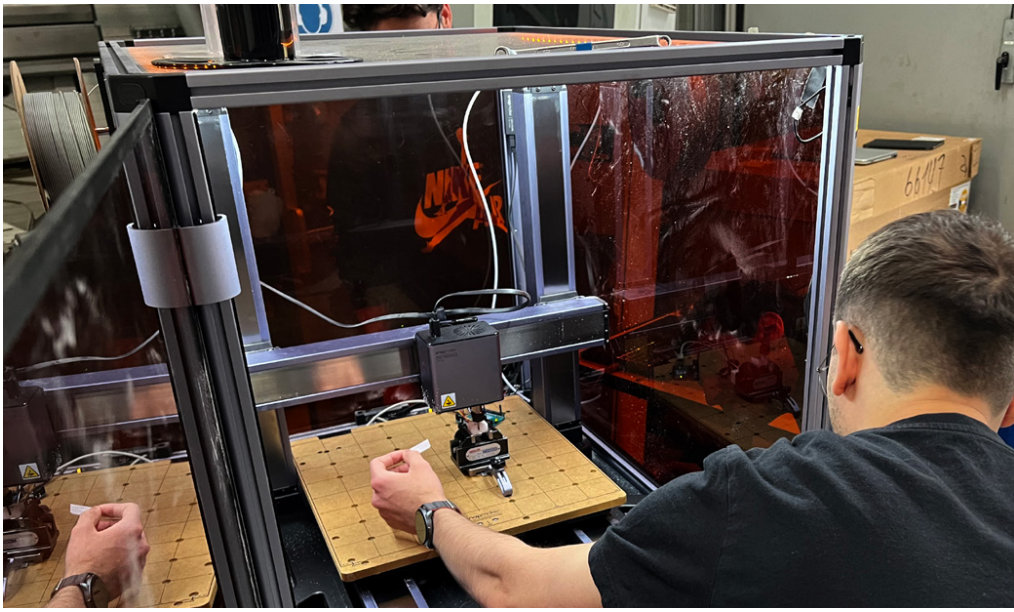
La manifattura in Italia è un pilastro fondamentale dell'economia, occupando un sesto della forza lavoro e contribuendo in uguale misura al PIL nazionale



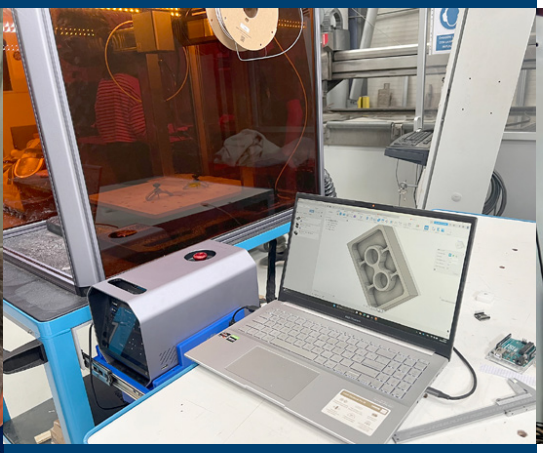
■ **Massimiliano Annoni**

Il Manufacturing al centro della formazione

Rispetto ad altri grandi Paesi dell'Unione Europea, l'Italia si distingue per la grande presenza di piccole e medie imprese (PMI), in particolare microimprese (cioè con meno di 9 dipendenti). Tuttavia, proprio queste microimprese presentano una delle produttività più basse tra le principali economie europee, a causa dello scarso sviluppo di asset immateriali, indispensabili per l'innovazione. Per rispondere a questa sfida, il laboratorio di ricerca PoliMill ha avviato un approccio olistico alla formazione in ambito manifatturiero, integrando percorsi formali e non formali. L'approccio formale, che include metodi tradizionali e il problem-based learning, punta a formare una nuova generazione di ingegneri specializzati nella digitalizzazione della manifattura, capaci di rafforzare le aziende in cui lavoreranno. L'approccio non formale, invece, è pensato per riqualificare e aggiornare i lavoratori già attivi nelle PMI, rendendoli in grado di comprendere e contribuire al valore aggiunto della digitalizzazione, quindi capaci di sviluppare asset di conoscenza una volta tornati in azienda.

La manifattura è uno dei motori principali della crescita nell'Unione Europea. Secondo Eurostat, nel 2022 si contavano 2,2 milioni di imprese manifatturiere, con 30 milioni di lavoratori e un valore aggiunto annuale di 2.400 miliardi di euro. Fernandez e Palazuelos (2018), analizzando dati storici, hanno concluso che la crescita dell'UE dipende fortemente dalla capacità del settore industriale di innovare e che le politiche per aumentare la produttività dovrebbero puntare su questo. Anche Behun et al. hanno rilevato che lo sviluppo economico dei principali paesi europei è strettamente legato allo stato dell'industria manifatturiera, correlata direttamente al PIL nazionale.

Le PMI sono il cuore della manifattura europea: impiegano oltre la metà della forza lavoro del settore (circa 15,5 milioni di persone) e generano un terzo del valore aggiunto. Non sorprende che la produttività apparente del lavoro delle PMI sia inferiore rispetto alle grandi imprese, crescendo in modo lineare con la dimensione aziendale. In questo contesto, la trasformazione digitale e il paradigma di Industria 4.0



In apertura: Azzeramento del pezzo sulla Snapmaker Artisan (frese Sandvik Coromant)

In alto: Uno dei pezzi lavorati dagli studenti in una schermata di Fusion 360. È visibile nella foto una scheda Arduino usata per acquisire dati di accelerazione della morsa

Sopra: Lavoro di gruppo nel laboratorio di Tecnologie del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano

A destra: Lezione pratica di metrologia ottica 3D sullo strumento Bruker Alicona Focus X usato per la verifica dimensionale dei pezzi lavorati

Nelle figure di questo articolo si possono osservare varie fasi dello svolgimento del corso LAB - Digital Machining, tenutosi da febbraio a giugno 2025 presso il Politecnico di Milano

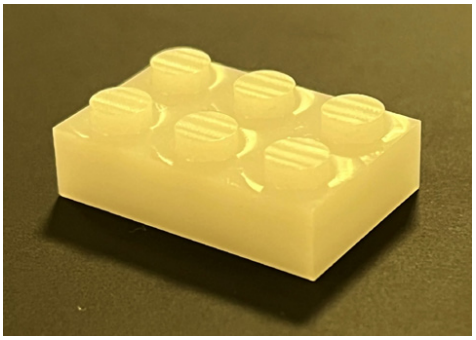
(I4.0) sono considerati da molti strumenti chiave per accrescere la competitività delle PMI. Tuttavia, come evidenziano Sabog e Chovancova, gli strumenti digitali non sono sufficienti da soli: per essere efficaci devono essere accompagnati da una formazione costante e strutturata. La formazione nelle PMI è spesso complessa, reattiva e a breve termine, con il rischio di essere addirittura controproducente se mal organizzata. La formazione dovrebbe invece servire a generare nuovi asset di conoscenza o a valorizzare quelli esistenti, abilitando nuovi prodotti o strategie. La digitalizzazione è una leva fondamentale per sviluppare questi asset e prepararsi a contesti incerti, situazione che le PMI tendono a gestire peggio rispetto alle grandi imprese. Hulla et al. identificano le competenze chiave su cui puntare: riconoscere le potenzialità della digitalizzazione, conoscere le tecnologie digitali e saper sviluppare ed eseguire una roadmap digitale.

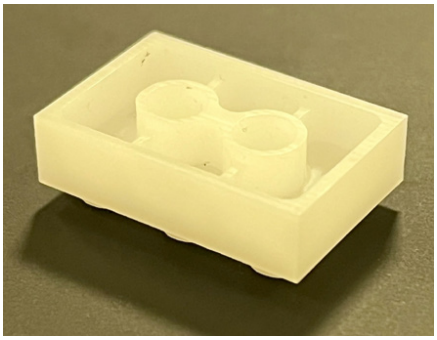
Le PMI italiane del Manufacturing: opportunità e sfide

Secondo il Rapporto Eurostat “Businesses in the Manufacturing Sector”, il valore aggiunto della manifattura italiana ammonta a circa 274 miliardi di euro, ossia quasi un settimo del PIL italiano, e occupa circa 3,79 milioni di persone, un settimo della forza lavoro totale. Inoltre, il 20% dell’intera forza lavoro manifatturiera è impiegata nelle cosiddette microimprese, ovvero realtà con un numero di dipendenti compreso tra 0 e 9, un vero e proprio unicum per una potenza economica di tale dimensione.

La manifattura rappresenta dunque un settore di grande rilievo ed è una colonna portante dell’economia italiana e dei suoi partner esteri. Infatti, l’ISTAT, l’Istituto nazionale di statistica, nel suo rapporto annuale del 2024, ha evidenziato che il 45% della produzione italiana viene utilizzato come input per processi produttivi esteri. Il problema risiede nel fatto che la dipendenza strategica italiana è aumentata rispetto ad altri Paesi, mentre la sua rilevanza strategica a livello globale è diminuita.

Le ragioni della perdita di competitività italiana a livello macroeconomico sono molteplici e non è l’obiettivo di questo articolo discuterle nel dettaglio, ma l’ISTAT individua nella perdita della capacità produttiva manifatturiera una delle cause principali. Inoltre, la scarsa produttività (e quindi competitività) delle imprese italiane si concentra soprattutto nelle microimprese, mentre per altre dimensioni aziendali l’Italia risulta spesso la più competitiva tra le grandi potenze europee. Infine, l’ISTAT ipotizza che questa mancanza di competitività potrebbe essere





Uno dei pezzi fresati dagli studenti (materiale POM-c)

Tabella 1: Argomenti, obiettivi di apprendimento, metodi didattici e competenze acquisite grazie al corso Digital Machining B.

Argomento	Obiettivi di apprendimento	Metodi didattici	Competenze acquisite
Macchine utensili	Identificare i componenti di una macchina utensile e le loro performance	Apprendimento tradizionale	Conoscenza generica delle tecnologie
Digital Workflow	Selezionare la sequenza di azioni digitali per lavorare correttamente pezzi meccanici al primo tentativo	Apprendimento tradizionale	Implementazione di idee in produzione, know-how di processo, creazione e esecuzione di una roadmap di digitalizzazione, capacità di creare valore grazie alla digitalizzazione
Previsione delle forze di taglio mediante modelli meccanicistici	Usare modelli meccanicistici per stimare le forze e prevedere la stabilità e la qualità della lavorazione	Apprendimento tradizionale	Data analytics e interpretazione
Computer Aided Manufacturing (CAM)	Capire gli algoritmi e la logica dei software CAM	Apprendimento tradizionale	Riconoscere il potenziale della digitalizzazione, conoscenza di base delle tecnologie digitali, capacità di creare valore grazie alla digitalizzazione
Simulazione della macchina utensile	Capire come usare la simulazione nelle sue diverse forme per stimare la qualità del percorso utensile	Apprendimento tradizionale	Riconoscere il potenziale della digitalizzazione, conoscenza di base delle tecnologie digitali, capacità di creare valore grazie alla digitalizzazione
Monitoraggio di processo	Capire come monitorare le lavorazioni attraverso tool dedicati	Apprendimento tradizionale	Data analytics e interpretazione
Metrologia	Capire come effettuare verifiche GD&T per componenti lavorati	Apprendimento tradizionale	Riconoscere il potenziale della digitalizzazione, conoscenza di base delle tecnologie digitali, capacità di creare valore grazie alla digitalizzazione
Lab Work	Progettare un flusso di lavoro digitale completo dato un certo componente da lavorare e una macchina utensile	Problem-based Learning	Capacità di pensiero innovativo, capacità di problem solving, capacità di lavoro di gruppo e collaborazione, comunicazione, creazione e esecuzione di una roadmap digitale, capacità di decision making

superata se le microimprese investissero maggiormente in "beni immateriali o prodotti di proprietà intellettuale" come la ricerca e sviluppo, il software e, non da ultimo, la formazione.

Istruzione formale e non formale

Ormai è chiaro come la formazione e l'istruzione influenzino in modo significativo il futuro delle PMI e delle persone che vi lavorano. Tuttavia, esistono due tipi di formazione che possono avere un impatto distinto.

L'istruzione formale è definita come l'apprendimento all'interno di un sistema scolastico. Il programma educativo è verificato e riconosciuto, ed è organizzato da insegnanti professionisti. Inoltre, il completamento con successo del percorso viene attestato da un diploma o un certificato di laurea. L'istruzione non formale si svolge al di fuori del sistema di istruzione formale. Le qualifiche che permette di ottenere non modificano il livello di istruzione dell'individuo. Essa può assumere diverse forme, come workshop, seminari o corsi, e ha principalmente l'obiettivo di migliorare le competenze di una persona in un'area specifica di specializzazione.

Il laboratorio di ricerca PoliMill, specializzato nella digitalizzazione dei processi di produzione, ritiene fondamentale affrontare entrambe le aree dell'istruzione per generare un impatto si-

Un momento della presentazione finale del Lab Work di fronte ai docenti

gnificativo. Per questo motivo, il laboratorio ha adottato un approccio a doppio binario con l'obiettivo esplicito di insegnare la digitalizzazione dei processi di asportazione truciolo.
L'istruzione formale si realizza attraverso una serie di corsi di livello magistrale, che mirano a insegnare sia gli aspetti teorici sia quelli pratici della digitalizzazione. L'obiettivo è formare una nuova generazione di ingegneri che considerino la manifattura un aspetto fondamentale del loro lavoro e del loro modo di pensare. Ingegneri dotati delle competenze per portare idee innovative nelle PMI in cui lavoreranno, permettendo loro di non rimanere ancorati ai vecchi paradigmi di cosa sia o debba essere la manifattura.
L'istruzione non formale viene svolta tramite corsi e workshop organizzati dal laboratorio per il potenziamento e la riqualificazione delle competenze. L'obiettivo è lasciare ai partecipanti il dubbio su eventuali margini di miglioramento dei loro processi, mostrando tecnologie e procedure all'avanguardia, già collaudate a livello industriale. Questo aiuta le PMI a innovare nel breve-medio termine, mentre le nuove generazioni di ingegneri escono progressivamente dal sistema di istruzione superiore ed entrano nel mondo del lavoro.

Istruzione formale, il ruolo delle lezioni frontali (apprendimento tradizionale)

Il ruolo dell'apprendimento tradizionale, basato su un paradigma centrato sull'insegnante e sulle lezioni frontali, resta centrale ed è di fondamentale importanza nell'insegnamento di materie complesse che richiedono un solido background teorico. Una futura generazione di leader e innovatori deve non solo comprendere il "come" si applica il paradigma Industria 4.0, ma anche il "perché", e questo può avvenire solo attraverso una solida base teorica.
Per questo motivo, il corso Digital Machining B (offerto come corso a sé stante oppure all'interno del corso Digital Machining A, nel secondo anno della Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica del Politecnico di Milano, track Sustainable Manufacturing Engineering (CM4)) affronta gli aspetti principali delle macchine uten-

Argomento	Obiettivi di apprendimento	Metodi didattici	Competenze acquisite
Selezione degli utensili	Scegliere gli utensili mediante l'uso di software industriale	Apprendimento tradizionale / Learning by doing	Conoscenza generica delle tecnologie
Computer Aided Manufacturing (CAM)	Selezionare/progettare le strategie di lavorazione usando software industriali di riferimento	Apprendimento tradizionale / Learning by doing	Riconoscere il potenziale della digitalizzazione, capacità di creare valore grazie alla digitalizzazione, capacità di interagire con interfacce software moderne
Simulazione della macchina utensile	Simulare la strategia di lavorazione selezionata mediante un software industriale di riferimento allo scopo di verificare le collisioni usando la cinematica specifica della macchina	Apprendimento tradizionale / Learning by doing	Riconoscere il potenziale della digitalizzazione, capacità di creare valore grazie alla digitalizzazione, capacità di interagire con interfacce software moderne
Monitoraggio	Applicare un sistema di misura basato su IIoT (MEMS sensori, bus di comunicazione, protocolli) e rendere i dati disponibili a sistemi di supervisione (field-devices, gateway, cloud)	Apprendimento tradizionale / Learning by doing	Data analytics e interpretazione
Metrologia	Effettuare verifiche GD&T mediante l'uso di PMI (Product Manufacturing Information)	Apprendimento tradizionale	Riconoscere il potenziale della digitalizzazione, capacità di creare valore grazie alla digitalizzazione
Lab Work	Progettare un flusso di lavoro digitale completo comprendente la reale lavorazione del componente assegnato	Problem-based Learning	Capacità di pensiero innovativo, capacità di problem solving, capacità di lavoro di gruppo e collaborazione, comunicazione, creazione e esecuzione di una roadmap digitale, capacità di decision making

Tabella 2: Argomenti, obiettivi di apprendimento, metodi didattici e competenze acquisite del corso LAB - Digital Machining

Cybersecurity: un momento di un'attività di gruppo in cui i partecipanti aziendali competono per provare a violare una macchina CNC nel minor tempo possibile. L'attività è progettata per sensibilizzare sull'importanza di creare e mantenere una cybersicurezza efficace nelle infrastrutture industriali (corso Digital Machining per le aziende)

Argomento	Obiettivi di apprendimento	Metodi didattici	Competenze acquisite
Coppia e potenza al mandrino di una macchina utensile	Capire come queste due variabili chiave interagiscono tra loro e sono fondamentali per scegliere il diametro dell'utensile e i parametri di lavorazione	Apprendimento tradizionale / Problem-based Learning	Conoscenza generica delle tecnologie
Selezione degli utensili	Scegliere gli utensili più adatti mediante software industriale allo stato dell'arte	Apprendimento tradizionale	Conoscenza di base delle tecnologie digitali, Riconoscere il potenziale della digitalizzazione
Selezione delle attrezzature di bloccaggio	Scegliere l'attrezzatura più adatta per il tipo di componente e il tipo di macchina utensile	Apprendimento tradizionale	Conoscenza generica delle tecnologie
Selezione dei tool holder	Scegliere i vari tipi di portautensili in funzione dell'obiettivo della lavorazione	Apprendimento tradizionale	Conoscenza generica delle tecnologie
Computer Aided Manufacturing (CAM)	Capire le caratteristiche principali di un software industriale allo stato dell'arte e il suo potenziale in produzione	Learning by doing	Riconoscere il potenziale della digitalizzazione, capacità di creare valore grazie alla digitalizzazione, capacità di interagire con interfacce software moderne
Simulazione della macchina utensile	Capire le caratteristiche principali di un software industriale allo stato dell'arte e il suo potenziale in produzione	Learning by doing	Riconoscere il potenziale della digitalizzazione, capacità di creare valore grazie alla digitalizzazione, capacità di interagire con interfacce software moderne
Fluidi da taglio	Scegliere il fluido da taglio corretto per il materiale target e la lavorazione da svolgere	Apprendimento tradizionale	Conoscenza generica delle tecnologie
Metrologia	Capire come effettuare verifiche GD&T per componenti lavorati mediante metrologia ottica 3D	Apprendimento tradizionale	Conoscenza di base delle tecnologie digitali, Riconoscere il potenziale della digitalizzazione
Lavorabilità di acciai a alte prestazioni	Capire le caratteristiche e le opportunità della lavorazione di acciai a alte prestazioni	Apprendimento tradizionale	Conoscenza generica delle tecnologie
Cybersecurity	Valutare il rischio di esporre le macchine utensili a internet	Apprendimento tradizionale / Problem-based learning	Competenze ICT, capacità di lavoro di gruppo e collaborazione, Conoscenza di base delle tecnologie digitali
AR/VR	Capire le capacità dell'extended reality (XR) per la formazione del personale	Apprendimento tradizionale / Learning by doing	Conoscenza di base delle tecnologie digitali, Riconoscere il potenziale della digitalizzazione

Tabella 3: Argomenti, obiettivi di apprendimento, metodi didattici e competenze acquisite del corso Digital Machining per le PMI (Competenze acquisite tratte da M. Hulla et al. (2019, 2021).

sili in termini di cinematica, controllo e funzionalità, per poi entrare nel dettaglio della digitalizzazione presentando software industriali all'avanguardia come simulatori e CAM quali VERICUT e Siemens NX. Il corso, come si può vedere nella Tabella 1, mira a coprire tutti gli argomenti centrali per la digitalizzazione nei processi di asportazione truciolo, permettendo agli studenti di sviluppare competenze chiave creando una roadmap di digitalizzazione e la capacità di generare valore basato sulla digitalizzazione, essenziale per promuovere il cambiamento nelle PMI.
Il corso è principalmente orientato all'apprendimento tradizionale, ma il lavoro finale di laboratorio, basato sul problem-based learning, è progettato per sviluppare nelle studentesse e negli studenti capacità di pensiero critico, affrontando un caso reale di lavorazione meccanica e applicando le conoscenze precedentemente acquisite.

Il ruolo dei laboratori *(Learning by doing)*

L'apprendimento pratico ("learning by doing") da tempo rappresenta un pilastro fondamentale per l'acquisizione di competenze specifiche in un'applicazione o in un campo determinato. Il laboratorio diventa quindi un complemento all'apprendimento in aula, permettendo agli studenti di applicare le conoscenze acquisite a casi pratici. Nel corso LAB - Digital Machining (offerto nel secondo anno della Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica del Politecnico di Milano, track Sustainable Manufacturing Engineering (CM4)), gli studenti imparano a realizzare componenti semplici utilizzando una fresatrice a tre assi (Snapmaker Artisan) e un software CAM commerciale (Fusion 360), e vengono valutati in base all'accuratezza e al tempo ciclo che riescono a raggiungere. La Tabella 2 illustra come il corso sia fortemente orientato ad attività di learning by doing, necessarie affinché gli studenti acquisiscano dimestichezza e competenza nell'uso di software industriali e nelle pratiche fondamentali per incrementare la produttività nelle PMI manifatturiere. Infine, per testare a fondo le capacità degli studenti, la valutazione finale si basa su un approccio di problem-based learning, progettato per sviluppare competenze di lavoro di gruppo e pensiero innovativo.

Il corso per le aziende, chiamato Digital Machining per coerenza con il corso universitario, è organizzato dal gruppo PoliMill ed è esterno all'università

Il ruolo della ricerca *(Coaching and Mentoring)*

Infine, il gruppo PoliMill attribuisce grande importanza ai lavori di tesi, in cui spesso sono richieste competenze trasversali per risolvere problemi complessi, come la conoscenza di linguaggi di programmazione quali Python o C++, la padronanza di temi avanzati come l'intelligenza artificiale (AI) e l'Internet industriale delle cose (IIoT) e, naturalmente, la capacità di integrare tutti questi ambiti per offrire soluzioni migliori e più avanzate alle sfide dell'ecosistema manifatturiero, dall'automazione dei processi al loro miglioramento in termini di stabilità.

Istruzione non formale: Workshop (apprendimento tradizionale) e corsi per aziende

Il gruppo PoliMill organizza inoltre workshop insieme ai suoi consolidati partner industriali con l'obiettivo di presentare alle PMI le tecnologie industriali emergenti. I workshop sono tematici e affrontano settori specifici come biomedicale, aerospaziale o automotive.
I partecipanti sono incoraggiati non solo a prendere parte e ad approfondire le nuove tecnologie, ma anche a contribuire alla successiva tavola rotonda, durante la quale si discutono problemi specifici che affliggono la manifattura, come la carenza di manodopera qualificata o le difficoltà legate alla digitalizzazione e alle nuove tecnologie, ad esempio l'intelligenza artificiale.
Il corso per le aziende, chiamato Digital Machining per coerenza con il corso universitario, è organizzato dal gruppo PoliMill ed è esterno all'università. Come detto, ha l'obiettivo di riqualificare e aggiornare le competenze dei dipendenti delle PMI, mostrando le potenzialità delle tecnologie più avanzate disponibili oggi (https://www.polimill.polimi.it/eventi-download/).
La Tabella 3 fornisce una panoramica degli argomenti trattati e delle competenze che si possono acquisire; il corso è concepito in modo molto trasversale, senza un approfondimento eccessivo dei singoli temi, poiché l'obiettivo principale è permettere alle PMI partecipanti di familiarizzare con il valore aggiunto della digitalizzazione. Questo risultato viene raggiunto attraverso un mix di apprendimento tradizionale e apprendimento pratico ("learning by doing"), soprattutto nell'ambito software, dato che secondo il personale PoliMill questo approccio aiuta a ridurre la diffidenza che alcuni possono avere verso le pratiche di digitalizzazione e a trasmettere in modo più efficace il valore aggiunto di tali soluzioni. Un esempio di questo approccio è riportato in Figura 1.

Conclusioni

PoliMill ritiene che l'educazione nel campo della manifattura richieda un approccio olistico. Per questo motivo sono state investite e continuano a essere investite risorse significative per supportare le attività descritte in precedenza. Le PMI devono innovare per sopravvivere, e questo può avvenire solo se ci impegniamo a cambiare il futuro e a rimodellare il contesto attuale in cui operano le aziende italiane. È ancora presto per dire se questi sforzi siano sufficienti, tuttavia va sottolineato che l'engagement sui social delle attività del gruppo in ambito formativo è triplicato nei 18 mesi successivi al lancio del primo corso (https://www.polimill.polimi.it). L'autore ritiene che questo doppio approccio - educare le future generazioni di ingegneri su come implementare l'innovazione e formare le generazioni attuali di lavoratori sul perché l'innovazione è necessaria - sia la chiave per aumentare la produttività delle PMI in Italia e all'estero.

Ringraziamenti

L'autore ringrazia i colleghi Francesco Barna, per il lavoro di ricerca e di stato dell'arte alla base di questo articolo, Alessandro Tenconi e Antonio Costetti, per la gestione della parte del corso LAB – Digital Machining legata al CAM, alla lavorazione e alla metrologia dimensionale e Marco Tarabini e Sara Del Chicca, che hanno curato la parte di LAB – Digital Machining legata all'acquisizione e all'analisi dei dati a scopo di monitoraggio di processo.■