.com/it/it/services/consulting/assets/docs/opportunita.pdf, p. 5

⁷⁰ Nur Hanifa Mohd Zaidin, Muhammad Nurazri Md Diah, Po Hui Yee, Shahryar Sorooshian, 2014, “Quality Management in Industry 4.0 Era”, *Journal of Management and Science*, Vol.4. No.3, settembre 2014, p. 87

⁷¹ Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, op. cit., pp. 11-13

Anche la gestione della qualità e i sistemi che ne fanno parte potrebbero essere modificati sostanzialmente dalla Quarta Rivoluzione Industriale. I *Big Data* che sono disponibili attraverso la rete aziendale e le altre nuove tecnologie adottate aprono infatti diverse opportunità per sviluppare in modo innovativo le quattro branche che costituiscono l'ambito della qualità. Per ciò che concerne la pianificazione della qualità (o *quality planning*), lo scenario che propone l'Industria 4.0 è quello di un considerevole aumento degli obiettivi di qualità raggiungibili per mezzo di innovative tecniche di produzione e di monitoraggio automatizzate. In questo contesto *hi-tech* è quindi sempre più rilevante l'apporto dei macchinari stessi per svolgere in modo più efficiente ed efficace le fasi di controllo, garanzia e miglioramento di qualità. Le macchine dotate di Intelligenza Artificiale hanno capacità di auto-apprendimento e auto-miglioramento basate sui parametri di processo e di prodotto che monitorano: è possibile ottenere, ad esempio, una diagnostica avanzata delle condizioni dei macchinari in tempo reale e sviluppare così un nuovo concetto di manutenzione predittiva⁷², oppure correlare tempestivamente errori o difetti di produzione al macchinario che li ha generati tramite il processo di *machine learning* in modo da abbattere i costi legati a scarti o rilavorazioni e garantire un maggior livello di conformità dei prodotti. I dati "grezzi" ottenuti dai sensori e quelli rielaborati nell'ottica dei controlli di qualità sono anche disponibili per consentire l'ottimizzazione dei processi aziendali integrando gli ERP e attraverso un'ulteriore azione di *data mining* è possibile apportare migliorie al processo produttivo e selezionare il personale più qualificato ed adatto alle mansioni richieste. Un'ultima opportunità per il processo di gestione della qualità favorito dall'Integrazione Verticale aziendale è quella di consentire lo sviluppo di metodi virtuali basati sui dati reali che prende il nome di *Virtual Quality Management*. Tale aspetto viene illustrato in modo più approfondito nella sezione 2.4.

2.2 Integrazione orizzontale

Con l'espressione Integrazione Orizzontale della catena del valore si intende la creazione di una rete di scambio di informazioni, materiali ed altri asset produttivi tra le imprese che fanno parte della stessa filiera produttiva⁷³. La costituzione di queste "società virtuali", così come le hanno definite M.

⁷² Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, op. cit., p. 12

⁷³ Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, op. cit., p. 5

Brettel *et al.*⁷⁴, tra organizzazioni legalmente indipendenti consente di apportare considerevoli migliorie per tutte le parti coinvolte. Una catena di fornitura generica tradizionalmente intesa (Figura 6) è costituita da diversi attori che si scambiano flussi informativi (come ad esempio ordini o previsioni di vendita) e flussi di materiale fino alla consegna del pezzo finito al cliente finale⁷⁵. I problemi principali legati alla gestione delle catene di fornitura sono stati da sempre di massima importanza. Gli approcci tradizionali, senza dotazioni particolari di infrastrutture comunicative tra le aziende, portavano i singoli attori della filiera ad adottare, tra le altre, politiche di gestione di minimo costo, orizzonte di programmazione di breve periodo e una rendita commisurata ai rischi di gestione presi⁷⁶: tale orientamento risultava lontano dall'ottimizzazione globale della filiera e generava molteplici inefficienze in termini di costo e sforzi profusi. Attraverso la successiva introduzione dei metodi di Supply Chain Management, che affondano le proprie radici nei metodi di Just in Time (JIT) creato da Toyota⁷⁷, si è potuta migliorare la gestione dei rapporti tra le imprese (vedi A. F. Cutting-Decelle *et al.*⁷⁸). L'introduzione dei metodi di SCM ha consentito un maggior coordinamento complessivo delle catene di fornitura, ma ha tuttavia portato alla generazione di altre tipologie di complicazioni legate alla lunga e dispendiosa creazione di imponenti architetture software (come illustrato in Figura 5). Questi sistemi IT, inoltre, richiedono una notevole attività di rielaborazione umana dei dati, soprattutto nell'interfacciamento tra applicazioni software di genere diverso che, unita al basso livello di automazione dei processi e della raccolta dei dati (pre-Industria 4.0), porta anche i metodi di SCM ad essere lontani dall'ottimizzazione dei processi. Attraverso l'integrazione dei sistemi ICT (*Information and Communications Technology*) tra imprese appartenenti alla stessa catena del valore e grazie all'*Industrial IoT*, reso possibile attraverso l'introduzione di dispositivi *hi-tech* interconnessi nel processo produttivo, i prodotti e i livelli di scorte in magazzino sono noti a tutte le aziende connesse e possono essere generati benefici per le singole aziende e per l'intera filiera. Data una singola impresa in un punto qualsiasi della filiera, l'Integrazione Orizzontale supporta la capacità di condividere informazioni, e i benefici di questa operazione si manifestano sia in funzione

⁷⁴ Malte Brettel, Niklas Friederichsen, Michael Keller, Marius Rosenberg, 2014, op. cit., p. 39

⁷⁵ Anne-Francoise Cutting-Decelle, Bob. I. Young, Bishnu P. Das, Keith Case, Shahin Rahimifard, Chimay J. Anumba, Dino M. Bouchlaghem, 2007, "A Review of approaches to Supply Chain Communication: from manufacturing to construction", ITcon, Volume 12, gennaio 2007, p. 76

⁷⁶ Anne-Francoise Cutting-Decelle, Bob. I. Young, Bishnu P. Das, Keith Case, Shahin Rahimifard, Chimay J. Anumba, Dino M. Bouchlaghem, 2007, op. cit., p. 77

⁷⁷ Anne-Francoise Cutting-Decelle, Bob. I. Young, Bishnu P. Das, Keith Case, Shahin Rahimifard, Chimay J. Anumba, Dino M. Bouchlaghem, 2007, op. cit., p. 75

⁷⁸ Anne-Francoise Cutting-Decelle, Bob. I. Young, Bishnu P. Das, Keith Case, Shahin Rahimifard, Chimay J. Anumba, Dino M. Bouchlaghem, 2007, op. cit., p. 77

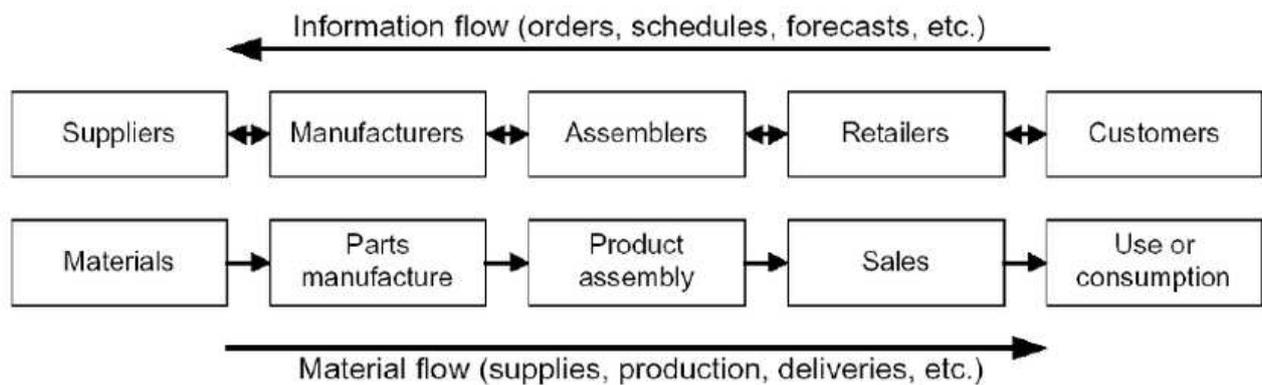


Figura 6: Generica catena di fornitura in un contesto produttivo (Vrijhoef et al., 1999)

di un'integrazione nei confronti dei propri fornitori, sia attraverso un'integrazione dei clienti (che possono essere anch'esse realtà *industrial* oppure consumatori privati, nel caso in cui l'impresa integrante sia l'ultima della filiera). I principali benefici di un'Integrazione Orizzontale dei clienti sono:

- la possibilità di offrire un *tracking* dettagliato e completamente automatizzato dell'avanzamento dell'ordine (e delle singole lavorazioni) al cliente interessato, in modo da snellire le procedure di *Customer Relationship* e i processi di gestione dei reclami⁷⁹;
- la comunicazione istantanea al cliente di eventuali problematiche riscontrate nel soddisfare un ordine affinché venga trovata una soluzione consensuale tra le parti⁸⁰ e la possibilità di gestire rapidamente eventuali modifiche in corso d'opera richieste dal committente e senza il bisogno di sopralluoghi dello stesso⁸¹;
- la possibilità di sviluppare nuovi modelli di business basati sui servizi al cliente, fornendo ad esempio, la possibilità di co-progettare e realizzare (con tecniche di produzione additiva) prodotti altamente personalizzabili⁸²;
- la possibilità di fornire molte più informazioni ingegneristiche sul prodotto e sulle lavorazioni subite (che vengono richieste più frequentemente dai clienti *industrial*);

⁷⁹ Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, op. cit., pp. 9-10

⁸⁰ Marina Crnjac, Ivica Veža, Nikola Banduka, 2017, "From Concept to the Introduction of Industry 4.0", International Journal of Industrial Engineering and Management (IJEM), Volume 8, No 1, 2 marzo 2017, p. 22

⁸¹ Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, op. cit., p. 9

⁸² Lucas Santos Dalenogare, Guilherme Brittes Benitez, Néstor Fabián Ayala, Alejandro Germán Frank, 2018, "The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance", International Journal of Production Economics, agosto 2018, p. 8

- l'opportunità di ridurre le tempistiche del ciclo produttivo⁸³, fornendo maggiore valore per il cliente.

L'Integrazione Orizzontale verso i propri fornitori offre invece la possibilità di:

-pianificare e organizzare gli ordini di merci con tempistiche e volumi più precisi⁸⁴ (poiché il livello di scorte in magazzino è noto in tempo reale al fornitore). In tale contesto è possibile implementare con successo politiche di gestione di magazzini quali VMI⁸⁵ (*Vendor Managed Inventory*), ovvero la gestione delle scorte di merci affidata al fornitore oppure sistemi di *auto-replenishment*;

-conoscere immediatamente eventuali indisponibilità di componenti o materie prime da parte dei fornitori e di cercare automaticamente attraverso la rete un altro fornitore in grado di sopperire alla richiesta⁸⁶. Si riduce dunque il rischio di dover fermare la produzione a causa della mancanza di componenti differenziando il portafoglio dei fornitori a disposizione;

- avere maggiori dati sui componenti utilizzati nel processo produttivo del committente⁸⁷. Questo aspetto, apparentemente positivo soltanto per i fornitori, genera in realtà un circolo virtuoso, poiché i maggiori dati disponibili sulla qualità dei prodotti venduti ai committenti porta i fornitori a ottimizzare il portafoglio prodotti mantenendo soltanto i componenti di maggiore qualità, che pervengono ai committenti stessi aumentando la qualità dei prodotti finiti.

L'integrazione di più imprese in queste "società virtuali", comporta quindi notevoli vantaggi per tutte le parti coinvolte. Per quanto concerne l'aspetto della gestione della qualità, i cambiamenti indotti da questo processo di collaborazione interaziendale potrebbero essere molteplici. La garanzia della qualità al cliente potrebbe essere aumentata offrendo il già menzionato servizio di tracking lungo il ciclo produttivo. Inoltre, grazie all'intelligenza artificiale dei macchinari, la ricerca e la selezione del personale più adatto ad effettuare interventi di manutenzione può essere effettuata dagli stessi macchinari attraverso portali di telepresenza centralizzati. Per contro, però, va ricordato che questa Integrazione Orizzontale mantiene le organizzazioni legalmente indipendenti: salvo legami contrattuali ben definiti, è quindi possibile che gli obiettivi di qualità prefissati dalle singole imprese differiscano tra loro e ciò può comportare delle divergenze sulla gestione della qualità interaziendale.

⁸³ Malte Brettel, Niklas Friederichsen, Michael Keller, Marius Rosenberg, 2014, op. cit., p. 39

⁸⁴ Marina Crnjac, Ivica Veža, Nikola Banduka, 2017, op. cit. p. 22

⁸⁵ Pwc, 2017, "Le opportunità Industry 4.0", www.pwc.com/it/it/services/consulting/assets/docs/opportunita.pdf, p. 6

⁸⁶ Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, op. cit., p. 9

⁸⁷ Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, op. cit., p. 9

Un ultimo risvolto socio-culturale potenzialmente da non trascurare per quanto riguarda l'Integrazione Orizzontale della catena del valore è descritto da Brettel *et al.*⁸⁸. Gli autori sostengono che l'assenza di fiducia tra le aziende, specialmente tra quelle di piccole e medie dimensioni (le cosiddette PMI), può costituire un ostacolo alla sinergia interaziendale, poiché queste non sono avvezze allo scambio di informazioni con organizzazioni che vedono soltanto come concorrenti. Un altro aspetto sottolineato dai ricercatori tedeschi è il rischio di fenomeni di apprendimento asimmetrico causato da comportamenti opportunistici tra aziende di ridotte dimensioni. Soprattutto a livello globale, punti di vista diversi nei confronti delle informazioni e della condivisione dei costi possono generare ingenti costi di coordinamento, determinando la conclusione di molte cooperazioni. Gli aspetti sopracitati potrebbero costituire quindi una limitazione quantomeno temporanea alla diffusione dell'Industria 4.0 e dell'Integrazione Orizzontale e costituire un'ulteriore causa di divario tecnologico tra grandi imprese e multinazionali (generalmente più propense a valutare obiettivamente le opportunità generate dall'adozione di una nuova tecnologia) e le piccole e medie imprese.

2.3 Integrazione digitale end-to-end dell'Engineering

Per ottenere i benefici derivanti dall'Integrazione Orizzontale e Verticale, è necessario un processo di digitalizzazione dei processi di Engineering e di modellazione e design di processo, in modo da poter garantire una gestione semplificata di un apparato di per sé molto complesso. L'integrazione dei cosiddetti CPPS lungo tutta la catena del valore e all'interno delle stesse organizzazioni che ne fanno parte costituisce un aspetto fondamentale per poter sfruttare pienamente le potenzialità della Quarta Rivoluzione Industriale. Attraverso le interconnessioni informative fra aziende appartenenti alla stessa *value chain* e dei processi che vi avvengono internamente, è possibile sfruttare l'enorme e variegata quantità di dati generati in modo da efficientare i processi produttivi e migliorarne i prodotti derivanti. Jain, Chandrasekaran e Erol⁸⁹ descrivono una possibile struttura di integrazione completa dei sistemi aziendali (Figura 7). Elementi che sono coinvolti nel processo di integrazione del modello proposto e che fanno parte del ciclo di sviluppo del sistema proposto sono la gestione dei requisiti, il

⁸⁸ Malte Brettel, Niklas Friederichsen, Michael Keller, Marius Rosenberg, 2014, *op. cit.*, p. 39

⁸⁹ Rashmi Jain, Anithashree Chandrasekaran, Ozgur Erol, 2010, "A framework for end-to-end approach to Systems Integration", *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, Volume 5, No. 1, pp. 84-104

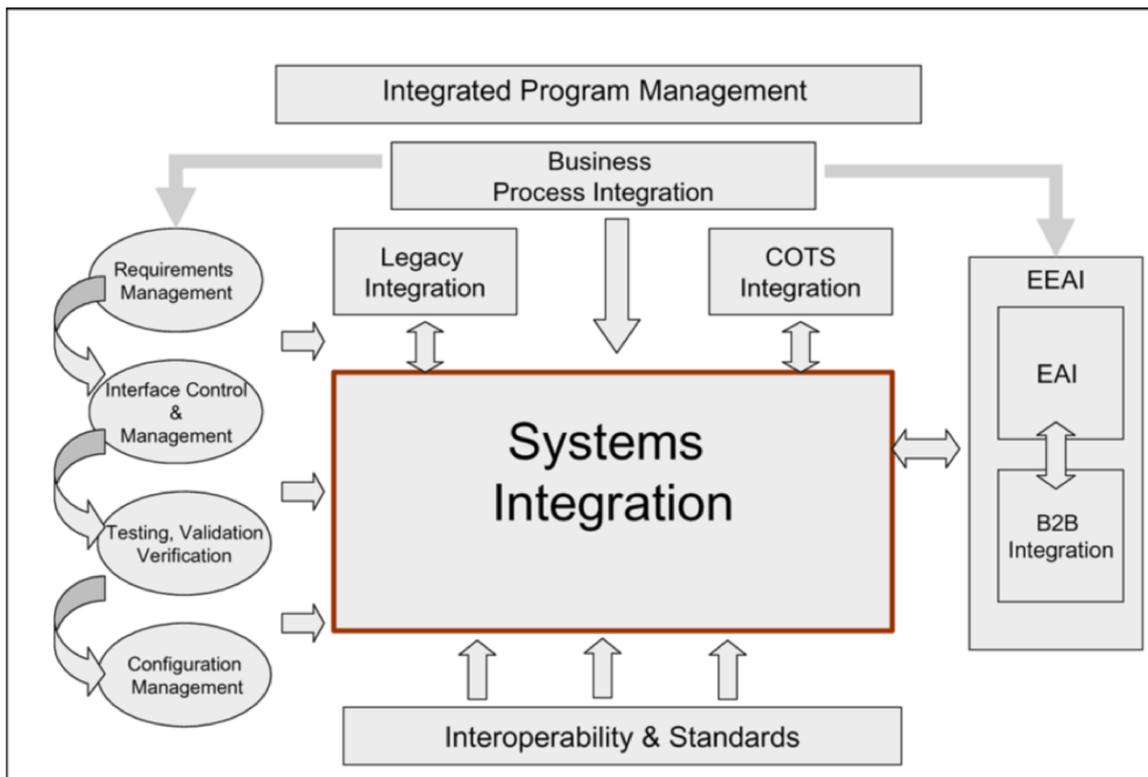


Figura 7: Struttura di integrazione dei sistemi aziendali proposta da Jain

controllo e la gestione dell'interfaccia, le procedure di test, verifica e valutazione e la gestione delle configurazioni. Altri elementi che devono essere integrati nel sistema sono i sistemi *legacy* e i COTS (*Commercial Off The Shelf*), che richiedono notevoli sforzi per garantire la compatibilità delle interfacce preesistenti in uso. Infine, gli ultimi elementi ad essere integrati sono i processi di business (BPI) e i dati a livello di singola applicazione (*Enterprise Application Integration*, EAI). Questi ultimi sistemi sono relativi ai processi interni all'azienda, ma in un contesto di impresa "estesa" (*Extended*) che comprende anche le relazioni che avvengono tra diversi livelli aziendali e con gli altri attori della filiera, il processo di integrazione prende il nome di EEAI. Questi elementi, a loro volta suddivisi in quattro categorie⁹⁰ a seconda della mansione a cui sono adibiti, sono:

- l'integrazione dei sistemi IT nel contesto aziendale al fine di migliorare l'efficienza e soddisfare le esigenze di elaborazione dei dati in tempo reale (non in Figura 7);
- l'integrazione di sistemi *legacy* connessi alla rete per consentire ai clienti di accedere a prodotti, servizi e informazioni (non in Figura 7);

⁹⁰ Rashmi Jain, Anithashree Chandrasekaran, Ozgur Erol, 2010, op. cit., p. 97

-l'integrazione *business-to-customer* (B2C) dei sistemi IT di *back-end* con applicazioni *front-end* basate su siti internet per interagire con il cliente privato (non in Figura 7);

-l'integrazione *business-to-Business* (B2B) dei sistemi IT tra diverse organizzazioni per la gestione comune della *supply chain*. Per una trattazione più approfondita del sistema di integrazione end-to-end descritto, si rimanda il lettore al testo di Jain, Chandrasekaran e Erol⁹¹.

Come accennato in precedenza, la presenza di standard di comunicazione e di scambio di dati che rendono possibile il dialogo tra reparti e impianti anche molto differenti è di primaria importanza. In merito allo scambio di dati che avviene tra le diverse divisioni aziendali e tra le diverse imprese va detto però che è necessario un sistema per garantire che tali fonti informative siano trasparenti, non manipolabili e accessibili soltanto dagli agenti umani o robotici prestabiliti. Per queste ragioni l'Integrazione *end to end* necessita di tecnologie come la *blockchain* per essere effettuata con successo. Con questo termine si intende, in ambito produttivo, la creazione di un database condiviso tra un numero chiuso di imprese che contiene una traccia permanente delle operazioni consecutive svolte (i "blocchi" da cui prende il nome) e caratterizzato dal fatto che tali informazioni non siano alterabili senza il consenso di tutte le parti coinvolte⁹². Un caso di studio concernente l'applicazione della *blockchain* in ambito industriale è proposto da Angrisha *et al.*⁹³.

Sinteticamente, i principali benefici generati da un processo di Integrazione *end to end* sono:

- la diffusione di informazioni a tutti i livelli aziendali caratterizzate da accessibilità, trasparenza, tempestività e granularità⁹⁴;
- la possibilità di rendere più attuabile la produzione di lotti unitari o *mass customization* per soddisfare le esigenze specifiche dei singoli clienti⁹⁵;
- l'utilizzo dei dati della filiera produttiva per ridurre i costi della progettazione, dell'ingegnerizzazione di nuovi prodotti e della gestione di famiglie di prodotti sviluppate contemporaneamente;

⁹¹ Rashmi Jain, Anithashree Chandrasekaran, Ozgur Erol, 2010, op. cit., pp. 84-104

⁹² Atin Angrisha, Benjamin Cravera, Mahmud Hasana, Binil Starlya, 2018, "A Case Study for Blockchain in Manufacturing: "FabRec": A Prototype for Peer-to-Peer Network of Manufacturing Nodes", Elsevier, NAMRC 46, Texas, USA, p. 4

⁹³ Atin Angrisha, Benjamin Cravera, Mahmud Hasana, Binil Starlya, 2018, op. cit., pp. 1-13

⁹⁴ Rashmi Jain, Anithashree Chandrasekaran, Ozgur Erol, 2010, op. cit., p. 96

⁹⁵ Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, op. cit., p. 14

- la possibilità di ridurre il *time to market* dei nuovi prodotti se gli ingegneri e gli sviluppatori possono utilizzare modelli digitali completi e simulazioni del processo di produzione per prevedere risultati ed effetti dei loro progetti di sviluppo prodotto⁹⁶;
- l'opportunità di effettuare una serie di operazioni senza la necessità di addetti in linea di produzione, quali ad esempio la diagnostica e la manutenzione da remoto.

Anche dal punto di vista della gestione della qualità l'Integrazione *end to end* dell'*Engineering* costituisce un'importante novità. Attraverso l'integrazione di informazioni provenienti da tutti i reparti aziendali e dagli altri attori della *value chain* è possibile sviluppare sistemi per il controllo e la garanzia di qualità che siano inquadrati all'interno di sistemi di gestione aziendali quali ERP, MES (*Manufacturing Execution System*) e PLM (*Product Lifecycle Management*)⁹⁷. Un ulteriore aspetto di notevole rilevanza è che attraverso questa integrazione informativa bidirezionale è possibile sviluppare nuovi metodi virtuali di gestione della qualità che prendono appunto il nome di *Virtual Quality Management (VQM)*.

2.4 Virtual Quality Management (VQM)

Il *Virtual Quality Management* è definito in letteratura come un insieme di “approcci coordinati alla modellizzazione, all'adattamento, all'utilizzo e all'analisi efficienti di studi di simulazione per la generazione di conoscenze resilienti e tecniche di dimensionamento della qualità per prodotti e processi durante la fase di pianificazione”⁹⁸. La necessità di sviluppare questo genere di metodi nasce dalle difficoltà e dalle inefficienze generate dalle tradizionali tecniche di gestione della qualità. Queste, infatti, vengono solitamente implementate al termine del processo di progettazione o addirittura nelle prime fasi della produzione, causando notevoli ritardi e elevati costi di

⁹⁶ Lucas Santos Dalenogare, Guilherme Brittes Benitez, Néstor Fabián Ayala, Alejandro Germán Frank, 2018, p. 21

⁹⁷ Malte Brettel, Niklas Friederichsen, Michael Keller, Marius Rosenberg, 2014, op. cit., p. 40

⁹⁸ Martin Bookjans, Albert Weckenmann, 2010, “Virtual Quality Management - Validation of measurement systems by the use of simulation technologies”, *Physics Procedia*, Vol. 5, Elsevier, p. 746

riprogettazione nel caso in cui fossero riscontrate irregolarità⁹⁹. Tali presupposti, uniti alla possibilità offerta dai sistemi cyber-fisici di raccolta di una consistente quantità di dati e parametri di processo e alle sofisticate apparecchiature per la rielaborazione delle informazioni raccolte, rendono realizzabili i sistemi di gestione della qualità virtuale per la fase di progettazione di prodotto¹⁰⁰. Gli elementi costituenti un sistema di gestione della qualità virtuale proposto da Bookjans e Weckenmann¹⁰¹ sono illustrati in Figura 8. Le informazioni che vengono utilizzate in input da questo sistema sono di due tipologie. Una prima categoria di dati necessari è inerente al processo e al prodotto ideali ed è utilizzata come base di progettazione del modello ideale. Per ottenere un modello realistico è necessario tenere traccia anche di una seconda tipologia di informazioni, ovvero imperfezioni del processo e influenze ambientali che prendono il nome di conoscenza di Qualità. L'unione di queste varietà di dati consente di generare i cosiddetti “modelli di processo orientati alla qualità” (*Quality Orientated Process Models*). Tali modelli si avvalgono di moduli in grado di realizzare studi di capacità di processo e di simulare i cicli di controllo della qualità; per ottenere l'ottimizzazione di questi ultimi è pratica comune nel VQM l'utilizzo di metodi euristici quali gli algoritmi genetici, che consentono di ottenere una soluzione ottima (che potrebbe essere soltanto locale) ricombinando iterativamente la soluzione ideale di partenza includendo elementi di perturbazione reali. Tali modelli di processo orientati alla qualità possono essere utilizzati per due scopi diversi durante la fase di progettazione di prodotto:

- 1) può essere testato e ottimizzato virtualmente il processo produttivo sfruttando la notevole velocità offerta da questo metodo e senza ritardare l'avvio della produzione. Le tempistiche per lo svolgimento di un test virtuale sono di alcuni ordini di grandezza inferiori rispetto ai test tradizionali e le capacità computazionali delle apparecchiature utilizzate consentono inoltre di gestire un campione di scenari di processo nettamente più numeroso, fornendo risultati più immediati e più accurati e robusti da un punto di vista statistico;
- 2) è possibile testare e ottimizzare le tecniche di gestione della qualità prima dell'impostazione del processo produttivo. Il beneficio di questo utilizzo è dato dalla possibilità di poter

⁹⁹ Martin Bookjans, Albert Weckenmann, 2010, op. cit., p. 745

¹⁰⁰ Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, op. cit., pp. 11-12

¹⁰¹ Martin Bookjans, Albert Weckenmann, 2010, op. cit., pp. 746-747

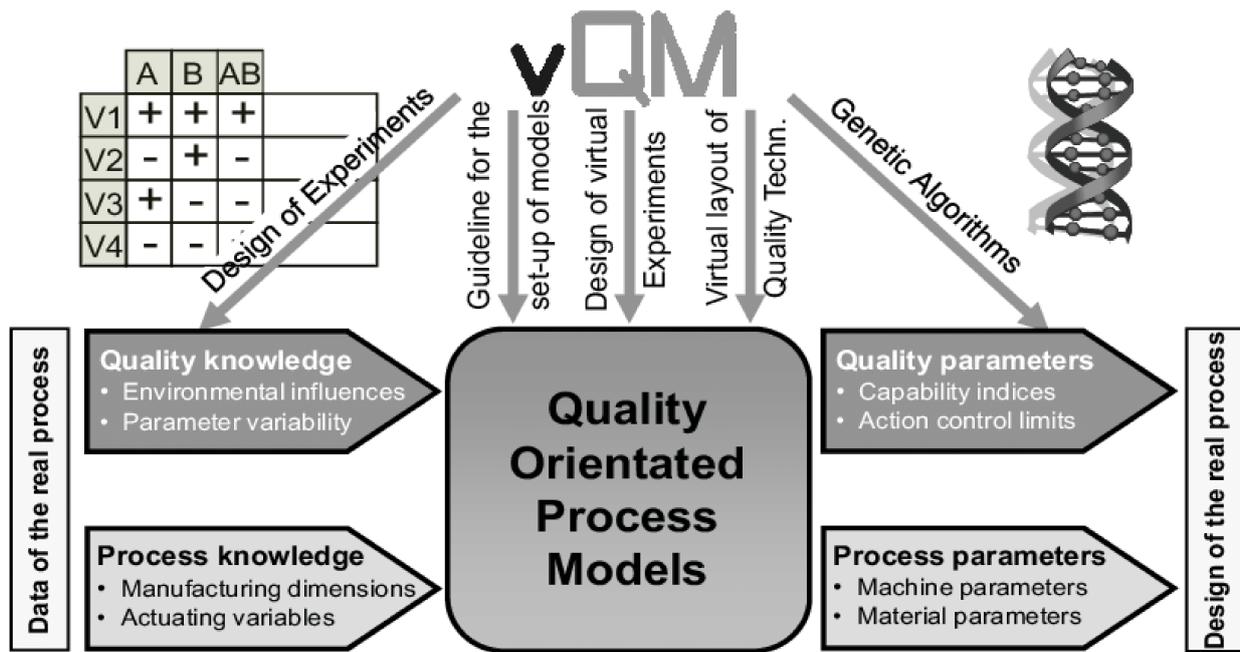


Figura 8: Elementi del Virtual Quality Management secondo M. Bookjans e A. Weckenmann

effettuare prognosi su prodotto, processo e sistemi di misurazione e rilevamento e di evidenziare eventuali fragilità del sistema ideato in una fase embrionale della progettazione in cui i costi di rettifica sono relativamente contenuti.

Un ulteriore punto a favore delle tecniche di simulazione è costituito dalla possibilità di configurare, testare e perfezionare i cicli del controllo qualità in un ambiente virtuale prima di effettuarne il setup nel contesto reale di produzione. Attraverso questa fase preliminare viene consentito un notevole risparmio di tempo e la produzione può essere avviata senza considerevoli ritardi. Le potenzialità della gestione della qualità virtuale risultano amplificate nel contesto dell'Industria 4.0. Oltre alla già menzionata semplicità e velocità di raccolta dati che consente di avvicinare i reparti produttivi e i macchinari in essi presenti alle fasi ad esse precedenti, il VQM risulta una valida alternativa anche per riuscire a soddisfare le richieste specifiche del consumatore finale. Come esemplificato da uno studio effettuato dal prof. S. Bodi *et al.*¹⁰² dell'Università Tecnica di Cluj-Napoca, è possibile utilizzare sinergicamente questa innovativa tecnica di gestione della qualità con le tradizionali tecniche di supporto dei processi decisionali e approcci consolidati nei sistemi di gestione della qualità. Inoltre, con l'Integrazione bidirezionale dei sistemi ICT (verso fornitori e clienti) e con l'elevata semplicità di scambio di informazioni che avviene tra i vari attori della catena

¹⁰² Stefan Bodi, Sorin Popescu, Calin Drageanu, Dorin Popescu, 2015, "Virtual Quality Management elements in optimized new product development using genetic algorithms", TIIM & makelearn Joint International Scientific Conference, Bari, 27-29 maggio 2015, pp. 633-642

del valore, è ipotizzabile una crescente agevolezza nel reperimento dei desideri degli utilizzatori finali attraverso i nuovi canali di comunicazione. I feedback dei consumatori sulle migliorie da apportare ai prodotti esistenti o sulle esigenze ancora insoddisfatte potrebbero essere raccolti tramite applicazioni di *smartphone* e altri dispositivi *smart* creati dalle imprese oppure attraverso canali quali social network e social media.

La metodologia proposta dagli studiosi dell'università romena (Figura 9) si articola in tre punti¹⁰³:

1) come primo passo è necessaria l'acquisizione delle preferenze e dei desideri dei clienti, attraverso metodi quali questionari, sondaggi online o VOCT (*Voice of the Customer Table*), proposti a potenziali consumatori del bene in questione. Successivamente è necessaria un'attività di raffinamento delle informazioni raccolte attraverso sessioni di brainstorming in cui vengono coinvolti anche alcuni rappresentanti del team di sviluppo prodotto. L'output di questa attività è un elenco di requisiti di prodotto che devono in seguito essere prioritizzati attraverso tecniche di supporto strutturate tra cui il più utilizzato è il metodo multicriterio AHP (*Analytical Hierarchy Process*);

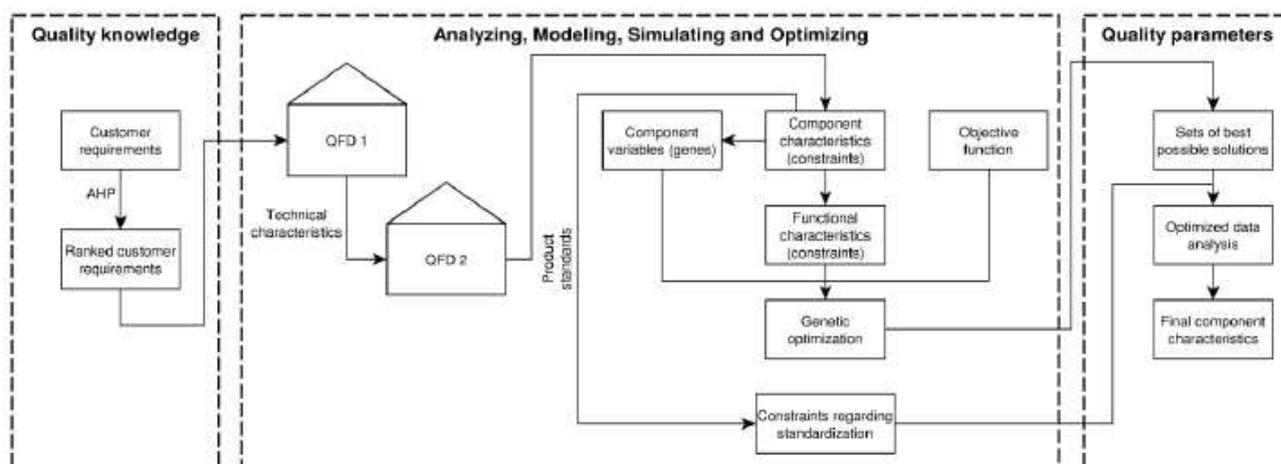


Figura 9: Struttura proposta per lo sviluppo del prodotto ottimizzato (S. Bodi et al.)

2) il secondo step del metodo proposto, che ha come input la classificazione delle richieste dei clienti, ha l'obiettivo di fornire le caratteristiche del prodotto tramite l'utilizzo del Quality Function Deployment (QFD). La metodologia consiste in due matrici in sequenza, in cui la prima mette in relazione le esigenze degli utenti e gli attributi tecnici, mentre la seconda utilizza le specifiche di prodotto e i componenti. Nella struttura proposta dagli autori vengono deliberatamente tralasciate le

¹⁰³ Stefan Bodi, Sorin Popescu, Calin Drageanu, Dorin Popescu, 2015, op. cit., pp. 634-637

ultime due fasi del metodo del QFD (ovvero la pianificazione e il controllo del processo) per avere una maggiore focalizzazione sull'antecedente sviluppo del prodotto;

3) il terzo ed ultimo passo del modello proposto ha come finalità quella di ottimizzare le componenti che costituiscono il prodotto. Una precondizione al processo di ottimizzazione è l'impostazione della funzione obiettivo, che comprende tutte le caratteristiche trovate al punto 2. La soluzione ottima viene raggiunta attraverso l'implementazione iterativa degli algoritmi genetici, che sono euristiche basate sull'evoluzione biologica. Tali algoritmi si basano sui tre principi di selezione, ricombinazione, e mutazione che si basano rispettivamente sulla possibilità di sopravvivenza di tutti gli "individui" nelle generazioni future (anche i peggiori), sulla possibilità di ricombinare casualmente i parametri nella creazione di nuovi "individui" e sulla modifica spontanea dei parametri all'interno dei limiti di specifica al fine di non individuare una soluzione di ottimo soltanto locale¹⁰⁴. I valori (individui) associati ad ogni caratteristica del prodotto vengono ritenuti adatti ogniqualvolta che vengono rispettati i vincoli stabiliti. Il processo di ottimizzazione termina quando, andando a sostituire i valori generati nella funzione obiettivo, si riscontrano i valori di minimo (o di massimo a seconda dell'impostazione della funzione) globali.

Per la trattazione di un caso di studio esemplificativo basato sul modello illustrato, si rimanda il lettore interessato al testo originale¹⁰⁵. In conclusione, l'utilizzo di metodi di gestione della qualità virtuale consentono di contenere i costi e i tempi di progettazione di prodotto ma di ottenere contemporaneamente anche miglioramenti di processo e l'integrazione di cicli di controlli di qualità nettamente più precisi. Queste motivazioni fanno del *Virtual Quality Management* un tassello di grande prospettiva nell'ottica dell'Industria 4.0.

¹⁰⁴ Martin Bookjans, Albert Weckenmann, 2014, *Virtual Quality Management: simulative evaluation of Quality Control Charts by use of Quality Orientated Process Models*, p. 8

¹⁰⁵ Stefan Bodi, Sorin Popescu, Calin Drageanu, Dorin Popescu, 2015, op. cit., pp. 637-641

Evoluzione dei controlli di qualità futuri nelle diverse tipologie di filiere

La Quarta Rivoluzione Industriale porta con sé dei profondi cambiamenti nei processi produttivi grazie all'introduzione di avveniristici metodi di produzione e tecnologie ad alto tasso di automazione. L'introduzione di robot e *cobot* (ovvero *collaborative robot*, robot collaborativi) dotati di una sempre maggiore capacità di movimento e in grado di svolgere un numero crescente di mansioni in modalità autonoma o semiautonoma (nel caso dei *cobot*) consente di aumentare la produttività degli impianti e di ridurre l'impatto dei costi del personale diretto sui prodotti. In aggiunta, l'innovazione delle tecniche di comunicazione e connessione informatica portate da Industria 4.0 permette una capacità di monitoraggio e controllo dei processi e dei suoi output senza precedenti. L'interconnessione di macchinari, sensori, prodotti e operatori consente dunque un ammodernamento e un'espansione del processo di gestione della qualità all'interno delle aziende: a differenza del passato in cui le quattro fasi descritte in precedenza (Capitolo 2) erano sequenziali ma ben distinte nel tempo, nell'Industria 4.0 esse sono attuate contemporaneamente durante il processo produttivo. Tale spostamento temporale del processo di gestione della qualità consente di conoscere in tempo reale la conformità delle produzioni in corso e di monitorare le condizioni delle strumentazioni utilizzate nel processo produttivo, prevenendo i malfunzionamenti e contraendo le tempistiche della risoluzione dei problemi riscontrati.

In questa sezione dell'elaborato vengono prese in esame alcune tra le principali tipologie di processi produttivi attualmente applicate nel contesto manifatturiero che si contraddistinguono tra loro per tempistiche, frequenze e modalità con cui sono effettuati i controlli di prodotto e di processo. In merito a tali processi, in seguito ad una descrizione delle peculiarità che li caratterizzano, vengono tracciati alcuni possibili scenari di come potrebbero evolvere i controlli di qualità a seguito dell'avvento dell'Industria 4.0.

3.1 Produzione per reparti – *job shop*

Il *job shop* è un processo produttivo ideato per realizzare commesse e lavorazioni su misura. Come descritto dai proff. Roberto Cafferata e Corradi Gatti¹⁰⁶, le sequenze di lavorazioni in questo tipo di processi possono essere diverse e i macchinari sono pensati per poter svolgere operazioni eterogenee. In genere il layout degli impianti di produzione organizzati per la realizzazione di ordini è caratterizzato dall'accorpamento di macchinari adibiti allo svolgimento di una determinata lavorazione in un unico reparto (chiuso o semplicemente delimitato da apposita segnaletica orizzontale): si hanno ad esempio i reparti di tornitura, rettificatura e assemblaggio (come illustrato in Figura 10). Generalmente l'organizzazione del personale impiegato in questo genere di processi produttivi segue quella dei macchinari e gli operatori sono dunque associati e specializzati per comparto. Altri aspetti caratteristici evidenziati da Cafferata e Gatti¹⁰⁷ per il *job shop* sono l'approvvigionamento di materie prime secondo una logica *just in time* (ovvero soltanto al momento dell'acquisizione di una commessa) e un consistente traffico informativo tra il management e gli addetti alla produzione per riuscire a garantire il soddisfacimento delle richieste del committente. Un ultimo elemento distintivo della produzione per reparti è quello di rendere possibile il processamento di più ordini simultaneamente in modo da aumentare il tasso di utilizzo dei macchinari¹⁰⁸; tuttavia la programmazione e l'esecuzione di più commesse che hanno in genere cicli di lavorazione differenti risulta complessa e può generare inefficienze quali code e colli di bottiglia che possono allungare le tempistiche e congestionare l'intera produzione. Il punto di forza principale di questo tipo di processi produttivi risulta essere l'elevata flessibilità degli impianti utilizzati, che possono produrre un'infinità di prodotti customizzati; per contro, però, l'utilizzo di macchinari non specifici per singoli prodotti e la necessità di setup dei macchinari per ogni nuovo prodotto lavorato portano il *job shop* ad avere mediamente un costo unitario di produzione più elevato rispetto ai processi di produzione continui. I processi produttivi organizzati per reparti hanno, come detto, obiettivo di realizzare commesse con specifiche di prodotto nella maggior parte dei casi uniche e, a tal fine, è necessario realizzare controlli

¹⁰⁶ Roberto Cafferata, Corrado Gatti (a cura di), 2003, "Casi di Economia e Gestione delle Imprese", Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", Dipartimento di Studi sull'Impresa, p. 15

¹⁰⁷ Roberto Cafferata, Corrado Gatti, op. cit., p. 15

¹⁰⁸ James E. Ashton, Frank X. Cook, Jr., 1989, "Time to Reform Job Shop Manufacturing, Harvard Business Review, marzo-aprile 1989,

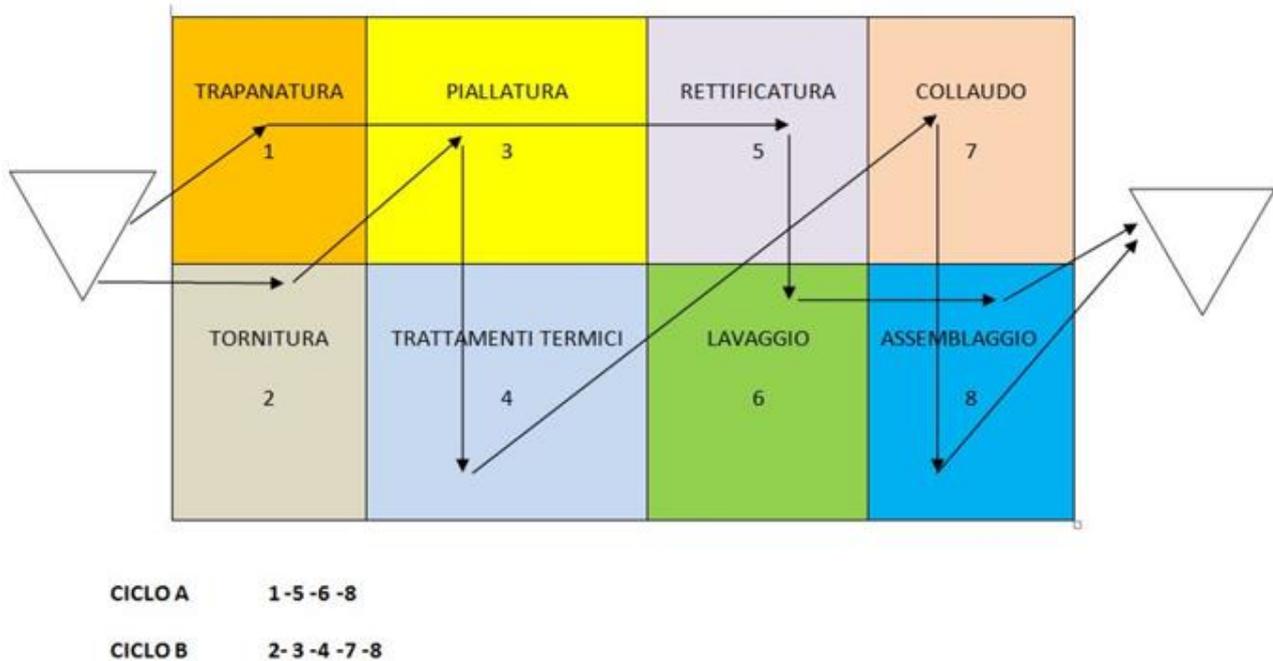


Figura 10: Layout di un impianto produttivo organizzato a Job Shop

di qualità e di conformità ad hoc per gli output del processo. Inoltre, è indispensabile che a dover essere controllato non sia soltanto il pezzo finito al termine del processo, ma anche i semilavorati in uscita dai singoli reparti poiché risulterebbe un dispendio di tempo e risorse inutile (e anche controproducente) il completamento di un prodotto che risulta già difettoso in una fase intermedia del processo. Tradizionalmente, però, la realizzazione dei controlli *in process* dei semilavorati in processi a *job shop* risulta scarsamente reattiva. In genere l'ispezione di ogni pezzo lavorato è difficilmente applicabile a causa degli elevati costi che tale scelta operativa comporterebbe; ad essere scelta, invece, è solitamente una ispezione periodica a cadenza regolare oppure, in alcuni casi particolari, viene estratto un campione per ogni ordine processato. Tale operazione si articola in 3 fasi:

- 1) prelievo del campione,
- 2) ispezione delle caratteristiche di interesse dell'esemplare esaminato. In genere ad essere controllate sono le tolleranze dimensionali, geometriche e la finitura superficiale del pezzo¹⁰⁹;
- 3) restituzione dell'esito al reparto interessato.

¹⁰⁹ S. S. Pande, "Inspection and Quality Control", Mechanical Engineering Department Indian Institute of Technology, Bombay, p. 24

La durata di questo processo può variare in funzione della complessità del pezzo interessato e del conseguente numero di test da svolgere, ma solitamente il feedback non è generato in tempistiche brevi. Ciò comporta che, nel caso di riscontro di pezzi non conformi alle specifiche, sia necessaria una ulteriore analisi per il rintraccio delle cause scatenanti e in caso di errori sistematici della lavorazione (come ad esempio guasti del macchinario o utensili eccessivamente usurati) non rilevati dagli operatori del reparto vi è il rischio di dover ispezionare e rifiutare o (se possibile) rilavorare la totalità o una parte dei pezzi creati sul macchinario interessato a partire dall'ultimo controllo conforme.

Il *job shop* risulta quindi essere una valida alternativa per l'espletamento di commesse di prodotti customizzati grazie all'elevata flessibilità degli impianti organizzati secondo questa logica di processo; tuttavia, come descritto in precedenza, la programmazione e il processamento delle lavorazioni risulta di difficile attuazione a causa della natura non deterministica delle richieste di questi ordini¹¹⁰. Ad apportare miglioramenti sostanziali alla programmazione dei processi produttivi potrebbero essere le innovazioni della Quarta Rivoluzione Industriale, come afferma anche Brian Hoey: "Industry 4.0 getta le basi per processi più aperti, trasparenti e adattabili su tutti i punti di contatto della catena del valore, compresi processi come la pianificazione degli ordini di lavoro che sono stati tradizionalmente resistenti"¹¹¹. Lo stesso Hoey aggiunge in merito al *job shop* che "questo livello di digitalizzazione consente di formare soluzioni software complesse su una determinata sfida di pianificazione al fine di creare piani di produzione ottimali [...] in modo più rapido ed efficace di quanto sarebbe ragionevolmente possibile attraverso la pianificazione manuale del flusso di lavoro"¹¹². I cosiddetti sistemi cyberfisici offrono dunque la possibilità di conoscere in tempo reale lo stato degli ordini processati e le lavorazioni necessarie per il completamento degli stessi e hanno la facoltà attraverso applicativi software di suggerire la schedulazione dei processi in atto in modo da ottimizzare l'utilizzo dei macchinari a disposizione anche in caso di imprevisti. L'interconnessione aziendale portata dalla Quarta Rivoluzione Industriale non modifica soltanto le modalità di pianificazione del lavoro: attraverso una gestione più diretta delle relazioni i clienti (o *Customer Relationship Management*) garantita dalle moderne ICT, è possibile una maggiore qualità del flusso informativo per arrivare a comprendere le specifiche di prodotto e modificare (se necessario) più agevolmente gli ordini in corso d'opera rispetto al passato. Altra fase focale del processo *job shop*

¹¹⁰ James E. Ashton, Frank X. Cook, Jr., 1989, op. cit.

¹¹¹ Brian Hoey, "The Marriage of Industry 4.0 and Job Shop Scheduling", www.blog.flexis.com, 28 agosto 2018

¹¹² Brian Hoey, op. cit.

che risulta notevolmente accelerato e semplificata è la progettazione attraverso tecniche CAD (*Computer Aided Design*) e CAM (*Computer Aided Manufacturing*)¹¹³. Le prime sono in realtà in uso già da alcuni decenni nel contesto industriale, ma con l'Industria 4.0 esse si sono affinate in modo da poter utilizzare al meglio le informazioni di processo (come ad esempio i vincoli tecnici) e di prodotto (ad esempio i materiali impiegabili) disponibili e soprattutto di poter realizzare disegni in 3D osservabili anche attraverso supporti quali ad esempio visori di realtà virtuale. I CAM, invece, costituiscono una svolta per quanto il concerne il passaggio dal design alla realizzazione del prodotto: essi consentono di convertire i disegni realizzati a CAD in percorsi utensile, ovvero istruzioni interpretabili dal controller della macchina. Questi software trasformano i disegni fatti a CAD in valori numerici, che la macchina legge come coordinate di un grafico. Le coordinate sono decifrate dalla macchina CNC (*computer numerical control*) che le trasforma in movimenti reali che consentono lo spostamento guidato dell'utensile e la lavorazione del pezzo¹¹⁴. L'efficacia di questi metodi CAM va dunque di pari passo con l'adozione all'interno dei reparti di macchinari utensili a controllo numerico, la cui peculiarità è quella di eseguire le lavorazioni secondo i dettami del dispositivo elettronico integrato. Attraverso le interconnessioni aziendali che formano l'*Industrial Internet of Things* è possibile inoltre la trasmissione delle informazioni relative ai percorsi utensile direttamente ai macchinari, riducendo drasticamente i tempi di setup e la possibilità di errori umani nella programmazione dei macchinari. Nelle officine in cui l'introduzione di macchinari a controllo numerico non è possibile o dove le lavorazioni effettuate necessitano ancora delle abilità manuali per essere completate, l'Industria 4.0 offre comunque nuovi metodi di supporto. Bracci robotici e "cobot" (l'unione delle parole "collaborative" e "robot") costituiscono un valido ausilio per l'espletamento di compiti gravosi o ripetitivi. I *cobot* hanno i notevoli vantaggi di poter essere utilizzati a stretto contatto con gli operatori umani senza bisogno di gabbie o protezioni di sicurezza (come accade invece per i robot industriali)¹¹⁵ e di essere facilmente programmabili e integrabili nel sistema¹¹⁶: questi elementi corrispondono alle esigenze dei reparti del job shop. Un esempio di adozione di *cobot* da parte di un grande fornitore di motori industriali è descritto dai proff. M. e U. Wilkesmann dell'Università Tecnica di Dortmund¹¹⁷, che espongono il successo generato dall'introduzione di

¹¹³ Hypertherm, 2018, "Famiglia di software CAD/CAM - Applicazione schema di taglio, layout tubi e lamiera", p.5

¹¹⁴ Nicolò Grammatico, "Macchine CNC: Cosa sono e come funzionano", www.ronchinimassimo.com, 1° giugno 2017

¹¹⁵ David Greenfield, "Choosing Between Cobots and Industrial Robots", www.automationworld.com, 10 agosto 2017

¹¹⁶ Stefano Maggi, 2017, "Che futuro per il binomio automazione e robotica?", *Automazione Oggi*, giugno-luglio 2017, p. 17

¹¹⁷ Maximiliane Wilkesmann, Uwe Wilkesmann, 2018, "Industry 4.0 – organizing routines or innovations?", *VINE Journal of Information and Knowledge Management Systems*, Vol. 48 Issue: 2, p. 247

questa tipologia di robot a fianco degli operatori nel processo di assemblaggio senza la necessità di gabbie o recinzioni di protezione. L'introduzione delle tecnologie dell'Industria 4.0 risulta quindi essere utile per il miglioramento di una molteplicità di processi che hanno luogo nelle aziende che adottano una logica a *job shop*. Tra queste procedure è anche inclusa la verifica della conformità dei prodotti e dei processi al fine di garantire la qualità delle lavorazioni effettuate. Come accennato in precedenza, i controlli di prodotto e di processo negli impianti produttivi organizzati per reparti presentano alcune lacune per la natura stessa dell'organizzazione degli impianti; tuttavia la prospettiva creata dall'introduzione di macchinari automatizzati, interconnessioni informatiche aziendali, sensori 4.0, strumenti di diagnosi remota e di controllo in tempo reale¹¹⁸ per l'ispezione dei prodotti consentono di aumentare l'efficacia e la rapidità di esecuzione di questi aspetti, migliorando di conseguenza l'intero ciclo produttivo. Innanzitutto, i cambiamenti portati dall'Industria 4.0 nell'ambito del processo di gestione della qualità si articolano in direzione di tutti i principali aspetti che devono essere posti sotto controllo nelle imprese manifatturiere. Una sintesi delle novità introdotte e un confronto con le procedure tradizionali è possibile attraverso la Tabella 7. I primi elementi ad essere ispezionati in ordine temporale sono le materie prime che si ricevono in input generalmente da uno o più fornitori per l'esecuzione della commessa. Per il *job shop*, in cui in genere le richieste dei committenti sono disparate sia in termini di prodotti, sia in termini di materiali utilizzati, gli acquisti di materiale, come accennato in precedenza, vengono effettuati solitamente soltanto al momento della ricezione di un ordine ed essi hanno quindi generalmente una numerosità ridotta. Le procedure tradizionali impongono in genere un controllo di accettazione al momento della consegna della merce ordinata, per verificare la qualità del materiale ordinato in caso di materie prime e la corrispondenza rispetto al materiale desiderato in caso di acquisto di semilavorati o componenti prodotti altrove in caso di strumentazione interna non adatta allo svolgimento di determinate operazioni. Generalmente questa tipologia di ispezione è effettuata sulla totalità del lotto in input se esso è di entità ridotta, mentre a causa di ristrettezze temporali o in caso di elevato costo di ispezione¹¹⁹ in caso di numerosità più elevata esso viene effettuato tramite piani di campionamento semplici o multipli a discrezione delle scelte manageriali aziendali.

¹¹⁸ László Monostori, 2014, "Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges", 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Elsevier, p.10

¹¹⁹ Elisabete Carolino, Isabel Barão, 2013, "Robust methods in Acceptance Sampling", REVSTAT – Statistical Journal Volume 11, Num. 1, marzo 2013, p. 69

Tabella 7: Principali ispezioni nei processi organizzati a job shop prima e dopo l'introduzione di Industria 4.0

Oggetto dell'ispezione	Procedure abituali	Industria 4.0
Materie prime	Ispezione effettuata a campione dall'addetto del reparto qualità per ogni lotto di materiale in ingresso	Non necessaria se fornitori fanno parte del network aziendale (Integrazione Orizzontale); a campione se necessaria
Semilavorati	Ispezione effettuata a campione dall'addetto del reparto qualità per ogni commessa oppure a intervalli di tempo regolari nel reparto; poco efficiente e feedback lento	Ispezione automatizzata di tutte le unità tramite sensori montati su bracci robotici/cobot all'interno dei reparti; ispezione di altro genere effettuate a campione dall'operatore
Prodotto	Ispezione attuata dall'addetto del reparto qualità su tutte le unità della commessa se essa è di numerosità ridotta, campionaria se numerosità elevata	Ispezione totale automatizzata attraverso macchine di ispezione con tomografia industriale computerizzata/raggi x
Processo	Controllo manuale periodico del deterioramento degli utensili (ad es. ad ogni cambio turno) e degli altri parametri di processo (con una frequenza minore)	Monitoraggio automatico dei parametri fondamentali di produzione attraverso smart sensor integrati all'interno dei macchinari; analisi predittiva del processo attraverso il Virtual Quality Management
Manutenzione	Interventi di manutenzione a seguito del rilevamento del problema	Interventi di manutenzione programmati dai macchinari stessi quando rilevano problematiche

Nell'ottica della Quarta Rivoluzione Industriale queste procedure potrebbero essere semplificate o, in alcuni casi, totalmente abolite perché ridondanti. Come descritto in precedenza (Sezione 2.2), l'Integrazione Orizzontale genera una maggiore connessione tra le imprese appartenenti alla stessa catena del valore, che operano in sinergia come una sorta di "società virtuale"; in tale contesto in cui le informazioni riguardanti i prodotti e i processi da questi subiti sono fruibili oltre i confini aziendali dalle altre imprese coinvolte, il rapporto tra fornitori e imprese di trasformazione risulta necessariamente più trasparente¹²⁰. Attraverso questa possibilità senza precedenti di tracciare con semplicità qualsiasi unità prodotta sino alle fasi primordiali del proprio ciclo di produzione e di conoscere dettagliatamente i requisiti dei materiali, è ipotizzabile che i fornitori siano indotti a farsi carico del controllo della qualità della merce fornita senza alcun margine di errore e che quindi risulti ridondante e superfluo il controllo di accettazione degli ordini effettuati dall'impresa committente. Va ribadito che però la realizzazione di questo libero flusso informativo relativo ai processi e ai prodotti realizzati tra le imprese della stessa *value chain* non è di immediato: per varie motivazioni tra cui l'assoggettamento di costi relativi all'innovazione tecnologica i cui benefici rischiano di andare a favore quasi esclusivo di altre imprese, essa potrebbe essere difficilmente attuabile in alcuni contesti. Una ricerca effettuata tra le aziende tedesche supporta questo diffuso pensiero di

¹²⁰ Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, op. cit., p. 10

diffidenza¹²¹. In tali situazioni in cui non è instaurabile una procedura di accettazione automatica dei lotti in input è comunque possibile una riduzione significativa delle tempistiche di ispezione campionaria o il passaggio al controllo totale per la verifica dei materiali richiesti attraverso l'ausilio di *cobot* dotati di sensori e programmati volta per volta per il rilevamento dei parametri di interesse sostituendo, quando possibile, gli addetti alle ispezioni nei controlli più monotoni o gravosi, come esemplificato da Schmidt¹²². Un problema individuato dal presidente di 3D Infotech, Rohit Khanna¹²³ è inoltre costituito dal fatto che i controlli di qualità effettuati nei diversi turni possono generare output di prodotti molto diversi e inoltre la strumentazione utilizzata dagli addetti per verificare la qualità consente soltanto di misurare ciò che è visibile a occhio umano e risulta quindi parzialmente inefficace. L'utilizzo di robot collaborativi per tutte le mansioni di misurazioni e controllo garantisce, invece, uniformità nel giudizio e capacità di rilevazione di parametri valutativi più elevata.

L'ispezione degli output dei singoli reparti costituisce, come già accennato in precedenza, un problema cruciale per il corretto funzionamento della logica produttiva del *job shop* e le procedure di ispezione campionarie generalmente applicate non garantiscono la qualità adeguata ad un processo che si dovrebbe distinguere proprio per la creazione di prodotti customizzati a regola d'arte. Per queste ragioni l'introduzione di tecnologie e supporti di ispezione di qualità automatici o semiautomatici risultano potenzialmente rivoluzionari per queste fasi critiche. Anche in questo caso la raccolta dei dati relativi ai parametri fondamentali di valutazione dei pezzi può essere affidata ai *cobot* al termine della lavorazione all'interno del reparto stesso, accelerando le tempistiche del rilevamento delle informazioni necessarie. Inoltre, attraverso la capacità di rielaborazione locale dei dati di cui sono dotati questi dispositivi, è possibile valutare con tempistiche più puntuali la conformità dei semilavorati e snellire le procedure di reportistica consequenziale a questo genere di operazione. Oltre a questo genere di controlli di qualità avanzati in cui i robot sostituiscono e migliorano le procedure utilizzate già dagli stessi operatori umani, è ipotizzabile, con il supporto di sensori 4.0 in grado di rilevare fenomeni fisici collegati alla lavorazione, la valutazione della conformità dei pezzi lavorati *in process*. Un esempio a sostegno di questa nuova prospettiva è

¹²¹ Malte Brettel, Niklas Friederichsen, Michael Keller, Marius Rosenberg, 2014, op. cit., p. 42

¹²² Axel Schmidt, 2017, "Two years' experience with Collaborative Robots (Cobots) in a low volume manufacturing environment", Sennheiser, p.24

¹²³ Universal Robot, "How cobots are changing Quality Assurance in manufacturing", blog.universal-robots.com, 26 gennaio 2017

illustrato da Steffan *et al.*¹²⁴, che trattano il controllo di qualità di una lavorazione particolarmente critica, ovvero la rettifica a tuffo per pezzi temprati con sezione non perfettamente circolare. Tale processo risulta specificamente rilevante perché in genere viene eseguito tra le ultime lavorazioni del processo produttivo, quando i semilavorati hanno già assimilato considerevoli sforzi realizzazione che renderebbero particolarmente costoso lo scarto di un pezzo. Durante il processo questi pezzi possono risultare soggetti al danno termico generato dalla mutevolezza delle condizioni di rettifica a causa dalla circonferenza irregolare del profilo del pezzo elaborato; se ciò avviene le parti interessate del pezzo risultano essere caratterizzate indesideratamente da una minor durezza e dalla presenza di tensioni di trazione residue. I metodi di ispezione tradizionalmente utilizzati per il rilevamento di questo problema risultano temporalmente troppo dispendiosi e approssimativi nella misurazione (ad esempio ispezione visiva, test di durezza e diffrattometria a raggi X) oppure applicabile soltanto con modalità campionaria a causa della compromissione del pezzo durante il test (come accade attraverso la tecnica dell'attacco chimico o *nital etching*). Per queste ragioni gli autori propongono una metodologia di controllo applicata *in process* che sfrutta la presenza di un fenomeno fisico strettamente correlato con la durezza e le tensioni interne residue del materiale, che prende il nome di rumore di Barkhausen. Tale fenomeno fisico è generato attraverso il processo di magnetizzazione discontinua dei materiali ferromagnetici che risulta di maggiore intensità rispetto ai valori normali quando nel processo di rettifica del pezzo di interesse si verifica il danno termico generato dalla durezza e dalle tensioni residue del materiale. Il principio di misurazione è illustrato in Figura 11. Attraverso una bobina di eccitazione viene indotto un campo magnetico alternato H nel pezzo. L'intensità del campo magnetico B viene rilevata tramite un sensore di Hall. A causa dell'eccitazione magnetica alternata, i singoli domini di Weiss manifestano il fenomeno di rimagnetizzazione in modalità discontinua se viene superata la forza critica del campo magnetico del dominio. Essendo i domini di Weiss connotati da un orientamento e un'energia di rimagnetizzazione distribuiti stocasticamente, il campo magnetico B risulta sovrapposto dal fenomeno chiamato rumore di Barkhausen. Come specificato dagli autori, però, non è sufficiente la rilevazione del rumore di Barkhausen per valutare efficacemente lo stato del pezzo esaminato; per tale fine sono infatti necessarie misurazioni precise effettuate con altre tecniche su un set di campioni dello stesso materiale esaminato e un'attività di calibrazione delle stesse rispetto al rumore di Barkhausen.

¹²⁴ Matthias Steffan, Franz Haas, Alexander Pierer, Gentzen Jens, 2017, "Adaptive Grinding Process—Prevention of Thermal Damage Using OPC-UA Technique and In Situ Metrology", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, ASME, 2 novembre 2017, pp. 1,4-5

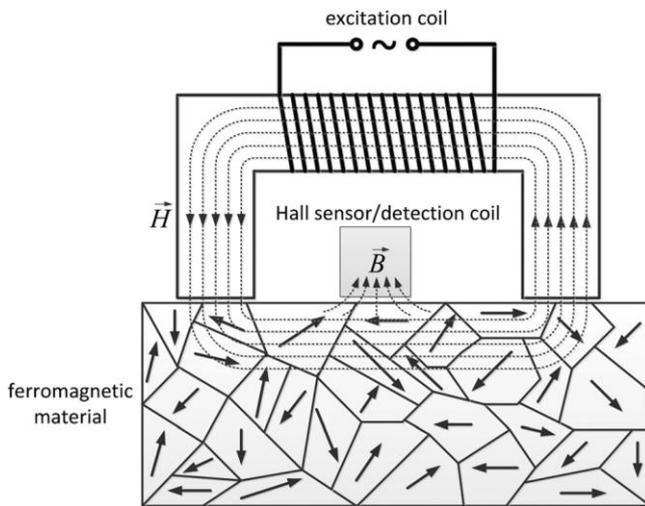


Figura 11: Principio di misurazione del rumore di Barkhausen secondo Steffan *et al.*

Sperimentalmente gli autori effettuano le rilevazioni attraverso un sensore di rumorosità di Barkhausen integrato su un supporto metallico di una rettificatrice industriale per rettifica cilindrica esterna e albero a camme (modello Kellenberger KEL-VARIA¹²⁵) e collocato a contatto diretto della superficie del pezzo in posizione diametralmente opposta rispetto all'area di contatto tra l'utensile e l'unità lavorata per evitare la collisione (Figura 12). La rilevazione del rumore di Barkhausen passa dal sensore al controller attraverso un segnale di tensione. Queste misurazioni, a seguito di un'opportuna calibrazione della strumentazione di analisi, possono essere utilizzate per regolare il tempo e la velocità di avanzamento del processo. Per una trattazione approfondita dei risultati dei test si rimanda il lettore alla trattazione originale¹²⁶. Attraverso i necessari sistemi di connessione e di rielaborazione di questi dati è dunque ipotizzabile l'introduzione in ambito industriale del metodo sopracitato per consentire al macchinario stesso di controllare questo aspetto critico in tempo reale e di correggere automaticamente in caso di superamento dei valori soglia del rumore di Barkhausen le impostazioni per evitare i danni termici e rendere superflue le relative verifiche sul prodotto al termine del processo. Come nell'esempio citato, è quindi presumibile che una profonda indagine e sperimentazione dei fenomeni fisici legati ai processi produttivi e le annesse modalità di rilevamento intelligenti, possano condurre i processi organizzati per reparti (e non solo) a livelli di efficienza sempre più elevati e rendere ridondanti alcune verifiche degli output al termine dei processi.

Il controllo finale dei prodotti, effettuato al termine del ciclo di lavorazione, costituisce l'ultimo step

¹²⁵ www.hartwiginc.com/wp-content/uploads/2015/07/Kellenberger-KEL_VARIA-Brochure.pdf

¹²⁶ Matthias Steffan, Franz Haas, Alexander Pierer, Gentzen Jens, 2017, op. cit., pp. 5-6

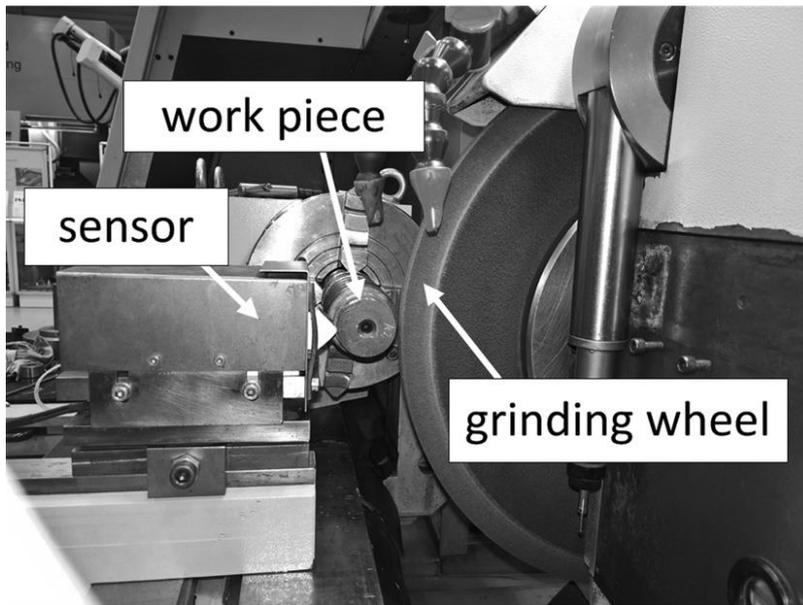


Figura 12: Installazione del sensore per la rilevazione del rumore di Barkhausen nell'esperimento condotto da Steffan *et al.*

di verifica antecedente all'invio ai committenti delle merci richieste. Generalmente è eseguito con gli stessi criteri con cui vengono effettuati i controlli tra i reparti: se la dimensione del lotto lo consente viene ispezionata la totalità dei pezzi finiti, mentre per ordini consistenti vengono utilizzati piani di campionamento atti a verificare la conformità della commessa entro i limiti di tolleranza di difettosità stabiliti dalle decisioni strategiche interne. Nel panorama delineato dall'Industria 4.0 anche queste procedure potrebbero essere rivoluzionate: l'Integrazione Orizzontale verso i clienti potrebbe imporre vincoli di qualità in uscita analogamente stringenti rispetto a quelli che le imprese manifatturiere che operano con la tecnica del *job shop* pretenderebbero dai rispettivi fornitori descritti in precedenza. In tal caso le procedure di ispezione totale effettuate con metodi di ispezioni tradizionali porterebbero i costi del controllo qualità ad incidere pesantemente sul costo pieno di produzione. Garantire la qualità di tutti i prodotti rilasciati contenendo i costi unitari di ispezione è possibile attraverso l'introduzione di strumentazione all'avanguardia, come i macchinari di ispezione con tomografia computerizzata o a raggi X, che garantiscono una mappatura dettagliata e uniforme dei pezzi controllati e possono operare in autonomia a ciclo continuo. Esempi di questa supporti industriali sono i macchinari "XT H 225"¹²⁷ e "ZEISS METROTOM"¹²⁸. Attraverso le interconnessioni aziendali e i software di rielaborazione dei dati è poi agilmente e automaticamente concretizzabile la verifica di conformità rispetto ai disegni tecnici virtuali dei prodotti.

¹²⁷ www.directindustry.it/prod/nikon-metrology/product-21023-447264.html

¹²⁸ www.zeiss.com/metrology/products/systems/computed-tomography/metrotom.html

I controlli di processo sono utili per verificare che i macchinari utilizzati, nel processo del *job shop* e non solo, risultino operanti nelle modalità per cui sono stati progettati. Generalmente questi controlli possono essere effettuati da ispettori di qualità in modalità *full time* o *part time*. Ad occuparsi del monitoraggio dei macchinari possono essere anche gli operatori che lavorano all'interno dei reparti, che solitamente non hanno una formazione specifica per il controllo qualità, ma che riconoscono in base all'esperienza maturata all'interno dei reparti le anomalie e i malfunzionamenti dei macchinari; in alcuni casi però essi sono sprovvisti della responsabilità per poter prendere decisioni di controllo sui macchinari. Tipici controlli effettuati sulle machine utensile sono i controlli di accuratezza geometrica e cinematica atti a scongiurare errori di allineamento tra mandrino e supporti portautensili¹²⁹. Generalmente le attività di ispezione di processo si dividono in periodiche e occasionali: i controlli dello stato degli utensili intercambiabili, ad esempio, vengono effettuati solitamente ad intervalli regolari (ogni cambio turno); i controlli occasionali invece vengono svolti soltanto quando è rilevata una anomalia, che può essere visibilmente rintracciata sul macchinario stesso oppure attraverso difformità dei suoi output. Questa seconda modalità di controllo risulta poco efficiente in termini globali di processo, poiché agisce *ex post*, ovvero sugli effetti delle problematiche dei macchinari e non sulle cause che le hanno generate e, se non sono rilevati tempestivamente, possono portare a dover scartare quantità considerevoli di pezzi non conformi e provocare ingenti perdite economiche. I macchinari utilizzati nella Quarta Rivoluzione Industriale, invece, dovrebbero risultare “immuni” dalla necessità di ispezioni umane periodiche per la verifica dei parametri di processo, poiché essi stessi acquisirebbero le capacità di valutare le condizioni in cui operano attraverso il monitoraggio dei dati registrati durante le attività svolte e attraverso la rielaborazione dei feedback dei sensori intelligenti installati a valle del reparto interessato, rintracciati attraverso il sistema informativo aziendale in cloud. Le possibili modalità con cui possono essere creati questi sistemi integrati cyberfisici vengono illustrate da N. Jazdi¹³⁰. Attraverso il largo impiego di queste tecniche automatizzate di controllo dei processi, l'attività di monitoraggio umano dei processi sarebbe limitata alla valutazione delle soluzioni proposte da questi sistemi cyberfisici. Inoltre, come accennato in precedenza (2.4), attraverso l'introduzione di questi “doppioni digitali” dei processi produttivi, è possibile tracciare molteplici scenari di processo e di conseguenza riuscire a prevedere con un buon livello di probabilità una molteplicità di problematiche riscontrabili durante il normale funzionamento dei macchinari e prevenirne i danni nel caso in cui si presentassero nella

¹²⁹ S. S. Pande, op. cit., p. 11

¹³⁰ Nasser Jazdi, 2014, op. cit., pp. 2-3

realtà le loro condizioni scatenanti. A tal proposito, però, va precisato che i macchinari dell'Industria 4.0 non si limitano potenzialmente soltanto a riconoscere le problematiche venture attraverso l'analisi dei prodromi riscontrabili nei dati di processo e a scongiurare i danni conseguenti. Infatti, come descritto in un documento di sintesi pubblicato dal gruppo tedesco ZVEI¹³¹, è possibile ipotizzare uno scenario in cui i macchinari raccolgono incessantemente i dati relativi al loro stesso funzionamento attraverso i sensori intelligenti più appropriati e, considerando contemporaneamente i tempi di inattività e le loro cause, possono delineare una previsione di quando è necessaria la manutenzione prima che il processo generi dei difetti sistematici. Gli stessi macchinari, inoltre, potrebbero provvedere ad effettuare la richiesta dei pezzi di ricambio necessari alla riparazione, in modo che essi siano disponibili in data utile per l'intervento concordato con il piano di produzione adattato dinamicamente. Con l'avvento di Industria 4.0 la manutenzione passa dunque dall'essere una procedura riparativa ed inefficiente all'essere una pratica predittiva quasi totalmente automatizzata che contribuisce continuamente all'efficientamento del processo produttivo.

3.2 Produzione a lotti

Con processo produttivo a lotti possono essere intese diverse realtà industriali che hanno generalmente la proprietà comune di creare una determinata quantità di prodotti con le stesse caratteristiche. N. Martin *et al.* dell'Università di Hasselt¹³² tracciano una panoramica delle varie definizioni che in letteratura vengono date ai processi che possono rientrare sotto questo nome. Secondo alcune accezioni questi processi sono descritti come l'elaborazione simultanea di un dato numero di prodotti, mentre per altri la contemporaneità della lavorazione di tutte le unità non è condizione necessaria per rientrare sotto questa nomenclatura, ma è sufficiente la sequenzialità delle lavorazioni dei prodotti. Gli autori propongono inoltre una classificazione di tre diverse tipologie di processo¹³³, che vanno sotto il nome di:

- processo a lotto simultaneo quando le elaborazioni vengono effettuate da una stessa risorsa per più unità distinte allo stesso tempo (si pensi ad esempio ai trattamenti termici effettuati in forni a camera);
- processo a lotto sequenziale se la stessa risorsa processa le unità singolarmente ma in rapida sequenza;

¹³¹ ZVEI, "Industrie 4.0: MES – Prerequisite for Digital Operation and Production Management", German Electrical and Electronic Manufacturers' Association, agosto 2017, p.15

¹³² Niels Martin, Marijke Swennen, Benoît Depaire, Mieke Jans, An Caris, Koen Vanhoof, 2015, "Batch Processing: Definition and Event Log Identification", 5th International Symposium on Data-driven Process Discovery and Analysis, Vienna, dicembre 2015, p. 138

¹³³ Niels Martin, Marijke Swennen, Benoît Depaire, Mieke Jans, An Caris, Koen Vanhoof, 2015, op. cit., pp. 138-139

-processo a lotto “concorrenziale” quando i singoli pezzi sono lavorati dalla stessa risorsa con tempistiche di processo delle singole unità parzialmente sovrapposte alle altre.

Deve essere precisato che, però, in alcuni contesti industriali la classificazione dei processi risulta non immediata o addirittura impossibile, poiché all’interno dello stesso ciclo produttivo le singole fasi possono essere svolte con logiche diverse. Va inoltre precisato che la produzione per lotti può essere considerata come un processo a *job shop* standardizzato per un set limitato di prodotti¹³⁴ con numerosità dei pezzi processati superiore. All’interno di questo elaborato l’accezione che viene data dei processi produttivi a lotti racchiude tutte le tre tipologie descritte dai ricercatori belgi ed enunciate in precedenza. Le principali caratteristiche che accomunano questi processi generalmente sono:

- la produzione di pezzi omogenei all’interno dello stesso lotto¹³⁵;
- la possibilità di processare un lotto successivo dopo la conclusione (o in leggera sovrapposizione in caso di lotti concorrenziali) di un primo lotto;
- la necessità di effettuare il setup del processo ogni volta che si desidera ottenere un lotto di prodotti con caratteristiche differenti¹³⁶;
- le risorse umane generalmente specializzate per operare soltanto in una determinata fase del processo produttivo;
- la generazione di economie di scala e un costo unitario di produzione (generalmente) contenuto rispetto al processo a *job shop* e più elevato rispetto alla produzione in serie¹³⁷;
- un livello di flessibilità produttiva intermedio tra i processi a *job shop* e a ciclo continuo che dipende anche dal settore produttivo e dalla complessità dei prodotti¹³⁸.

Le complessità principali generate da questa tipologia di processi sono solitamente concentrate in tre aspetti. In primis vi è la gestione della produzione dei lotti, che risulta critica nel caso in cui le imprese operino con commesse occasionali o di dimensioni variegata: in tal caso si generano problematiche di schedulazione degli ordini analoghe a quelle esaminate per il caso del *job shop*. Un secondo aspetto, riconducibile al primo perché sempre legato alla produzione, è la problematica dei tempi e dei costi di setup che vengono generati allorché si programma il processo per una commessa diversa rispetto all’ultima che è stata effettuata: a causa di questa caratteristica strutturale del sistema di produzione l’output effettivamente generato può essere considerevolmente inferiore rispetto alla capacità produttiva dell’impianto. Un terzo aspetto delicato della produzione per lotti è la necessità di operare con scorte di materie prime maggiori rispetto al *job shop* e che in alcuni casi esigono un attento

¹³⁴ Daniela Todorova, John Dugger, 2015, “Lean Manufacturing Tools In Job Shop, Batch Shop and Assembly Line Manufacturing Settings”, The Journal of Technology, Management, and Applied Engineering (JTMAE), Volume 31, Num. 1, gennaio-marzo 2015, p. 4

¹³⁵ Daniela Todorova, John Dugger, 2015, op. cit., p. 4

¹³⁶ Daniela Todorova, John Dugger, 2015, op. cit., p. 4

¹³⁷ Logisticamente.it, 2005, “I processi produttivi: classificazione e strategie”, 21 novembre 2005

¹³⁸ Logisticamente.it, 2005, op. cit.

monitoraggio perché non mantengono inalterate le proprietà caratteristiche nel tempo (si pensi ad esempio al deperimento delle farine nell'industria alimentare). Con l'avvento di Industria 4.0, però, anche i processi produttivi a lotti potrebbero essere migliorati nettamente. L'introduzione di macchinari di produzione all'avanguardia potrebbe consentire di gestire i processi con una maggiore efficienza, abbattendo i tempi di setup relativi alle impostazioni dei macchinari (che verrebbero programmate dai macchinari stessi) e la gestione degli input di processo potrebbe essere effettuata con maggiore partecipazione dei fornitori attraverso la già citata Integrazione Orizzontale, consentendo di diminuire il livello di scorte medio in magazzino¹³⁹.

Uno specifico sistema di *Quality Management* per le produzioni a lotti risulta necessario per verificare la conformità di ogni lotto prodotto rispetto alle caratteristiche desiderate dai committenti. In Tabella 8 è riportato un confronto generale tra le modalità con cui sono state effettuate fino ad ora le principali ispezioni di qualità nei processi produttivi a lotti e le prospettive create in tale ambito dall'introduzione delle tecnologie introdotte da Industria 4.0. Anche in questa tipologia di filiera, come nel caso del *job shop*, i controlli di accettazione del materiale in ingresso possono passare, con l'opportuna integrazione dei sistemi informativi nei confronti dei fornitori, ad essere superflue. Qualora questo genere di collaborazione trasparente non fosse applicabile, l'attività di ispezione delle materie prime in ingresso potrebbe essere comunque agevolata dall'introduzione di strumentazione dotata di sensori 4.0 e di dispositivi connessi alla rete aziendale in grado di agevolare la generazione e l'immissione nel cloud aziendale della reportistica associata a ciascuna partita di materiale. In settori come quello alimentare o farmaceutico, ad esempio, è di fondamentale importanza la tracciabilità delle materie prime utilizzate nei processi e l'integrazione in tempo reale di queste informazioni nei sistemi ERP industriali è di grande rilevanza¹⁴⁰. I controlli di qualità sui pezzi semilavorati e finiti sono generalmente effettuati in modalità campionaria dagli addetti del reparto qualità o, nelle ispezioni più semplici, dagli operatori di linea. Tali controlli risultano spesso ripetitivi e possono portare il personale a compiere errori di misurazione o di valutazione e inoltre lo svolgimento di queste attività da parte di ispettori differenti può portare a discordanze di valutazione dei lotti esaminati. Per ovviare a questi problemi, nei contesti produttivi organizzati a lotti più innovativi sono ipotizzabili diversi scenari. Innanzitutto, ad essere necessaria è una valutazione dei costi e dei benefici portata dall'introduzione di strumentazioni innovative per il controllo di qualità, in funzione anche del valore dei beni prodotti. Un metodo di valutazione a riguardo è proposto da E.S. Richter e A.L. McClellan¹⁴¹. In genere per i processi con lotti di basso valore è ipotizzabile un semplice affinamento delle attività già svolte con l'introduzione di strumentazione a supporto degli operatori umani, oppure la sostituzione del personale per i controlli campionari attraverso l'adozione di cobot industriali dotati di opportuni sensori e di capacità autonome di registrazione dei risultati. Attraverso l'introduzione di macchinari a raggi x come quelli elencati in 3.1 è invece possibile effettuare ispezioni sulla totalità dei pezzi costituenti il lotto di interesse. Per lotti di prodotti di valore rilevante è ipotizzabile l'immissione di sensori internamente al prodotto (*smart product*). Attraverso queste integrazioni è il

¹³⁹ Pwc, 2017, op. cit., p. 6

¹⁴⁰ IFS, 2013, "Using ERP for Process Manufacturing Quality Management", Whitepaper, pp. 4-5

¹⁴¹ Eric S. Richter, Arthur L. McClellan, 2015, "Process Approach to Determining Quality Inspection Deployment", The Aerospace Corporation, 8 giugno 2015, pp. 1-16

prodotto stesso a raccogliere, elaborare e trasmettere i dati¹⁴² sui processi subiti e a facilitare i controlli di qualità.

Tabella 8: Principali ispezioni di qualità nei processi organizzati a lotti prima e dopo l'introduzione di Industria 4.0

Oggetto dell'ispezione	Procedure abituali	Industria 4.0
Materie prime	Ispezione effettuata a campione dall'addetto del reparto qualità per ogni ordine di materiale in ingresso; in caso di materiale comprato a stock e deperibile sono necessari controlli periodici in magazzino	Non necessaria se fornitori fanno parte del <i>network</i> aziendale (Integrazione Orizzontale); monitoraggio automatizzato dei magazzini in caso di merce deperibile
Semilavorati	Ispezione effettuata a campione dall'addetto del reparto qualità per ogni lotto in processamento	Ispezione automatizzata di tutte le unità del lotto (per prodotti di elevato valore/ <i>smart product</i>) oppure campionaria (prodotti di basso valore) tramite sensori montati su bracci robotici/ <i>cobot</i> in seguito al processo
Prodotto	Ispezione attuata dall'addetto del reparto qualità su tutte le unità del lotto se il valore unitario dei prodotti è elevato, campionaria altrimenti	Ispezione visiva automatizzata di tutto il lotto attraverso macchine di ispezione con tomografia industriale computerizzata/raggi x, campionaria con ausilio di sensori per altri aspetti (ad es. sensori chimici per lotti alimentari)
Processo	Controllo manuale periodico dei centri produttivi, monitoraggio <i>in process</i> dei parametri rilevabili; criticità nel monitorare le impostazioni che cambiano per ogni lotto processato	Monitoraggio automatico dei parametri fondamentali di produzione attraverso smart sensor integrati all'interno centri produttivi; analisi predittiva del processo attraverso il <i>Virtual Quality Management</i>
Manutenzione	Interventi di manutenzione dei centri produttivi a seguito del rilevamento del problema	Interventi di manutenzione programmati dai centri produttivi stessi quando rilevano i segnali di possibili problematiche

Il monitoraggio del processo produttivo a lotti è di vitale importanza. Le condizioni attraverso cui i macchinari utilizzati effettuano le lavorazioni condizionano la qualità della totalità dei pezzi processati ed è dunque opportuno verificarne la conformità. In genere questa tipologia di controlli è effettuata sia attraverso ispezioni effettuate periodicamente sulle apparecchiature degli impianti nei periodi di fermo macchina, sia durante il processamento dei lotti. Tuttavia, questo secondo genere di verifiche è stato generalmente limitato dalla indisponibilità di strumentazioni adatte al rilevamento di tutti i parametri di processo di interesse e nella quasi totalità dei casi non consente azioni proattive di correzione. Attraverso l'introduzione delle tecnologie che caratterizzano l'Industria 4.0, questi controlli possono radicalmente evolvere. L'utilizzo di un'ampia gamma di *smart sensor* integrati direttamente nei macchinari consente la rilevazione dei parametri critici di processo in tempo reale, mentre la capacità di rielaborazione dei dati dei sistemi integrati consente di agire prontamente qualora vengano riscontrate delle anomalie *in process*. Inoltre, attraverso il Virtual Quality

¹⁴² Andreja Rojko, 2017, op. cit., p. 82

Management, il sistema è in grado di tracciare molteplici scenari prima del processamento di un lotto in modo da prevedere le problematiche di processo riscontrabili e creare possibili soluzioni. Un esempio concreto di impianto produttivo in cui i controlli di processo sono automatizzati è descritto da P. Emilia¹⁴³. L'impianto in questione produce insulina ed è stato realizzato dall'azienda farmaceutica Biopharmax in Cina. Questo genere di produzione è molto complesso (Figura 13) ed è caratterizzato da condizioni stringenti, quali camere sterili e strutture igienizzate; elementi aggiuntivi di criticità in questo impianto sono la varietà delle ricette e delle fasi di produzione da supportare (rispettivamente 70 e 300). Questo stabilimento è stato supportato attraverso un sistema di controllo di processo Rockwell Automation costituito da oltre 10.000 interfacce informatiche (Input/Output) e da controllori di processo di varie dimensioni. Nei punti critici del processo i controllori raccolgono e elaborano i dati attraverso interfacce distribuite e ridondanti. Tutte le informazioni raccolte sono fruibili da una sala di controllo centrale mentre le stazioni di lavoro sono in grado di fornire attraverso le HMI l'accesso ai principali componenti dell'impianto e una diagnostica avanzata. I componenti dei controllori delle diverse aree di processo (come ad esempio i convertitori di frequenza e le bilance) comunicano attraverso protocolli Ethernet/IP e per mezzo di questo link di comunicazione è possibile analizzare approfonditamente i dati e, in caso di necessità, apportare misure correttive ai dispositivi. L'affidabilità e le performance del sistema risultano notevolmente aumentate attraverso questa soluzione ed è accresciuta considerevolmente anche la semplicità di individuazione e risoluzione dei problemi.

Per quanto concerne la manutenzione degli impianti possono essere fatte considerazioni analoghe a quelle proposte in 3.1. L'evoluzione dei macchinari nell'industria del futuro consentirà di conoscere lo stato di salute dei macchinari attraverso l'elaborazione dei dati provenienti dai macchinari e dai prodotti stessi. Un esempio proposto è l'integrazione di un sensore acustico per la rilevazione del suono emesso dagli ingranaggi di un macchinario in funzione al fine di comprenderne il livello di deterioramento¹⁴⁴.

¹⁴³ Patrizio Emilia, 2017, "Risparmiare tempo e sforzo ingegneristico", Automazione Oggi, giugno-luglio 2017, pp. 76-78

¹⁴⁴ Li Da Xu & Lian Duan, 2018, "Big data for cyber physical systems in industry 4.0: a survey", Enterprise Information Systems, p. 11



Figura 13: Un reparto dell'impianto di produzione di insulina (Rockwell Automation¹⁴⁵)

3.3 Produzione in serie

Con l'espressione di produzione in serie si intende generalmente un processo produttivo caratterizzato da prodotti ad elevato grado di standardizzazione, elevati volumi, bassi costi unitari e una stretta sequenzialità tra le postazioni di lavoro o fasi che costituiscono il processo¹⁴⁶. Questo tipo di logica produttiva può essere anche definita a ciclo o flusso continuo nel caso in cui vi siano dei supporti continui per la movimentazione dei semilavorati tra le varie postazioni. La stretta sequenzialità di queste operazioni riduce al minimo il tempo di inattività dei macchinari e massimizza il *throughput*¹⁴⁷ ma, nei casi in cui non siano presenti dei buffer di sicurezza tra una postazione di lavoro e la successiva, un problema riscontrato può portare all'interruzione dell'intero ciclo produttivo. Gli impianti per le produzioni in serie consentono dunque di massimizzare l'efficienza produttiva, ma al

¹⁴⁵ Immagine disponibile al link:

https://www.rockwellautomation.com/resources/images/rockwellautomation/photograph/large/DS4--graphic_280w.jpg

¹⁴⁶ Daniela Todorova, John Dugger, 2015, op. cit., p. 4

¹⁴⁷ Glenn Ballard, Iris Tommelein, 1999, "Aiming for Continuous Flow", LCI White Paper, Num. 3, 5 marzo 1999, p. 1

contempo richiedono ingenti investimenti monetari per essere creati¹⁴⁸. Altri aspetti rilevanti di questa logica produttiva sono:

- la sincronizzazione tra i reparti produttivi, che deve essere perfetta negli impianti a produzione continua¹⁴⁹;
- la flessibilità produttiva dei macchinari limitata, che rende molto difficoltoso il lancio di nuovi prodotti;
- la bassa frequenza di setup dei macchinari¹⁵⁰, che negli impianti a ciclo continuo coincide generalmente con i rari periodi di fermo-linea;
- l'elevato livello di automazione e il limitato apporto di manodopera nel corso del processo produttivo¹⁵¹.

Le produzioni in serie si adattano dunque perfettamente al soddisfacimento della domanda di prodotti altamente standardizzati e, grazie ai bassi costi di produzione unitari, riescono ad essere altamente competitive sui segmenti di mercato relativi a queste categorie merceologiche. Tuttavia, il trend di mercato caratterizzato da una richiesta in costante aumento di prodotti personalizzabili¹⁵², che prende il nome di *mass customization*, pone in serio pericolo il predominio nel mercato di queste logiche di *mass production*. Per questa ragione le linee produttive necessitano di una riconversione al fine di aumentare la flessibilità dei macchinari per poter rispondere prontamente alle esigenze di mercato. In unione a questa esigenza, sorge anche la necessità di poter individuare prontamente i bisogni dei clienti. L'avvento dell'Industria 4.0 porta con sé i presupposti per riuscire a realizzare questi nuovi impianti di produzione; l'Integrazione Orizzontale verso i clienti finali per scoprire i requisiti dei prodotti è invece realizzabile attraverso piattaforme software¹⁵³.

La gestione della qualità nelle linee di produzione richiede notevoli attenzioni sia in fase preliminare, ovvero nelle fasi di progettazione degli impianti, sia in fase di monitoraggio dei parametri di processo (Tabella 9). I controlli di accettazione dei materiali in ingresso generalmente costituiscono la prima ispezione dei prodotti in ordine temporale. Tale ispezione viene eseguita nella quasi totalità delle produzioni in serie in modalità campionaria per ogni partita di merce ricevuta poiché i costi derivanti dall'ispezione totale risulterebbero spropositati. Essa avviene in genere attraverso un prelievo di materiale effettuato da un addetto del reparto qualità al momento dell'arrivo della merce, che viene successivamente testato in laboratorio. Nel caso di scorte deperibili in giacenza, è necessaria una

¹⁴⁸ "I processi produttivi: classificazione e strategie", Logisticamente.it, 21 novembre 2005

¹⁴⁹ Mahmoud Abbas Mahmoud, 2014, "Classifications of production systems", University of Technology Baghdad, Iraq, 2014-2015, pp. 3-4

¹⁵⁰ Logisticamente.it, 2005, op. cit.

¹⁵¹ Logisticamente.it, 2005, op. cit.

¹⁵² Vicki Holt, 2018, "Five Expert Insights into Digital Manufacturing and Mass Customization", IndustryWeek, 19 luglio 2018

¹⁵³ Anshuk Gandhi, Carmen Magar, Roger Roberts, 2013, "How technology can drive the next way of mass customization", McKinsey & Company, Business Technology, 2013, pp. 7-9

periodica attività di controllo dei parametri sensibili delle merci in questione.

Tabella 9: Principali ispezioni di qualità nei processi di produzione in serie prima e dopo l'introduzione di Industria 4.0

Oggetto dell'ispezione	Procedure abituali	Industria 4.0
Materie prime	Ispezione effettuata a campione dall'addetto del reparto qualità per ogni ordine di materiale in ingresso; in caso di materiale comprato a stock e deperibile, necessari controlli periodici in magazzino	Non necessaria se fornitori fanno parte del network aziendale (Integrazione Orizzontale); monitoraggio automatizzato in caso di merce deperibile
Semilavorati	Ispezione effettuata a campione dall'addetto del reparto qualità a intervalli di tempo regolari (ad esempio ogni 2 ore)	Ispezione automatizzata di tutte le unità processate con espulsione immediata delle unità non conformi e reimmissione automatica degli scarti (quando le lavorazioni non sono irreversibili) nel ciclo produttivo
Prodotto	Ispezione campionaria effettuata dall'addetto del reparto qualità a intervalli di tempo regolari	Ispezione visiva e ponderale (solo se necessaria) automatizzate in linea di tutte le unità prodotte attraverso scanner industriali e macchinari a raggi x, campionaria con ausilio di sensori intelligenti per aspetti non verificabili a tappeto
Processo	Controllo manuale periodico dei centri produttivi, monitoraggio in process dei parametri rilevabili	Monitoraggio automatico dei parametri fondamentali di produzione attraverso smart sensor integrati all'interno della linea; analisi predittiva del processo attraverso il Virtual Quality Management
Manutenzione	Interventi di manutenzione con la sospensione della produzione a seguito del rilevamento del problema	Interventi di manutenzione programmati dalla linea stessa quando rileva i segnali di possibili problematiche; regolazione automatizzata o semplificata della velocità di processo per consentire le riparazioni senza il fermo-linea (se possibile)

Con l'avvento dell'Industria 4.0 queste procedure di controllo potrebbero subire un cambiamento analogo a quello descritto in 3.1 e 3.2, ovvero essere effettuate da parte dei fornitori in modalità approfondita e con la conformità delle specifiche richieste. Per le filiere con un livello di integrazione non così elevato da rendere superflui i controlli di accettazioni da parte delle industrie, sono comunque possibili diverse soluzioni innovative. I già citati *cobot* possono agevolare le procedure di ispezione effettuate dagli ispettori di qualità e in alcuni tipi di controllo agire autonomamente. I controlli di qualità dei semilavorati, invece, hanno per le linee di produzione continue l'esigenza di essere effettuati attraverso tecniche rapide di verifica dei pezzi in avanzamento. In gran parte dei contesti industriali le pratiche di controllo dei prodotti in linea continua prevedono un'ispezione visiva del flusso di prodotti effettuata dagli operatori a bordo linea. Il controllo di parametri fisici/chimici, invece, viene effettuato attraverso il campionamento e l'analisi in laboratorio, a scadenze regolari, di una determinata quantità di pezzi nelle fasi di interesse del processo. Queste procedure risultano, però, essere inefficienti sotto gli aspetti dell'uniformità del giudizio e, nel secondo caso, anche della tempestività dell'esito del controllo. Per queste ragioni l'introduzione di nuove strumentazioni tecnologicamente avanzate per l'esecuzione dei controlli dei prodotti semilavorati in linea risulta di grande interesse per i produttori. Per alcuni controlli, come quello della pesatura dei pezzi, l'integrazione della strumentazione utile ad automatizzare il controllo nella linea produttiva risulta piuttosto semplice. Attraverso l'installazione di una selezionatrice ponderale nel punto di interesse, è possibile far proseguire lungo la linea produttiva soltanto i pezzi dal peso conforme. Questa applicazione risulta particolarmente utile in seguito al confezionamento dei prodotti all'interno dell'involucro primario. Un esempio di questa tipologia di applicazione è stato realizzato da Picotronik su richiesta di un'azienda di confezionamento di corredi di elettrodomestici che aveva l'esigenza di verificare la conformità del peso dei kit imballati¹⁵⁴. Il sistema è composto di un indicatore PS30, un piatto bilancia PB-AHA e un espulsore pneumatico. L'indicatore verifica rapidamente attraverso un algoritmo la conformità del peso rispetto alle specifiche del kit di assemblaggio che passa sulla bilancia e ne fa proseguire la corsa se il controllo è superato, mentre in caso contrario provvede a segnalare un allarme al sistema e a inviare il segnale di espulsione al supporto addetto. Per controlli più specifici di ogni linea produttiva sono inoltre in aumento le soluzioni proposte ad hoc. Siemens ha creato un metodo per effettuare la verifica dell'uniformità di spessore dei film plastici prodotti in processi continui¹⁵⁵. La soluzione sviluppata, supportata con SIMATIC PC-based Automation, comprende l'utilizzo di due dispositivi: una testina di misura dotata di sorgente radioattiva che si muove avanti e indietro al di sopra del film in direzione perpendicolare rispetto al flusso del materiale e un sensore che muove al di sotto del foglio plastico. Attraverso la rilevazione da parte del sensore del segnale emesso dalla testina e la rielaborazione di dati raccolti attraverso complessi algoritmi matematici, è possibile determinare lo spessore del film in qualsiasi posizione e possono essere compensati gli scostamenti dal valore di riferimento. Gli algoritmi utilizzati in questa applicazione sono implementati in linguaggio C++ di alto livello e integrate nel programma attraverso un ODK (Open Development Kit); la verifica da parte degli addetti può essere effettuata in tempo reale su un terminale tramite WinAC RTX.

¹⁵⁴ Luca Dotti, 2017, "seleziona e discrimina", Automazione Oggi, giugno-luglio 2017, p. 80

¹⁵⁵ Siemens, 2014, op. cit., p. 18 (1/8)

I controlli effettuati sui prodotti in serie a fine linea sono anch'essi generalmente applicati in modalità campionaria da parte degli addetti del reparto qualità secondo le routine programmate all'interno del contesto aziendale. Queste procedure, in un contesto di Industria 4.0, potrebbero diventare parte integrante del processo produttivo stesso e portare alla scomparsa dell'ispezione di qualità effettuata dal personale¹⁵⁶. Un esempio a supporto di questa tendenza delle linee produttive è offerto da un controllo di tipo estetico già introdotto in uno stabilimento produttivo della Lipton a Dubai¹⁵⁷. Il controllo in questione mira a verificare il corretto posizionamento dei fili attaccati alle estremità delle bustine di tè e le etichette riportanti il logo del marchio che sono presenti all'altro capo del filo. Il filo deve essere avvolto sulla bustina e il suo posizionamento e quello dell'etichetta devono essere precisi. La soluzione utilizzata per questo controllo consiste nell'integrazione di un sensore intelligente chiamato Inspector I40 collegato direttamente al controllo oppure ad un dispositivo di espulsione per mezzo delle uscite digitali di cui è dotato. Questo supporto, dotato di obiettivo quadrangolare ad alta risoluzione e filtro blu per creare maggior contrasto, è in grado di acquisire immagini a grande velocità ed è dotato di un algoritmo di localizzazione degli oggetti che gli permette di effettuare l'ispezione indipendentemente dal posizionamento del pezzo esaminato. Il controllo viene dunque eseguito in modalità totalmente automatica sulla totalità delle bustine di tè prodotte sulla linea. Un esempio di macchinario automatizzato costituito da un sistema di visione Cognex, attuatori ROBO, PLC e interfaccia uomo-macchina per l'ispezione di qualità universale di prodotti finiti è invece presentato da *M. Patil et al*¹⁵⁸.

Il controllo del processo che caratterizza la linea produttiva è di fondamentale importanza per creare i presupposti di una produzione standardizzata e senza scarti di lavorazione. Questi controlli, fino ad ora limitati dalla mancanza di supporti tecnologici adeguati, potrebbero essere effettuati nelle fabbriche del futuro con maggiore puntualità ed efficienza. Attraverso l'utilizzo del Virtual Quality Management è possibile creare database di scenari produttivi virtuali volti a monitorare l'evoluzione dei parametri di processo e a conoscere preventivamente le problematiche riscontrabili. Inoltre, la stretta comunicazione tra i sistemi informativi di monitoraggio, i sensori integrati in corrispondenza dei punti critici del processo e gli *smart product* porta al tracciamento dettagliato dei processi produttivi che sono in grado di controllarsi in modalità quasi autonoma. Inoltre, queste informazioni legate al processo sono utili per effettuare la manutenzione in modo intelligente. Tale aspetto risulta particolarmente critico produzione continue, in cui una problematica riscontrata rischia di comportare l'interruzione della produzione dell'intera linea. Per questa ragione è possibile sfruttare le informazioni relative allo stato di salute degli impianti generate in linea per effettuare la manutenzione predittiva¹⁵⁹. La grande mole di dati generati può essere processata attraverso il supporto di software connessi direttamente ai macchinari che prendono il nome di *Cyber Physical*

¹⁵⁶ Sung Hyun Park, Wan Seon Shin, Young Hyun Park, Youngjo Lee, 2017, "Building a new culture for quality management in the era of the Fourth Industrial Revolution", Total Quality Management & Business Excellence, 2017, p. 941

¹⁵⁷ Marco Catizone, 2017, "La chiave per la soluzione migliore", Automazione Oggi, giugno-luglio 2017, p. 88-89

¹⁵⁸ Madhav Patil, Jack Toporovsky, L. Hmurcik, Tarek Sobh, 2012, "Integration of Vision System, Intelligent ROBO Actuator, HMI and PLC to Design a Universal Quality Inspection or Control Machine", i-manager's Journal, Mechanical Engineering, Vol. 2, No. 3, maggio-giugno 2012, pp. 5-13

¹⁵⁹ Ruben Ravnå, Per Schjøberg, 2016, "Industry 4.0 and Maintenance", Norsk Forening for Vedlikehold (NFV), p. 9

*Maintenance Systems*¹⁶⁰. Le funzionalità di questi supporti possono portare a generare stime accurate della vita utile residua dei macchinari e anche a proporre la programmazione dettagliata della risoluzione degli interventi. La regolazione della velocità di flusso al fine di prolungare temporalmente la vita utile dei macchinari è, invece, una prospettiva interessante ma non ancora attuata¹⁶¹.

3.4 Additive manufacturing

Con *additive manufacturing*, come già affermato in precedenza (1.2.6), si intende una serie di tecniche di produzione caratterizzate dal fatto di creare oggetti attraverso la deposizione di strati di materiale guidata da un computer. Tali tecniche hanno le peculiarità di poter produrre i pezzi desiderati, che possono avere geometrie altamente complesse, senza generare materiale di scarto e in modalità completamente automatizzata. I principali vantaggi di queste tecniche produttive rispetto ai metodi tradizionali, secondo il prof. dell'Università di Stato della California M. Attaran¹⁶², sono:

- 1) la possibilità di realizzare la stampa 3D dei pezzi di ricambio qualora gli utenti fossero muniti di un macchinario attrezzato. La stampa dei componenti necessari potrebbe richiedere semplicemente al consumatore di dover scaricare tramite internet il file di stampa 3D;
- 2) la cosiddetta *mass customization* attraverso la semplicità di progettazione su misura e i tempi di setup contenuti;
- 3) la produzione decentralizzata e l'ottimizzazione della logistica poiché i progetti 3D generati virtualmente potrebbero essere trasformati nel prodotto desiderato nello stabilimento più vicino al committente, con un elevato potenziale di risparmio sui costi di trasporto e sui costi di inventario;
- 4) la possibilità di produrre componenti industriali con specifiche stringenti e bassa tolleranza e anche prodotti costituiti da più materiali;
- 5) la possibilità di effettuare modifiche di progetto senza particolari ripercussioni economiche negative e ritardi nei tempi di consegna.

Per Attaran¹⁶³ gli ostacoli alla rapida diffusione delle tecniche di produzione additiva sono invece:

¹⁶⁰ Ruben Ravnå, Per Schjøberg, 2016, op. cit., p. 10

¹⁶¹ Hung-An Kao, Wenjing Jin, David Siegel, Jay Lee, 2015, "A Cyber Physical Interface for Automation Systems—Methodology and Examples", *Machines*, 14 maggio 2015, p. 98

¹⁶² Mohsen Attaran, 2017, op. cit., pp.

¹⁶³ Mohsen Attaran, 2017, op. cit., pp.

- 1) le restrizioni sulle dimensioni dei pezzi producibili attraverso la stampa 3D, in quanto questi non possono superare il volume del macchinario stesso su cui sono prodotti. La produzione di oggetti di grandi dimensioni in alternativa può essere effettuata attraverso la stampa dei segmenti che vengono successivamente assemblati, ma in tal modo si limitano i benefici di adozione della tecnica;
- 2) le tempistiche di produzione elevate rispetto alle produzioni in serie tradizionali, che limitano la possibilità di introduzione della stampa 3D nella produzione di beni standardizzati almeno nel medio termine;
- 3) gli elevati costi di acquisto dei macchinari per la stampa 3D e delle materie prime utilizzate nel processo. Tali costi tenderanno però ad abbassarsi a mano a mano che le tecniche diventeranno più diffuse e sarà accresciuta la competitività del mercato;
- 4) la necessità di un adeguamento alle normative, poiché con l'utilizzo diffuso delle stampanti 3D anche presso i consumatori vi è il rischio di poter creare i presupposti per la produzione illegale di oggetti pericolosi per l'ordine pubblico.

Gli ambiti di applicazione delle tecniche di produzione additiva sono svariati e in alcune realtà sono già utilizzate diffusamente per la produzione di componenti industriali o per agevolare le attività di prototipazione. Esempi di settori in cui le tecniche di *additive manufacturing* sono ampiamente consolidate quelli aerospaziale e biomedico. In quest'ultimo ambito ad essere impiegata largamente è la tecnica che ha dato origine alla diffusione delle stampanti 3D, ovvero la stereolitografia. Tale processo, illustrato in Figura 14, è costituito da una vasca contenente una resina (o un altro materiale fotosensibile allo stato liquido) che viene solidificato o polimerizzato attraverso il passaggio di un laser ultravioletto¹⁶⁴. Il metodo tradizionale di stereolitografia parte da un modello dell'oggetto, progettato attraverso un software CAD, che viene convertito in un file STL (un formato creato appositamente per le applicazioni di stereolitografia) che riesce a suddividere virtualmente l'oggetto progettato in piani di spessore variabile (in funzione della attrezzatura adoperata) che contengono le informazioni necessarie per produrre ogni singolo strato. Durante il processo il pezzo è ancorato ad una piattaforma che ha anche funzione di supporto per le strutture a sbalzo. Al termine della polimerizzazione del primo strato, che avviene per mezzo di un laser a UV che segue il percorso tracciato nel file STL, la piattaforma si abbassa all'interno della vasca di resina liquida per consentire al sistema di passare alla deposizione di un secondo strato di materiale. Queste operazioni sono ripetute iterativamente fino a quando il pezzo non viene ultimato; al termine del processo la vasca di resina viene svuotata, il liquido residuo viene momentaneamente stoccato in un altro serbatoio per essere successivamente riutilizzato e l'oggetto creato può essere prelevato. La realizzazione di oggetti attraverso questa tecnica, così come avviene negli altri metodi di produzione additiva, risulta molto complessa e richiede una intensa attività di progettazione e di controllo dei parametri critici di processo per essere di buona qualità. Le ricerche effettuate sui parametri di processo più importanti del processo di stereolitografia (Processi PVP, Tabella 4) sono raggruppate in un lavoro svolto da

¹⁶⁴ Kaufui V.Wong, Aldo Hernandez, 2012, "A Review of Additive Manufacturing", International Scholarly Research Network (ISRN), 17 giugno 2012, pp.2-3

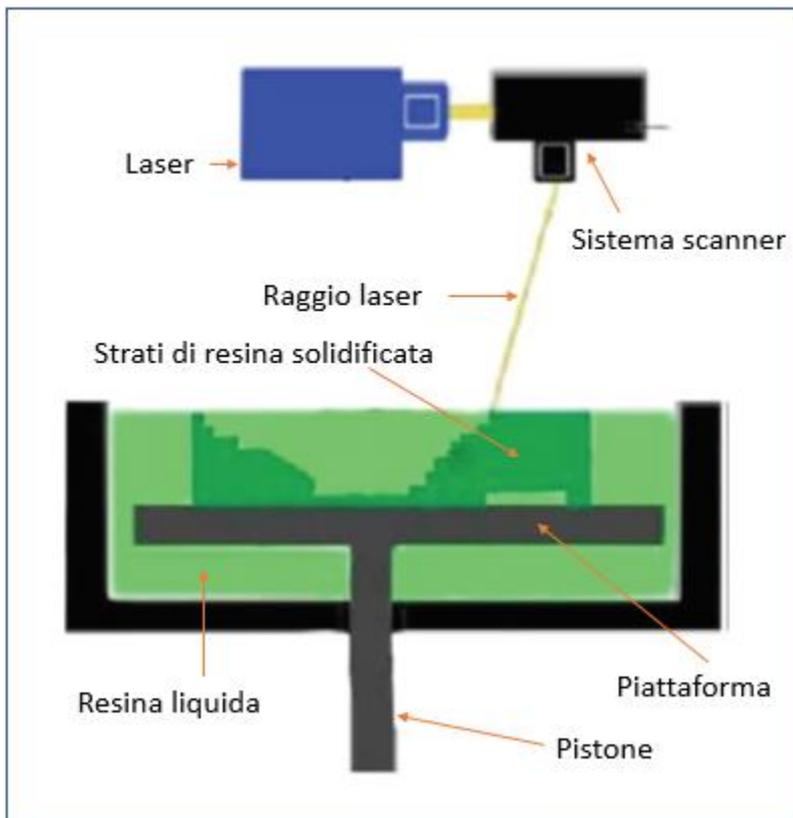


Figura 14: Illustrazione schematica del processo di stereolitografia

Kim, Lin e Tseng¹⁶⁵. Un primo elemento di criticità riscontrato nel processo è costituito dalla possibile presenza di stress termico all'interno del prodotto a seguito del ritiro termico causato dalla reazione esotermica sprigionata dal contratto tra il raggio laser e la soluzione di resina. La temperatura di reazione è anche funzione della velocità con cui viene effettuata la scansione, poiché gli studi effettuati mostrano che una velocità limitata nell'esecuzione dell'operazione porta a temperature e tassi di reazione più elevati. Altro parametro che influisce in modo rilevante sulla qualità degli output di questo processo è la viscosità del liquido utilizzato; sono in corso diversi studi e sperimentazioni che hanno lo scopo di cercare nuove soluzioni al fine di aumentare la versatilità e la qualità delle applicazioni. Le resine a bassa viscosità, ad esempio, consentono di ridurre i tempi di setup necessari alla pulitura e al drenaggio della vasca dai residui del materiale utilizzato nella precedente produzione, che risulta invece difficoltoso nei casi di resine con alto peso molecolare. Un altro aspetto che può influire sulla qualità superficiale del prodotto, sui tempi di realizzazione e sulle strutture di supporto è costituito dall'orientamento con cui è effettuato il processo. Seguendo le evoluzioni di questi parametri e con l'ausilio di software CAD, sono stati sviluppati metodi e algoritmi che consentono di individuare l'orientamento ottimale a seconda dei casi. Per il passaggio dei progetti CAD ai file STL sono inoltre stati ricercati e introdotti metodi di stratificazione adattiva che individuano i trade-off tra la finitura della superficie del pezzo, le tolleranze geometriche e i tempi di realizzazione.

¹⁶⁵ Hoejin Kim, Yirong Lin, Tzu-Liang Bill Tseng, 2018, op. cit., pp. 646-647

Tabella 10: Classificazione delle fasi che caratterizzano i processi di additive manufacturing e relativi controlli di qualità secondo Kim, Lin e Tseng

Fase	Procedure
Progettazione	Pre-controllo di qualità
	Preparazione del materiale
	Ottimizzazione dei parametri di progettazione
	Sviluppo analitico della modellazione
	Sviluppo algoritmi di data mining basati sulle previsioni di qualità
Stampa	Procedure di controllo qualità <i>in process</i>
	Ottimizzazione dei parametri di stampa
	Monitoraggio in tempo reale: raccolta dati basata su visione artificiale e elaborazione delle immagini
	Controllo della stampa in tempo reale: ciclo di feedback chiuso
Post processo	Controllo di qualità post processo
	Post trattamento: metodi di correzione dei difetti (per esempio ri-fusione dello strato), reazioni chimiche e termiche, sinterizzazione, pallinatura
Valutazione	Valutazione della qualità: qualità esterna e interna utilizzando la visione artificiale, la scansione 3D, test non distruttivi e distruttivi

Il controllo di qualità per la stereolitografia e le altre tecniche di produzione additiva è costituita da molteplici passaggi che devono essere svolti correttamente. Hollister *et al*¹⁶⁶, ad esempio, hanno proposto un processo di controllo in 5 fasi per un'applicazione in ambito medico. Tale processo necessita tuttavia di una fase di prototipazione del pezzo che allunga i tempi e fa aumentare i costi di realizzazione del pezzo. Per evitare questo genere di inconvenienti sarebbe necessaria la possibilità di regolare i parametri di interesse durante il processo in caso di necessità, rendendo il processo di controllo qualità molto più affidabile e in modo da effettuare azioni correttive immediate. Kim, Lin e Tseng¹⁶⁷ hanno proposto una classificazione dei controlli di qualità nel corso delle 4 fasi di processo di *additive manufacturing* in base alle procedure studiate dagli esperti (Tabella 10). Nella fase di progettazione vengono effettuati dei controlli preliminari di qualità che hanno come oggetto di ispezione i materiali scelti e il design del modello: i materiali non devono essere contaminati e non devono contenere pori che potrebbero inficiare le proprietà del pezzo finito, mentre una progettazione ottenuta utilizzando i parametri di processo ottimizzati è preconditione per il buon esito della produzione. Alcuni ricercatori si sono occupati di studiare ed implementare metodi per l'ottimizzazione dei parametri di processo attraverso il data mining e su algoritmi di previsione della qualità. La seconda fase, ovvero la stampa effettiva, è completamente automatizzata ed è per questo necessaria una configurazione ottimale dei parametri di stampa al fine di garantirne la qualità. Questo genere di controlli, come già accennato in precedenza, può avere un ruolo determinante sul risultato finale, ma per svolgere un ruolo proattivo e correttivo all'interno del processo, devono essere effettuati in tempo reale. Un gruppo di studiosi ha testato su un processo a getto di materiale (MJP)

¹⁶⁶ Scott J. Hollister, Colleen L. Flanagan, David A. Zopf, Robert J. Morrison, Hassan Nasser, Janki J. Patel, Edward Ebramzadeh, Sophia N. Sangiorgio, Matthew B. Wheeler, Glenn E. Green, 2015, "Design control for clinical translation of 3D printed modular scaffolds", *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 43, 1 marzo 2015, pp. 774-786

¹⁶⁷ Hoejin Kim, Yirong Lin, Tzu-Liang Bill Tseng, 2018, *op. cit.*, pp. 660-663

l'introduzione di metodi che consentono la correzione di fattori di design e di stampa in tempo reale per mezzo di feedback a circuito chiuso: per ogni strato di materiale depositato, il macchinario rileva e misura le differenze di profondità degli strati depositati e invia le informazioni ad un computer centrale che è in grado di regolare la quantità di gocce iniettate. Altri ricercatori hanno invece sperimentato sul metodo di fusione a fascio di elettroni (EBM) una tecnica che consente di correggere in situ gli errori commessi durante il processo. Nella terza fase, ovvero quella di post processo, è necessario eseguire un controllo preliminare del pezzo creato, al fine di verificare se il pezzo necessita di correzioni causate da materiale in eccesso o da una superficie irregolare. Nei processi di fusione in letto di polvere (PBF), ad esempio, la fase di post processo viene dedicata a trattamenti di pallinatura e sinterizzazione al fine di migliorare la finitura superficiale dei pezzi e le proprietà meccaniche dei pezzi. Per processi AM basati sull'estrusione (EBP) e sulla laminazione (SLP) di polimeri ABS, il miglioramento superficiale dei pezzi è ottenuto attraverso processi di taglio termico e chimico. Il quarto ed ultimo step del processo è costituito da una fase di valutazione del pezzo, che riguarda congiuntamente caratteristiche interne ed esterne. Oltre al controllo di conformità rispetto ai requisiti di progettazione, i controlli esterni possono essere eseguiti attraverso il supporto di strumentazione come tester di rugosità, calibri e sensori. I controlli interni possono essere fatti attraverso test distruttivi e non distruttivi. Per ottimizzare ed automatizzare questo processo di valutazione sono in corso svariate iniziative di ricerca. Per le produzioni AM di dimensioni microscopiche, ad esempio, è stato testato l'utilizzo di uno microscopio stereoscopico in grado di rilevare errori di costruzione localizzati in prossimità delle superfici in rilievo dei pezzi. Inoltre, per effettuare la valutazione interna dei pezzi senza dover ricorrere a prove distruttive, è stato testato sul campo un metodo microtomografia computerizzata, che risulta però molto costoso.

Per Kim, Lin e Tseng¹⁶⁸, inoltre, restano ancora aperte molte sfide per il futuro dei controlli di qualità delle tecniche AM. Innanzitutto è possibile sfruttare in modo più efficace la grande quantità di dati che vengono generati nelle fasi che costituiscono il processo in modo da facilitare l'attività di progettazione con l'ausilio dei dati storici a disposizione. Altro aspetto di potenziale miglioramento per i controlli di qualità futuri per le tecniche di produzione additiva è costituito dall'automazione delle tecniche di valutazione dei pezzi prodotti attraverso dispositivi integrati nel macchinario, che porterebbe ad un'accelerazione dei tempi di processo e ad una più immediata attività di analisi virtuale dei dati raccolti.

¹⁶⁸ Hoejin Kim, Yirong Lin, Tzu-Liang Bill Tseng, 2018, op. cit., pp. 663-664

Conclusioni

Nel presente elaborato di tesi è stata esaminata l'evoluzione del settore manifatturiero causata dall'introduzione della Quarta Rivoluzione Industriale, con particolare attenzione rivolta ai mutamenti in corso per i processi di controllo di qualità aziendali. Attraverso l'analisi delle pubblicazioni relative alle principali iniziative nazionali dei Paesi promotori di questo cambiamento, sono state tracciate le linee guida di questa rivoluzione che accomunano le diverse realtà e che invece sono peculiari per i singoli Stati industrializzati. Con l'ausilio della letteratura tecnica e scientifica disponibile sono state analizzate le principali tecnologie avanzate portate dall'Industria 4.0, e si è tentato di comprendere come l'introduzione di questi elementi innovativi possa modificare le routine del reparto qualità, sia in termini di modalità di esecuzione dei controlli, sia in termini di efficacia delle soluzioni implementate. La tematica del cambiamento del concetto di controllo di qualità è stata affrontata anche prendendo in considerazione le presupposte evoluzioni delle dinamiche aziendali e interaziendali all'interno delle filiere produttive con l'ausilio delle visioni dei principali esperti del settore.

Bibliografia

- Mario Hermann, Tobias Pentek, Boris Otto, 2015, “Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review”, Technische Universität Dortmund - Fakultät Maschinenbau, Audi Stiftungslehrstuhl Supply Net Order Management, Working Paper No. 01/2015
- “Federal Big Data Research and Development Strategic Plan”, Networking and Information Technology Research and Development (NITRD), www.nitrd.gov, maggio 2016
- Direzione generale della Ricerca e dell'innovazione (Commissione Europea), 2014, “Horizon 2020 in breve - Il programma quadro dell'UE per la ricerca e l'innovazione”
- EFFRA, 2016, “Factories 4.0 and Beyond- Recommendations for the work programme 18-19-20 of the FoF PPP under Horizon 2020”, 12 settembre 2016
- Plattform Industrie 4.0, “Digital Transformation „Made in Germany “”, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy Public Relations Division, marzo 2018
- Plattform Industrie 4.0, 2016, “Digitization of Industrie- Progress Report April 2016”, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), aprile 2016
- Jan Larosse, 2017, “Analysis of national initiatives on digitizing European industry- France: Alliance Industrie du Futur”, VANGUARD INITIATIVES Consult&Creation, ottobre 2017
- Ministero dello Sviluppo Economico, 2017, “Italy’s Plan Industria 4.0”
- Andreja Rojko, 2017, “Industry 4.0 Concept: Background and Overview”, International Journal of Information Management (IJIM)– Vol. 11, No. 5, 10 giugno 2017
- State Council (Cina), 2015, “Made in China 2025 《中国制造2025》”, 7 luglio 2015
- Luca Zorloni, “Made in China 2025, il piano di Pechino per diventare una potenza hi-tech”, www.wired.it, 15 giugno 2018
- Business Sweden Tokyo, 2017, “Seizing Industry 4.0 opportunities in Japan – Opportunities & barriers to implementation of Industry 4.0 in Japan”, aprile 2017
- Zoltán Pödör, Attila Gludovátz, László Bacsárdi, Imre Erdei, Ferenc Nandor Janky, 2017, “Industrial IoT techniques and solutions in wood industrial manufactures”, Infocommunications Journal, Volume 9, Numero 4, Dicembre 2017
- John Conway, 2015, “The Industrial Internet of Things: An Evolution to a Smart Manufacturing Enterprise”, Schneider Electric White Paper

- Yongkui Liu, Xun Xu, 2017, “Industry 4.0 and Cloud Manufacturing: A Comparative Analysis”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 139, marzo 2017
- Peter O’Donovan, Kevin Leahy, Ken Bruton, Dominic T. J. O’Sullivan, 2015, “Big data in manufacturing: a systematic mapping study”, Journal of Big Data, 13 settembre 2015
- McKinsey & Company, 2016, “Industry 4.0 after the initial hype - Where manufacturers are finding value and how they can best capture it”
- Oliviero Casale, 2018, “AICQ Industria 4.0 - Roma 30 maggio 2018”, Convegno AICQ Industria 4.0, 20 marzo 2018, Torino
- Maurizio Molinari, “Sorpresa robot nel mondo del lavoro”, La Stampa, 9 settembre 2018, p. 19
- Gunnar Johannsen, 2009, “Human-Machine Interaction”, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Vol.XXI,
- Benjamin Blankertz, Matthias Krauledat, Guido Dornhege, John Williamson, Roderick Murray-Smith, Klaus-Robert Muller, 2015, “Advanced Human-Computer Interaction with the Berlin Brain-Computer Interface”
- Hoejin Kim, Yirong Lin, Tzu-Liang Bill Tseng, 2018, "A review on quality control in additive manufacturing", Rapid Prototyping Journal
- Mohsen Attaran, 2017, “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing”, Business Horizons, Agosto 2017
- Rich Harwell, 2012, “The integrated HMI-PLC”, Industry Application, Eaton Corporation, Agosto 2012
- Giuseppe Palazzolo, 2017, “Innovazione a tutti i livelli per il mondo HMI”, Automazione Oggi, giugno-luglio 2017
- Massimiliano Ruggeri, 2016, “Sensori basati su Nanomateriali e Dispositivi MEMS per IoT, Smart Manufacturing e HMI”, Consiglio Nazionale delle Ricerche, 3 maggio 2016
- Siemens, 2014, “Human Machine Interface Systems/PC-based Automation”, Catalog ST 80/ST PC
- Intel IoT, 2016, “Optimizing Assets, Operations and the Workforce with Smart Manufacturing”, Fiera di Hannover 2016

- Andreas Schütze, Nikolai Helwig, Tizian Schneider, 2018, “Sensors 4.0 – smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0”, Journal of Sensors and Sensors Systems (JSSS), 9 maggio 2018
- Deloitte, 2018, “Using smart sensors to drive supply chain innovation”
- Mr. Mohammad Hassan, Mr. M.W.Khanooni, Mr. Naseeruddin Ali, Ms. Madiha Quazi, 2017, “Industrial Automation for Quality Control by SCADA”, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume 04, Issue 04, aprile 2017
- ISO: Quality management systems - Fundamentals and vocabulary (ISO 9000:2005), 2005
- Harald Foidl, Michael Felderer, 2016, “Research Challenges of Industry 4.0 for Quality Management”
- Malte Brettel, Niklas Friederichsen, Michael Keller, Marius Rosenberg, 2014, “How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective”, International Journal of Information and Communication Engineering
- Nur Hanifa Mohd Zaidin, Muhammad Nurazri Md Diah, Po Hui Yee, Shahryar Sorooshian, 2014, “Quality Management in Industry 4.0 Era”, Journal of Management and Science, Vol.4. No.3, settembre 2014
- Pwc, “Le opportunità Industry 4.0”, www.pwc.com/it/it/services/consulting/assets/docs/opportunita.pdf
- Anne-Francoise Cutting-Decelle, Bob. I. Young, Bishnu P. Das, Keith Case, Shahin Rahimifard, Chimay J. Anumba, Dino M. Bouchlaghem, 2007, “A Review of approaches to Supply Chain Communication: from manufacturing to construction”, ITcon, Volume 12, gennaio 2007
- Marina Crnjac, Ivica Veža, Nikola Banduka, 2017, “From Concept to the Introduction of Industry 4.0”, International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM), Volume 8, No 1, 2 marzo 2017
- Lucas Santos Dalenogare, Guilherme Brittes Benitez, Néstor Fabián Ayala, Alejandro Germán Frank, 2018, “The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance”, International Journal of Production Economics, agosto 2018
- Rashmi Jain, Anithashree Chandrasekaran, Ozgur Erol, 2010, “A framework for end-to-end approach to Systems Integration”, International Journal of Industrial and Systems Engineering, Volume 5, No. 1

- Atin Angrisha, Benjamin Cravera, Mahmud Hasana, Binil Starlya, 2018, “A Case Study for Blockchain in Manufacturing: “FabRec”: A Prototype for Peer-to-Peer Network of Manufacturing Nodes”, Elsevier, NAMRC 46, Texas, USA
- Martin Bookjans, Albert Weckenmann, 2010, “Virtual Quality Management - Validation of measurement systems by the use of simulation technologies”, Physics Procedia, Vol. 5, Elsevier
- Martin Bookjans, Albert Weckenmann, 2014, “Virtual Quality Management: simulative evaluation of Quality Control Charts by use of Quality Orientated Process Models”
- Stefan Bodi, Sorin Popescu, Calin Drageanu, Dorin Popescu, 2015, “Virtual Quality Management elements in optimized new product development using genetic algorithms”, TIIM & makelearn Joint International Scientific Conference, Bari, 27-29 maggio 2015
- Roberto Cafferata, Corrado Gatti, 2003, “Casi di Economia e Gestione delle Imprese”, Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”, Dipartimento di Studi sull’Impresa
- James E. Ashton, Frank X. Cook, Jr., 1989, “Time to Reform Job Shop Manufacturing, Harvard Business Review, marzo-aprile 1989
- S. S. Pande, “Inspection and Quality Control”, Mechanical Engineering Department Indian Institute of Technology, Bombay
- Brian Hoey, “The Marriage of Industry 4.0 and Job Shop Scheduling”, www.blog.flexis.com, 28 agosto 2018
- Nicolò Grammatico, “Macchine CNC: Cosa sono e come funzionano”, www.ronchinimassimo.com, 1° giugno 2017
- David Greenfield, “Choosing Between Cobots and Industrial Robots”, www.automationworld.com, 10 agosto 2017
- Stefano Maggi, 2017, “Che futuro per il binomio automazione e robotica?”, Automazione Oggi, giugno-luglio 2017
- Maximiliane Wilkesmann, Uwe Wilkesmann, 2018, "Industry 4.0 – organizing routines or innovations?", VINE Journal of Information and Knowledge Management Systems, Vol. 48, Issue: 2
- László Monostori, 2014, “Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges”, 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Elsevier

- Elisabete Carolino, Isabel Barão, 2013, “Robust methods in Acceptance Sampling”, REVSTAT – Statistical Journal Volume 11, Num. 1, marzo 2013
- Hypertherm, 2018, “Famiglia di software CAD/CAM - Applicazione schema di taglio, layout tubi e lamiere”
- Axel Schmidt, 2017, “Two years’ experience with Collaborative Robots (Cobots) in a low volume manufacturing environment”, Sennheiser
- Daniela Todorova, John Dugger, 2015, “Lean Manufacturing Tools In Job Shop, Batch Shop and Assembly Line Manufacturing Settings”, The Journal of Technology, Management, and Applied Engineering (JTMAE), Volume 31, Num. 1, gennaio-marzo 2015
- Logisticamente.it, 2005, “I processi produttivi: classificazione e strategie”, 21 novembre 2005
- IFS, 2013, “Using ERP for Process Manufacturing Quality Management”, Whitepaper
- Eric S. Richter, Arthur L. McClellan, 2015, “Process Approach to Determining Quality Inspection Deployment”, The Aerospace Corporation, 8 giugno 2015
- Patrizio Emilia, 2017, “Risparmiare tempo e sforzo ingegneristico”, Automazione Oggi, giugno-luglio 2017
- Li Da Xu & Lian Duan, 2018, “Big data for cyber physical systems in industry 4.0: a survey”, Enterprise Information Systems
- Glenn Ballard, Iris Tommelein, 1999, “Aiming for Continuous Flow”, LCI White Paper, Num. 3, 5 marzo 1999
- Mahmoud Abbas Mahmoud, 2014, “Classifications of production systems”, University of Technology Baghdad, Iraq, 2014-2015
- Vicki Holt, 2018, “Five Expert Insights into Digital Manufacturing and Mass Customization”, IndustryWeek, 19 luglio 2018
- Anshuk Gandhi, Carmen Magar, Roger Roberts, 2013, “How technology can drive the next way of mass customization”, McKinsey & Company, Business Technology, 2013
- Luca Dotti, 2017, “seleziona e discrimina”, Automazione Oggi, giugno-luglio 2017
- Sung Hyun Park, Wan Seon Shin, Young Hyun Park, Youngjo Lee, 2017, “Building a new culture for quality management in the era of the Fourth Industrial Revolution”, Total Quality Management & Business Excellence, 2017

- Marco Catizone, 2017, “La chiave per la soluzione migliore”, Automazione Oggi, giugno-luglio 2017
- Madhav Patil, Jack Toporovsky, L. Hmurcik, Tarek Sobh, 2012, “Integration of Vision System, Intelligent ROBO Actuator, HMI and PLC to Design a Universal Quality Inspection or Control Machine”, i-manager’s Journal, Mechanical Engineering, Vol. 2, No. 3, maggio-giugno 2012
- Ruben Ravnå, Per Schjølberg, 2016, “Industry 4.0 and Maintenance”, Norsk Forening for Vedlikehold (NFV)
- Hung-An Kao, Wenjing Jin, David Siegel, Jay Lee, 2015, “A Cyber Physical Interface for Automation Systems—Methodology and Examples”, Machines, 14 maggio 2015
- Kaufui V. Wong, Aldo Hernandez, 2012, “A Review of Additive Manufacturing”, International Scholarly Research Network (ISRN), 17 giugno 2012
- Scott J Hollister, Colleen L. Flanagan, David A. Zopf, Robert J. Morrison, Hassan Nasser, Janki J. Patel, Edward Ebramzadeh, Sophia N. Sangiorgio, Matthew B. Wheeler, Glenn E. Green, 2015, “Design control for clinical translation of 3D printed modular scaffolds”, Annals of Biomedical Engineering, Vol. 43, 1 marzo 2015
- Universal Robot, “How cobots are changing Quality Assurance in manufacturing”, blog.universal-robots.com, 26 gennaio 2017
- Matthias Steffan, Franz Haas, Alexander Pierer, Gentzen Jens, 2017, “Adaptive Grinding Process—Prevention of Thermal Damage Using OPC-UA Technique and In Situ Metrology”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME
- Nasser Jazdi, 2014, “Cyber Physical Systems in the Context of Industry 4.0”, Institute of Industrial Automation and Software Engineering, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany
- ZVEI, “Industrie 4.0: MES – Prerequisite for Digital Operation and Production Management”, German Electrical and Electronic Manufacturers’ Association, agosto 2017
- Niels Martin, Marijke Swennen, Benoît Depaire, Mieke Jans, An Caris, Koen Vanhoof, 2015, “Batch Processing: Definition and Event Log Identification”, 5th International Symposium on Data-driven Process Discovery and Analysis, Vienna, dicembre 2015

Sitografia

- www.bcg.com/it-it/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.aspx
- www.blog.flexis.com
- www.ronchinimassimo.com
- www.qualitiamo.com
- www.plattform-i40.de
- www.ec.europa.eu/horizon2020
- www.business-sweden.se
- www.i-jim.org
- www.daqri.com
- www.pwc.com/it/it/services/consulting/assets/docs/opportunita.pdf
- www.directindustry.it/prod/nikon-metrology/product-21023-447264.html
- www.zeiss.com/metrology/products/systems/computed-tomography/metrotom.html
- www.hartwiginc.com/wp-content/uploads/2015/07/Kellenberger-KEL_VARIA-Brochure.pdf
- http://www.logisticamente.it/Articoli/5810/I_processi_produttivi_classificazione_e_strategie/
- www.innovationpost.it/wp-content/uploads/2016/12/epon.jpg (Fig. 1)
- www.google.it/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjAvO3Pn7HeAhWFz4UKHf1B0kQjRx6BAgBEAU&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FElements-of-the-Virtual-Quality-Management_fig1_243652475&psig=AOvVaw3p2VcqjO-F-LDcnJAuyO55&ust=1541094784965684 (Fig. 2)
- <http://donar.messe.de/exhibitor/hannovermesse/2017/U208979/dsh-data-sheet-eng-495327.pdf> (Figg. 3-4)
- <https://www.google.it/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi8vqOTx-zeAhUO66QKHTCjAyEQjRx6BAgBEAU&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FGeneric-configuration-of-a-supply-chain-in-manufacturing-Vrijhoef-Koskela-> (Fig. 6)

- https://www.rockwellautomation.com/resources/images/rockwellautomation/photograph/large/DS4--graphic_280w.jpg (Fig. 13)

Ringraziamenti

Al termine di questo elaborato desidero ringraziare alcune persone che sono state determinanti per il raggiungimento di questo mio traguardo.

In primo luogo, desidero ringraziare il Prof. Maurizio Galetto per avermi assistito assiduamente e tempestivamente in tutte le fasi della stesura di questa tesi.

Desidero, inoltre, ringraziare la mia famiglia che mi ha garantito il supporto morale ed economico per poter portare a termine questo lungo percorso in tranquillità e la mia Lulù, che è sempre stata al mio fianco negli ultimi anni. Un pensiero affettuoso va anche a Steu e Cia, che purtroppo non hanno potuto vedere la fine di questa mia esperienza ma che sento comunque vicini in ogni momento. Infine, desidero ricordare tutti i miei compagni di viaggio: a chi mi ha accompagnato all'inizio del percorso, a chi mi è stato vicino nel prosieguo e anche a chi ho avuto modo di conoscere soltanto nelle ultime fasi esprimo sentitamente e in egual misura la gratitudine per tutti i bei momenti trascorsi insieme che hanno reso meno lunghe e faticose le mie giornate al Poli.