



**Politecnico  
di Torino**

Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

**Systematic Literature Review  
sulle Learning Factory: stato dell'arte,  
implementazioni attuali  
e prospettive future**

Relatore

Prof.ssa Cagliano Anna Corinna

Candidato

Michele Arnò

Novembre 2025



## INDICE

1.	INTRODUZIONE .....	5
2.	INTRODUZIONE ALLA SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW .....	7
3.	PRIME FASI DELLA SLR .....	8
3.1	FASE 0 E FASE 1 .....	8
3.2	FASE 2.....	9
4.	FASE 3: APPLICAZIONE TECNICHE LSA E LDA.....	17
4.1	Identificazione dei topic per LSA .....	18
4.2	Identificazione dei topic per LDA .....	22
4.3	RISULTATI LDA & LSA .....	26
.....		
29		
5.	FASE 3: SCREENING MANUALE TRAMITE LETTURA DEL TITOLO E DELL' ABSTRACT... 29	29
6.	FASE 4: SCREENING MANUALE MEDIANTE LETTURA COMPLETA DELL'ARTICOLO .....	36
7.	FASE 5: SNOWBALLING .....	49
7.1	Articoli aggiunti tramite snowballing.....	55
8.	FASE 6, 7, 8: ANALISI CORPUS .....	57
8.1	ANNO DI PUBBLICAZIONE .....	58
8.2	DISTRIBUZIONE PER PROVENIENZA GEOGRAFICA.....	59
8.2.1	Distribuzione per continente .....	59
8.2.2	Europa.....	61
8.2.3	Asia.....	62
8.2.4	America .....	63
8.3	APPROCCIO E METODOLOGIA DI RICERCA .....	64
8.3.1	Approccio di ricerca .....	64
8.3.2	Metodologia di ricerca .....	65
8.4	ANALISI IN RELAZIONE ALLE RESEARCH QUESTIONS .....	68
8.4.1	RQ1: Scopo di una Learning Factory .....	68
8.4.2	RQ2: Contenuti Didattici.....	69
8.4.3	RQ3: Fasi del ciclo di vita di un prodotto .....	71
8.4.4	RQ4: Tecnologie implementate.....	73
9.	FASE 8: RISPOSTA ALLE DOMANDE DI RICERCA .....	75
9.1	RQ 1: Quali sono gli scopi principali delle Learning Factory esistenti? .....	75
9.2	RQ 2: Quali sono i principali contenuti didattici/di apprendimento delle Learning Factory esistenti?.....	77
9.3	RQ 3: Quali sono le fasi del ciclo di vita del prodotto analizzate dalle Learning Factory esistenti?	78

9.4	RQ 4: Quali sono le principali tecnologie implementate/utilizzate all'interno delle Learning Factory esistenti? .....	80
10.	FASE 9: SPUNTI PER RICERCA FUTURA, IMPLEMENTAZIONI E LIMITAZIONI.....	81
10.1	Spunti per ricerca futura.....	81
10.1.1	RQ1: Quali sono gli scopi principali delle Learning Factory esistenti? .....	81
10.1.2	RQ2: Quali sono i principali contenuti didattici/di apprendimento delle Learning Factory esistenti? .....	81
10.1.3	RQ3: Quali sono le fasi del ciclo di vita del prodotto analizzate dalle Learning Factory esistenti? .....	82
10.1.4	RQ 4: Quali sono le principali tecnologie implementate/utilizzate all'interno delle Learning Factory esistenti?.....	83
10.2	Implicazioni accademiche e pratiche .....	83
10.3	Limitazioni.....	84
11.	BIBLIOGRAFIA .....	85

# 1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, le recenti evoluzioni nel panorama industriale e didattico hanno imposto lo sviluppo di nuovi modelli formativi capaci di connettere gli aspetti teorici con la pratica. In questo contesto vi è stato lo sviluppo delle Learning Factory come ambienti innovativi per la formazione didattica, ricerca e training industriale. In questo sistema è possibile quindi simulare le dinamiche reali delle aziende, offrendo così la possibilità a lavoratori del settore e studenti di entrare in possesso di nuove competenze inerenti al mondo dell'industria, potendo testare sul campo quanto appreso a livello teorico. Inoltre le Learning Factory rappresentano un luogo dove è possibile effettuare ricerca e sviluppo su nuovi prodotti e nuove tecnologie, permettendo di effettuare simulazioni prima che questi vengano immessi nell'industria.

La presente tesi mira a tracciare e definire uno stato dell'arte sull'argomento, il quale è in rapida espansione ma ancora carente di lavori che definiscano in modo chiaro il contesto nel quale le Learning Factory si trovino al giorno d'oggi. Come metodologia di ricerca è stata utilizzata quella della Systematic Literature Review, che consente di effettuare una ricerca che mira ad analizzare ed effettuare opportune analisi in modo oggettivo su di un determinato argomento.

In particolare è stato utilizzato il protocollo di ricerca definito nel lavoro di tesi di Marzo (2024), nel quale è stata effettuata la formulazione delle domande di ricerca, la definizione dei criteri di inclusione ed esclusione per selezionare gli articoli da analizzare in modo poi da poter effettuare un'analisi completa e strutturata sull'argomento. È stato effettuato un aggiornamento del Corpus del lavoro di tesi citato rivedendo gli articoli presenti ed aggiungendone nuove per rendere il lavoro attuale ed aggiornato al 2025. Sono stati utilizzati approcci innovativi quali l'utilizzo di Python e altri software utili a rendere il processo di revisione sistematica automatico con l'obiettivo di ridurre in modo consistente i tempi dato l'alto numero di articoli e fonti a disposizione. Un altro obiettivo dell'utilizzo di tool innovativi è stato quello di identificare le tematiche trattate e collocare quest'ultime con le quattro domande di ricerca proposte attraverso due tecniche di topic modelling, ovvero la Latent Semantic Analysis (LSA) e la Latent Dirichlet Allocation (LDA).

L'obiettivo della tesi è quello di fornire alla letteratura un contributo importante sull'attuale contesto delle Learning Factory, effettuando un'analisi completa ed approfondita del Corpus toccando gli aspetti più analizzati nel campo delle Systematic Literature Review, con l'obiettivo finale di rispondere in modo completo alle quattro domande di ricerca identificate da Marzo (2024), fornendo inoltre spunti per ricerca futura, implicazioni accademiche e pratiche nel campo delle Learning Factory. Inoltre, in continuità con l'obiettivo di tesi di Marzo (2024), il presente lavoro applica un protocollo di ricerca utilizzando software e tool innovativi utili ad effettuare revisioni sistematiche della letteratura anche in altri campi di ricerca. La ricerca, guidata dalle research questions individuate, ha permesso di delineare in modo completo lo stato dell'arte delle Learning Factory, identificandone i principi fondanti, le principali tematiche di apprendimento e le tecnologie più frequentemente implementate, fornendo al contempo ulteriori spunti utili per il loro futuro sviluppo e miglioramento. È stato possibile identificare gli scopi prevalenti delle Learning Factory, che si concentrano prevalentemente su formazione didattica, essendo ambienti che crescono all'interno di università, ed in linea leggermente minore nell'industrial training, ovvero formazione operativa in un contesto aziendale. Inoltre le attività effettuate all'interno di esse si concentrano sulle operations, formando professionisti e studenti nelle attività operative in linea con lo sviluppo dei principi

dell'Industry 5.0. Sono state affrontate tutte le fasi dello sviluppo di un prodotto o di un servizio all'interno di una Learning Factory, attività che si sono concentrate per la maggior parte su ricerca e sviluppo e produzione. Inoltre sono state analizzate le tecnologie implementate, sviluppate ed utilizzate, analizzando sia la componente hardware che software. Queste si sono concentrate soprattutto sui digital twin, realtà aumentata e cobot, andando quindi al passo con lo sviluppo dei nuovi principi dell'Industry 5.0.

## 2. INTRODUZIONE ALLA SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Il protocollo di ricerca seguito nella realizzazione di questo lavoro di tesi è stato sviluppato nel lavoro di Marzo (2024), dove sono state elencate e spiegate nel dettaglio tutte le fasi da seguire. Si specifica che sono stati utilizzati i tool che hanno prodotto risultati rilevanti nel lavoro svolto dal precedente tesista, inoltre sono state effettuate alcune modifiche ai codici Python implementati per ovviare ad alcune problematiche incorse nell'utilizzo di alcuni software. Ogni modifica è stata riportata nella stesura della tesi. Si riporta la tabella 1 sviluppata da Marzo (2024), la quale riassume le fasi della Systematic Literature Review e gli strumenti adottati.

0. DEFINIZIONE DOMANDA DI RICERCA	Tale fase viene svolta manualmente
1 .DEFINIZIONE DEI CRITERI DI INCLUSIONE ED ESCLUSIONE	Tale fase viene svolta manualmente
2. RICERCA DEGLI ARTICOLI IN BASE AI CRITERI DI INCLUSIONE/ESCLUSIONE	Tale fase viene svolta su: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rayyan</li> <li>- Pandas (Python)</li> </ul> Al termine del processo, vengono confrontati i due metodi ed evidenziate eventuali differenze, con relativa discussione di possibili divergenze nei risultati
3. SELEZIONE DEGLI ARTICOLI IN BASE AL TITOLO E ALL'ABSTRACT	Tale fase viene svolta su Python per applicare le tecniche di Latent Semantic Analysis e Latent Dirichlet Allocation. Al termine del processo, si verifica che i topic estratti dai titoli ed abstract dei documenti siano coerenti con le tematiche trattate nel presente lavoro di tesi, così come alle domande di ricerca. Successivamente si procede a uno screening manuale degli articoli in base alla lettura del Titolo e dell' Abstract
4. SELEZIONE DEGLI ARTICOLI IN BASE ALLA LETTURA COMPLETA	Tale fase viene svolta sia manualmente che su: <ul style="list-style-type: none"> <li>- SciSpace</li> <li>- PopAI</li> <li>- Covidence (eventualmente, a pagamento)</li> </ul> N.B. i software indicati sono di sostegno al lavoro manuale
5. APPLICAZIONE APPROCCIO SNOWBALLING	Tale fase viene svolta su Citation Gecko
6a. ANALISI DEL CORPUS: DISTRIBUZIONE DEGLI ARTICOLI PER ANNO, RIVISTA (E NAZIONE)	Tale fase viene svolta su: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pandas (Python)</li> <li>- SciSpace</li> </ul> Al termine del processo, vengono confrontati i due metodi ed evidenziate eventuali differenze, con relativa discussione di possibili divergenze nei risultati. Risolti i punti di discussione, si procede a creare i grafici delle distribuzioni degli articoli per anno, rivista e nazione, ecc. da Pandas (Python). Si evidenzia come possano essere utilizzati entrambi i metodi, pertanto si lascia libera scelta al revisore.
7. ANALISI DEL CORPUS: DESCRIZIONE DELL' APPROCCIO DI STUDIO DEI TREND RELATIVI ALLO SCOPO DI RICERCA (O ARGOMENTO CHIAVE)	Tale fase viene svolta manualmente e viene utilizzato il supporto di SciSpace per identificare i trend
8. ANALISI DEL CORPUS: DESCRIZIONE DEI PRINCIPALI TREND RELATIVI ALLO SCOPO DELLA RICERCA (O ARGOMENTO CHIAVE)	Tale fase viene svolta per l'estrapolazione dei trend di ricerca su SciSpace e, per la descrizione di questi, manualmente
9. IDENTIFICAZIONE DEI GAP DI RICERCA E DELLE FUTURE LINEE DI RICERCA	Tale fase viene svolta manualmente

Tabella 1: fasi della SLR

### 3. PRIME FASI DELLA SLR

Nella fase iniziale è stato effettuato un lavoro preliminare per l'applicazione della metodologia di Systematic Literature Review allo studio dello stadio dell'arte delle Learning Factory. In particolare, sono stati letti ed analizzati il lavoro di tesi di Marzo (2024) e il paper Lagorio et al. (2021), il quale fornisce un'applicazione circostanziata dell'approccio della SLR. Sono stati compresi i passaggi da effettuare per aggiornare il Corpus degli articoli su cui procedere per poi poter effettuare il lavoro di ricerca. L'aggiornamento del Corpus è stato effettuato per rendere il lavoro di ricerca il più attuale possibile, rivedendo in seguito anche gli altri articoli già presenti all'interno del Corpus in base ai criteri di inclusione ed esclusione già definiti.

#### 3.1 FASE 0 E FASE 1

La fase 0 e la fase 1, relative all'individuazione delle research questions, alla definizione dei criteri di inclusione ed esclusione ed alla ricerca delle keyword non sono state oggetto di revisione per garantire coerenza con la direzione metodologica seguita nell'ambito di questo lavoro di ricerca già impostata nel documento di tesi Marzo (2024).

Si riportano in seguito le domande di ricerca e le keyword identificate, ed in tabella 2 i criteri di inclusione ed esclusione utilizzati nella ricerca dei paper per la definizione del Corpus.

#### DOMANDE DI RICERCA

RQ 1: Quali sono gli scopi principali delle Learning Factory esistenti?

RQ 2: Quali sono i principali contenuti didattici/di apprendimento delle Learning Factory esistenti?

RQ 3: Quali sono le fasi del ciclo di vita del prodotto analizzate dalle Learning Factory esistenti?

RQ 4: Quali sono le principali tecnologie implementate/utilizzate all'interno delle Learning Factory esistenti?

#### KEYWORD

- Active learning
- Experiential learning
- Experimental learning
- Didactic concept
- Didactic transformation
- Competency development
- Education
- Training
- Industrial training
- Business/es
- Manufacturing research
- Product development process/es
- Model construction
- Production machine/s



- Digital Technology/ies
- Technology/ies
- Energy management
- Global production
- Logistics
- Supply/ies
- Supply Chain
- Industry 4.0
- Industry 5.0
- Distribution
- Design
- Operation
- Evaluation
- Research

CRITERI	
Area tematica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Business, Management and Accounting</li> <li>• Economics</li> <li>• Engineering</li> <li>• Social Sciences</li> </ul>
Tipologia di fonte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Article</li> <li>• Conference Paper</li> <li>• Book Chapter</li> </ul>
Lingua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inglese</li> </ul>
Arco temporale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dal 2014 al febbraio 2025</li> </ul>
Tipologia di documento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peer- reviewed</li> </ul>

Tabella 2: criteri di inclusione ed esclusione

## 3.2 FASE 2

La fase 2 consiste nella ricerca degli articoli all'interno della banca dati Scopus, un database bibliografico di letteratura scientifica peer-reviewed, con la finalità di aggiornare il Corpus al mese di marzo 2025. La scelta di Scopus è motivata dalla sua selettività nell'inclusione dei documenti, poiché utilizza criteri di selezione rigorosi quali la peer review, la rilevanza accademica, la qualità del contenuto, la reputazione dell'editore e la frequenza di citazioni (Cioni 2018, Marzo 2024).

Il primo passo effettuato è stato quello di inserire le query di ricerca nella banca dati Scopus in coerenza con quanto effettuato nel precedente lavoro. In particolare l'impostazione delle query ha seguito la seguente struttura: l'inserimento della keyword generica, ovvero "learning factory" OR "learning factories", combinata con le keyword identificate ed elencate in precedenza.

Di seguito vengono riportate le query, già definite in Marzo (2024):

- ("learning factory" OR "learning factories") AND "action-oriented learning"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "active learning"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "experiential learning"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "experimental learning"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("didactic concept" OR "didactic concepts")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("didactic transformation" OR "didactic transformations")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "competency development"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "education"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "training"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "industrial training"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("business" OR "businesses")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "manufacturing research"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("product development process" OR "product development processes")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("model construction" OR "model constructions")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("production machine" OR "production machines")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("digital technology" OR "digital technologies")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("technology" OR "technologies")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "energy management"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "global production"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("logistic" OR "logistics")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("supply" OR "supplies")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("supply chain" OR "supply chains")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "industry 4.0"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "industry 5.0"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "distribution"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("design" OR "designs")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("operation" OR "operations")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("evaluation" OR "evaluations")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "research"

Nella ricerca degli articoli su Scopus è stato impostato un unico filtro, ovvero quello della ricerca dei documenti pubblicati tra il 2024 e il 2025, dato che i paper d'interesse nel periodo tra il 2014 fino al febbraio 2024 sono stati già inseriti nel Corpus elaborato nel documento di tesi di Marzo (2024). Ogni query inserita ha generato una raccolta di articoli, da dove sono state estratte le informazioni d'interesse attraverso la generazione di file CSV(Comma-Separated Value), consentita dalla banca

dati Scopus. Sono stati generati 21 file CSV, uno per ogni query che ha prodotto almeno un risultato. Le informazioni estratte sono elencate all'interno della figura 1.

What information do you want to export?

<input checked="" type="checkbox"/> Citation information	<input checked="" type="checkbox"/> Bibliographical information	<input checked="" type="checkbox"/> Abstract & keywords	<input type="checkbox"/> Funding details	<input checked="" type="checkbox"/> Other information
--	---	---	--	---

---

<input checked="" type="checkbox"/> Author(s)	<input checked="" type="checkbox"/> Affiliations	<input checked="" type="checkbox"/> Abstract	<input type="checkbox"/> Number	<input type="checkbox"/> Tradenames & manufacturers
<input checked="" type="checkbox"/> Document title	<input checked="" type="checkbox"/> Serial identifiers (e.g. ISSN)	<input checked="" type="checkbox"/> Author keywords	<input type="checkbox"/> Acronym	<input checked="" type="checkbox"/> Accession numbers & chemicals
<input checked="" type="checkbox"/> Year	<input checked="" type="checkbox"/> PubMed ID	<input checked="" type="checkbox"/> Indexed keywords	<input type="checkbox"/> Sponsor	<input type="checkbox"/> Conference information
<input checked="" type="checkbox"/> EID	<input checked="" type="checkbox"/> Publisher		<input type="checkbox"/> Funding text	<input type="checkbox"/> Include references
<input checked="" type="checkbox"/> Source title	<input checked="" type="checkbox"/> Editor(s)			
<input checked="" type="checkbox"/> Volume, issues, pages	<input checked="" type="checkbox"/> Language of original document			
<input checked="" type="checkbox"/> Citation count	<input checked="" type="checkbox"/> Correspondence address			
<input checked="" type="checkbox"/> Source & document type	<input checked="" type="checkbox"/> Abbreviated source title			
<input checked="" type="checkbox"/> Publication stage				
<input checked="" type="checkbox"/> DOI				
<input checked="" type="checkbox"/> Open access				

---

Truncate to optimize for Excel ⓘ
  Save as preference

Figura 1: informazioni estratte da Scopus e inserite all'interno dei file CSV

Laddove la query non abbia portato all'individuazione di alcun documento, non è stato esportato alcun file CSV. In particolare le query che non hanno ottenuto nessun risultato sono le seguenti:

- ("learning factory" OR "learning factories") AND "experimental learning"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("didactic concept" OR "didactic concepts")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("didactic transformation" OR "didactic transformations")
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "industrial training"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND "manufacturing research"
- ("learning factory" OR "learning factories") AND ("product development process" OR "product development processes")
  - ("learning factory" OR "learning factories") AND ("model construction" OR "model constructions")
  - ("learning factory" OR "learning factories") AND ("production machine" OR "production machines")

In seguito è stato effettuato lo screening degli articoli su Pandas in coerenza con il codice Python implementato nel documento di Marzo (2024), effettuando tuttavia una modifica al protocollo di ricerca utilizzato data l'impossibilità di accedere al sito <https://products.aspose.app/cells/it/merger/csv> per effettuare l'unione dei file CSV scaricati in un file unico. Infatti, il tool citato non è risultato essere più open source, quindi non è stato possibile accedervi gratuitamente.

Per ovviare a tale problematica, il codice Python sviluppato nel precedente lavoro di tesi è stato opportunamente modificato .

L'intervento ha previsto il caricamento di 21 file CSV all'interno dello script, l'applicazione dello screening secondo i criteri definiti nel documento di Marzo (2024) e, successivamente, l'unione dei file filtrati in un unico dataset (file 'CSV\_finale') consolidato, sempre in formato CSV.

La modifica sostanziale al codice Python precedentemente applicato al protocollo di ricerca è stata l'inserimento di una stringa che consente la lettura di tutti i 21 file CSV caricati, la quale consentirà in seguito di effettuare lo screening degli articoli attraverso i criteri selezionati per il presente lavoro di ricerca.

Per completezza, si riporta l'intero codice Python sviluppato, la modifica apportata a quest'ultimo è evidenziata in caratteri rossi.

```
→      import pandas as pd
→      file_list = [

          'action-oriented learning.csv', 'active learning.csv', 'business.csv', 'competency
development.csv', 'design.csv', 'digital technology.csv',

          'distribution.csv', 'energy management.csv', 'evaluation.csv', 'experiential learning.csv',
'global production.csv', 'industry 4.0.csv',

          'industry 5.0.csv', 'logistics.csv', 'operation.csv', 'research.csv', 'supply chain.csv',
'supply_ies.csv', 'technology_ies.csv', 'training.csv'

      ]
→      keywords = [

          'Learning Factory', 'Action-oriented Learning', 'Active learning', 'Experiential Learning',
'Experimental learning', 'Didactic concept',

          'Didactic transformation', 'Competency development', 'Education', 'Training', 'Industrial
training', 'Business', 'Businesses',

          'Manufacturing research', 'Product development process', 'Product development processes',
'Model construction', 'Production machine',

          'Production machines', 'Digital Technology', 'Technologies', 'Technology', 'Energy
management', 'Global production',

          'Logistics', 'Supply', 'Supplies', 'Supply Chain', 'Industry 4.0', 'Industry 5.0', 'Distribution',
'Design', 'Operation', 'Evaluation', 'Research'

      ]
→      dati_filtrati = []

      for file in file_list:

          try:
```

```

df = pd.read_csv(file)

df['Year'] = pd.to_numeric(df['Year'], errors='coerce')

df = df[(df['Year'] > 2024) & (df['Year'] <= 2025)]

➔ keyword_filter = (
    df['Index Keywords'].str.contains('|'.join(keywords), case=False, na=False) |
    df['Index Keywords'].str.contains('|'.join(keywords), case=False, na=False)
)

➔ language_filter = df['Language of Original Document'].str.contains('English',
case=False, na=False)
➔ document_filter = df['Document Type'].isin(['Article', 'Conference Paper', 'Book
chapter'])

dati_filtrati.append(df[keyword_filter & language_filter &
document_filter].drop_duplicates())

➔ print(f' Dati filtrati da {file} aggiunti.')

except Exception as e:

➔ print(f' Errore nel file {file}: {e}')

pd.concat(dati_filtrati, ignore_index=True).to_csv('CSV_finale.csv', index=False)

print("File 'CSV_finale.csv' creato con successo ")

```

In seguito si è optato per eseguire un ulteriore passaggio, in aggiunta a quanto sviluppato nel lavoro di Marzo (2024), ossia quello di eliminare eventuali duplicati dal file CSV tramite sempre l'utilizzo di stringhe di codice Python, in ottica di ottenere un dataset più pulito su cui effettuare l'analisi

Nel dettaglio viene importata la libreria Pandas, utile a consentire la lettura, l'elaborazione e l'esportazione del dataset contenuto nel file CSV denominato 'CSV finale'. In seguito viene effettuata la definizione dei percorsi dove lo script Python cercherà i dati e salverà le relative elaborazioni, attraverso le seguenti stringhe:

- file\_path = 'CSV\_finale.csv'
- output\_path = 'CSV\_senza\_duplicati.csv'

Il dataset in cui vi è la presenza di eventuali duplicati, è rappresentato dalla prima stringa, mentre la seconda stringa indica il nome del dataset in output, ossia quello pulito.

Le stringhe:

- try: df = pd.read\_csv(file\_path)
- print("✅ File CSV caricato con successo!")

except Exception as e:

```
print(f"✘ Errore nella lettura del file: {e}") (*)
```

```
exit()
```

consentono di verificare la corretta lettura del file CSV importato. In caso di lettura errata viene stampato a schermo il messaggio d'errore riportato nella stringa sopra e identificato con il simbolo \*.

Le stringhe:

- if 'Title' in df.columns and 'Abstract' in df.columns:

```
df_senza_duplicati = df.drop_duplicates(subset=['Title', 'Abstract'], keep='first')
```

```
print("✔ Righe duplicate basate su 'Title' e 'Abstract' rimosse con successo!")
```

consentono di verificare la presenza delle colonne 'Title' e 'Abstract', le quali costituiscono un criterio di identificazione dei duplicati. Dopo aver effettuato questa verifica, si procede con la rimozione delle righe duplicate utilizzando la funzione 'drop\_duplicates'. L'argomento 'subset=['Title', 'Abstract']' specifica che due righe sono considerate duplicate solo se entrambi i campi coincidono. L'opzione keep='first' conserva la prima occorrenza tra quelle ripetute.

Le stringhe:

- df\_senza\_duplicati.to\_csv(output\_path, index=False)

```
print(f"✔ File senza duplicati salvato come '{output_path}'")
```

consentono l'esportazione del file elaborato in un nuovo file CSV.

Di seguito si riporta il codice Python completo precedentemente descritto.

```

1 import pandas as pd
2
3 # Percorso del file CSV
4 file_path = 'CSV_finale.csv' # Sostituisci con il nome del tuo file
5 output_path = 'CSV_senza_duplicati.csv'
6
7 # Lettura del file CSV
8 try:
9     df = pd.read_csv(file_path)
10    print("✅ File CSV caricato con successo!")
11 except Exception as e:
12    print(f"❌ Errore nella lettura del file: {e}")
13    exit()
14
15 # Verifica se le colonne 'Title' e 'Abstract' esistono
16 if 'Title' in df.columns and 'Abstract' in df.columns:
17     # Rimozione dei duplicati basati su 'Title' + 'Abstract'
18     df_senza_duplicati = df.drop_duplicates(subset=['Title', 'Abstract'], keep='first')
19     print(f"✅ Righe duplicate basate su 'Title' e 'Abstract' rimosse con successo!")
20 else:
21     print("! Le colonne 'Title' e/o 'Abstract' non sono presenti nel file.")
22     print("Ecco le colonne presenti nel file:", df.columns)
23     exit()
24
25 # Esportazione del file pulito
26 df_senza_duplicati.to_csv(output_path, index=False)
27 print(f"✅ File senza duplicati salvato come '{output_path}'")

```

Figura 2 Codice Python eliminazione duplicati

Dal file CSV generato sono stati inizialmente selezionati 107 articoli. Successivamente, sono stati rimossi i paper già presenti nel Corpus costruito da Marzo (2024), aggiornato a febbraio 2024. In particolare, sono stati eliminati i lavori di Lagorio et al. (2024) e Neacșu et al. (2024). Il numero totale di articoli considerati dopo questa operazione è risultato pari a 106.

Si è deciso di non effettuare lo screening degli articoli su Rayyan, poiché in base alla ricerca svolta da Marzo (2024) è risultato poco preciso nell'output fornito.

Dal numero di articoli estratti dalla banca dati Scopus è possibile notare come l'argomento delle Learning Factory sia stato affrontato in modo consistente nel 2024 all'interno della comunità scientifica. Infatti il numero di paper pubblicati sull'argomento è abbastanza in linea con il numero di articoli pubblicati all'anno tra il 2018 e il 2020, anni dove l'argomento delle Learning Factory ha avuto una crescita notevole in concomitanza con lo sviluppo di nuove tendenze e concetti legati all'Industria 4.0

Tale dato è messo in evidenza dall'istogramma in Figura 3, che mostra il numero di articoli emersi dalle query identificate nel periodo temporale tra il 2014 e il 2025. Si specifica che la ricerca non ha prodotto risultati per quanto riguarda i primi due mesi del 2025, per cui quell'anno è stato rimosso dal grafico.

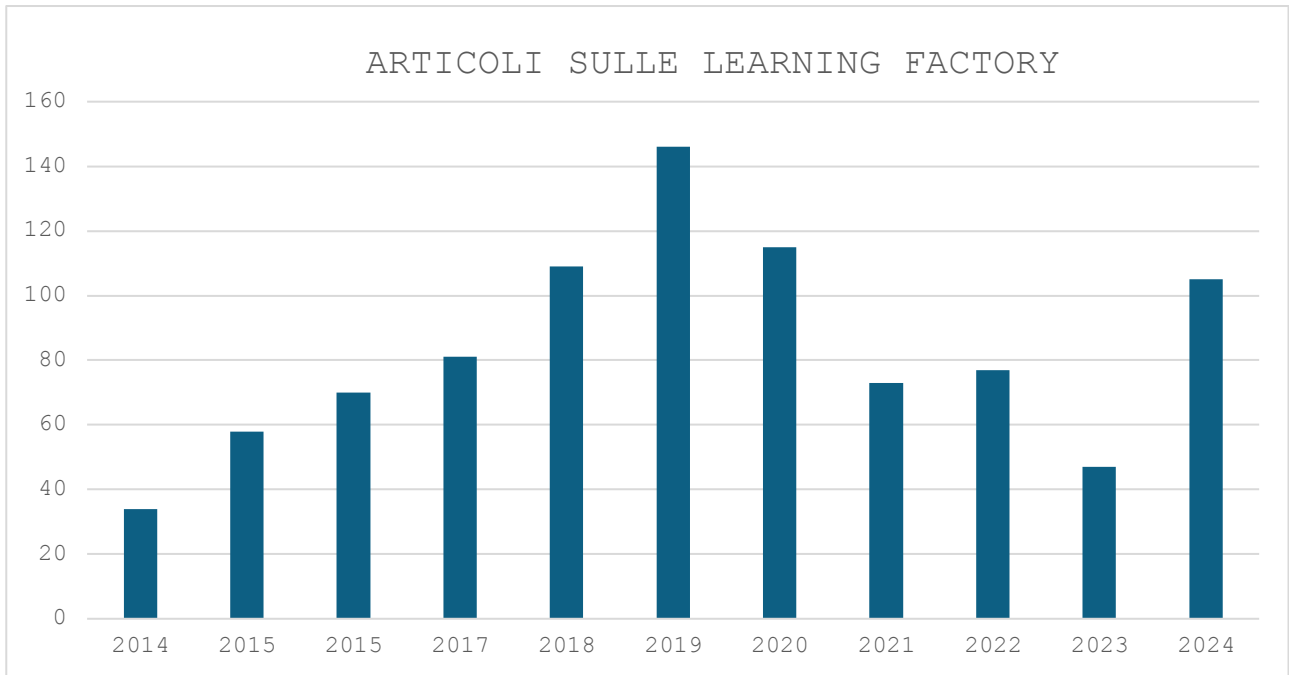


Figura 3: distribuzione temporale degli articoli pubblicati sulle Learning Factory



## 4. FASE 3: APPLICAZIONE TECNICHE LSA E LDA

Le tecniche di topic modeling rappresentano un approccio fondamentale per l'estrazione di argomenti latenti all'interno di grandi quantità di dati testuali non strutturati. Tra i metodi più diffusi si annoverano la Latent Dirichlet Allocation (LDA) e la Latent Semantic Analysis (LSA), che sebbene condividano l'obiettivo di identificare strutture semantiche nei dati, adottano strategie differenti per raggiungere tale scopo.

Il modello Latent Dirichlet Allocation (LDA) è un modello generativo basato su un processo bayesiano, introdotto da Blei et al. (2003), che assume che ogni documento sia generato da una combinazione di argomenti e che ogni argomento sia rappresentato da una distribuzione di parole. In termini matematici, LDA modella ogni documento come una distribuzione multinomiale di argomenti e ogni argomento come una distribuzione multinomiale di parole, dove la definizione di un topic mediante la creazione delle WordCloud avviene attraverso una distribuzione di Dirichlet (Gan et al., 2024). Le WordCloud rappresentano visivamente i termini più significativi di ciascun topic, dove la dimensione delle parole indica il loro peso o rilevanza all'interno del tema individuato dal modello. La struttura di LDA prevede due iperparametri principali, definiti prima dell'addestramento del modello e utilizzati per controllare il processo di apprendimento di quest'ultimo:

- $\alpha$  (alpha): rappresenta la distribuzione di probabilità di topic nei documenti.
- $\beta$  (beta): rappresenta la distribuzione di probabilità delle parole nei topic.

Il modello, attraverso un processo iterativo, calcola le distribuzioni ottimali rispetto al criterio della massima verosimiglianza dei dati analizzati all'interno dei documenti e delle parole nei topic, permettendo di identificare i temi predominanti all'interno del Corpus analizzato. LDA è particolarmente efficace nel rappresentare i documenti come combinazioni probabilistiche di argomenti, migliorando così l'interpretabilità e l'organizzazione semantica dei dati (Goyal et Kashyap, 2024).

La Latent Semantic Analysis (LSA), introdotta da Deerwester et al. (1990), adotta un approccio differente rispetto a LDA, basandosi sull'algebra lineare attraverso una decomposizione ai valori singolari (*Singular Value Decomposition - SVD*). La LSA riduce la dimensionalità dei dati trasformando la matrice di occorrenze termine-documento, ovvero una rappresentazione numerica che quantifica quante volte ciascun termine appare in ciascun documento, in uno spazio semantico di dimensione ridotta. In questo spazio, ogni termine e ogni documento sono rappresentati da vettori costituendo quindi un ambiente vettoriale, e la distanza tra di essi riflette la loro somiglianza concettuale. Ridurre la dimensionalità significa semplificare la complessità originaria della matrice, estraendo solo le componenti latenti più significative, ovvero quelle che meglio catturano le relazioni semantiche tra parole e testi (Goyal et Kashyap, 2024). Questo metodo permette di evidenziare e associare le correlazioni latenti tra termini che non appaiono esplicitamente vicini nei testi migliorando l'analisi semantica e permettendo di rendere confrontabili documenti e parole in uno spazio semantico comune. A differenza di LDA, LSA non è un modello probabilistico, ma un modello puramente geometrico, il che comporta che non generi distribuzioni di probabilità ma rappresentazioni vettoriali nello spazio semantico.

L'applicazione delle tecniche LDA e LSA è stata condotta nel rispetto del protocollo di ricerca adottato nel lavoro di tesi di Marzo (2024). A tal fine, sono state implementate apposite stringhe di

codice in Python per l'estrazione dei principali topic e delle keyword più rilevanti, al fine di individuare eventuali trend emergenti e gap nello stato dell'arte relativo alle Learning Factory.

Per rendere l'applicazione della tecnica più precisa e coerente con la letteratura sono state sviluppate delle stringhe di codice Python che permettono di applicare una tecnica scientificamente riconosciuta per il calcolo del numero di topic. È stata utilizzata per questo fine la tecnica del calcolo della coerenza semantica, che permette di identificare il numero di topic ideale sia per LDA che per LSA.

La coerenza semantica rappresenta una delle metriche più affidabili per valutare la qualità e l'interpretabilità dei topic generati nei modelli di topic modeling, ovvero modelli che raggruppano parole che tendono a comparire insieme all'interno dei documenti analizzati. La coerenza semantica si basa sull'idea che, in un buon topic, le parole con la maggiore probabilità, nel caso di LDA, o i termini con i pesi più alti, ovvero quelli più importanti, nel caso di LSA, debbano avere un significato semanticamente coerente tra loro e tendere a comparire insieme all'interno del Corpus (Goyal et Kashyap, 2024).

Nella LDA, la coerenza semantica viene calcolata sulla base delle distribuzioni probabilistiche generate dal modello. In particolare, le parole più probabili per ciascun argomento vengono confrontate in termini di co-occorrenza nei documenti: più spesso compaiono insieme, maggiore è la coerenza semantica del topic (Gan et al., 2024; Goyal & Kashyap, 2024).

Nel caso della LSA, che si basa su una decomposizione ai valori singolari (SVD) della matrice termine-documento, i topic vengono identificati come combinazioni lineari di parole più rappresentative per ciascun componente semantico. Un componente semantico identifica una direzione nello spazio semantico che rappresenta un insieme di parole che tendono ad apparire insieme e che condividono un significato correlato tra di loro.

Anche in questo caso, la coerenza viene valutata misurando la correlazione tra i termini principali di ciascun topic, verificando se compaiono con sufficiente regolarità nei testi. L'uso della coerenza semantica in LSA risulta particolarmente utile per avere un riscontro di misura di qualità tematica su una tecnica che si basa su principi matematici, avendo quindi una controprova della validità della tecnica. (Jolliffe & Cadima, 2016).

Nelle WordCloud generate dalle tecniche LDA e LSA, la dimensione delle parole rappresenta il loro peso all'interno di ciascun topic: nel caso di LDA indica la probabilità con cui una parola compare in un argomento, mentre in LSA riflette l'importanza della parola nella componente semantica.

## 4.1 Identificazione dei topic per LSA

Dall'analisi del paper di Röder et al. (2015), sono state sviluppate opportune stringhe di codice Python, che permettono il calcolo della coerenza semantica per entrambe le tecniche nella presente Systematic Literature Review. È importante specificare che la tecnica implementata dalle stringhe è una tecnica iterativa, basata sulla ripetizione di essa incrementando ogni qualvolta il numero di topic. Di seguito sono riportate le stringhe di codice Python per il calcolo della coerenza semantica in LSA.

Le stringhe

- ```
import pandas as pd
from sklearn.feature_extraction.text import TfidfVectorizer
from sklearn.decomposition import TruncatedSVD
```

```

from gensim.models import CoherenceModel
from gensim import corpora
import nltk
from nltk.Corpora import stopwords
import re
import matplotlib.pyplot as plt
import os

```

importano tutte le librerie necessarie per la gestione dei dati tabellari, per la decomposizione SVD e applicazione di LSA e per il calcolo della coerenza semantica.

Le stringhe

- ```

if not os.path.exists('CSV_unificato_preprocessed.csv'):
    print(" Unione dei file CSV...")
    # Unione di due file CSV
    file1 = 'CSV_senza_duplicati.csv'
    file2 = 'CSV finale copia.csv'

    # Lettura dei file
    df1 = pd.read_csv(file1)
    df2 = pd.read_csv(file2)

    # Unione e rimozione duplicati
    df = pd.concat([df1, df2], ignore_index=True)
    df.drop_duplicates(subset='Title', inplace=True)

    # Salvataggio del file unificato
    df.to_csv('CSV_unificato.csv', index=False)
    print(" File unificato salvato come 'CSV_unificato.csv'")

```

verificano se esiste già il file unificato e preprocessato. Se non esiste, il codice legge i due file CSV caricati ('CSV senza duplicati' e 'CSV finale copia', ovvero il Corpus 2024/2025 e il Corpus precedente sviluppato da Marzo (2024)), li unisce, rimuove i duplicati basati su titolo e abstract, preprocessa il testo e salva il file per la lettura e l'applicazione della tecnica LSA. L'operazione di preprocessing prevede la conversione dei caratteri in minuscolo, la rimozione di numeri, punteggiatura e spazi superflui, nonché l'eliminazione delle stopwords in lingua inglese. Le stopwords sono parole molto frequenti utilizzate nel linguaggio scritto (es. and, the, with, ecc..) e vengono rimosse per ottenere un documento più pulito da analizzare.

Le stringhe

- ```

# Funzione di pre-processing del testo
def preprocess_text(text):
    if pd.isna(text):
        return ""
    text = text.lower()

```

```

text = re.sub(r'\d+', "", text)
text = re.sub(r'^\w\s', "", text)
text = text.strip()
tokens = text.split()
tokens = [word for word in tokens if word not in stopwords.words('english')]
return ' '.join(tokens)

# Pre-processamento dei testi
df['Title'].fillna("", inplace=True)
df['Abstract'].fillna("", inplace=True)
df['Processed_Text'] = df['Title'].astype(str) + ' ' + df['Abstract'].astype(str)
df['Processed_Text'] = df['Processed_Text'].apply(preprocess_text)

# Salvataggio del CSV preprocessato
df.to_csv('CSV_unificato_preprocessed.csv', index=False)
print("File preprocessato salvato come 'CSV_unificato_preprocessed.csv'")
else:
print(" Caricamento del file preprocessato...")
df = pd.read_csv('CSV_unificato_preprocessed.csv')

```

permettono di effettuare il preprocessamento dei testi contenuti nei campi ‘Title’ e ‘Abstract’ del dataset. In caso di esistenza del file preprocessato, il codice effettua il caricamento diretto per ottimizzare i tempi di esecuzione.

## Le stringhe

- # Creazione della matrice TF-IDF

```

print(" Creazione della matrice TF-IDF...")
vectorizer = TfidfVectorizer()
X = vectorizer.fit_transform(df['Processed_Text'])
print("Matrice TF-IDF creata correttamente.")

# Creazione del dizionario e del Corpus per Coherence Model
text_data = [text.split() for text in df['Processed_Text']]
dictionary = corpora.Dictionary(text_data)
Corpus = [dictionary.doc2bow(text) for text in text_data]
print("Dizionario e Corpus creati correttamente.")

```

creano la matrice Term Frequency – Inverse Document Frequency (TF-IDF), una matrice a due dimensioni composta dalle parole presenti nel CCorpus e dal punteggio che ognuna di essa possiede, calcolato attraverso la formula  $TF-IDF(t,d)=TF(t,d)\times\log(DF(t)N)$ , dove  $TF(t,d)$  rappresenta la frequenza della parola  $t$  nel documento  $d$ ,  $DF(t)$  rappresenta il numero di documenti che contengono la parola  $t$ , ed  $N$  il numero totale di documenti nel Corpus.

Se non già presente, il codice calcola e salva in memoria la matrice stessa tramite la funzione 'tfidf\_matrix.pkl', e il vettorizzatore tramite la funzione 'tfidf\_vectorizer.pkl'.

Le stringhe

- # Calcolo della Coerenza Semantica per un range di topic con LSA  
def compute\_lsa\_coherence(X, vectorizer, text\_data, dictionary, topic\_range):  
    coherences = []  
  
    for k in topic\_range:  
        print(f" Applicazione di LSA e calcolo della Coerenza Semantica per {k} topic...")  
  
        # 1 Applicazione della tecnica LSA  
        svd = TruncatedSVD(n\_components=k, random\_state=42)  
        X\_topics = svd.fit\_transform(X)  
  
        # 2 Estrazione delle parole chiave per ogni componente  
        terms = vectorizer.get\_feature\_names\_out()  
        topics = []  
        for comp in svd.components\_:  
            topic\_terms = [terms[i] for i in comp.argsort()[-10:]]  
            topics.append(topic\_terms)  
  
        # 3 Calcolo della Coerenza Semantica  
        coherence\_model = CoherenceModel(topics=topics, texts=text\_data,  
dictionary=dictionary, coherence='c\_v')  
        coherence = coherence\_model.get\_coherence()  
        coherences.append(coherence)

permettono, per un numero di topic definito da 2 a 50, come suggerito da Joliffe et Cadima (2016), l'applicazione della tecnica LSA, l'estrazione delle parole chiave per ciascun topic, il calcolo della coerenza semantica attraverso la funzione '))gensim.CoherenceModel', proveniente dalla libreria Gensim presente nella IDE Py-Charm, e il salvataggio dei risultati trovati. Le stringhe

- # 4 Plot del Metodo del Gomito  
plt.figure(figsize=(12, 6))  
plt.plot(topic\_range, coherences, linestyle='--', marker='o', color='green')  
plt.xlabel('Numero di Topic')  
plt.ylabel('Coerenza Semantica (C\_v)')  
plt.title('Metodo del Gomito - Coerenza Semantica (LSA)')  
plt.grid(True)  
plt.legend(['Coerenza Semantica'])  
plt.show()

permettono di tracciare il grafico per l'applicazione del Metodo del Gomito che consente di identificare visivamente il punto massimo ideale per il numero ottimale di topic. Oltre questo punto

l'incremento del numero di topic porta il valore della coerenza semantica a diminuire, portando solo benefici marginali al modello (Joliffe et Cadima, 2016)

Si riporta in figura 4 il grafico relativo al metodo del gomito per LSA.

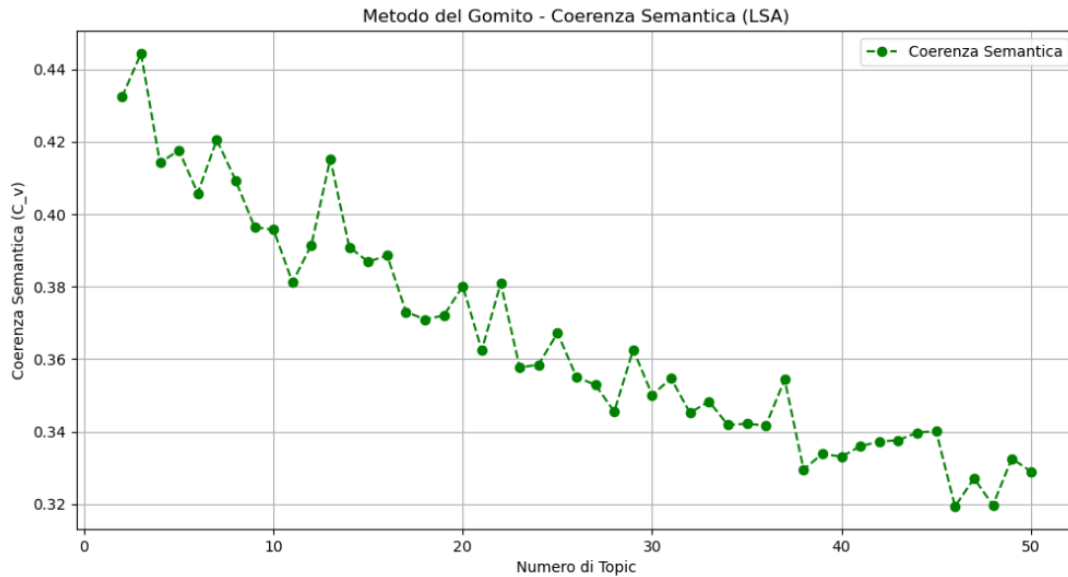


Figura 4: metodo del gomito LSA

Dal grafico in figura si evince come il numero ottimo di topic per l'applicazione in oggetto della tecnica LSA è pari a 3.

## 4.2 Identificazione dei topic per LDA

È stato implementato lo stesso codice Python anche per l'identificazione del numero ottimale dei topic con l'applicazione della tecnica LDA. Il codice precedentemente illustrato è stato modificato nella parte di applicazione della tecnica. Per completezza si riporta l'intero codice, con la parte modificata in rosso, dove attraverso la funzione 'lda.model' viene applicata la LDA per un range di topic compreso tra 2 e 50.

```
➔ import pandas as pd

from gensim import corpora

from gensim.models.ldamodel import LdaModel

from gensim.models import CoherenceModel

import nltk

from nltk.Corpora import stopwords
```

```
import re
import matplotlib.pyplot as plt
import os
```

```
→ # Download stopwords
nltk.download('stopwords')
```

```
→ # Controlla se esiste già il file unificato e preprocessato
if not os.path.exists('CSV_unificato_preprocessed.csv'):
```

```
    print("🔗 Unione dei file CSV...")
    file1 = 'CSV_senza_duplicati.csv'
    file2 = 'CSV finale copia.csv'
    df1 = pd.read_csv(file1)
    df2 = pd.read_csv(file2)
    df = pd.concat([df1, df2], ignore_index=True)
    df.drop_duplicates(subset='Title', inplace=True)
```

```
def preprocess_text(text):
    if pd.isna(text):
        return ""
    text = text.lower()
    text = re.sub(r'\d+', "", text)
    text = re.sub(r'^\w\s', "", text)
    text = text.strip()
    tokens = text.split()
    tokens = [word for word in tokens if word not in stopwords.words('english')]
    return ' '.join(tokens)
```

```
→ df['Title'].fillna("", inplace=True)
df['Abstract'].fillna("", inplace=True)
```

```

df['Processed_Text'] = df['Title'].astype(str) + ' ' + df['Abstract'].astype(str)
df['Processed_Text'] = df['Processed_Text'].apply(preprocess_text)
df.to_csv('CSV_unificato_preprocessed.csv', index=False)
print(" File preprocessato salvato come 'CSV_unificato_preprocessed.csv'")

```

else:

```

print(" Caricamento del file preprocessato...")
df = pd.read_csv('CSV_unificato_preprocessed.csv')

```

➔ # Costruzione del dizionario e del Corpus

```

print(" Creazione del dizionario e del Corpus...")
text_data = [text.split() for text in df['Processed_Text']]
dictionary = corpora.Dictionary(text_data)
Corpus = [dictionary.doc2bow(text) for text in text_data]
print("Dizionario e Corpus creati correttamente.")

```

➔ # Calcolo della Coerenza Semantica per un range di topic

```

def compute_coherence_only(Corpus, dictionary, text_data, topic_range):
    coherences = []

    for k in topic_range:
        print(f" Calcolo della Coerenza Semantica per {k} topic...")
        lda_model = LdaModel(Corpus=Corpus, id2word=dictionary, num_topics=k,
random_state=42, passes=10)

```

➔ topics = []

```

for topic_id, topic in lda_model.show_topics(num_topics=k, formatted=False):
    topic_words = [word for word, _ in topic]
    topics.append(topic_words)

```



```

→ coherence_model = CoherenceModel(topics=topics, texts=text_data, dictionary=dictionary,
coherence='c_v')

coherence = coherence_model.get_coherence()

coherences.append(coherence)

→ # Plot Coerenza Semantica
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(topic_range, coherences, linestyle='--', marker='o', color='blue')
plt.xlabel('Numero di Topic')
plt.ylabel('Coerenza Semantica (C_v)')
plt.title('Metodo del Gomito - Coerenza Semantica (LDA)')
plt.grid(True)
plt.legend(['Coerenza Semantica (C_v)'])
plt.show()

→ optimal_k = topic_range[coherences.index(max(coherences))]
print(f"\n Miglior numero di topic (massima coerenza semantica): {optimal_k}")

→ # Esecuzione del codice
if __name__ == '__main__':
topic_range = range(2, 51)
compute_coherence_only(Corpus, dictionary, text_data, topic_range)

```

Si riporta in Figura 5 il grafico ottenuto dall'identificazione dei topic per l'applicazione di LDA, applicando nuovamente il Metodo del Gomito come descritto in precedenza per LSA.

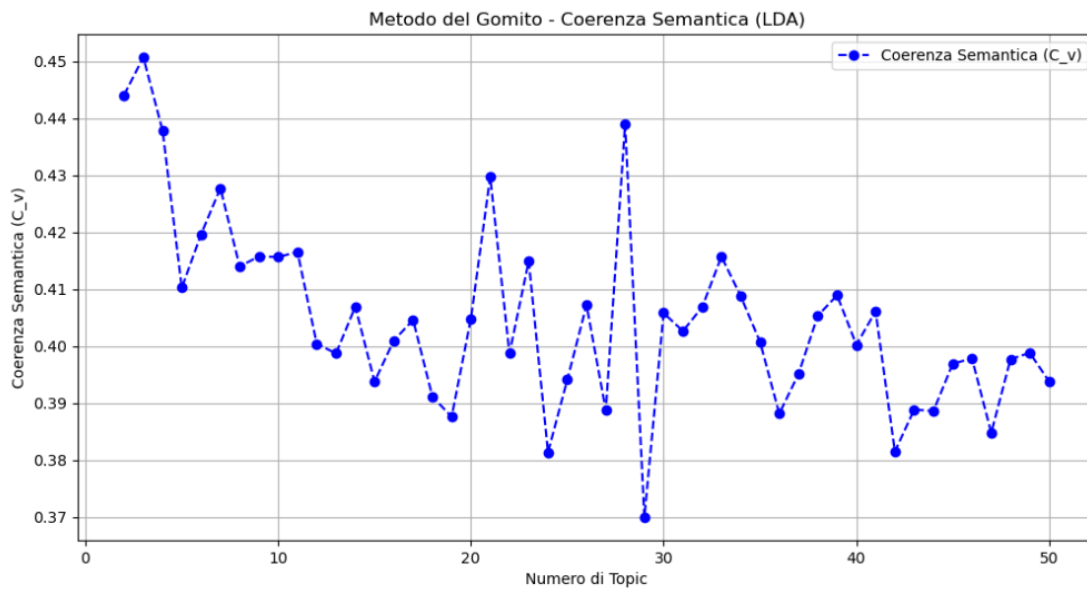


Figura 5: metodo del gomito LDA

Dal grafico in figura si evince come il numero ottimo di topic per l'applicazione della tecnica LDA è nuovamente pari a 3.

La LDA e la LSA sono state applicate al Corpus ottenuto da Marzo (2024) unendo i nuovi articoli del 2024/2025, per ottenere un quadro più chiaro e aggiornato sullo stato dell'arte delle Learning Factory ed evidenziare attraverso i topic e le keyword identificate i trend principali che riguardano l'argomento in questione.

### 4.3 RISULTATI LDA & LSA

Si riportano nelle Figure 5 e 6 le WordCloud che raffigurano i risultati dell'applicazione delle due tecniche.



Figura 6: WordCloud LSA

## LDA Topic Wordclouds

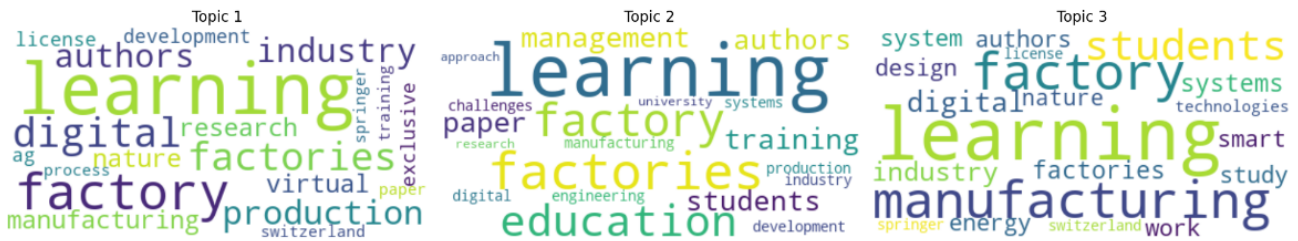


Figura 7: WordCloud LDA

Dalle figure 5 e 6 è possibile notare come le parole *learning* e *factory* siano quelle con più peso nei lavori della letteratura esaminata, confermando quindi che il Corpus è ben focalizzato sull'oggetto di indagine di questa ricerca. Inoltre emergono altre keyword principali, attraverso le quali possiamo identificare eventuali trend che saranno in seguito confermati nelle successive fasi della Systematic Literature Review.

Dal topic 2 della figura 3 emerge il tema legato alla metodologia *Lean*, associato nel topic alle keyword *management* e *training*, i quali suggeriscono un potenziale trend legato ai fondamenti della Lean Production legato all'implementazione di quest'ultimi all'interno delle Learning Factories.

Dalle WordCloud emergono le keyword *education*, *training*, e *students*, volte ad evidenziare chiaramente lo scopo formativo e didattico di questi ambienti di lavoro, con l'obiettivo primario del supporto nello sviluppo delle competenze tecnico-pratiche in contesti realistici.

Inoltre emergono keyword come *production*, *design*, *manufacturing* e *assembly* legate alle fasi del ciclo di vita di un prodotto oggetto di una Learning Factory. È possibile notare come questi termini siano legati a concetti operativi correlati al mondo dell'industria, come ad esempio lo sviluppo e la progettazione di un prodotto e le varie fasi di produzione e assemblaggio di quest'ultimo.

Altro concetto che emerge dall'analisi condotta, in particolare dal topic 3 della LSA (figura 3), è quello di *digital twin*, impiegato come strumento didattico avanzato per replicare digitalmente sistemi produttivi reali, consentendo agli utenti di analizzare e ottimizzare i processi attraverso simulazioni interattive, senza impattare fisicamente sull'impianto. Il termine *smart* inoltre riflette la tendenza alla digitalizzazione e l'evoluzione delle Learning Factory guidata dai concetti di Industry 4.0.

La Tabella 3 lega le quattro research questions alle keyword emerse dall'applicazione della LDA e LSA.

| RESEARCH QUESTIONS                                                                                            | KEYWORD LDA/LSA                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| RQ1: Quali sono gli scopi principali delle Learning Factory esistenti?                                        | <i>learning, training, students, education, research</i>     |
| RQ2: Quali sono i principali contenuti didattici/di apprendimento delle Learning Factory esistenti?           | <i>industry, production, management, lean, manufacturing</i> |
| RQ3: Quali sono le fasi del ciclo di vita del prodotto analizzate dalle Learning Factory esistenti?           | <i>manufacturing, design, assembly, production</i>           |
| RQ4: Quali sono le principali tecnologie implementate/utilizzate all'interno delle Learning Factory esistenti | <i>digital, twin, smart</i>                                  |

Tabella 3: keyword LDA/LSA legate alle RQ

## 5. FASE 3: SCREENING MANUALE TRAMITE LETTURA DEL TITOLO E DELL' ABSTRACT

È stato successivamente effettuato uno screening manuale degli articoli pubblicati tra il 2024 e il 2025 mediante la lettura di titolo e abstract, con l'obiettivo di verificarne la coerenza e la pertinenza rispetto alle quattro domande di ricerca identificate. Inoltre un altro obiettivo di questa fase è quello di rimuovere dal Corpus gli articoli identificati se questi ultimi, dalla lettura di titolo ed abstract, risultassero essere fuori tematica. Come specificato in precedenza, nell'applicazione di questa fase è stata eseguita la stessa metodologia utilizzata e descritta da Marzo (2024).

| Authors                | Title                          | Year | SCOPO                                                                      |         | CONTENUTI DIDATTICI |            | FASI CICLO DI VITA              |                     |                                |          |          | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |  |   |
|------------------------|--------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------|------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|----------|----------|-------------------------|--|---|
|                        |                                |      | INDUSTRIAL TRAINING/EDUCATION                                              | RICERCA | BUSINESS            | OPERATIONS | RESEARCH AND DEVELOPMENT/SUPPLY | PRODUCTION/ASSEMBLY | DISTRIBUTION/LOGISTICS/SERVICE | DISPOSAL | HARDWARE | SOFTWARE                |  |   |
| Ramsauer C.            | Experiences from 10 years LE   | 2024 | X                                                                          | X       |                     | X          |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Fantuzzi I.C.          | The Impact of University On    | 2024 | NON PERTINENTE CON LE TEMATICHE AFFRONTATE ALL'INTERNO DEL PRESENTE LAVORO |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Rudele K.              | Industrial management met      | 2024 | X                                                                          |         |                     |            | X                               |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Barth J.               | Development of an IAL One      | 2024 |                                                                            | X       |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Aly-Shaarrah M.        | Using the Learning Factory fi  | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Wollett T.             | Investigation of Digital Valu  | 2024 |                                                                            | X       |                     |            |                                 | X                   |                                |          |          |                         |  |   |
| Saravanya L.           | The Concept of Digital Trans   | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Veira R.E.             | Learning Factories in New B    | 2024 | X                                                                          |         |                     | X          |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Lindgren K.            | Empowering STEM Students       | 2024 | NON PERTINENTE CON LE TEMATICHE AFFRONTATE ALL'INTERNO DEL PRESENTE LAVORO |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Ahmad R.               | Insights into the "Pi Tech Acz | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Grimmel P.             | A Game-Based Learning App      | 2024 | X                                                                          |         | X                   |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Galdeano M.            | A Project-Based Learning Ap    | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Schroth T.             | Investigation of AI Algorithm  | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Papacharalampopoulos A | Teaching Learning Factories    | 2024 |                                                                            | X       |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Dehnborg M.H.          | AI Education for Tomorrow's    | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  | X |
| Köppe G.               | The Role of Learning Factori   | 2024 | X                                                                          |         |                     | X          |                                 |                     |                                |          |          |                         |  | X |
| Wanyama T.             | Learning Factory for Integrat  | 2024 | X                                                                          |         |                     | X          |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Semenets-Olova I.      | Learning Factories in the Era  | 2024 |                                                                            | X       |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Wang K.                | Progress and Reflection of L   | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Padovano A.            | Empowering Operator 5.0: hi    | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  | X |
| Olearczyk J.           | System Architecture for Exter  | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  | X |
| Salcedo Gil R.         | Optimizing Training for Hum    | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  | X |
| Ahmad M.H.             | The Influence of Industrial I  | 2024 |                                                                            | X       |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Chemweno P.            | Learning Factory Concept Tai   | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Ahmad S.               | Integrated Smart Monitoring    | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  | X |
| Nelles J.              | Skill Awareness Framework      | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Dvorak J.              | Circular Production in Learni  | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  |   |
| Rosemeyer J.           | Human-Centered Design for      | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |          |                         |  | X |

Tabella 4a: screening titolo e abstract

| Authors       | Title                         | Year | SCOPO                                                                           |         | CONTENUTI DIDATTICI |            | FASI CICLO DI VITA              |                     |                             |          | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |          |  |
|---------------|-------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------|------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------|----------|-------------------------|----------|--|
|               |                               |      | INDUSTRIAL TRAINING/EDUCATION                                                   | RICERCA | BUSINESS            | OPERATIONS | RESEARCH AND DEVELOPMENT/SUPPLY | PRODUCTION/ASSEMBLY | DISTRIBUTION/LOGIST/SERVICE | DISPOSAL | HARDWARE                | SOFTWARE |  |
| Karhisi A.    | How inclusive is Manufactur   | 2024 |                                                                                 | X       |                     | X          |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Raitt A.      | In-house Workshop Support     | 2024 | X                                                                               |         | X                   |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Massa J.      | Guiding the Design of Effect  | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Martineti A.  | Learning from strangers: Tra  | 2024 | X                                                                               |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Zhang Y.      | Designing of an AM Learning   | 2024 | X                                                                               |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Wengle M.     | "Zukunftsfabrik Bodensee"     | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Bittercour V. | Interactive Digitally Support | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Rosic M.      | Designing Natural User line   | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Terkaj W.     | A Framework for virtual learn | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Hader B.      | Improving Human-Robot Inti    | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Mehrash M.    | Development of Experientia    | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Ferreira E.   | Teaching Human-Centered C     | 2024 | X                                                                               |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Köhler C.     | Human-Centered/Optimizati     | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Weißflog L.   | Balancing the Three-Legged    | 2024 | X                                                                               |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Königs L.C.   | Balancing Immersion and Si    | 2024 | X                                                                               |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Coenen J.     | Disassembly Strategies for f  | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Stanley E.M.  | Will the First-Year Makers P  | 2024 | X                                                                               |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Rückert P.    | Design and Validation of a l  | 2024 | X                                                                               |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Cimini C.     | Design and test of a Human    | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Frick N.      | Design Model for the Digita   | 2024 | X                                                                               |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Knoet M.      | Competency-Based Develop      | 2024 | X                                                                               |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Permin E.     | Perspectives, Application Gz  | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Dalm K.       | Application of Collaborative  | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Agbomehwa L.  | Integrating Industry 5.0 Com  | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Lugaresi G.   | A new teaching approach ex    | 2024 | X                                                                               |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Manettas C.   | Development and Validatio     | 2024 | 2024 NON PERTINENTE CON LE TEMATICHE AFFRONTATE ALL'INTERNO DEL PRESENTE LAVORO |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Kneissi A.    | A human-centric preference-   | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Schwinn A.    | Connecting Work System Pla    | 2024 | X                                                                               |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Stabo D.      | Learning Factories in Practic | 2024 | X                                                                               |         |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |
| Heister P.    | Complementing Learning Fa     | 2024 |                                                                                 | X       |                     |            |                                 |                     |                             |          |                         |          |  |

Tabella 4b: screening titolo e abstract

| Authors              | Title                          | Year | SCOPO                                                                      |         | CONTENUTI DIDATTICI |            | FASI CICLO VITA                 |                     |                              |          |          | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |   |   |
|----------------------|--------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------|------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------|----------|----------|-------------------------|---|---|
|                      |                                |      | INDUSTRIAL TRAINING/EDUCATION                                              | RICERCA | BUSINESS            | OPERATIONS | RESEARCH AND DEVELOPMENT/SUPPLY | PRODUCTION/ASSEMBLY | DISTRIBUTION/LOGIST./SERVICE | DISPOSAL | HARDWARE | SOFTWARE                |   |   |
| Layeb S.B.           | New Horizons in Engineering    | 2024 | X                                                                          |         |                     |            |                                 | X                   |                              |          |          |                         | X |   |
| Beinhardt F.         | Meeting the Complexity of Ir   | 2024 | X                                                                          |         | X                   | X          | X                               | X                   |                              | X        |          |                         |   | X |
| Deuse J.             | Establishing a Machine Lean    | 2024 | X                                                                          |         |                     | X          | X                               |                     |                              |          |          |                         |   |   |
| Martin M.            | Mastering the Future of Proc   | 2024 | X                                                                          |         |                     | X          | X                               | X                   |                              |          |          |                         |   |   |
| Prell B.             | Transfer of Industry 4.0 Know  | 2024 | X                                                                          |         |                     | X          | X                               | X                   |                              |          |          |                         |   |   |
| Meštrović A.A.       | Learning factory environmer    | 2024 | X                                                                          |         |                     | X          | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Jovanoski B.         | Smart Learning Factory – Sfo   | 2024 | X                                                                          |         |                     | X          | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Dorka F.             | Using Large Language Mode      | 2024 | X                                                                          |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Künster N.           | Methodical Approach to the     | 2024 | X                                                                          |         |                     | X          | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Hentsch M.           | Concept for a Low-Cost Impli   | 2024 | X                                                                          |         |                     | X          | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Bondini A.           | Breaking Barriers: Enhancing   | 2024 | NON PERTINENTE CON LE TEMATICHE AFFRONTATE ALL'INTERNO DEL PRESENTE LAVORO |         |                     |            |                                 | X                   |                              |          |          |                         |   | X |
| Eloumi K.            | Integration of Pk by Light II  | 2024 | X                                                                          |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Jier S.V.            | A cognitive digital twin for p | 2025 |                                                                            |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Häfner P.            | An Adaptive Learning Enviro    | 2024 | X                                                                          |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Miron M.B.           | Quo Vadis Learning Factorie    | 2024 |                                                                            |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Jier S.V.            | Federated Interoperable Dig    | 2024 |                                                                            |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Schlechter T.        | Development and case stud      | 2024 |                                                                            |         |                     |            | X                               | X                   |                              |          |          |                         |   | X |
| Alrijij S.           | Employing PLM in Learning F    | 2024 | X                                                                          |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Rüdele K.            | Resource Productivity Tough    | 2024 |                                                                            |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Xie Y.               | VR-Based Learning Platform     | 2024 | X                                                                          |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Ghafoorpoor Yazdi P. | Cyber Physical System for Re   | 2024 |                                                                            |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Björnsten T.B.       | Extending the Learning Facto   | 2024 |                                                                            |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| De Marchi M.         | Computer Vision in a Digital   | 2024 | X                                                                          |         |                     | X          | X                               | X                   |                              |          |          |                         |   | X |
| Mueller F.A.         | From Sustainable Production    | 2024 |                                                                            |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Padovano A.          | Towards sustainable cognit     | 2024 |                                                                            |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Kim H.               | Behavioral Modeling of Coll    | 2024 | X                                                                          |         |                     |            | X                               |                     |                              |          | X        |                         |   |   |
| Vázquez-Hurtado C.   | Virtual Twin for the Smart Fa  | 2024 | X                                                                          |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Veerasamy N.         | Examining Misinformation a     | 2024 | NON PERTINENTE CON LE TEMATICHE AFFRONTATE ALL'INTERNO DEL PRESENTE LAVORO |         |                     |            |                                 | X                   |                              |          |          |                         |   | X |
| Nezzi C.             | Modeling and simulation of     | 2024 |                                                                            |         |                     |            | X                               |                     |                              |          |          |                         |   | X |
| Grano A.             | A Data Management Concep       | 2024 |                                                                            |         |                     |            | X                               | X                   |                              |          |          |                         |   | X |

Tabella 4c: screening titolo e abstract



| Authors              | Title                          | Year | SCOPO                         |         | CONTENUTI DIDATTICI |            | FASI CICLO DI VITA              |                     |                                |          | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |          |   |
|----------------------|--------------------------------|------|-------------------------------|---------|---------------------|------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|----------|-------------------------|----------|---|
|                      |                                |      | INDUSTRIAL TRAINING/EDUCATION | RICERCA | BUSINESS            | OPERATIONS | RESEARCH AND DEVELOPMENT/SUPPLY | PRODUCTION/ASSEMBLY | DISTRIBUTION/LOGISTICS/SERVICE | DISPOSAL | HARDWARE                | SOFTWARE |   |
| Zumpe F.             | Application of the Learning    | 2024 |                               | X       | X                   |            |                                 |                     |                                |          |                         |          |   |
| Kang Y.              | Smart Farming for Sustainab    | 2024 | X                             | X       |                     | X          |                                 |                     |                                |          |                         |          |   |
| Leber P.             | Intra-logistics in Learning Fa | 2024 | X                             |         | X                   |            |                                 |                     |                                |          |                         | X        | X |
| Teichmann M.         | Digitalization, Demographic    | 2024 |                               | X       |                     |            |                                 |                     |                                |          |                         |          |   |
| Kang U. T.           | RECONSTRUCTING A MANUFA        | 2024 | X                             |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |                         |          | X |
| Serified S.          | A Learning Factory as a Comj   | 2024 | X                             |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |                         |          |   |
| Noga M.              | Harnessing the Potential of    | 2024 | X                             |         |                     | X          |                                 |                     |                                |          |                         | X        | X |
| Afy-Shararah M.      | Using Augmented Reality ar     | 2024 | X                             |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |                         |          |   |
| Monok N.             | Enhancing engineering stud     | 2024 | X                             |         |                     | X          |                                 |                     |                                |          |                         |          | X |
| Meštrović-Amarađa A. | Artificial Intelligence Forec  | 2024 | X                             |         |                     | X          |                                 |                     | X                              |          |                         |          | X |
| Hager J.             | Biologicalisation in Learnin   | 2024 | X                             | X       |                     | X          |                                 |                     |                                |          |                         |          |   |
| Trilitsch U.         | Learning Environment for Di    | 2024 |                               |         |                     | X          |                                 |                     |                                |          |                         |          | X |
| Rouschal P.          | Towards a Learning Factory-    | 2024 | X                             |         |                     | X          |                                 |                     | X                              |          |                         |          | X |
| Rudela K.            | Circular Economy in Learning   | 2024 |                               |         |                     | X          |                                 |                     |                                |          |                         |          |   |
| Vojtko T.            | An IoT Learning Factory Dem    | 2024 | X                             |         |                     | X          |                                 |                     |                                |          |                         | X        |   |
| Khan Z.C.            | Ontology-driven cybersecuri    | 2024 | X                             |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |                         |          |   |
| Pothoff L.           | Escape Rooms as a Tool for     | 2024 | X                             |         |                     |            |                                 |                     |                                |          |                         |          |   |

Tabella 4d: screening titolo e abstract

Analizzando la tabella 4, per quanto riguarda la prima research question si rileva come le Learning Factory siano prevalentemente orientate a finalità educative (es: Layeb et al. 2024; Lugaresi et al. 2024); sebbene non manchino contributi che le descrivano come strumenti a supporto della formazione industriale e della ricerca (es: Hader et al. 2024; Martin et al. 2024).

Relativamente alla seconda research question, riguardante i principali contenuti didattici/di apprendimento delle Learning Factory, emerge con chiarezza l'enfasi sui contenuti legati alle operations, in linea con le tematiche attualmente più discusse, tra cui l'Industria 4.0 (Häfner et al. 2024), l'Industria 5.0 (Agbomemewa et al. 2024) e l'applicazione dell'intelligenza artificiale nei contesti formativi (Meštrović et al. 2024). Tale evidenza suggerisce la presenza di un potenziale gap tematico per quanto riguarda le tematiche manageriali, che potrebbe rappresentare un'opportunità di approfondimento per la comunità scientifica.

In particolare, l'integrazione di tematiche manageriali nei modelli formativi delle Learning Factory risulterebbe rilevante per allineare maggiormente questi ambienti alle reali esigenze dell'industria contemporanea, affrontando in questo modo le nuove tendenze legate alla digitalizzazione delle imprese e ai concetti di industria 4.0 e 5.0. Infatti essi prevedono lo sviluppo di Learning Factory per permettere alle aziende di effettuare decision making tramite l'analisi dei dati per ridurre rischi in ambito finanziario e manageriale. Ovviamente, tale gap dovrà essere verificato nella fasi successive della Systematic Literature Review.

Per quanto concerne la terza domanda di ricerca, relativa alle fasi del ciclo di vita del prodotto sviluppato all'interno delle Learning Factory, in coerenza con quanto già evidenziato nel lavoro di Marzo (2024), esse si concentrano prevalentemente sulle fasi di produzione/assemblaggio e distribuzione/logistica. La lettura degli abstract evidenzia infatti un forte interesse verso lo sviluppo di linee di assemblaggio a fini educativi e sperimentali, finalizzate alla validazione di nuove tecnologie applicabili all'ambito industriale, oggetto ad esempio dei lavori di Ferreira e Louw (2024) e di Chemweno et al. (2024).

Un aspetto particolarmente rilevante emerso nel periodo temporale degli articoli qui considerato e legato alla quarta domanda di ricerca, relativa alle tecnologie hardware/software utilizzate, è l'integrazione di tecnologie avanzate all'interno delle Learning Factory, in particolare quelle associate all'Industria 4.0. In tale contesto, gli articoli di letteratura citano componenti sia hardware (es: sensori, robot collaborativi) sia software (es: software per la visualizzazione 3D, software che monitorano la linea produttiva). Inoltre, si segnala l'introduzione crescente dell'intelligenza artificiale nello sviluppo di soluzioni digitali, con particolare riferimento ai digital twin, ovvero rappresentazioni virtuali dinamiche di oggetti, processi o sistemi fisici, utilizzate per monitorare, simulare e ottimizzare le prestazioni in tempo reale (De Marchi et al., 2024).

Nel grafico in figura 8 vengono rappresentate le tendenze descritte.

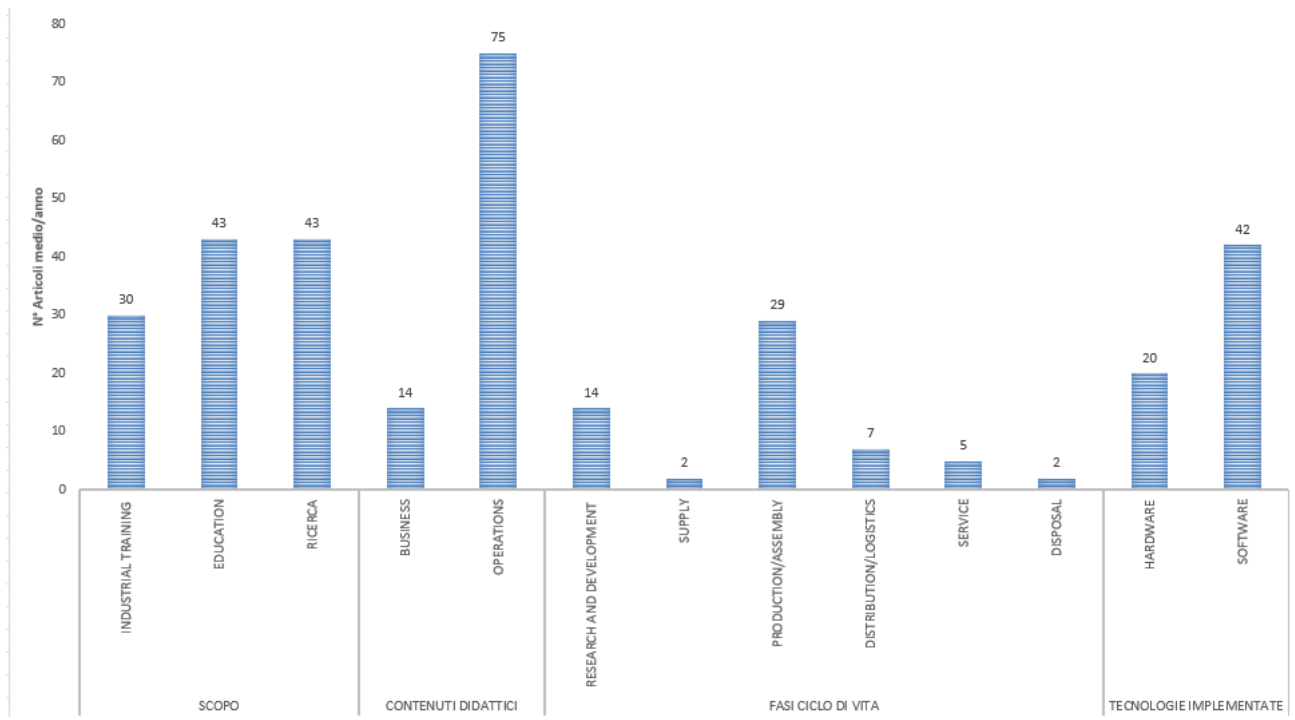


Figura 8: risultati screening di titolo e abstract

## 6. FASE 4: SCREENING MANUALE MEDIANTE LETTURA COMPLETA DELL'ARTICOLO

In questa fase è stato effettuato lo screening manuale tramite lettura completa degli articoli ricavati tramite la precedente fase di screening, seguendo la procedura esplicitata da Marzo (2024).

È opportuno precisare che una parte significativa degli articoli analizzati proviene dai due volumi:

- Thiede, Lutters, *Learning Factories for the Future –Volume 1, Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories*, 2024, Springer
- Thiede, Lutters, *Learning Factories for the Future –Volume 2, Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories*, 2024, Springer

che raccolgono gli atti della conferenza internazionale sulle Learning Factory tenutasi presso l'Università di Twente nell'aprile 2024. Poiché tali contributi non risultavano disponibili in formato full text nel database Scopus, si è ritenuto opportuno procedere all'acquisto dei volumi, al fine di consentire la consultazione integrale degli articoli per garantire un'analisi più completa ed aggiornata possibile.

Inoltre sono stati rivisti alcuni articoli presenti nel Corpus di Marzo (2024) poiché ritenuti fuori tematica, poiché non avevano come argomento principale le Learning Factory ma le citavano soltanto senza approfondire il contesto.

Sono state aggiornate e riviste le spunte all'interno della tabella compilata nella fase di screening tramite titolo ed abstract, inoltre sono state compilate le seguenti colonne:

- Citations al 04/07/2025
- Approccio di ricerca
- Metodologia di ricerca
- Tematica
- Paese di pubblicazione

La compilazione della tabella ha permesso quindi di effettuare un'analisi completa che ha portato ai risultati esposti nel capitolo x.

Lo screening inoltre ha visto l'ausilio del software SciSpace per approfondire e verificare i contenuti in relazione alle domande di ricerca. Lo strumento basato su intelligenza artificiale è stato impiegato come supporto per chiarire eventuali dubbi ed avere un quadro chiaro riguardo al contenuto dell'articolo e a come questo rispondesse alle quattro research questions. È importante precisare che la valutazione finale è stata fatta in seguito alla lettura completa dell'articolo.

I risultati completi dell'intero Corpus sono elencati in tabella 5.



| TITOLO                                          | AUTORE              | ANNO | SCOPO     |           | CONTENUTI DIDATTICI |          | FASI CICLO DIVITA |                     |         | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |         | CITATIONS 04/07/ |          |          |          |
|-------------------------------------------------|---------------------|------|-----------|-----------|---------------------|----------|-------------------|---------------------|---------|-------------------------|---------|------------------|----------|----------|----------|
|                                                 |                     |      | INDUSTRIA | EDUCATIVA | RICERCA             | BUSINESS | OPERATIONS        | RESEARCH AND SUPPLY | PRODUCT | DISTRIBUTIVE            | SERVICE |                  | DISPOSAL | HARDWARE | SOFTWARE |
|                                                 |                     |      |           |           |                     |          |                   |                     |         |                         |         |                  |          |          |          |
| A Systematic Approach for Designing Learning    | Abele E.            | 2017 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         |                         |         |                  | X        | X        | 7        |
| Learning factory design: a competency-oriented  | Tisch M.            | 2016 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 96       |
| WORLDWIDE LEAN LEARNING FACTORIES               | Wittek G.R.         | 2023 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 1        |
| A "learning small enterprise" networked with    | Angrisan L.         | 2020 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         |                         |         |                  | X        | X        | 13       |
| Towards a proactive vision of the training for  | Marmier F.          | 2021 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 12       |
| Learning Factory: The Path to Industry 4.0      | Baena F.            | 2017 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 213      |
| Bringing the Entrepreneurial Mindset into Mini  | Sørensen A.         | 2022 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         |                         |         |                  | X        | X        | 10       |
| Sustainable Manufacturing in Vietnamese Engi    | Reise C.            | 2016 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        |          |
| Utility-based Configuration of Learning Facto   | Tisch M.            | 2017 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 10       |
| Learning Environment to Support the Product     | D Schützer K.       | 2017 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 4        |
| Learning factories for research, education, and | Abele E.            | 2015 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 291      |
| Broadening participation in learning factories  | Spillane D.R.       | 2020 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 4        |
| Learning factories for sustainable manufacturi  | Helm R.             | 2014 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 7        |
| An approach for designing smart manufacturi     | Alonso-Perez J.L.   | 2022 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 3        |
| PROJECT-BASED LEARNING FOR ENGINEERING          | Al Khatib A.        | 2023 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 2        |
| Teaching Engineering Design for Industry 4.0    | U Chelini J.        | 2023 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 2        |
| Product family design for changeable learni     | Wagner U.           | 2014 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 21       |
| Competence development for the holistic desi    | Hummel V.           | 2015 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 31       |
| Developing products for changeable learni       | Wagner U.           | 2015 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 14       |
| Implementing Cyber-physical Production Syst     | Thiede S.           | 2016 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 99       |
| Industry 4.0 learning factory didactic design   | pa Sackey S.M.      | 2017 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 60       |
| A Classification Framework for Analysing Ind    | Vallati S.          | 2023 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 0        |
| A Learning Approach for Future Competencie      | Dahl H.             | 2023 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 5        |
| Literature review on cyber physical systems     | de Lozano C.V.      | 2020 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 41       |
| Starting up a learning factory focused on ind   | Leal L.F.           | 2020 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 15       |
| Idea Lab: Bridging Product Design and Autom     | Kleppe P.S.         | 2022 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 4        |
| System development for the configuration of     | le Krelt A.         | 2020 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 3        |
| Towards a Mixed Virtual Reality Environment     | lvázquez-Hurtado C. | 2023 | X         | X         | X                   | X        | X                 |                     |         | X                       |         |                  | X        | X        | 3        |

Tabella 5a: screening completo

| TITOLO                                                               | AUTORE | ANNO | INDUSTRIE/EDUCATIVE/RICERCA | SCOPO | BUSINESS   OPERATIONS | CONTENUTI DIDATTICI | RESEARCH AND SUPPLY | PRODUCT/DISTRIBUT | DISPOSAL | HARDWARE | IMPLEMENTATE SOFTWARE | CITATIONS 04/07 |
|----------------------------------------------------------------------|--------|------|-----------------------------|-------|-----------------------|---------------------|---------------------|-------------------|----------|----------|-----------------------|-----------------|
| AD Design Guidelines for Implementing I4.0 Le Rauch E.               |        | 2019 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 11              |
| Professional skills in the Product Development: Sallati C.           |        | 2019 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 31              |
| An interdisciplinary and hands-on learning appi Nöhring F.           |        | 2015 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 5               |
| The MTA SZTAKI Smart Factory: Platform for Re Kemény Z.              |        | 2016 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 41              |
| Implementation of a Bi-Directional Digital Twin Protic A.            |        | 2020 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 24              |
| Integrated Product / System Design and Plannit ElMaraghy H.          |        | 2017 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 24              |
| Experimental learning of CAD systems interoper Alves C.              |        | 2019 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 15              |
| A Seamless Convergence of the Digital and Phy Brenner B.             |        | 2016 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 14              |
| Learning integrated product and manufacturing ElMaraghy H.           |        | 2015 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 22              |
| Learning factories for future oriented research Abele E.             |        | 2017 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 251             |
| A Literature Survey of Energy Sustainability in L Aasad F.           |        | 2020 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 5               |
| Guideline-based video analysis of competencie Hambach J.             |        | 2015 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 6               |
| Scientific mapping to identify competencies rec Kipper L.M.          |        | 2021 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 185             |
| Design concept towards a human-centered lear Mattsson S.             |        | 2018 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 9               |
| A simplified changeable learning factory design Geddawy T.           |        | 2019 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 1               |
| Work in Progress: Developing Competencies by Heredia-Marin I.B.      |        | 2022 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 1               |
| Design alternatives for internationally distributed Schumacher B.C.  |        | 2020 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 1               |
| An augmented reality collaborative product des Mourtzis D.           |        | 2020 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 66              |
| Advanced learning factory (aLF) -method, imple Plorin D.             |        | 2015 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 19              |
| Integrated and Modular Didactic and Methodol Lanza G.                |        | 2016 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 13              |
| Mass customization and paperless assembly in Merkel L.               |        | 2018 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 8               |
| A Learning Factory Framework: Challenges and Quinn W.                |        | 2022 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 3               |
| Integration of a Case Study into Learning Facto Vijayan K.K.         |        | 2019 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 13              |
| Guidelines to develop demonstration models o Fuertes J.J.            |        | 2023 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 7               |
| Evolution of the academic Fablab at University Angrisani L.          |        | 2018 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 2               |
| Learning Factories and Sustainable Engineering Wolf M.               |        | 2022 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 9               |
| Development of evaluation tools for learning fe Tverge N.            |        | 2018 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 24              |
| Practical Engineering Education: Use of collab Vogel C.              |        | 2023 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 2               |
| Research-based teaching in digital manufactur Engelhardt-Novitzki C. |        | 2020 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 3               |
| Advantages of learning factories for productior Andres M.            |        | 2019 | X                           | X     | X                     | X                   | X                   | X                 | X        | X        | X                     | 3               |

Tabella 5b: screening completo

| 1  | TITOLO                                                           | AUTORE | ANNO | SCOPO     |           |         | CONTENUTI DIDATTICI |            |                     | FASI CICLO DI VITA |              |         | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |          | CITAZIONI 04/07 |
|----|------------------------------------------------------------------|--------|------|-----------|-----------|---------|---------------------|------------|---------------------|--------------------|--------------|---------|-------------------------|----------|-----------------|
|    |                                                                  |        |      | INDUSTRIE | EDUCATIVE | RICERCA | BUSINESS            | OPERATIONS | RESEARCH AND SUPPLY | PRODUCT            | DISTRIBUTION | SERVICE | DISPOSAL                | HARDWARE |                 |
| 61 | Conceptual development of learning factory for Tan H-S.          |        | 2020 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 1               |
| 62 | Presenting the UCN industrial playground for te Gren H.G.        |        | 2020 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          |                 |
| 63 | Development of Learning Factory at FSRE, Univ Stojkic Z.         |        | 2019 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          |                 |
| 64 | Development of the transversal competencies Devika               |        | 2020 | X         | X         |         | X                   | X          |                     | X                  |              |         | X                       |          | 1               |
| 65 | Digital twinning as the basis for integration of Lutters E.      |        | 2023 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    |              |         | X                       |          |                 |
| 66 | System dynamics modelling and learning factor Assuad C.S.A.      |        | 2020 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          |                 |
| 67 | Learning factories: a review of state of the art Bellucci M.     |        | 2022 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          |                 |
| 68 | Integration of digitization trends in learning factories Li F.   |        | 2019 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 1               |
| 69 | Engineering education in changeable and recon Andersen A.-L.     |        | 2019 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 3               |
| 70 | Low-cost desktop learning factory to support tr Orozco E.        |        | 2024 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          |                 |
| 71 | A Hybrid Method Based on Systems Approach t Masse C.             |        | 2019 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          |                 |
| 72 | Towards 5.0 skills acquisition for students in in Lagorio A.     |        | 2024 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          |                 |
| 73 | Added value of a virtual approach to simulator Tvenge N.         |        | 2020 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 2               |
| 74 | Integration of engineering and manufacturing cShakirov E.        |        | 2019 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          |                 |
| 75 | Advanced Automation for SMEs in the I4.0 Rev Gualtieri L.        |        | 2018 | X         | X         |         | X                   | X          |                     | X                  |              |         | X                       |          | 2               |
| 76 | Digital Twin & Virtual Reality Enabled Conveyo Livanawaduge N.M. |        | 2023 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          |                 |
| 77 | Towards a modular, decentralized and digital ir Lang S.          |        | 2018 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 1               |
| 78 | Sustainability through Factory-Based Learning Jing Z.            |        | 2023 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          |                 |
| 79 | Learning factory for management, organization Wagner P.          |        | 2015 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 2               |
| 80 | Learning factory 2.0 -integrated view of produc Bender B.        |        | 2015 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 1               |
| 81 | Combining Learning Factories and ICT- based S Tvenge N.          |        | 2016 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 1               |
| 82 | Cyber-physical production systems combined w Seitz K.-F.         |        | 2015 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 8               |
| 83 | Experiencing Closed Loop Manufacturing in a L Juraschek M.       |        | 2017 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 1               |
| 84 | Project-based learning in production engineerir Balve P.         |        | 2015 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 3               |
| 85 | Learning factory on global production Lanza G.                   |        | 2015 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 1               |
| 86 | Learning Factories for the Operationalization o Moldavska A.     |        | 2016 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          |                 |
| 87 | Complementary Research and Education Oppor Kemény Z.             |        | 2016 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 1               |
| 88 | Mini-factory - A learning factory concept for sti Matt D.T.      |        | 2014 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 6               |
| 89 | Transition towards an Industry 4.0 State of the Karre H.         |        | 2017 | X         | X         |         | X                   | X          |                     | X                  |              |         | X                       |          | 13              |
| 90 | Integrating Intralogistics into Resource Efficient Scholz M.     |        | 2016 | X         | X         |         | X                   | X          |                     |                    | X            |         | X                       |          | 1               |

Tabella 5c: screening completo



| TITOLO                                                        | AUTORE    | ANNO | SCOPO       |           | CONTENUTI DIDATTICI |            | FASI CICLO DI VITA |            |         | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |         | CITAZIONI 04/07/20 |          |          |
|---------------------------------------------------------------|-----------|------|-------------|-----------|---------------------|------------|--------------------|------------|---------|-------------------------|---------|--------------------|----------|----------|
|                                                               |           |      | INDUSTRIALE | EDUCATIVO | BUSINESS            | OPERATIONS | RESEARCH           | AND SUPPLY | PRODUCT | DISTRIBUTION            | SERVICE |                    | DISPOSAL | HARDWARE |
| Learning factories for open schooling and colla Svasta P.     |           | 2016 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 0        |
| Holistic learning factories - A concept to train Kreimeier D. |           | 2014 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 71       |
| Intelligent Learning Management by Means of Posselt G.        |           | 2016 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 11       |
| Educational Learning Factory of a Holistic Prodi Graßler I.   |           | 2016 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 13       |
| Die lernfabrik-research-based learning for sust Blume S.      |           | 2015 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 46       |
| Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approx Erol S.        |           | 2016 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 478      |
| Lean learning factory at FESB - University of Sp Veza I.      |           | 2015 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 20       |
| ETA Learning Factory: A Holistic Concept for Te Abele E.      |           | 2016 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 31       |
| Evaluation Model for Mobility Design of Learnii Petrusch N.   |           | 2020 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 0        |
| BERTHA - A Flexible Learning Factory for Manu Schreiber S.    |           | 2016 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 16       |
| Roller Skis Assembly Line Learning Factory – Dr Ogorodnyk O.  |           | 2017 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 6        |
| SEPT Approaches for Education and Training us Centea D.       |           | 2019 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 19       |
| Building capabilities for agility in a learning fac Karre H.  |           | 2019 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 8        |
| Concept Development for the Verification of th Liebrecht C.   |           | 2017 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 6        |
| Development of Learning Factory Directory - Dr Hegedic M.     |           | 2022 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 0        |
| SEPT Learning Factory for Industry 4.0 Educatio Elbestawi M.  |           | 2018 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 69       |
| Concept, challenges, and learning benefits dev Zarte M.       |           | 2019 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 13       |
| TU Wien Pilot Factory Industry 4.0                            | Hennig M. | 2019 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 36       |
| Industrie 4.0 - Competencies for a modern prod Enke J.        |           | 2018 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 89       |
| IdeaLab: A learning factory concept for Norway Vijayan K.K.   |           | 2020 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 5        |
| A Learning Factory concept for skills enhancem Maheso N.      |           | 2019 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 8        |
| Performance analysis of the RFID system for or Gjeldum N.     |           | 2018 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 19       |
| Augmented reality for future research opportun Vargas D.G.M.  |           | 2020 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 22       |
| Development of teaching factory competency-k Wahjusaputri S.  |           | 2022 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 5        |
| Learning manual assembly through real-time m Piliati F.       |           | 2020 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 54       |
| Learning Factories 4.0 in technical vocational s Roll M.      |           | 2021 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 27       |
| On the development of the Digital Shadow of tl Sala R.        |           | 2022 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 2        |
| Using a semi-automated job-shop production s Pechmann A.      |           | 2019 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 3        |
| Integration of LIFT Technology in an Industry 4.0 Mukku V.D.  |           | 2019 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 14       |
| Challenges in Implementing Industry 4.0 Laborat Marian R.     |           | 2019 | X           |           | X                   | X          |                    |            | X       |                         |         | X                  |          | 4        |

Tabella 5d: screening completo

| TITOLO                                                           | AUTORE | ANNO | SCOPO                  |         | CONTENUTI DIDATTICI |            | FASI CICLO DI VITA  |         |              | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |          | CITAZIONI 04/07/ |
|------------------------------------------------------------------|--------|------|------------------------|---------|---------------------|------------|---------------------|---------|--------------|-------------------------|----------|------------------|
|                                                                  |        |      | INDUSTRIAL/EDUCATIONAL | RICERCA | BUSINESS            | OPERATIONS | RESEARCH AND SUPPLY | PRODUCT | DISTRIBUTION | SERVICE                 | DISPOSAL |                  |
| A Cybersecurity Training Concept for Cyber-physical Threat K.    |        | 2023 | X                      | X       | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 3                |
| Design of a Demonstrator Environment for Inve Brooks S.          |        | 2023 |                        | X       | X                   | X          |                     |         |              |                         | X        | 1                |
| Learning-by-Doing Safety and Maintenance Pra Mazzuto G.          |        | 2022 | X                      |         | X                   | X          |                     |         | X            |                         | X        | 6                |
| RFID in manufacturing: An implementation case Centea D.          |        | 2020 | X                      | X       |                     | X          |                     | X       |              |                         | X        | 7                |
| An implementation approach for an academic   Ralph B.J.          |        | 2020 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 19               |
| Getting small medium enterprises started on in Leona Niemeyer C. |        | 2020 | X                      |         | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 24               |
| Using the SEPT learning factory for the implementation Centea D. |        | 2020 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 13               |
| Cloud platform for learning factories Kolesnyk O.                |        | 2021 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 3                |
| Supporting SMEs towards adopting mixed reality Butth L.          |        | 2018 | X                      |         | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 3                |
| Process Analysis and Modelling of Operator Performance G.C.      |        | 2024 | X                      | X       |                     | X          |                     | X       |              |                         | X        | 1                |
| Towards a connected Digital Twin Learning Ecc Garcia A.          |        | 2022 | X                      | X       | X                   | X          |                     |         |              |                         | X        | 41               |
| Outline of an Industry 4.0 Awareness Game Mortensen S.T.         |        | 2019 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 9                |
| Learning Factory Modules for Smart Factories Prinz C.            |        | 2016 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 143              |
| A Virtual Commissioning Learning Platform Mortensen S.T.         |        | 2018 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 33               |
| Learning in the AutoFab - The Fully Automated   Simons S.        |        | 2017 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 88               |
| Learning Factories' Trainings as an Enabler of Reuter M.         |        | 2017 | X                      |         | X                   | X          |                     | X       |              |                         |          | 47               |
| Simulation Game for Intelligent Production Log Blöchl S.J.       |        | 2016 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 38               |
| The AAU Smart Production Laboratory for Teac Madsen O.           |        | 2017 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 50               |
| Design and implementation of a low cost RFID Louw L.             |        | 2018 | X                      |         | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 15               |
| Textile Learning Factory 4.0 - Preparing Germa Küsters D.        |        | 2017 | X                      |         | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 94               |
| Industry 4.0 learning factory for regional SMEs Faller C.        |        | 2015 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 193              |
| Reshaping the Curriculum for Academy in Facto Jamaludin K.A.     |        | 2023 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 2                |
| Manufacturing and Evaluation of the Open-Source Purdon K.        |        | 2021 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 3                |
| Approach for the implementation of resource a Weyand A.          |        | 2023 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 1                |
| Co-Creation of Production Resources and Processes Kemény Z.      |        | 2023 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 1                |
| Digital Triplet and its implementation on Learn Umeda Y.         |        | 2022 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 11               |
| Methodology for the development of transform Oberc H.            |        | 2020 | X                      |         | X                   | X          |                     | X       |              |                         |          | 1                |
| Bender - An educational game for teaching agile Omidvarkarjan D. |        | 2020 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 11               |
| A systematic analysis of learning factories in G Sudhoff M.      |        | 2020 | X                      | X       | X                   | X          |                     | X       |              |                         | X        | 17               |
| On the application of augmented reality in a leather Eder M.     |        | 2020 | X                      |         | X                   | X          |                     |         | X            |                         | X        | 30               |

Tabella 5e: screening completo

| TITOLO                                                          | AUTORE | ANNO | SCOPO     |           | CONTENUTI DIDATTICI |            | FASI CICLO DI VITA  |         |           | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |          | CITAZIONI 04/07/ |
|-----------------------------------------------------------------|--------|------|-----------|-----------|---------------------|------------|---------------------|---------|-----------|-------------------------|----------|------------------|
|                                                                 |        |      | INDUSTRIE | EDUCATIVE | BUSINESS            | OPERATIONS | RESEARCH AND SUPPLY | PRODUCT | DISTRIBUT | SERVICE                 | DISPOSAL |                  |
| Integration of the human-robot system in the le Aljinovic A.    |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         | X         |                         | X        | 16               |
| Integration of a teardown approach at Graz Uni Kohlweiss A.     |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 2                |
| Implementing AR/MR - Learning factories as pr Sorko S.R.        |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 17               |
| 5G and AI technology application in the AMTC Zhang W.           |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 22               |
| A digital twin creation method for an openour Al-Geddawy T.     |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 19               |
| A Machine Vision-based Cyber-Physical Produc Kumar R.           |        | 2021 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 21               |
| Machine Vision and Radio-Frequency Identifica Kumar R.          |        | 2021 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        |                  |
| A FabLab as integrative part of a learning facto Ropin H.       |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 9                |
| Design Approach for a Learning Factory to train Sadaj E.A.      |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 4                |
| Agile implementation of virtual reality in learni Riemann T.    |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 24               |
| A new learning factory experience exploiting Li Lugaresi G.     |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 10               |
| A data-driven approach for quality analytics of Yang S.         |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 2                |
| A science mapping study on learning factories Martinez P.       |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 8                |
| A practical training approach in learning factor Oberc H.       |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 11               |
| Teaching industrie 4.0 technologies in a learni Louw L.         |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 18               |
| A mixed reality application for studying the imi Czarski M.     |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 4                |
| Opportunities and challenges in integrating ad Centea D.        |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 7                |
| Order-oriented learning factories: Why and how Siegart J.       |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 1                |
| Design and development of a flexible manufact Mourtzis D.       |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 32               |
| Integrating virtual and physical production prox Büth L.        |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 8                |
| Effectivity of Learning Factories to convey prob Steckmann F.   |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 5                |
| Integration of low-cost digital energy meters in Eder M.        |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 7                |
| Software control system requirements for ultra-Siegart J.       |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 3                |
| Data acquisition to enable research, education Herstätter P.    |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 5                |
| Learning Environment for Introduction in Discre Schumacher B.C. |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 1                |
| A cloud-based research and learning factory fo Merz R.          |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         |           |                         | X        | 5                |
| Concept of a mixed-reality learning environme Sievers T.S.      |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 22               |
| Exercise of digital kaizen activities based on d Umeda Y.       |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 30               |
| Consideration of digitalization for the purpose Brüggemann H.   |        | 2020 | X         | X         | X                   | X          |                     |         | X         |                         | X        | 9                |
| Influence of learning factories on students' suc Glass R.       |        | 2018 | X         | X         | X                   | X          |                     | X       |           |                         | X        | 8                |

Tabella 5f: screening completo

| TITOLO                                            | AUTORE         | ANNO | SCOPO     |           | CONTENUTI DIDATTICI |          | FASI CICLO DI VITA |                     |         | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |         | CITAZIONI 04/07/ |          |
|---------------------------------------------------|----------------|------|-----------|-----------|---------------------|----------|--------------------|---------------------|---------|-------------------------|---------|------------------|----------|
|                                                   |                |      | INDUSTRIA | EDUCATIVO | RICERCA             | BUSINESS | OPERATIONS         | RESEARCH AND SUPPLY | PRODUCT | DISTRIBUT               | SERVICE |                  | DISPOSAL |
| Optimizing Training for Human-Robot Collaboration | Salcedo Gil R. | 2024 | X         |           |                     | X        |                    |                     |         |                         | X       |                  | 0        |
| Learning Factory Concept Tailored for Engineers   | Chemweno P.    | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    |                     | X       |                         |         |                  | 0        |
| Integrated Smart Monitoring Technologies for      | Ahmad S.       | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         |                         | X       |                  | 0        |
| Skill Awareness Framework for Learning Design     | Nelles J.      | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    |                     |         |                         |         |                  | 0        |
| Circular Production in Learning Factories: A Te   | Dvorak J.      | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 2        |
| Human-Centered Design for Digital Machine Le      | Rosemeyer J.   | 2024 |           | X         | X                   | X        |                    |                     |         |                         | X       | X                | 0        |
| How Inclusive is Manufacturing? An Analysis o     | Karbasi A.     | 2024 |           | X         |                     | X        |                    | X                   |         |                         |         |                  | 0        |
| In-house Workshop Supported by Learning Fa        | Ranif A.       | 2024 | X         |           |                     | X        |                    |                     |         |                         |         |                  | 1        |
| Guiding the Design of Effective Learning Fac      | Massa J.       | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    |                     |         |                         |         |                  | 0        |
| Learning from strangers: Transferability of cu    | Martineti A.   | 2024 | X         |           |                     | X        |                    | X                   |         |                         |         |                  | 0        |
| Designing of an AM Learning Factory Using         | Int Zhang Y.   | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    |                     |         |                         |         | X                | 0        |
| "Zukunftsfabrik Bodensee" - A Production Net      | Wengle M.      | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 0        |
| Interactive Digitally Supported Design of Hum     | Bittencourt V. | 2024 | X         |           | X                   | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 2        |
| Designing Natural User Interfaces in Virtual      | Re Rosic M.    | 2024 |           | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 0        |
| A framework for virtual learning in industrial    | e Terkaj W.    | 2024 |           | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 3        |
| Development of Experiential Learning Framew       | o Mehrtash M.  | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 0        |
| Teaching Human-Centered Design of Collabo         | ra Ferreira E. | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 0        |
| Human-Centered Optimization of Assembly S         | y Köhler C.    | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       |         |                  | 1        |
| Balancing the Three-Legged Stool of Learning      | F Weißflog L.  | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         |                         | X       |                  | 1        |
| Design and Validation of a Learning Factory       | wi Rückert P.  | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 0        |
| Design and Validation of a Learning Factory       | wi Rückert P.  | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 0        |
| Design and test of a Human-Machine Interfa        | ce Cimini C.   | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 0        |
| Design Model for the Digital Shadow of a Val      | u Frick N.     | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 10       |
| Competency-Based Development and Implem           | t Knott M.     | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 0        |
| Perspectives, Application Gaps, and Involvem      | e Permin E.    | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 0        |
| Application of Collaborative Robots in Resear     | ch Dalim K.    | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 0        |
| A new teaching approach exploiting lab-scale      | r Lugaresi G.  | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 0        |
| Development and Validation of a Training Fra      | m Manettas C.  | 2024 | X         | X         |                     | X        |                    | X                   |         | X                       | X       |                  | 0        |

Tabella 5g: screening completo

| TITOLO                                                          | AUTORE | ANNO | SCOPO     |           | CONTENUTI DIDATTICI |          | FASI CICLO DI VITA |                     |         | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |         | CITAZIONI 04/07/ |          |          |
|-----------------------------------------------------------------|--------|------|-----------|-----------|---------------------|----------|--------------------|---------------------|---------|-------------------------|---------|------------------|----------|----------|
|                                                                 |        |      | INDUSTRIE | EDUCATIVE | RICERCA             | BUSINESS | OPERATIONS         | RESEARCH AND SUPPLY | PRODUCT | DISTRIBUTION            | SERVICE |                  | DISPOSAL | HARDWARE |
| SMEs can touch Industry 4.0 in the Smart Learn Grube            |        | 2019 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   |         |                         |         | X                | X        | 42       |
| Creation of a Learning Factory for Cyber Physic Gräßler         |        | 2016 |           | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         |         | X                | X        | 36       |
| Metacognitive learning: Skills development through Henning      |        | 2017 |           | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         |         |                  | X        | 11       |
| Teaching maintenance plan development in a Jooste               |        | 2020 |           | X         | X                   | X        | X                  | X                   |         | X                       |         |                  |          | 8        |
| Human-robot collaboration in the MTA SZTAKI Kemény              |        | 2018 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         |         | X                | X        | 11       |
| Translating the Learning Factory model to a Da Lindvig          |        | 2020 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   |         |                         |         | X                | X        | 10       |
| Teaching Smart Production: An Insight into the Merkel           |        | 2017 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         |         | X                | X        | 27       |
| Lean Learning Factory at the University of Pitești Nitu         |        | 2019 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   |         |                         |         | X                | X        | 6        |
| Integration of Active Pharmaceutical Ingredients Petrusch       |        | 2019 | X         |           |                     | X        | X                  | X                   | X       |                         |         |                  |          | 5        |
| Lifting Table Design in a Learning Factory at Ur Rašović        |        | 2018 |           | X         | X                   | X        | X                  | X                   |         |                         |         | X                | X        | 10       |
| Learning Factory for Industry 4.0 Schallack                     |        | 2018 | X         |           | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         |         | X                | X        | 42       |
| Self-Organization of changeable intralogistics s Schuhmacher    |        | 2019 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         |         | X                | X        | 10       |
| Decentralized Control of Logistic Processes in (Schuhmacher     |        | 2016 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         |         | X                | X        | 43       |
| IoT, IIoT and cyber-physical systems integration Singh          |        | 2019 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         |         | X                | X        | 19       |
| Using a Learning Factory Approach to Transfer Wank              |        | 2016 | X         |           |                     | X        | X                  | X                   | X       | X                       |         | X                | X        | 47       |
| Machine vision applications in a learning facto Zancul          |        | 2020 |           | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         |         | X                | X        | 20       |
| Experiences from 10 years LEAD Factory and a Ramsauer C.        |        | 2024 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         |         |                  |          | 0        |
| Development of an IALF Overarching Learning (Barth J.           |        | 2024 | X         |           |                     | X        | X                  | X                   |         | X                       |         |                  |          | 0        |
| Using the Learning Factory for the Integration cAfy-Shararah M. |        | 2024 |           | X         | X                   | X        | X                  | X                   |         |                         | X       |                  |          | 0        |
| Investigation of Digital Value Stream Twins in (Wollert T.      |        | 2024 |           | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       | X                       |         |                  |          | 0        |
| The Concept of Digital Transformation of SMEs Šaravanja L.      |        | 2024 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   |         |                         |         |                  |          | 0        |
| Learning Factories in New Business Development Vieira R.E.      |        | 2024 | X         |           |                     | X        | X                  | X                   | X       |                         |         |                  |          | 0        |
| Empowering STEM Students with Digital Skills: Lindgren K.       |        | 2024 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         | X       | X                | X        | 0        |
| Insights into the "PITech Academy" Learning PI Ahmad R.         |        | 2024 |           | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       | X                       |         |                  |          | 0        |
| A Project-Based Learning Approach for the Dev Galdeano M.       |        | 2024 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   |         |                         |         |                  |          | 0        |
| Investigation of AI Algorithms for the Clustering Schroth T.    |        | 2024 | X         |           |                     | X        | X                  | X                   |         |                         | X       | X                | X        | 0        |
| The Role of Learning Factories in Validating an Köppe G.        |        | 2024 |           | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       | X                       |         | X                | X        | 0        |
| Learning Factory for Integrating Engineering Te Wanyama T.      |        | 2024 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         |         | X                | X        | 0        |
| Progress and Reflection of Learning Factory Wang K.             |        | 2024 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   |         |                         |         |                  |          | 0        |
| System Architecture for Extended Reality and H-Olearczyk J.     |        | 2024 | X         | X         | X                   | X        | X                  | X                   | X       |                         |         | X                | X        | 0        |

Tabella 5h: screening completo

| TITOLO | AUTORE                                                                  | ANNO | SCOPO       |           | CONTENUTI DIDATTICI |            | FASI CICLO DI VITA  |         |              | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |          | CITAZIONI 04/07/2 |
|--------|-------------------------------------------------------------------------|------|-------------|-----------|---------------------|------------|---------------------|---------|--------------|-------------------------|----------|-------------------|
|        |                                                                         |      | INDUSTRIALE | EDUCATIVO | BUSINESS            | OPERATIONS | RESEARCH AND SUPPLY | PRODUCT | DISTRIBUTION | SERVICE                 | DISPOSAL |                   |
| 1      | Learning Factories in Practice: The Example and Szabó D.                | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       |          | 0                 |
| 2      | Complementing Learning Factories with Virtual   Hersstätter P.          | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 3      | Establishing a Machine Learning and Internet of Deuse I.                | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 4      | Mastering the Future of Production: A Training C/Martin M.              | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 5      | Transfer of Industry 4.0 Knowledge to SME Empl/Prell B.                 | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 6      | Smart Learning Factory – Skopje: Boosting the L/Iovanoski B.            | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 7      | Methodical Approach to the Introduction of Assé/Künster N.              | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 8      | Concept for a Low-Cost Implementation of Auto/Hentsch M.                | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 9      | An Adaptive Learning Environment for Industry 4/Häfner P.               | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 1                 |
| 10     | Federated Interoperable Digital Twins for Collab/lyer S.V.              | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 1                 |
| 11     | Employing PLM in Learning Factories: A Project/Alniji S.                | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 12     | Resource Productivity Taught Well: How Learnin/Rüdele K.                | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 13     | VR-Based Learning Platform for the Application/Xie Y.                   | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 14     | Cyber Physical System for Reconfigurable Learnin/Ghatoorpoor Yazdi P.   | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 1                 |
| 15     | Extending the Learning Factory Through Virtual I/Björnsten T.B.         | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 16     | Computer Vision in a Digital Twin Based Manuf/De Marchi M.              | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 17     | From Sustainable Production to Smart Building M/Mueller F.A.            | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 18     | Towards sustainable cognitive digital twins: A p/Padovano A.            | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 3                 |
| 19     | Virtual Twin for the Smart Factory as a Tool to E/Vázquez-Hurtado C.    | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 20     | A Data Management Concept for Learning Facto/Grano A.                   | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 21     | Application of the Learning Factory Morphology/Zumpe F.                 | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 22     | Smart Farming for Sustainable Agriculture: A Cas/Kang Y.                | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 23     | Intralogistics in Learning Factories Leber P.                           | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 24     | Digitalization, Demographic Change and Decarb/Teichmann M.              | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 1                 |
| 25     | A Learning Factory as a Competence Centre for/Seyfried S.               | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 26     | Harnessing the Potential of Hybrid Virtual Comm/Noga M.                 | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 27     | Using Augmented Reality and Learning Factories/Afy-Shararah M.          | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 28     | Artificial Intelligence Forecasting of Digital Twin/Městrovic Amanda A. | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 29     | Biologicalisation in Learning Factories – Learnin/Hagen J.              | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |
| 30     | Learning Environment for Digital Twin Technol/Tritsch U.                | 2024 | X           | X         | X                   | X          | X                   | X       | X            | X                       | X        | 0                 |

Tabella 5i: screening completo

| TITOLO                                         | AUTORE                   | ANNO | SCOPO       |           | CONTENUTI DIDATTICI |          | FASI CICLO DI VITA |                      |        | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |          | CITAZIONI 04/07/2023 |
|------------------------------------------------|--------------------------|------|-------------|-----------|---------------------|----------|--------------------|----------------------|--------|-------------------------|----------|----------------------|
|                                                |                          |      | INDUSTRIALE | EDUCATIVO | RICERCA             | BUSINESS | OPERATIONS         | RESEARCH AND SERVICE | SUPPLY | PRODUCT/DISTRIBUTION    | DISPOSAL |                      |
| Learning Factory Requirements Analysis- Requi  | Enke J.                  | 2016 | X           | X         | X                   | X        |                    |                      |        |                         |          | 15                   |
| Effectiveness of using Learning Factories to   | Jim Makumbe S.           | 2018 | X           |           |                     | X        |                    |                      |        |                         |          | 16                   |
| Value stream management in the lean manufac    | Oberhausen C.            | 2015 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 31                   |
| Using a Learning Factory Approach to Transf    | Wank A.                  | 2016 | X           | X         | X                   |          |                    |                      |        |                         | X        | 47                   |
| Learning Factory for Industry 4.0 to provide   | fut. Schallack B.        | 2018 | X           |           |                     | X        |                    |                      |        |                         | X        | 116                  |
| Introducing Competency Models as a Tool fo     | r Müller-Frommeyer L.C.  | 2017 | X           |           |                     | X        |                    |                      |        |                         | X        | 35                   |
| Employee Qualification by Digital Learning     | Gar Görke M.             | 2017 | X           |           |                     | X        |                    |                      |        |                         | X        | 15                   |
| Classification of a Hybrid Production Infrastr | uctur Schuh G.           | 2017 | X           |           |                     | X        |                    |                      |        |                         | X        | 9                    |
| Extending the Scope of Future Learning Fact    | ories Weeber M.          | 2016 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         |          | 9                    |
| Enhancing Learning Experience in Physical      | Act I Thiede B.          | 2017 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 14                   |
| Railway Operation Research Centre - A Learn    | in Streitzig C.          | 2016 | X           | X         | X                   |          | X                  | X                    |        |                         | X        | 7                    |
| Demonstration of a Concept for Scalable Aut    | on Buergin J.            | 2017 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 6                    |
| Holistic approach of lean thinking in learni   | ng f Goerke M.           | 2015 | X           |           |                     | X        |                    |                      |        |                         | X        | 22                   |
| A Web-based Application for Classifying Tea    | ch Mavrikios D.          | 2017 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 18                   |
| Implementation of a Learning Environment fo    | r Prinz C.               | 2017 | X           |           |                     | X        |                    |                      |        | X                       | X        | 38                   |
| Development of an Optical Object Detection     | System Wiech M.          | 2017 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 10                   |
| Benefits of a Learning Factory in the Context  | of Rybski C.             | 2016 | X           |           |                     | X        |                    |                      |        |                         | X        | 17                   |
| Development of the Industrial IoT Competen     | ce Gronau N.             | 2017 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 46                   |
| Multimedia support for learning factories      | Pittschellis R.          | 2015 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 18                   |
| Preconditions for Learning Factory A Case      | Study Ogorodnyk O.       | 2016 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 6                    |
| Comparative Analysis for solar Energy Base     | d Learning Modul Erke J. | 2018 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 13                   |
| Competency-oriented design of learning mo      | dul Erke J.              | 2015 | X           |           |                     | X        |                    |                      |        |                         | X        | 35                   |
| Alberta Learning Factory for training reconf   | igur Ahmad               | 2018 | X           |           |                     | X        |                    |                      |        |                         | X        | 24                   |
| Learning in Context with Horizontally &        | Ve Athinarayanan         | 2019 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 9                    |
| Simulation Game for Intelligent Production     | Log Blöchl               | 2016 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 38                   |
| Developing a Learning Factory to Increase      | Resilience Böhner        | 2015 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 15                   |
| Internet of Things (IoT) in Buildings: A       | Learning Case Study      | 2023 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 18                   |
| Systematic learning factory improvement        | base Erke                | 2018 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        |                         | X        | 14                   |
| Development and implementation of an auton     | om Erdmann               | 2020 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        | X                       | X        | 10                   |
| Transfer of Model of Innovative Smart Facto    | ry Gjeldrum              | 2016 | X           | X         | X                   |          | X                  |                      |        | X                       | X        | 30                   |

Tabella 5j: screening completo

| TITOLO                                                                   | AUTORE            | ANNO | SCOPO                           |                     | CONTENUTI DIDATTICI |                              | FASI CICLO DI VITA |          |          | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |   | CITAZIONI 04/07/ |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|---------------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|--------------------|----------|----------|-------------------------|---|------------------|
|                                                                          |                   |      | INDUSTRIAL/EDUCATIONAL/RESEARCH | BUSINESS/OPERATIONS | RESEARCH AND SUPPLY | PRODUCT/DISTRIBUTION/SERVICE | DISPOSAL           | HARDWARE | SOFTWARE |                         |   |                  |
| Application of robotics in rail car manufacturing                        | Ogbenhe J.        | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 10               |
| Development of a learning factory concept                                | ti Oberc H.       | 2018 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 10               |
| Learning factory with product configurator                               | for t Brunoe T.D. | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 10               |
| Students' interactions: Using video data as a mirror                     | Reining N.        | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 5                |
| Learn how to cope with volatility in operations                          | Karre H.          | 2018 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 10               |
| Learning process planning for special machines                           | Menn J.P.         | 2018 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 9                |
| The Learning Factory - A New Stimulus                                    | Enhai Darun M.R.  | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 11               |
| Integration of IT into a Lean Basic Training                             | Tar Adam M.       | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 11               |
| Learning factories as laboratories for socio-technical systems           | Tvenge N.         | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 0                |
| Development of a low cost machine vision based system                    | Louv L.           | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 28               |
| Implementation of a cyber-physical cooling system                        | Vogt M.           | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 4                |
| Subject-oriented learning - A new perspective                            | Teichmann M.      | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 7                |
| Living Learning Environments                                             | Rossmeliss T.     | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 2                |
| Digitalized milk-run system for a learning factory                       | Gotthardt S.      | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 21               |
| Integration of an Android Application into the Learning Factory          | L Kleinwort R.    | 2018 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 3                |
| Enabling Small Medium Enterprises (SMEs) to implement Industry 4.0       | i Mourtzis D.     | 2018 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 33               |
| Low-cost 3D scanning in a smart learning factory                         | Nielsen C.P.      | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 2                |
| Introduction of a new product in an operating learning factory           | Auberger E.       | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 3                |
| A knowledge-based approach to the IoT-driven Learning Factory            | Mahmoodpour M.    | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 8                |
| Evolution of SMEs towards Industry 4.0 through Learning Factory          | Wienbruch T.      | 2018 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 19               |
| Ex Post Evaluation of a Learning Factory - Comparison                    | Baye P.           | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 33               |
| Consideration of material efficiency in a learning factory               | Brüggenmann H.    | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 4                |
| Energy Storage Technologies to foster Energy Efficiency                  | F Schulze C.      | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 10               |
| Integrated Concept for Acquisition and Utilization of Learning Resources | Schäfers P.       | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 14               |
| Implementation of reconfigurable manufacturing systems                   | Bortolini M.      | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 4                |
| A case study based digitalization training for Industry 4.0              | Hulla M.          | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 30               |
| Integration and testing of the RFID-enabled Smart Manufacturing          | Sim Mladineo M.   | 2019 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 17               |
| Development of Assembly Systems in Lean Manufacturing                    | Lea Veza I.       | 2017 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 12               |
| Simulation Game for Lean Leadership - Shopfic Bloch                      | S.J.              | 2017 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 20               |
| Procedure for Experimental Learning to Conduct                           | Müller B.C.       | 2017 | X                               | X                   | X                   | X                            | X                  | X        | X        | X                       | X | 13               |

Tabella 5k: screening completo



## 7. FASE 5: SNOWBALLING

Nel contesto delle revisioni sistematiche della letteratura, il processo di identificazione e selezione delle fonti scientifiche rilevanti rappresenta una fase critica per garantire l'esaustività, la qualità e la validità delle evidenze raccolte. Dopo la fase iniziale di ricerca sistematica tramite database bibliografici è prassi consolidata integrare l'analisi con tecniche complementari di esplorazione della letteratura. Tra queste, il metodo dello snowballing si è dimostrato particolarmente efficace per estendere la rete delle fonti individuate e intercettare contributi potenzialmente rilevanti non emersi durante la ricerca iniziale degli articoli basata sulle keywords identificate. È stato utilizzato in questa fase sia il backward snowballing, ossia la ricerca degli articoli che sono stati citati all'interno di ogni articolo presente nel Corpus, che il forward snowballing, ossia la ricerca di articoli che citano gli articoli presenti nel Corpus. È importante precisare che lo snowballing è stato applicato all'intero Corpus oggetto di analisi, quindi agli articoli del Corpus analizzato da Marzo (2024) uniti agli articoli aggiunti al Corpus nel presente lavoro di tesi. È stato necessario procedere in questo modo poiché, oltre agli articoli del Corpus 2024 che richiedevano il processo di revisione, anche quelli appartenenti al Corpus precedente dovevano essere riesaminati nell'ambito del forward snowballing, in quanto potevano essere citati da altri studi potenzialmente rilevanti per l'analisi condotta in questa tesi.

In continuità con l'approccio utilizzato da Marzo (2024), per attuare questa tecnica è stato utilizzato Citation Gecko, uno strumento digitale open source pensato per facilitare l'esplorazione delle relazioni citazionali tra articoli scientifici. Nel panorama degli strumenti a supporto della ricerca bibliografica, Citation Gecko rappresenta una soluzione innovativa, che consente di mappare e ampliare il Corpus di fonti rilevanti attraverso l'analisi delle citazioni dirette tra i documenti (<https://citationgecko.azurewebsites.net/>). Questo approccio si rivela particolarmente efficace nella fase di snowballing di una Systematic Literature Review, sia mediante backward snowballing sia tramite forward snowballing.

Citation Gecko consente di visualizzare in modo dinamico e interattivo la rete delle citazioni, facilitando l'identificazione di lavori strettamente connessi, di contributi influenti e di traiettorie emergenti all'interno di uno specifico dominio scientifico. Il software si interfaccia con database accademici aperti come CrossRef, Semantic Scholar e OpenCitations, permettendo l'importazione dei seed papers, ovvero gli articoli iniziali selezionati come punto di partenza nel processo di snowballing, tramite identificatori DOI, caricamento manuale o file bibliografici in formato BibTeX. Una volta caricato il set iniziale di articoli, la piattaforma genera automaticamente un elenco di documenti citati e citanti, fornendo per ciascuno informazioni bibliografiche dettagliate, come titolo, autori, rivista, anno di pubblicazione e numero di citazioni con i documenti di partenza.

Uno degli aspetti distintivi di Citation Gecko è la possibilità di visualizzare la rete citazionale tramite una mappa interattiva, dove ciascun nodo rappresenta un articolo e i collegamenti indicano le relazioni di citazione. Tale visualizzazione consente di individuare cluster tematici ricorrenti e articoli centrali nel dibattito scientifico. Il sistema consente inoltre di applicare filtri utili alla selezione, come il numero di citazioni, l'anno di pubblicazione o la presenza dell'abstract, offrendo così un controllo analitico nella valutazione dei documenti suggeriti. I risultati possono essere esportati in formato BibTeX e la sessione di lavoro può essere salvata per consentire di aggiornare l'analisi nel momento in cui si aggiungessero nuovi documenti all'interno del Corpus.

L'utilizzo di Citation Gecko in questa tesi ha rappresentato un supporto metodologico fondamentale nella fase di snowballing. Il suo impiego ha permesso di intercettare articoli strettamente collegati agli articoli del Corpus ma non inclusi nella prima selezione. L'integrazione di tali contributi ha

rafforzato la copertura della letteratura esaminata, incrementando la profondità analitica della revisione e contribuendo a delineare un quadro più robusto e coerente dello stato dell'arte sul tema.

Nell'applicazione dello snowballing all'intero Corpus sono stati ricercati e caricati manualmente tutti i 256 articoli sul software tramite la sezione "Search for Papers".

A seguito dell'analisi, il software ha generato due visualizzazioni distinte, relative rispettivamente al backward snowballing e al forward snowballing, le quali rappresentano visivamente le reti citazionali del dataset esaminato. Tali rappresentazioni grafiche costituiscono uno strumento utile per identificare, all'interno del Corpus, gli articoli che hanno esercitato un'influenza significativa nello sviluppo del tema trattato. Inoltre, attraverso l'analisi strutturale della rete è possibile individuare eventuali cluster di articoli, i quali suggeriscono la presenza di linee di ricerca consolidate o emergenti strettamente connesse all'evoluzione del concetto di Learning Factory.

Si riportano in seguito in figura 9 e 10 le figure rappresentanti i grafici citazionali

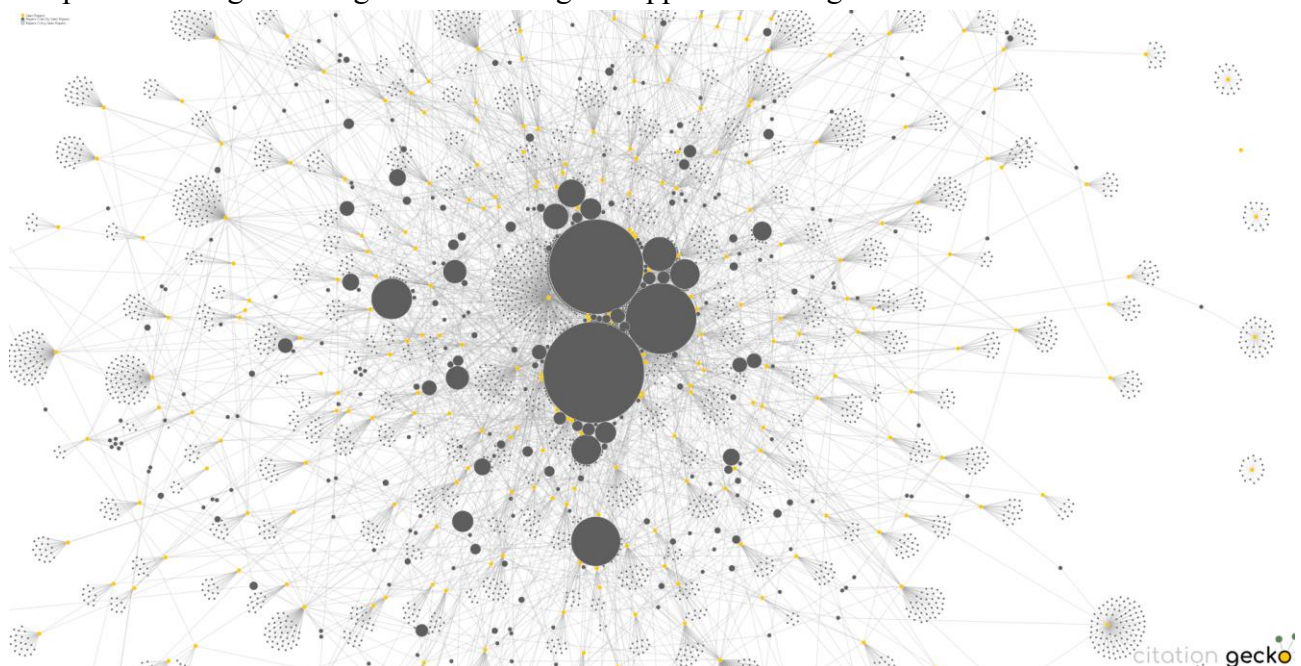


Figura 9: backward snowballing

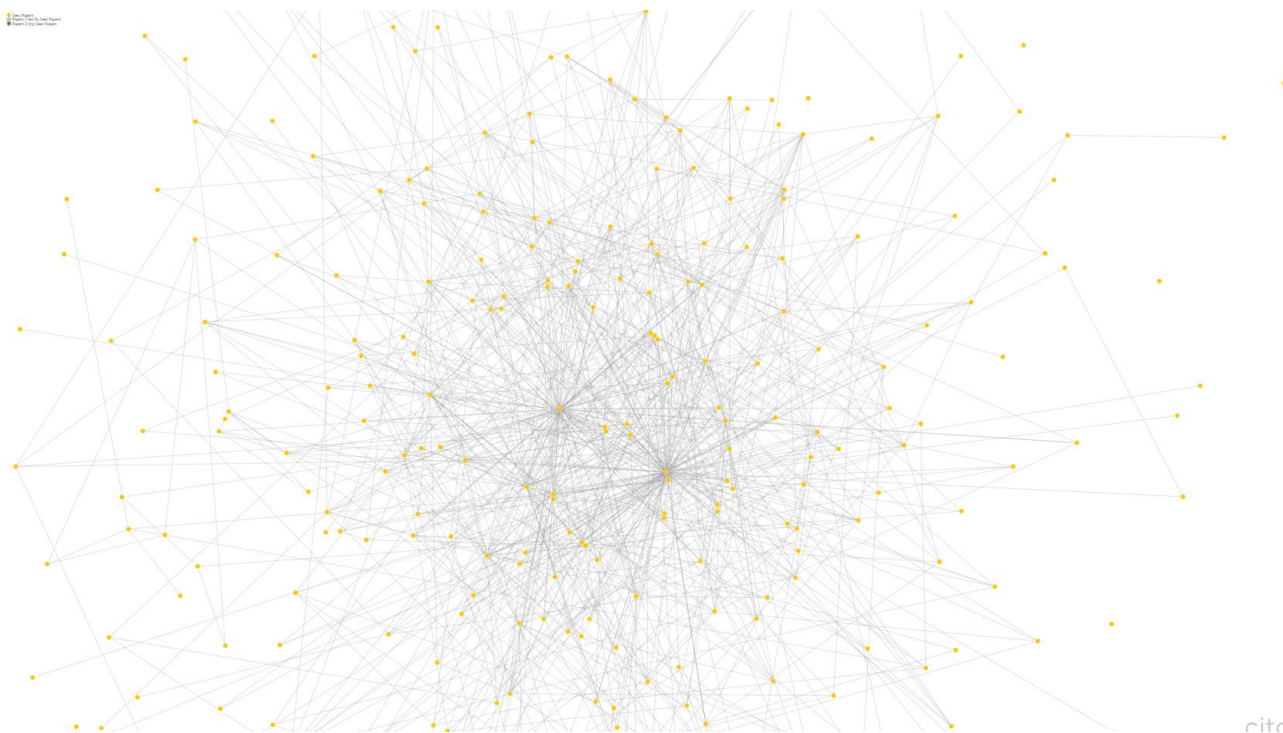


Figura 10: forward snowballing

Analizzando la figura 9, all'interno del grafo ogni nodo corrisponde a un singolo articolo scientifico, mentre gli archi rappresentano le relazioni di citazione tra i documenti, in termini sia di riferimenti bibliografici presenti nell'articolo (backward snowballing) sia di citazioni ricevute (forward snowballing). Le dimensioni dei nodi variano in funzione del numero di connessioni citazionali: i nodi di dimensioni maggiori indicano articoli con un'elevata centralità nella rete, ossia contributi che sono stati frequentemente citati o che, a loro volta, citano numerosi altri lavori rilevanti. La densità dei collegamenti evidenzia un'elevata interconnessione tra i documenti, inoltre, si osservano diversi cluster locali di nodi connessi tra loro, che riflettono la presenza di sotto-temi o linee di ricerca consolidate e coese all'interno del più ampio dominio di studio. Nello specifico risaltano in modo molto evidente tre nodi che risultano essere di dimensione maggiore rispetto agli altri e che indicano quindi che i suddetti articoli sono stati d'importanza rilevante per lo sviluppo del tema all'interno della letteratura.

Nell'articolo *The State of the Art and Prospects of Learning Factories* di Wagner et al. (2012), gli autori analizzano lo stato dell'arte delle learning factories, con particolare attenzione al loro utilizzo nella formazione, nella ricerca e nel trasferimento tecnologico di soluzioni industriali basate sulla variabilità dei sistemi produttivi. Dopo una revisione critica delle esperienze esistenti, vengono definite le principali caratteristiche di questi ambienti — spazi reali o virtuali, tecnologie innovative e approccio didattico esperienziale — mettendo in evidenza il potenziale delle learning factories orientate ai sistemi manifatturieri riconfigurabili come contesti di sperimentazione della flessibilità produttiva e dell'integrazione con l'Industria 4.0.

Infine, l'articolo propone un modello di classificazione basato su livello di modificabilità, prodotti e design, presentando le learning factories come strumenti strategici per colmare il divario tra industria e mondo accademico e formare professionisti capaci di operare in ambienti produttivi flessibili e digitalizzati.

Un altro contributo sul tema è l'articolo di Tisch et al. (2013), *A Systematic Approach on Developing Action-oriented, Competency-based Learning Factories*, in cui gli autori propongono una strategia metodologica denominata "Learning Factory Curriculum Guide" (LFC Guide), ideata per superare le carenze delle learning factories progettate in modo intuitivo e non strutturato. Gli autori sottolineano come questi ambienti vengano spesso sviluppati con un approccio *plug-and-play*, cioè installando tecnologie e moduli formativi "pronti all'uso" senza una pianificazione coerente degli obiettivi di apprendimento, riducendo così la qualità e l'efficacia del percorso formativo.

Il LFC Guide si articola in due fasi: la prima riguarda la definizione delle competenze da acquisire in base al contesto organizzativo, al tipo di produzione e agli obiettivi formativi; la seconda riguarda la progettazione sistematica dell'infrastruttura tecnologica e didattica per supportare l'acquisizione di tali competenze. Infine, gli autori evidenziano come l'applicazione del LFC Guide possa contribuire a rendere la progettazione delle learning factories più strutturata, efficiente e applicabile ai contesti produttivi reali.

Uno degli studi più rilevanti e citati nella letteratura scientifica è *Study on Action Oriented Learning with a Learning Factory Approach* di Cachay et al. (2012). Gli autori sostengono che le Learning Factory siano ambienti utilizzati per l'apprendimento esperienziale, in cui gli studenti di ingegneria della produzione possono apprendere attraverso la realizzazione di prodotti reali in un contesto simulato ma realistico.

Lo studio valuta l'efficacia del metodo *learning by doing* mediante un esperimento controllato che confronta studenti formati in una Learning Factory con altri che hanno seguito un corso tradizionale. I risultati mostrano che gli studenti coinvolti in attività pratiche hanno migliorato le loro prestazioni operative e la comprensione dei concetti teorici rispetto a quelli non coinvolti in esercitazioni pratiche. Infine, l'articolo fornisce una prova empirica del valore dell'apprendimento orientato all'azione, dimostrando come condizioni simulate e interattive possano migliorare in modo significativo l'efficacia formativa nell'ingegneria manifatturiera.

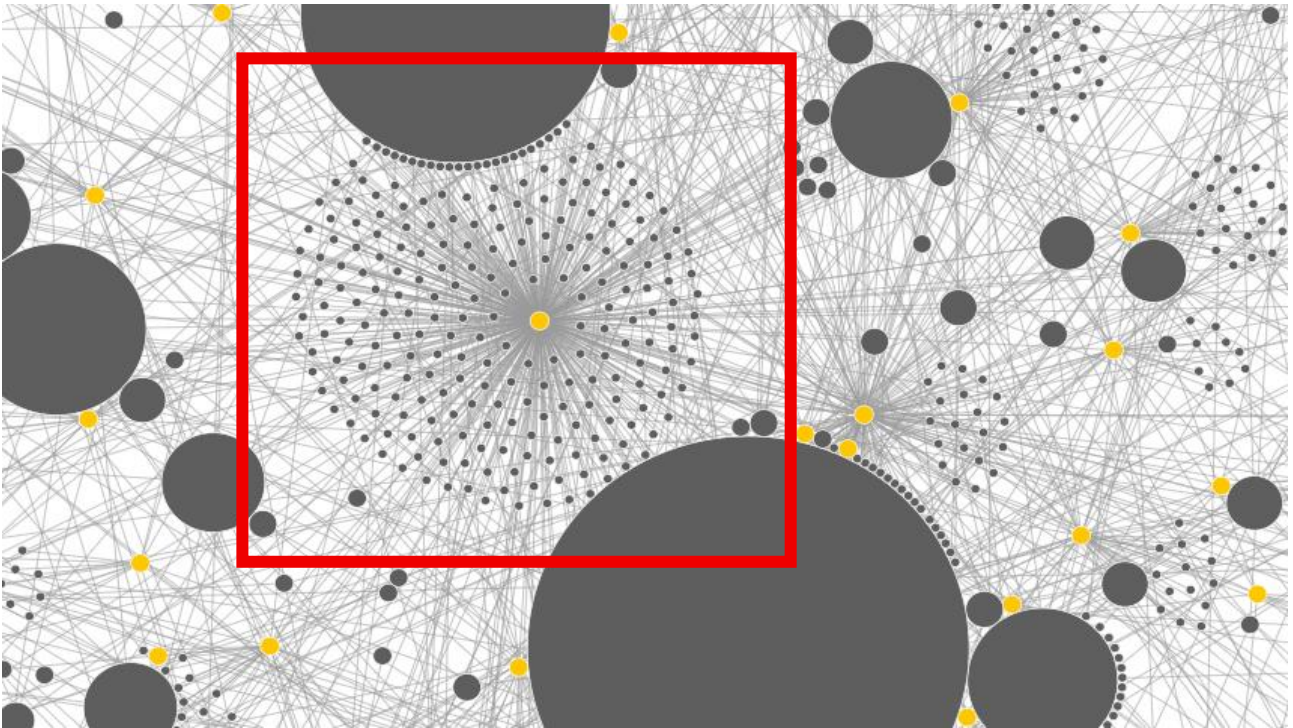
Nel complesso i tre contributi analizzati condividono alcuni elementi fondamentali che delineano il panorama attuale delle Learning Factory. In primo luogo, tutti enfatizzano un approccio action-oriented, nel quale l'apprendimento avviene attraverso esperienze operative reali in ambienti simulati, in seguito emergono chiaramente orientamenti sistematici alla progettazione e alla strutturazione delle Learning Factory. Infine, tutti e tre gli articoli riconoscono l'importanza dello sviluppo delle competenze operative e professionali.

Questi elementi comuni — apprendimento basato sull'azione, progettazione sistematica e orientamento allo sviluppo delle competenze — costituiscono il nucleo concettuale e metodologico dell'intero filone di ricerca sulle Learning Factory. Essi confermano l'efficacia di ambienti strutturati come mezzi di progresso didattico e professionale nel contesto della manifattura avanzata.

Si specifica che questi articoli non sono presenti nel Corpus poiché non rientrano nei criteri di inclusione ed esclusione definiti, essendo pubblicati in anni che non fanno parte del range temporale considerato nell'analisi. È stato opportuno citarli e descriverne il contenuto poiché sono stati riconosciuti dalla letteratura, dato il così alto numero di citazioni come gli articoli, come i pilastri teorici del concetto di Learning Factory.

Dall'analisi della rete citazionale generata tramite il backward snowballing (Figura 9) emergono diversi cluster tematici che riflettono le principali linee di sviluppo delle Learning Factory.

La densità e la distribuzione dei nodi all'interno del grafo evidenziano la presenza di aree di ricerca consolidate e specializzate, all'interno delle quali gli articoli condividono approcci, tecnologie o obiettivi formativi comuni. Tra i cluster identificati si segnalano tematiche rilevanti come l'integrazione dei digital twin come strumento di simulazione, l'utilizzo della realtà virtuale come mezzo per l'educazione e l'industrial training, lo sviluppo della collaborazione uomo-robot e l'adozione di metodologie d'insegnamento orientate alla sostenibilità, con particolare attenzione alla circular economy. È inoltre evidente la presenza di articoli riconducibili alle tecnologie (es. AI, IoT e additive manufacturing) e metodologie (es. smart manufacturing, lean) proprie dell'Industria 4.0, che costituiscono un riferimento costante nelle implementazioni più avanzate di Learning Factory. In seguito nelle figure 11, 12 e 13 sono evidenziati i cluster più evidenti e descritti in precedenza



*Figura 11: cluster sulla lean manufacturing*

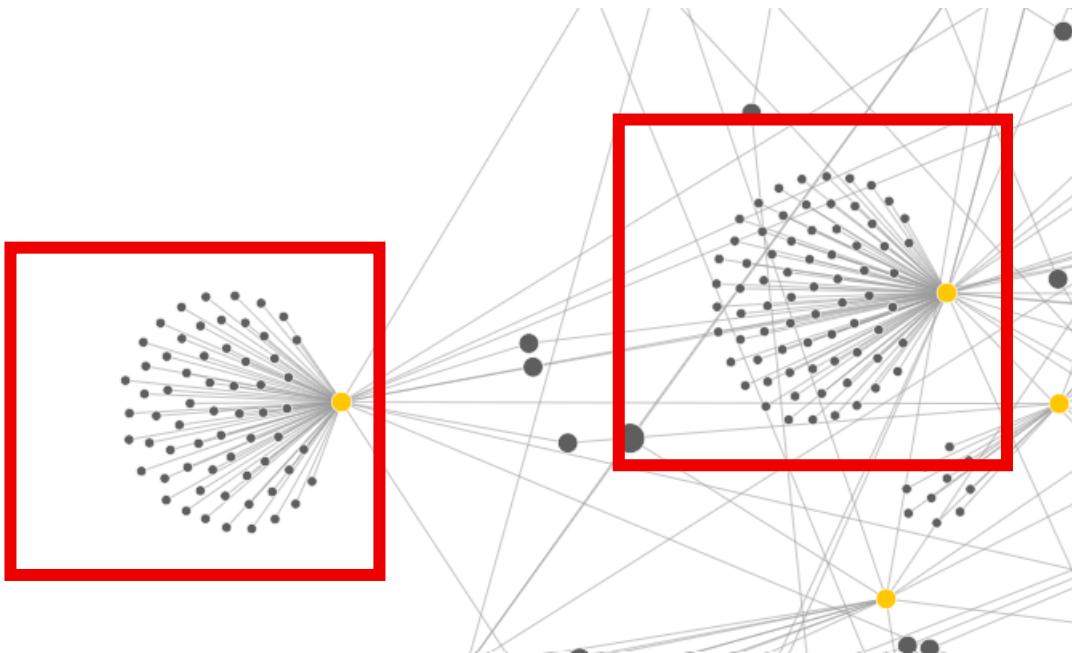


Figura 12: cluster su digital twin e realtà aumentata

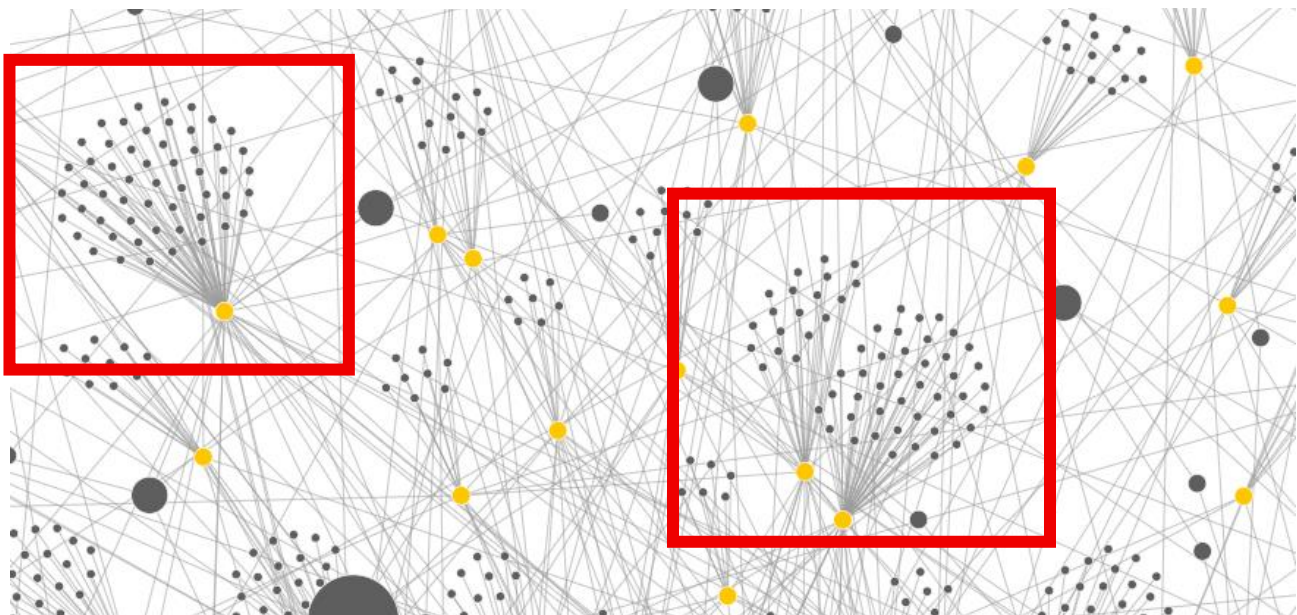


Figura 13 :cluster su additive manufacturing e circular economy

La figura 10 rappresenta la rete citazionale generata tramite il processo di forward snowballing condotto con il supporto della piattaforma Citation Gecko. Anche in questo caso, ogni nodo della rete corrisponde a un singolo articolo scientifico individuato nel processo, mentre gli archi rappresentano le connessioni citazionali tra tali documenti. A differenza della rete relativa al backward snowballing, in cui emergono nodi di dimensioni differenti e cluster tematici fortemente consolidati, questa visualizzazione presenta una distribuzione dei nodi più uniforme e omogenea, con la totalità dei nodi rappresentata dai seed papers. Nonostante ciò, si osserva comunque un nucleo centrale ad alta interconnessione, attorno al quale si sviluppano numerose connessioni periferiche.

Una limitazione emersa nell'utilizzo del software Citation Gecko riguarda la difficoltà di lettura ed interpretazione della rete citazionale generata tramite forward snowballing. Sebbene il sistema

restituisca un elenco di articoli che citano i seed papers caricati, tali contributi non risultano visibili all'interno del grafo, che rappresenta esclusivamente le relazioni di citazione tra i seed stessi. La figura 8 è stata quindi riportata per completezza, ma non risulta necessaria nella visualizzazione della rete citazionale del forward snowballing, ma riporta solo le interconnessioni tra gli articoli del Corpus.

## 7.1 Articoli aggiunti tramite snowballing

In seguito all'inserimento dei 332 articoli costituenti il Corpus iniziale, il software Citation Gecko ha restituito, oltre alle rappresentazioni grafiche analizzate nei paragrafi precedenti, due elenchi distinti di articoli derivanti rispettivamente dal processo di backward e forward snowballing. Ciascun elenco è stato sottoposto a un'analisi approfondita finalizzata a verificare la pertinenza all'argomento trattato nella ricerca di ogni articolo che lo compone e la sua eventuale possibilità di integrazione nel Corpus complessivo. Il processo di valutazione si è articolato nei seguenti passaggi:

- applicazione dei criteri di inclusione ed esclusione definiti in fase metodologica;
- verifica della pertinenza dell'articolo rispetto alla tematica oggetto di studio;
- accertamento che l'articolo non sia già presente nel Corpus precedente all'esecuzione dello snowballing;
- screening preliminare tramite lettura di titolo e abstract;
- verifica della disponibilità del full text;
- screening finale tramite lettura completa dell'articolo.

Al termine di questa fase, sono stati selezionati 17 articoli che hanno superato con esito positivo tutti gli step sopra esposti. Tali contributi si aggiungono ai 332 articoli iniziali, portando il numero complessivo di documenti presenti nel Corpus a 349. L'integrazione di questi articoli ha permesso di ampliare e rafforzare la copertura della letteratura, includendo studi non emersi nella fase di ricerca basata sulle Query ma rilevanti sul piano citazionale e contenutistico.

In tabella 6 sono elencati gli articoli selezionati tramite il processo di snowballing, in particolare gli articoli evidenziati in giallo risultano ricavati dal forward snowballing, mentre la restante parte dal backward snowballing

| Authors                                                 | Title                                                                                                                                             | Year |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Behrendt F.; Lehner O.; Rettmann A.; Schmidtke N.; Wol  | Process analysis of a teaching and learning factory environment to demonstrate Industry 4.0 solutions by using the Smart Logistics Zone approach  | 2022 |
| Enke J.; Oberc H.; Riemann T.; Schuhmacher J.; Hummel   | Cooperation between learning factories: Approach and example                                                                                      | 2020 |
| Gjeldum N.; Crnjac M.; Bilic B.                         | Simulation of bullwhip effect in a supply chain for lean learning factory purposes                                                                | 2017 |
| Hagen J.; Büth L.; Haupt J.; Cerdas F.; Herrmann C.     | Live LCA in learning factories: Real time assessment of product life cycles environmental impacts                                                 | 2020 |
| Enke J.; Glass R.; Metternich J.                        | Introducing a Maturity Model for Learning Factories                                                                                               | 2017 |
| Juraschek M.; Büth L.; Posselt G.; Herrmann C.          | Mixed Reality in Learning Factories                                                                                                               | 2018 |
| Kreitlein S.; Höft A.; Schwender S.; Franke J.          | Green factories Bavaria: A network of distributed learning factories for energy efficient production                                              | 2015 |
| Mahmood K.; Otto T.; Kuts V.; Terkaj W.; Urgo M.; Haid  | Development of Virtual Learning Factory Toolkit for Production Engineering Education                                                              | 2021 |
| Mahmood K.; Otto T.; Kuts V.; Terkaj W.; Modoni G.; Ur  | Advancement in production engineering education through Virtual Learning Factory Toolkit concept                                                  | 2021 |
| Mahmud F.; Tamyez P.F.M.; Nor M.F.M.                    | Determinants in developing a learning factory in higher educational institution                                                                   | 2019 |
| Plorin D.; Müller E.                                    | Developing an ambient assisted living environment applying the advanced Learning Factory (aLF) A conceptual approach for the practical use in the | 2014 |
| Rasovska I.; Deniaud I.; Marmier F.; Michalak J.-L.     | Learning factory FlexTory: Interactive loops between real and virtual factory through digital twin                                                | 2022 |
| Reining N.; Kauffeld S.                                 | Empirical Findings on Learning Success and Competence Development at Learning Factories: A Scoping Review                                         | 2022 |
| Rentzos L.; Doukas M.; Mavrikios D.; Mourtzis D.; Chrys | Integrating manufacturing education with industrial practice using teaching factory paradigm: A construction equipment application                | 2014 |
| Schmidbauer C.; Komenda T.; Schlund S.                  | Teaching cobots in learning factories - User and usability-driven implications                                                                    | 2020 |
| Schreiber S.; Funke L.; Tracht K.                       | BERTHA - A Flexible Learning Factory for Manual Assembly                                                                                          | 2016 |
| Stavropoulos P.; Bikas H.; Mourtzis D.                  | Collaborative Machine Tool design: The Teaching Factory paradigm                                                                                  | 2018 |
| Tisch M.; Metternich J.                                 | Potentials and Limits of Learning Factories in Research, Innovation Transfer, Education, and Training                                             | 2017 |
| Kemény Z.; Beregi R.; Nacsas J.; Glawar R.; Sihn W.     | Expanding production perspectives by collaborating learning factories - Perceived needs and possibilities                                         | 2018 |

Tabella 6: articoli snowballing

In seguito è stato effettuato lo screening tramite titolo ed abstract di questi articoli, dove i risultati sono riportati in tabella 7, i quali in seguito sono stati aggiunti al Corpus per lo screening tramite lettura completa dell'articolo, che ha portato ai risultati della tabella 8.



| Authors         | Title                                              | Year | SCOPO                                                                      |           |         | CONTENUTI DIDATTICI |            | FASI CICLO DI VITA |        |                     |                        |          | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |          |
|-----------------|----------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|---------------------|------------|--------------------|--------|---------------------|------------------------|----------|-------------------------|----------|
|                 |                                                    |      | INDUSTRIAL TRAINING                                                        | EDUCATION | RICERCA | BUSINESS            | OPERATIONS | RESEARCH           | SUPPLY | PRODUCTION/ASSEMBLY | DISTRIBUTION/LOGISTICS | DISPOSAL | HARDWARE                | SOFTWARE |
| Behrendt F.     | Process analysis of a teaching and learning fact   | 2022 | X                                                                          | X         |         |                     | X          |                    |        | X                   |                        |          |                         |          |
| Enke J.         | Cooperation between learning factories: Approa     | 2020 | X                                                                          | X         |         |                     | X          | X                  | X      |                     |                        |          | X                       |          |
| Gjeldum N.      | Simulation of bullwhip effect in a supply chain fi | 2017 |                                                                            |           | X       |                     | X          |                    |        |                     |                        |          |                         |          |
| Hagen J.        | Live LCA in learning factories: Real time assessm  | 2020 | X                                                                          | X         |         |                     | X          | X                  |        |                     |                        | X        |                         |          |
| Enke J.         | Introducing a Maturity Model for Learning Facto    | 2017 | X                                                                          |           |         |                     |            | X                  |        |                     |                        |          |                         |          |
| Juraschek M.    | Mixed Reality in Learning Factories                | 2018 | X                                                                          |           |         |                     | X          |                    |        |                     |                        | X        | X                       |          |
| Kreitlein S.    | Green factories Bavaria: A network of distributed  | 2015 | X                                                                          | X         |         |                     | X          | X                  |        |                     |                        |          |                         |          |
| Mahmood K.      | Development of Virtual Learning Factory Toolkit    | 2021 | X                                                                          |           |         |                     | X          |                    |        |                     |                        |          | X                       |          |
| Mahmud F.       | Determinants in developing a learning factory in   | 2019 | X                                                                          |           |         |                     | X          | X                  |        |                     |                        |          |                         |          |
| Plorin D.       | Developing an ambient assisted living environm     | 2014 | X                                                                          |           |         |                     | X          |                    |        |                     |                        |          |                         |          |
| Rasovska I.     | Learning factory FleXtory: Interactive loops betw  | 2022 | X                                                                          | X         |         |                     | X          | X                  |        | X                   |                        | X        | X                       |          |
| Reining N.      | Empirical Findings on Learning Factories           | 2022 | NON PERTINENTE CON LE TEMATICHE AFFRONTATE ALL'INTERNO DEL PRESENTE LAVORO |           |         |                     |            |                    |        |                     |                        |          |                         |          |
| Rentzos L.      | Integrating manufacturing education and learning   | 2014 | NON PERTINENTE CON LE TEMATICHE AFFRONTATE ALL'INTERNO DEL PRESENTE LAVORO |           |         |                     |            |                    |        |                     |                        |          |                         |          |
| Schmidbauer C.  | Teaching cobots in learning factories - User and   | 2020 | X                                                                          | X         |         |                     | X          |                    |        |                     |                        |          | X                       |          |
| Schreiber S.    | BERTHA - A Flexible Learning Factory for Manua     | 2016 | X                                                                          | X         |         |                     | X          | X                  |        | X                   |                        |          | X                       |          |
| Stavropoulos P. | Collaborative Machine Tool design                  | 2018 | NON PERTINENTE CON LE TEMATICHE AFFRONTATE ALL'INTERNO DEL PRESENTE LAVORO |           |         |                     |            |                    |        |                     |                        |          |                         |          |

Tabella 7: screening di titolo e abstract snowballing

| TITOLO                                             | AUTORE         | ANNO | SCOPO               |           |         | CONTENUTI DIDATTICI |            | FASI CICLO DI VITA |        |         |              |         | TECNOLOGIE IMPLEMENTATE |          | CITATIONS 04/07/2 |
|----------------------------------------------------|----------------|------|---------------------|-----------|---------|---------------------|------------|--------------------|--------|---------|--------------|---------|-------------------------|----------|-------------------|
|                                                    |                |      | INDUSTRIAL TRAINING | EDUCATION | RICERCA | BUSINESS            | OPERATIONS | RESEARCH AND       | SUPPLY | PRODUCT | DISTRIBUTION | SERVICE | DISPOSAL                | HARDWARE |                   |
| Process analysis of a teaching and learning fact   | Behrendt F.    | 2022 | X                   | X         |         |                     | X          |                    |        | X       |              |         |                         |          | 8                 |
| Cooperation between learning factories: Approa     | Enke J.        | 2020 | X                   | X         |         |                     | X          | X                  | X      |         |              |         | X                       |          | 3                 |
| Simulation of bullwhip effect in a supply chain fi | Gjeldum N.     | 2017 |                     |           | X       |                     | X          |                    |        |         |              |         |                         |          | 4                 |
| Live LCA in learning factories: Real time assessm  | Hagen J.       | 2020 | X                   | X         |         |                     | X          | X                  |        | X       |              |         | X                       |          | 27                |
| Introducing a Maturity Model for Learning Facto    | Enke J.        | 2017 | X                   |           |         |                     |            | X                  |        |         |              |         |                         |          | 33                |
| Mixed Reality in Learning Factories                | Juraschek M.   | 2018 | X                   |           |         |                     | X          |                    |        |         |              | X       | X                       |          | 76                |
| Green factories Bavaria: A network of distributed  | Kreitlein S.   | 2015 | X                   | X         | X       |                     | X          | X                  |        |         |              |         |                         |          | 29                |
| Development of Virtual Learning Factory Toolkit    | Mahmood K.     | 2021 | X                   |           |         |                     | X          |                    |        |         |              |         | X                       |          | 3                 |
| Determinants in developing a learning factory in   | Mahmud F.      | 2019 | X                   |           |         |                     | X          | X                  |        |         |              |         |                         |          | 1                 |
| Developing an ambient assisted living environm     | Plorin D.      | 2014 | X                   |           |         |                     | X          |                    |        |         |              |         |                         |          | 6                 |
| Learning factory FleXtory: Interactive loops betw  | Rasovska I.    | 2022 | X                   | X         |         |                     | X          | X                  |        | X       |              | X       | X                       |          | 9                 |
| Teaching cobots in learning factories - User and   | Schmidbauer C. | 2020 | X                   | X         |         |                     | X          |                    |        |         |              | X       | X                       |          | 37                |
| BERTHA - A Flexible Learning Factory for Manua     | Schreiber S.   | 2016 | X                   | X         |         |                     | X          | X                  |        | X       |              | X       | X                       |          | 16                |
| Potentials and Limits of Learning Factories in Re  | Tisch M.       | 2017 | X                   | X         | X       |                     |            |                    |        | X       |              |         |                         |          | 57                |
| Expanding production perspectives by collabora     | Kemény Z.      | 2018 | X                   |           |         |                     | X          |                    | X      | X       | X            |         |                         |          | 8                 |

Tabella 8: screening completo snowballing

Il numero di articoli del Corpus definitivo e su cui è stata condotta l'analisi descritta nei seguenti capitoli risulta essere pari a 349

## 8. FASE 6, 7, 8: ANALISI CORPUS

Questo capitolo è dedicato all'analisi del Corpus selezionato mediante lo screening effettuato, con l'obiettivo di delineare un quadro complessivo e aggiornato dello stato attuale della ricerca

nell'ambito delle Learning Factory. L'analisi è stata condotta utilizzando strumenti di statistica descrittiva ed è stata rappresentata mediante grafici e tabelle, al fine di riassumere in modo chiaro le principali tendenze emergenti.

Nella prima fase sono stati presi in considerazione gli aspetti quantitativi, come la distribuzione temporale, la provenienza geografica e la produttività dei vari Paesi. Successivamente, sono state analizzate le dimensioni metodologiche, soffermandosi sugli approcci di ricerca adottati (quantitativo o qualitativo) e sulle principali metodologie impiegate negli studi esaminati.

Infine, i risultati sono stati esaminati in relazione alle quattro research questions che guidano l'intero lavoro, attraverso un'analisi qualitativa volta a mettere in evidenza le tendenze emergenti, le prospettive future e le tematiche di maggiore interesse scientifico.

## 8.1 ANNO DI PUBBLICAZIONE

La distribuzione temporale delle pubblicazioni sulle learning factory mostra un'evoluzione interessante, caratterizzata da una fase di crescita fino al 2020, un calo nel 2021 e un nuovo aumento significativo nel 2024.

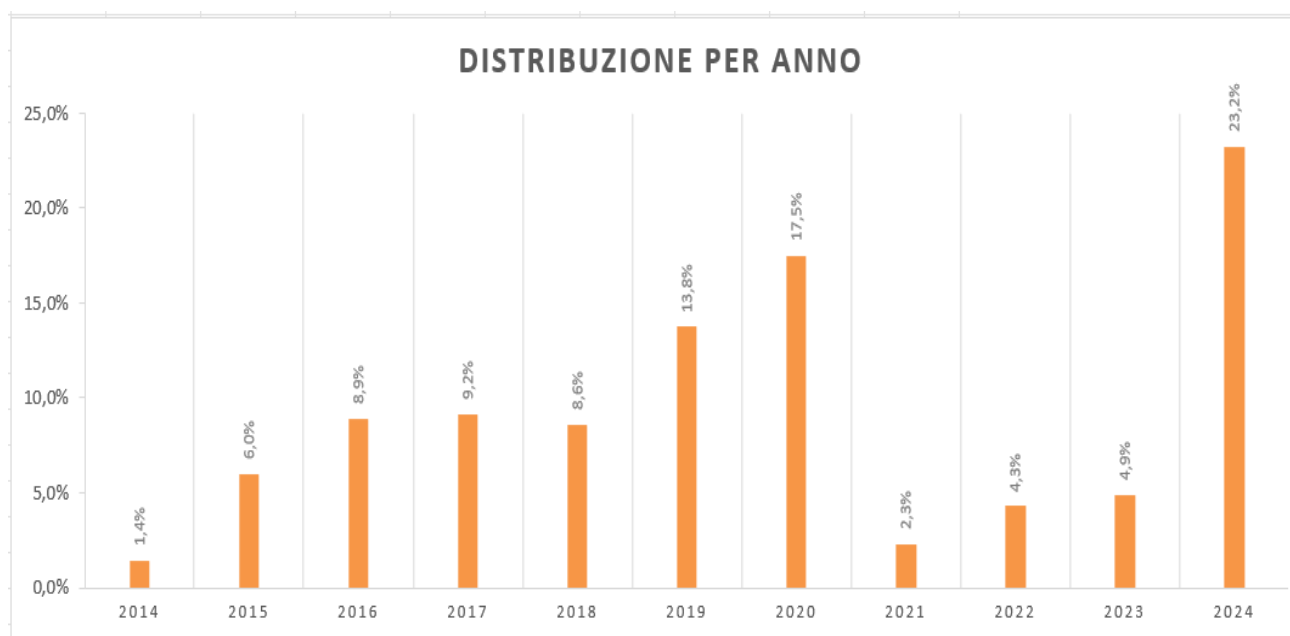


Figura 14: distribuzione per anno di pubblicazione

Nei primi anni, dal 2014 al 2016, il numero di articoli è piuttosto limitato, inferiore al 10%, segno che l'argomento era ancora in una fase pionieristica e concentrato in pochi centri di ricerca. A partire dal 2017 si osserva invece una progressiva stabilizzazione e un ampliamento del dibattito, che culmina nel 2019 con quasi il 14% delle pubblicazioni, evidenziando il consolidamento di una comunità scientifica sempre più interessata al tema.

Il 2020 rappresenta un anno di picco, con il 17,5% delle pubblicazioni totali, spiegabile con il crescente interesse verso strumenti didattici e ambienti sperimentali capaci di supportare la trasformazione digitale legata all'Industria 4.0. La letteratura sottolinea come le learning factory siano diventate un contesto privilegiato per testare nuove tecnologie e metodologie formative basate sull'apprendimento esperienziale, in linea con i profondi cambiamenti in atto nel mondo produttivo (Tisch et al. 2016).

Il 2021, al contrario, mostra un netto calo, pari al 2,3%, interpretabile come conseguenza diretta delle difficoltà operative imposte dalla pandemia. Poiché le learning factory si basano fortemente su esperienze pratiche e interazioni dirette, le chiusure e le restrizioni sanitarie hanno avuto un impatto rilevante, limitando la produzione di nuovi lavori sperimentali e la possibilità di avviare o documentare progetti già in corso.

Dal 2022 in avanti, il numero di pubblicazioni torna a crescere, inizialmente in modo graduale e poi più deciso nel 2024, quando raggiunge il 23,2%, il valore più alto dell'intero periodo considerato. Questo dato, tuttavia, non riflette soltanto un rinnovato interesse scientifico, ma è probabilmente influenzato anche dalla concentrazione di contributi presentati alla 14<sup>a</sup> Conferenza Internazionale sulle Learning Factory, svoltasi dal 17 al 19 aprile 2024 presso l'Università di Twente. Gli atti di questa conferenza, che rappresenta il principale punto di incontro della comunità internazionale, hanno raccolto gran parte della produzione più recente, generando così un picco che potrebbe non corrispondere a un incremento strutturale dell'attività di ricerca.

## 8.2 DISTRIBUZIONE PER PROVENIENZA GEOGRAFICA

### 8.2.1 Distribuzione per continente

Il grafico in figura 15 mostra una distribuzione fortemente sbilanciata della produzione scientifica sulle Learning Factory a livello mondiale.

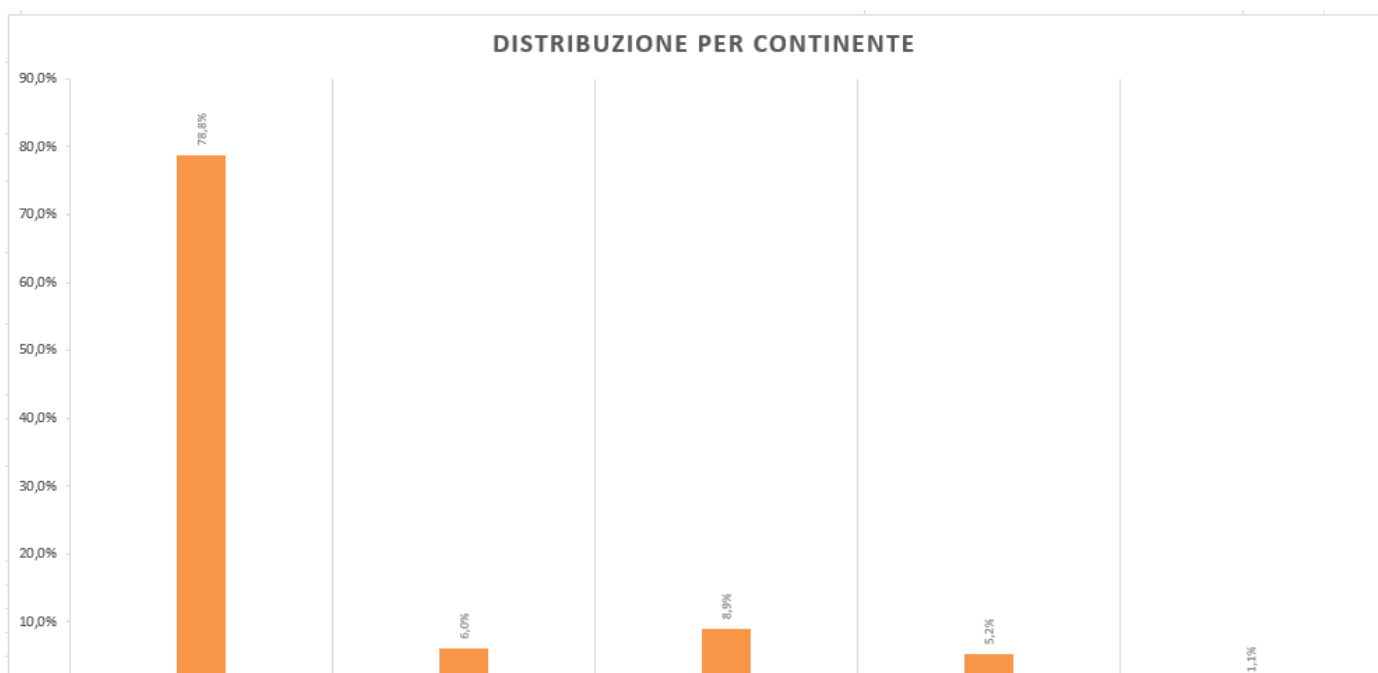


Figura 15: distribuzione per continente

L'Europa concentra quasi l'80% delle pubblicazioni (78,8%), confermandosi come il principale polo di ricerca grazie al ruolo pionieristico di università e istituti tedeschi e alla stretta connessione con le politiche di Industria 4.0. Seguono l'America con l'8,9% e l'Asia con il 6%, entrambe caratterizzate da esperienze in crescita ma ancora limitate rispetto al contesto europeo. L'Africa rappresenta il 5,2% del totale, mentre l'Oceania si attesta su una quota marginale pari all'1,1%. Questa distribuzione evidenzia come il fenomeno delle Learning Factory sia tuttora fortemente radicato nel contesto europeo, costituendo il punto di partenza per l'analisi dettagliata dei singoli continenti che segue.

## 8.2.2 Europa

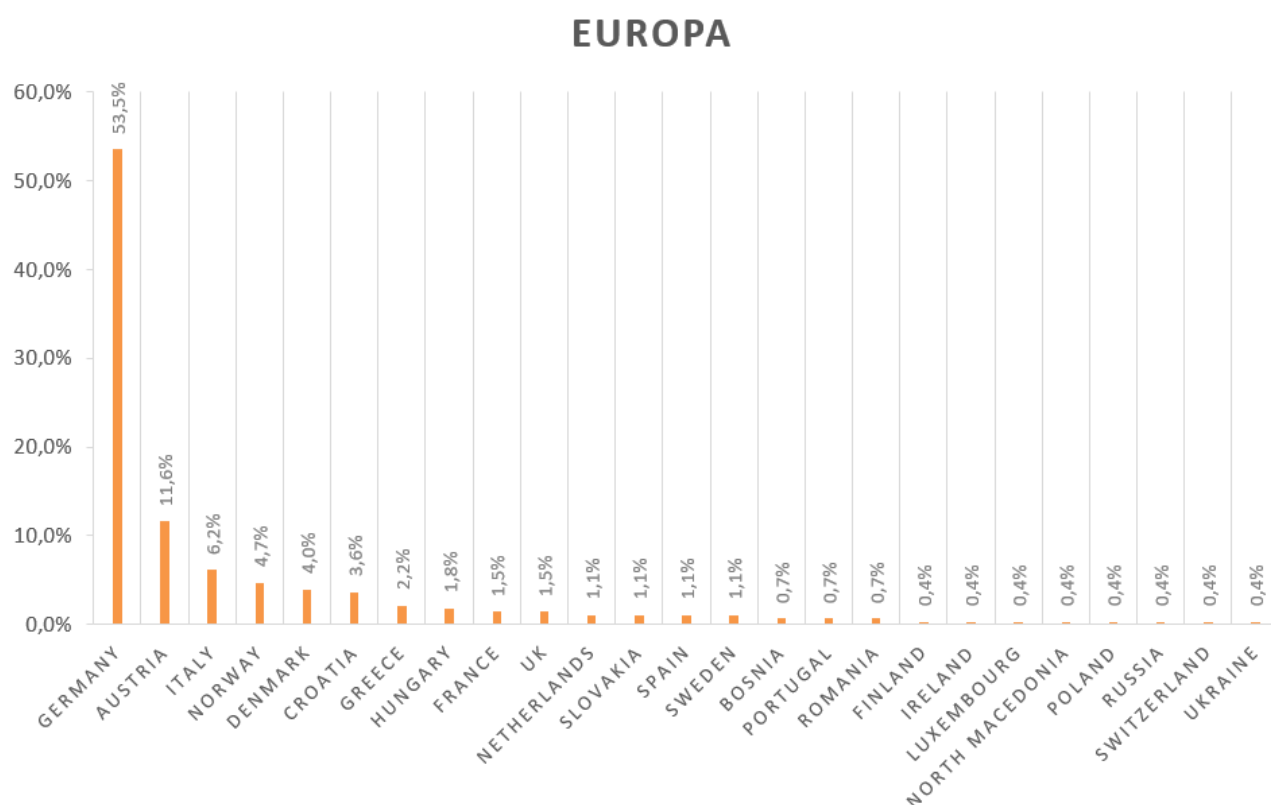


Figura 16: distribuzione europea

Il grafico in figura 16 mostra come la Germania domini nettamente la produzione scientifica sulle learning factory, con il 53,5% delle pubblicazioni, a fronte di valori decisamente più bassi negli altri Paesi europei. Questo primato si spiega con il ruolo pionieristico svolto dalle università e dagli istituti tedeschi nello sviluppo del concetto, strettamente legato alle politiche di *Industry 4.0*. Fin dall'inizio, la Germania ha infatti promosso le Learning Factory come strumenti per la formazione pratica e il trasferimento tecnologico, investendo in laboratori avanzati e in solide collaborazioni tra mondo accademico e industria (Abele et al. 2019; Wagner et al. 2012).

L'Austria si colloca al secondo posto con l'11,6% delle pubblicazioni e, pur con numeri inferiori, ha sviluppato esperienze significative, spesso in stretta continuità con la tradizione tedesca. Ciò è stato possibile anche grazie alla presenza di poli come la TU Graz e la Montanuniversität Leoben, che hanno favorito la diffusione del modello, in particolare nei settori manifatturiero e formativo (Abele et al. 2019).

L'Italia occupa la terza posizione con il 6,2%, avendo negli ultimi anni promosso progetti legati alle politiche di digitalizzazione e al Piano Nazionale Industria 4.0. Tuttavia, rispetto alla Germania, lo sviluppo italiano appare meno sistematico e più frammentato, frutto soprattutto di iniziative locali promosse da singoli atenei e centri di ricerca.

In sintesi, la distribuzione europea evidenzia un chiaro squilibrio: la Germania si conferma leader indiscussa, l'Austria rappresenta un polo regionale solido e ben strutturato, mentre l'Italia si presenta come un Paese in via di consolidamento, con un buon potenziale di crescita ma ancora lontano dai livelli dei leader continentali.

### 8.2.3 Asia

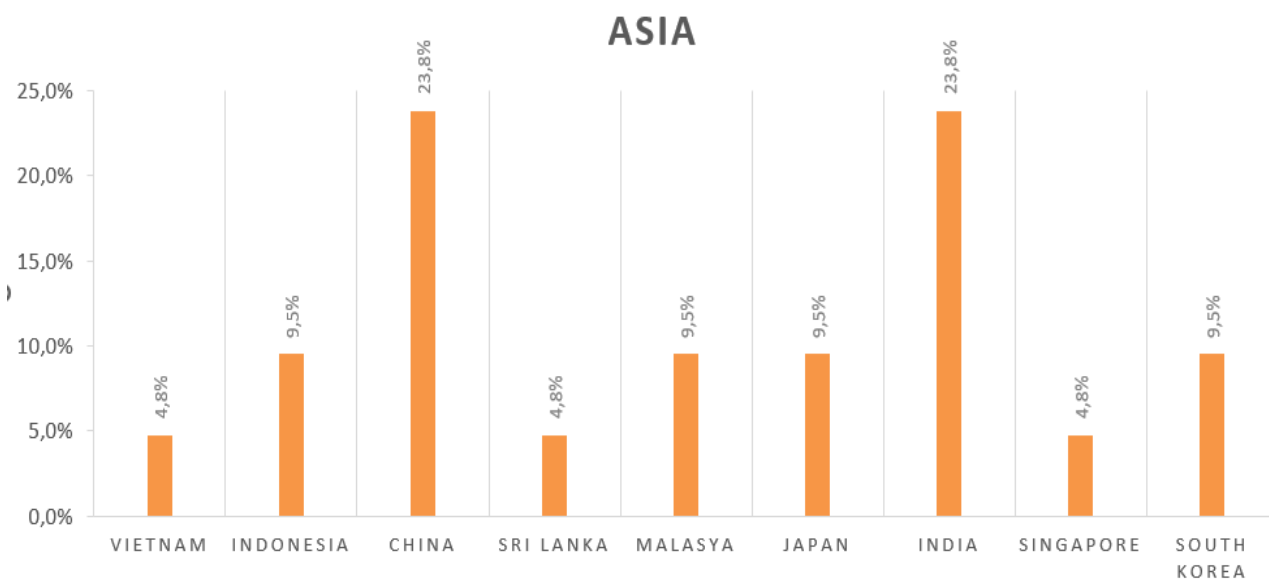


Figura 17: distribuzione asiatica

Nel grafico in figura 17 relativo all'Asia, la distribuzione appare più frammentata e con valori generalmente inferiori: Cina e India guidano entrambe con il 23,8%, seguite da Giappone, Malesia, Indonesia e Corea del Sud con il 9,5%, mentre Vietnam, Sri Lanka e Singapore si attestano al 4,8%. La Cina ha investito in modo costante nella digitalizzazione dei processi produttivi e nella formazione ingegneristica avanzata, utilizzando le learning factory come strumento per sperimentare le applicazioni dell'*Industry 4.0* e dello *Smart Manufacturing* (Xu et al. 2018).

L'India, pur presentando un sistema produttivo differente, ha avviato negli ultimi anni lo sviluppo di learning factory in ambito universitario, con l'obiettivo di potenziare le competenze pratiche degli studenti di ingegneria e di allinearsi agli standard internazionali (Prasad et al. 2019).

Altri Paesi, come il Giappone e la Corea del Sud, mostrano valori inferiori, probabilmente perché hanno adottato modelli diversi di apprendimento esperienziale in ambito industriale, integrando laboratori avanzati senza tuttavia definirli esplicitamente come learning factory (Tisch et al. 2016)

## 8.2.4 America

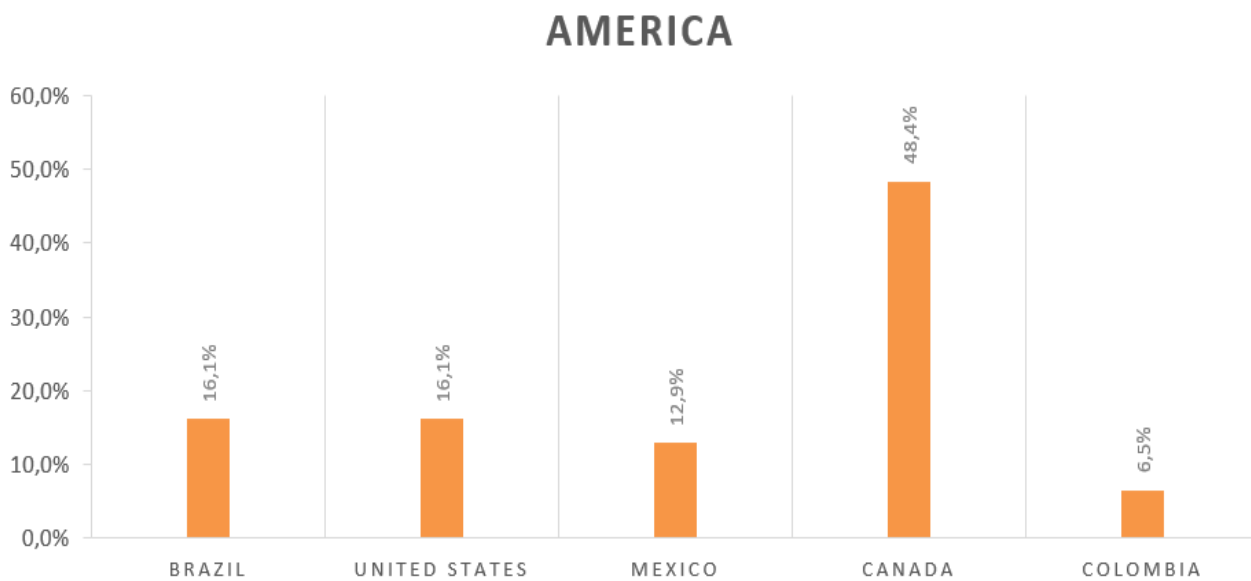


Figura 18: distribuzione asiatica

Per quanto riguarda il continente americano, il grafico in figura 18 mostra una netta prevalenza del Canada, che raggiunge il 48,4% delle pubblicazioni, seguito da Stati Uniti e Brasile, entrambi con il 16,1%, poi dal Messico con il 12,9% e infine dalla Colombia con il 6,5%. Questo risultato può apparire in parte inatteso, poiché gli Stati Uniti sono spesso considerati il principale polo dell'innovazione tecnologica mondiale. La maggiore incidenza del Canada si spiega invece con il ruolo trainante delle sue università, che hanno promosso programmi e laboratori interdisciplinari ispirati al modello delle learning factory, come evidenziato da Wagner et al. (2012).

Negli Stati Uniti, al contrario, il concetto di learning factory è stato spesso inglobato all'interno di iniziative più ampie di *engineering education* e di altre strutture formative avanzate, risultando quindi meno esplicitamente identificato come tale e, di conseguenza, generando un numero inferiore di pubblicazioni specifiche (Tisch et al. 2016)

## 8.3 APPROCCIO E METODOLOGIA DI RICERCA

### 8.3.1 Approccio di ricerca

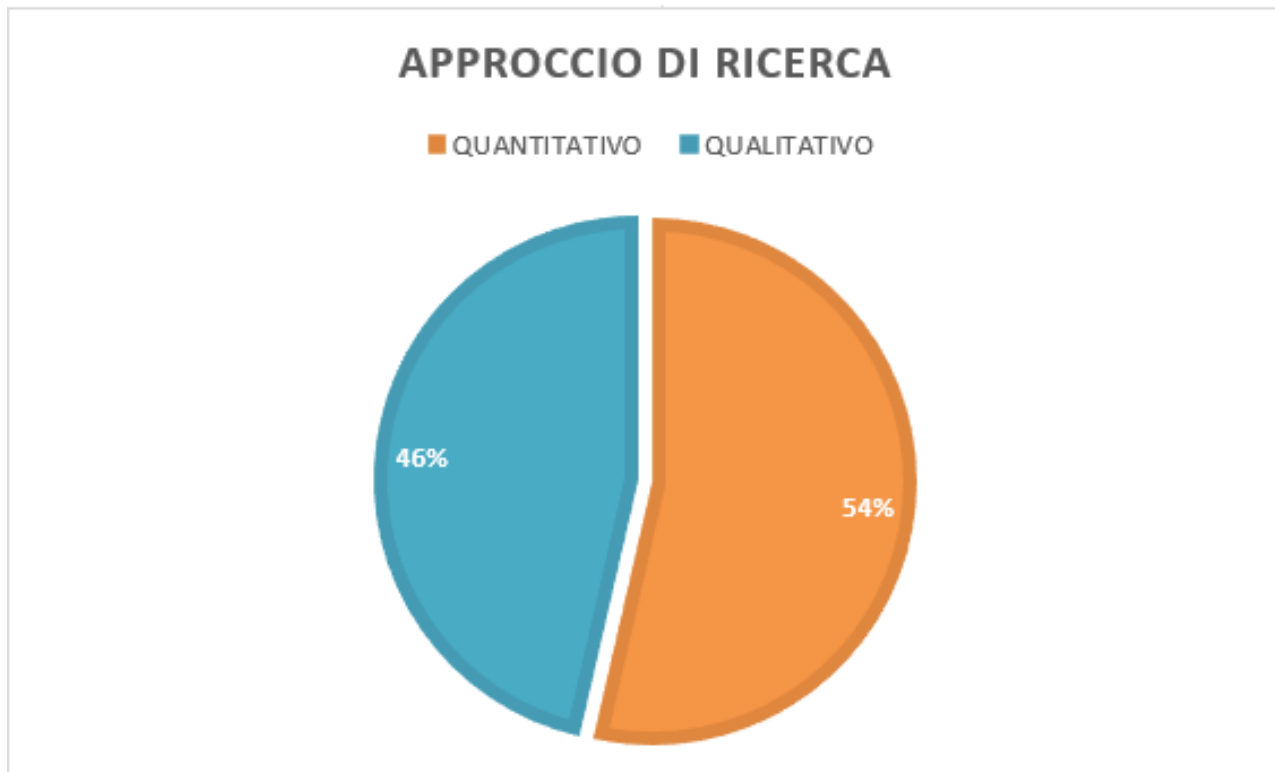


Figura 19: approccio di ricerca

Il grafico in figura 19 mostra la distribuzione degli approcci metodologici adottati nel corpus, distinguendo fra qualitativo e quantitativo. Nel primo rientrano metodologie come conceptual model ed exploratory analysis le quali servono soprattutto a costruire linee guida senza entrare nel dettaglio numerico-operativo. Nel secondo gruppo ricadono single case study e simulazioni dove l'obiettivo è quantificare effetti, confrontare alternative e validare ipotesi con dati.

Dai dati emerge che il 46% degli articoli adotta un approccio qualitativo e il 54% un approccio quantitativo. Il lieve vantaggio del quantitativo è il risultato di una dinamica temporale precisa: tra il 2016 e il 2018 prevalgono i contributi qualitativi, perché le learning factory erano ancora poche e servivano dei modelli di riferimento. Con l'apertura di nuove learning factory dal 2017 in poi, cresce la disponibilità di casi e dati: gli studi si spostano su analisi misurate di performance, valutazioni di layout e flussi, ottimizzazione di linee di assemblaggio e intralogistica, fino a simulazioni di processi e a digital twin che permettono test controllati prima del trasferimento in produzione. Di conseguenza, l'approccio quantitativo diventa prevalente perché risponde a bisogni concreti.

In termini interpretativi, la coesistenza dei due approcci è coerente con la natura del campo: i lavori qualitativi hanno svolto (e continuano a svolgere) un ruolo fondativo definendo il perimetro concettuale e aprendo nuove piste, mentre i quantitativi consolidano, misurano e generalizzano. Oggi, con più infrastrutture attive e dati accessibili, è normale vedere crescere simulazioni, modelli e case study, allo stesso tempo, i contributi qualitativi restano importanti per integrare dimensioni emergenti (es. human-centric, sostenibilità, organizzazione) e per leggere criticamente risultati e limiti degli studi.



### 8.3.2 Metodologia di ricerca

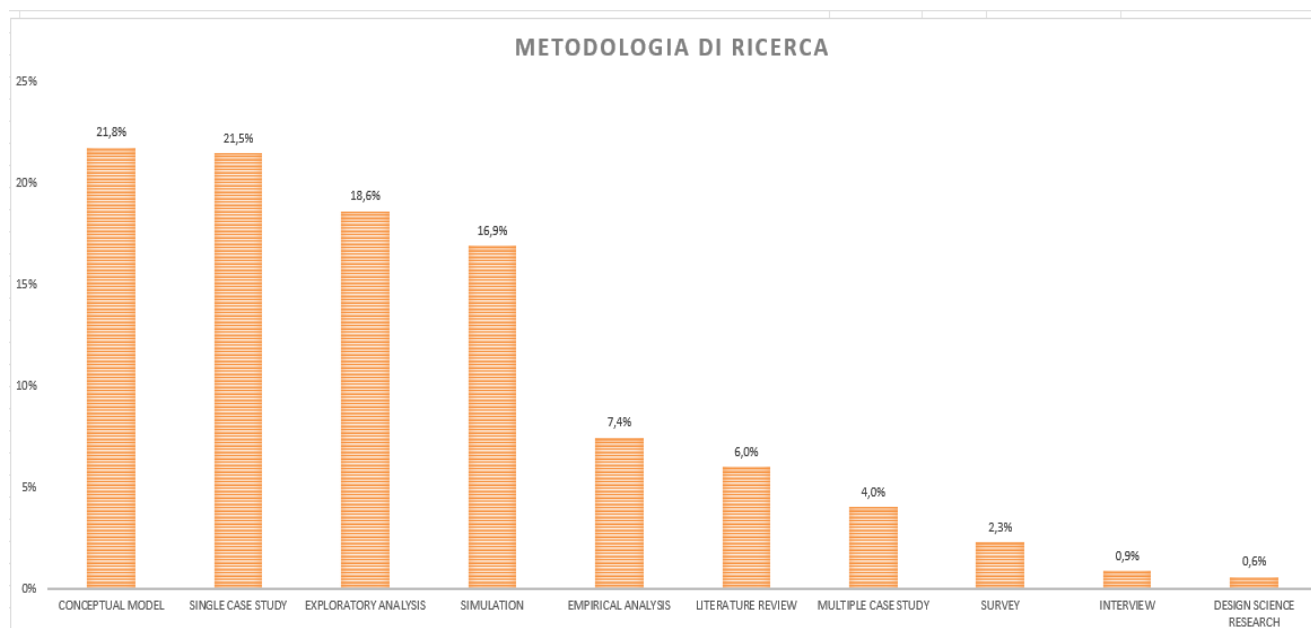


Figura 20: metodologia di ricerca

Il grafico in figura 20 mostra come la ricerca sulle learning factory tende a concentrarsi attorno a quattro principali approcci metodologici: conceptual model (21,5%), single case study (20,9%), exploratory analysis (18,3%) e simulation (16,6%). Insieme, questi quattro approcci coprono oltre due terzi della letteratura complessiva.

I conceptual model sono ampiamente utilizzati poiché rappresentano una prima fase di sistematizzazione teorica: attraverso schemi di riferimento e linee guida, i ricercatori possono proporre strutture utili per progettare o migliorare una learning factory. Questo approccio risulta particolarmente rilevante in un contesto innovativo, dove non esistono ancora standard universalmente riconosciuti e dove vi è la necessità di costruire framework capaci di orientare la ricerca e l'applicazione pratica (Abele et al. 2019). Tuttavia, la loro natura astratta rappresenta anche un limite: forniscono un quadro di riferimento ma non sempre trovano applicazione diretta, motivo per cui vengono spesso impiegati come punto di partenza per studi successivi.

I single case study, che rappresentano il 20,9%, consentono di descrivere nel dettaglio il funzionamento di una specifica learning factory, illustrando le attività svolte, le tecnologie implementate e gli obiettivi formativi o industriali perseguiti. Questa metodologia è particolarmente apprezzata poiché le learning factory sono spesso realtà uniche, sviluppate all'interno di università o aziende specifiche e strettamente legate al contesto locale. I case study permettono quindi di evidenziare esperienze concrete e di mostrare come un laboratorio o un'infrastruttura possano essere replicati o adattati altrove. Inoltre, questi studi aiutano a colmare il divario tra teoria e pratica, offrendo esempi tangibili di come i modelli concettuali si traducano in realtà operative.

Le exploratory analysis, che rappresentano il 18,3%, hanno un ruolo diverso ma complementare. Queste ricerche si concentrano sulla descrizione qualitativa dei fenomeni osservati, senza approfondire gli aspetti numerici o quantitativi. Nel contesto delle learning factory, ciò significa

individuare tendenze emergenti, nuove tecnologie o metodologie sperimentate e ambiti applicativi in fase di sviluppo. Ad esempio, un'exploratory analysis può mostrare come le learning factory contribuiscano alla diffusione di strumenti di Industry 4.0 (IoT, realtà aumentata, digital twin) o a nuove forme di collaborazione tra università e industria. Sebbene offrano minore solidità comparativa, queste analisi sono preziose perché aprono nuove riflessioni e direzioni di ricerca, fungendo spesso da base per studi più strutturati.

Le simulation (16,6%) sono perfettamente coerenti con la natura sperimentale delle learning factory. Grazie a strumenti digitali e modelli virtuali, i ricercatori possono riprodurre scenari industriali complessi, come linee di assemblaggio, flussi logistici o l'introduzione di nuove tecnologie hardware e software non ancora diffuse sul mercato. Le simulazioni permettono di testare in anticipo l'efficacia di determinate soluzioni e di creare ambienti sicuri e controllati nei quali studenti e operatori possono fare esperienza senza rischi. Questo approccio è quindi centrale sia per la ricerca applicata che per la didattica, poiché unisce rigore metodologico e realismo operativo.

Analizzando l'evoluzione di queste metodologie anno per anno (tabella x) si osserva che nel 2016 i conceptual model erano predominanti, a testimonianza del fatto che il concetto di learning factory stava iniziando ad affermarsi nella letteratura, pur rimanendo ancora poco diffuso nella pratica. L'aumento significativo di studi basati su case study e simulation tra il 2018 e il 2020 conferma invece che le learning factory avevano raggiunto una fase di pieno sviluppo, diventando ambienti maturi in cui si sono moltiplicate le sperimentazioni e le attività di ricerca pubblicate in quegli anni.

Accanto a questi approcci principali, il grafico mostra anche metodologie meno diffuse ma comunque rilevanti. Le empirical analysis (7,4%) si basano sulla raccolta e analisi di dati reali, offrendo risultati più solidi e verificabili ma richiedendo tempi e risorse maggiori, motivo per cui il loro utilizzo rimane limitato. Le literature review (6%) svolgono un ruolo importante nel sintetizzare lo stato dell'arte, ma la loro scarsità indica che il campo è ancora in evoluzione e che i ricercatori preferiscono produrre nuovi studi piuttosto che consolidare quelli esistenti. Altre metodologie, come survey (2,3%), interview (0,9%), oppure approcci più strutturati come il design science research (0,6%) e il mathematical modeling (0,3%), restano marginali. Questo dimostra come la ricerca sulle learning factory privilegi approcci qualitativi, descrittivi e sperimentali piuttosto che analisi quantitative su larga scala o modelli matematici complessi. Tale tendenza riflette la fase attuale di sviluppo del campo, in cui la priorità è esplorare, testare e validare nuovi concetti.

In sintesi, la combinazione di approcci concettuali, descrittivi, applicativi e sperimentali garantisce un buon equilibrio tra teoria e pratica, ma al tempo stesso mette in luce la necessità, in futuro, di applicare di più metodologie empiriche e comparative per rendere le evidenze scientifiche sulle learning factory più solide e generalizzabili.

|                                      | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | Totale |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| Approccio metodologico               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| Approccio concettuale                | 1    | 3    | 11   | 8    | 7    | 12   | 9    | 2    | 1    | 1    | 21   | 76     |
| Approccio di caso                    | 2    | 2    | 3    | 6    | 4    | 12   | 14   | 1    | 4    | 7    | 20   | 75     |
| Approccio di laboratorio             | 3    | 6    | 6    | 3    | 9    | 6    | 6    | 1    | 3    | 3    | 19   | 65     |
| Approccio di simulazione             | -    | 5    | 5    | 5    | 4    | 11   | 15   | 3    | 3    | -    | 8    | 59     |
| Approccio di analisi empirica        | -    | 2    | 5    | 1    | 4    | 3    | 3    | 1    | -    | 3    | 5    | 26     |
| Approccio di letteratura             | -    | 1    | 3    | 3    | 1    | 5    | -    | 1    | 3    | 4    | -    | 21     |
| Approccio di Review                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| Approccio di Multiple Case Study     | -    | 2    | 1    | -    | 1    | 2    | 4    | -    | -    | -    | 4    | 14     |
| Approccio di Survey                  | -    | -    | 1    | 1    | 1    | -    | 4    | -    | 1    | -    | -    | 8      |
| Approccio di Interview               | -    | -    | 1    | -    | -    | -    | 2    | -    | -    | -    | -    | 3      |
| Approccio di Design Science Research | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 2    | 2      |

Tabella 9: distribuzione annuale per metodologia di ricerca

## 8.4 ANALISI IN RELAZIONE ALLE RESEARCH QUESTIONS

In questo paragrafo verrà effettuata un'analisi dei risultati ottenuti da grafici sviluppati per rispondere alle quattro research questions, in modo tale da fornire un commento critico sulla base degli articoli del Corpus.

### 8.4.1 RQ1: Scopo di una Learning Factory

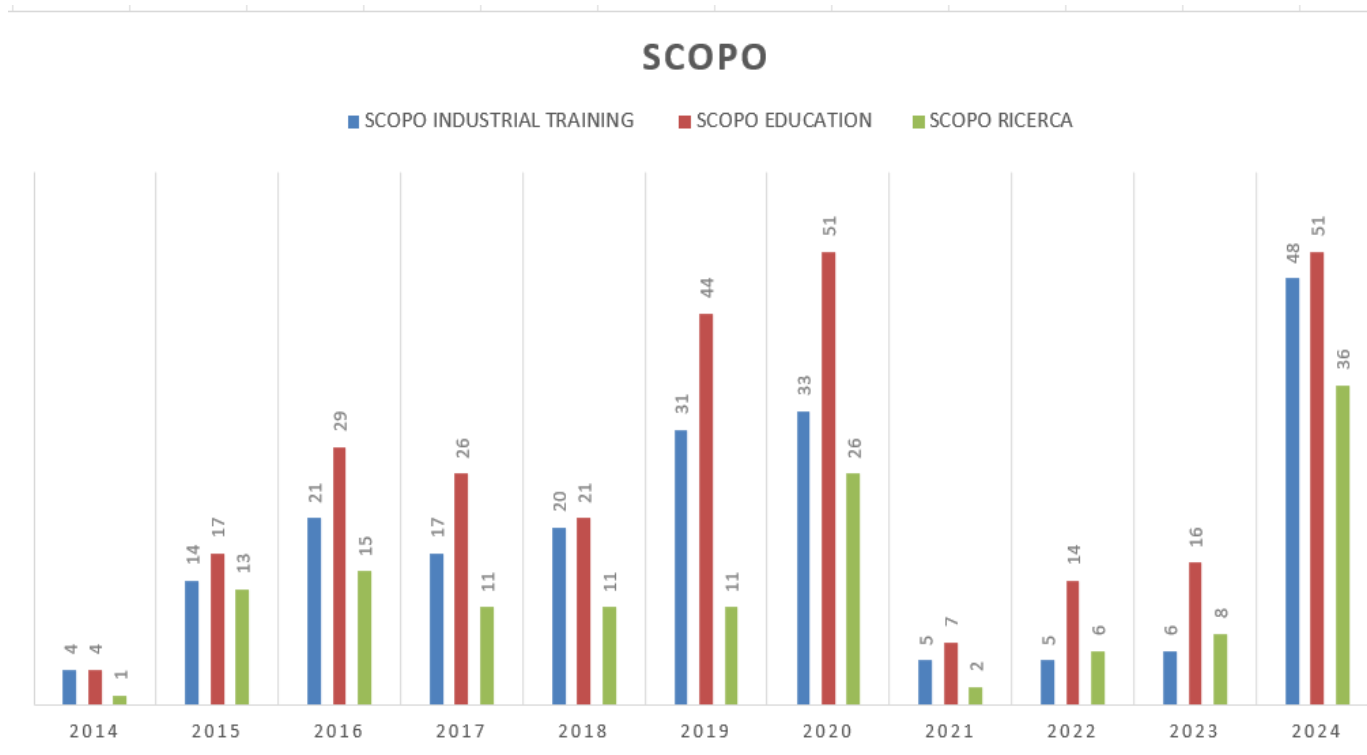


Figura 21: distribuzione annuale per scopo

Gli scopi delle learning factory – formazione industriale, educazione e ricerca – si riflettono in modo coerente nelle tendenze mostrate nel grafico in figura 21, che rispecchia il modo in cui tali ambienti sono stati progettati e utilizzati nei contesti accademici e industriali. Nel dettaglio, l'educazione, cioè le learning factory impiegate in ambito universitario e accademico, ha sempre avuto un ruolo centrale. Fin dai primi anni considerati nell'analisi emerge chiaramente che la maggior parte delle pubblicazioni dedicate alle learning factory si concentra sugli obiettivi formativi, come l'insegnamento a studenti di metodologie, tecnologie e processi produttivi. Diverse importanti università tedesche, come la TU Darmstadt e la TUM, hanno svolto un ruolo decisivo nello sviluppo di questi ambienti a scopo didattico; tra gli esempi più noti figura la Process Learning Factory CiP della TU Darmstadt, dedicata al lean manufacturing e all'Industria 4.0.

Per quanto riguarda la formazione industriale, il grafico mostra un andamento più graduale ma costante, con una crescita evidente nel 2024, anno in cui il numero di contributi dedicati al training industriale quasi eguaglia quello relativo alla formazione accademica. Questo risultato è pienamente coerente con il fatto che molte learning factory collaborano da anni con le imprese per migliorare l'efficienza delle linee di assemblaggio, ridurre i tempi di setup, ottimizzare i flussi logistici interni e integrare i principi del lean manufacturing con i processi digitali. Un esempio significativo è rappresentato dalla Festo Learning Factory di Scharnhausen, in Germania, dove i corsi di formazione

per operatori e tecnici della manutenzione comprendono moduli specifici su automazione, assemblaggio e miglioramento continuo attraverso gli strumenti lean (Dahl et al. 2023).

Sebbene inizialmente marginale, la ricerca ha acquisito negli ultimi anni un peso sempre maggiore. In quest'ambito rientrano non solo l'applicazione delle tecnologie, ma anche la sperimentazione dei loro limiti, l'esplorazione di nuove applicazioni e l'analisi delle implicazioni in termini di sostenibilità e resilienza. Lutters et al. (2023), ad esempio, ha studiato l'utilizzo del digital twin per l'ottimizzazione di una linea di assemblaggio, dimostrando come questa tecnologia possa migliorare la produttività, la sostenibilità e il monitoraggio in tempo reale della qualità. Köppe et al. (2024) ha invece analizzato come le learning factory possano supportare i fornitori di soluzioni di intelligenza artificiale nel testare e validare i propri prodotti in contesti reali, adattandoli alle esigenze dei clienti industriali.

Dal confronto tra i tre ambiti emerge chiaramente che l'educazione resta il fulcro originario e l'elemento più stabile, poiché le learning factory sono nate come strumenti didattici per la formazione in ingegneria e produzione. La formazione industriale cresce progressivamente, man mano che le imprese riconoscono il valore di questi ambienti per migliorare efficienza e processi. La ricerca, invece, sta acquisendo un'importanza crescente ma procede più lentamente, poiché richiede dati, sperimentazione e infrastrutture dedicate. Nel loro insieme, queste tre traiettorie confermano la natura ibrida delle learning factory: strumenti di formazione, spazi di collaborazione con l'industria e veri e propri laboratori scientifici per lo sviluppo di soluzioni innovative.

#### 8.4.2 RQ2: Contenuti Didattici

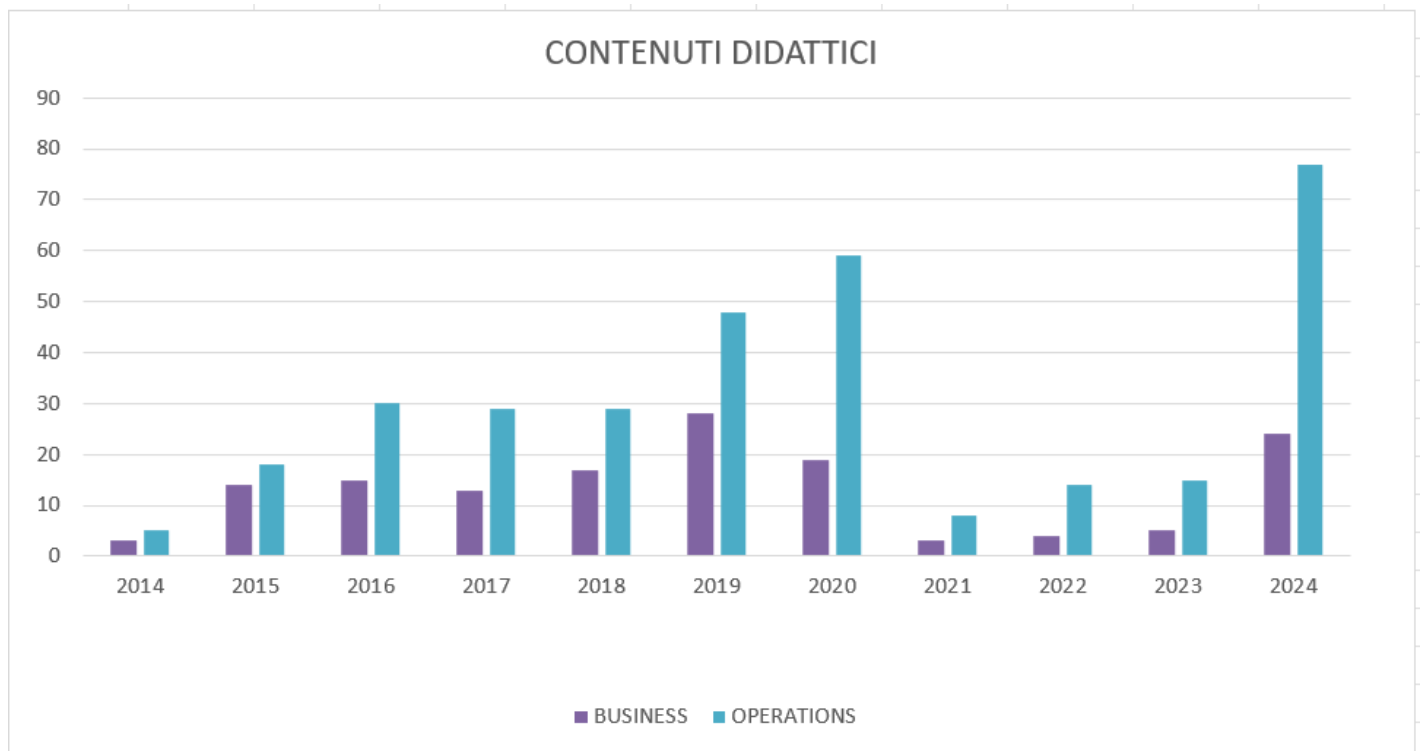


Figura 22: distribuzione annuale per i contenuti didattici

Il grafico in figura 22 sui contenuti didattici delle learning factory mette chiaramente in evidenza la forte predominanza dei temi legati alle operations rispetto a quelli di carattere manageriale. Fin dai primi anni considerati nel corpus di articoli, le learning factory si sono affermate soprattutto come laboratori di sperimentazione e formazione tecnica: i contributi incentrati sulle operations sono cresciuti in modo costante a partire dal 2015, raggiungendo un primo picco tra il 2019 e il 2020. In questo periodo, l'attenzione della comunità scientifica era fortemente orientata verso la transizione all'Industria 4.0, con particolare enfasi su automazione, sistemi ciber-fisici, simulazioni digitali e applicazioni della lean manufacturing come strumenti chiave per il miglioramento continuo e l'efficienza dei processi (Tisch et al. 2016).

Negli ultimi anni, tuttavia, l'attenzione alle operations si è ampliata oltre la sola efficienza produttiva. Diversi studi hanno sottolineato come le learning factory stiano progressivamente integrando i principi dell'Industria 5.0, che spostano il baricentro verso modelli produttivi più umani, resilienti e sostenibili (Breque et al. 2021). È anche per questo motivo – oltre a quelli già descritti in precedenti analisi – che si registra un marcato picco nel 2024, quando il numero di contributi raggiunge il livello più alto dell'intero periodo. Le learning factory stanno diventando sempre più luoghi in cui sperimentare non solo tecniche di lean e digitalizzazione, ma anche approcci innovativi che pongono al centro la persona, la sicurezza e l'impatto ambientale (Potthoff e Günemann 2023).

I temi legati al business, invece, rappresentano una quota molto più ridotta. Alcuni picchi, come quello del 2019, indicano momenti di maggiore attenzione verso argomenti manageriali, in particolare l'innovazione, l'imprenditorialità e lo sviluppo di start-up. In alcuni casi, le learning factory sono state utilizzate come ambienti per stimolare la creatività e il pensiero imprenditoriale degli studenti, simulando dinamiche di incubazione e accelerazione di nuove idee (Vieira et al. 2024). Tuttavia, questo filone non ha mostrato finora un andamento costante né una crescita paragonabile a quella delle operations; la dimensione manageriale rimane infatti più episodica e meno strutturata.

In sintesi, il grafico conferma che le learning factory si sono sviluppate principalmente come strumenti a vocazione tecnica e industriale, con solide radici nei principi della lean manufacturing e una progressiva apertura verso i valori dell'Industria 5.0. I contenuti di tipo business restano invece secondari e meno sistematizzati, pur offrendo spunti interessanti legati all'innovazione e alla creazione di nuove imprese. Questo squilibrio tra le due aree riflette una tendenza ormai consolidata: l'attenzione verso le operations rimane costante e in crescita, mentre il business continua a occupare una posizione marginale, emergendo solo in momenti specifici e in progetti mirati.

### 8.4.3 RQ3: Fasi del ciclo di vita di un prodotto

Il grafico in figura 23 relativo al ciclo di vita del prodotto mostra chiaramente le fasi su cui le learning factory concentrano maggiormente l'attenzione. Dai dati emerge come le aree più studiate siano la produzione/assemblaggio e la ricerca e sviluppo, mentre fasi come approvvigionamento, distribuzione/logistica, servizio e soprattutto smaltimento restano marginali.

La concentrazione su produzione e assemblaggio è particolarmente evidente, con picchi significativi soprattutto nel triennio 2016–2020 e nuovamente nel 2024. Ciò conferma la vocazione originaria delle learning factory come laboratori a orientamento tecnico-produttivo. Questi ambienti, infatti, sono stati concepiti per riprodurre linee di montaggio, processi industriali e scenari di fabbrica reali, con l'obiettivo di formare studenti e professionisti su metodologie lean, automazione, controllo qualità e ottimizzazione dei flussi (Abele et al. 2019).

La ricerca e sviluppo rappresenta la seconda area più rilevante, con un trend in costante crescita che raggiunge il suo massimo nel 2024. Questo andamento è coerente con l'evoluzione delle learning factory in vere e proprie piattaforme di sperimentazione tecnologica: non solo luoghi di formazione, ma anche spazi in cui sviluppare e testare innovazioni legate all'Industria 4.0 e, più recentemente, all'Industria 5.0, con particolare attenzione a personalizzazione, sostenibilità e resilienza.

Al contrario, fasi come approvvigionamento e logistica/distribuzione restano poco rappresentate. Sebbene la logistica sia un ambito cruciale per la competitività industriale, sembra essere ancora poco integrata nei progetti di learning factory, probabilmente perché richiede infrastrutture dedicate (magazzini, sistemi di trasporto, supply chain reali o simulate) difficilmente riproducibili in un contesto laboratoriale. Esistono tuttavia alcune eccezioni, come le learning factory dedicate all'intralogistica e alla gestione della supply chain – tra cui quella della Graz University of Technology – ma il loro peso complessivo rimane limitato su scala globale.

Anche le fasi di servizio e, ancor più, di smaltimento ricevono scarsa attenzione, mostrando valori quasi nulli fino al 2024, quando si nota un lieve incremento. Questo dato è interessante perché mette in luce un divario ancora aperto: la dimensione della sostenibilità e dell'economia circolare, legata alla gestione dei prodotti a fine vita e dei rifiuti, è ancora poco esplorata nelle learning factory, nonostante la crescente importanza del tema nella letteratura su Industria 5.0. Tuttavia, la recente comparsa di studi dedicati al *disposal* suggerisce una possibile direzione di sviluppo futuro, basata sull'integrazione tra tecnologie digitali, modelli circolari e processi formativi.

In sintesi, il grafico mostra come le learning factory abbiano finora concentrato le proprie attività sulle fasi centrali e a maggior valore aggiunto del ciclo di vita del prodotto – in particolare produzione/assemblaggio e R&D – mentre le fasi a valle, come logistica, servizio e smaltimento, restano ancora poco rappresentate. Ciò riflette, da un lato, la coerenza con l'obiettivo originario di riprodurre scenari produttivi realistici e, dall'altro, la necessità di un'evoluzione futura verso una copertura più completa dell'intero ciclo di vita, in linea con le nuove priorità di sostenibilità, resilienza e gestione integrata dei sistemi industriali.

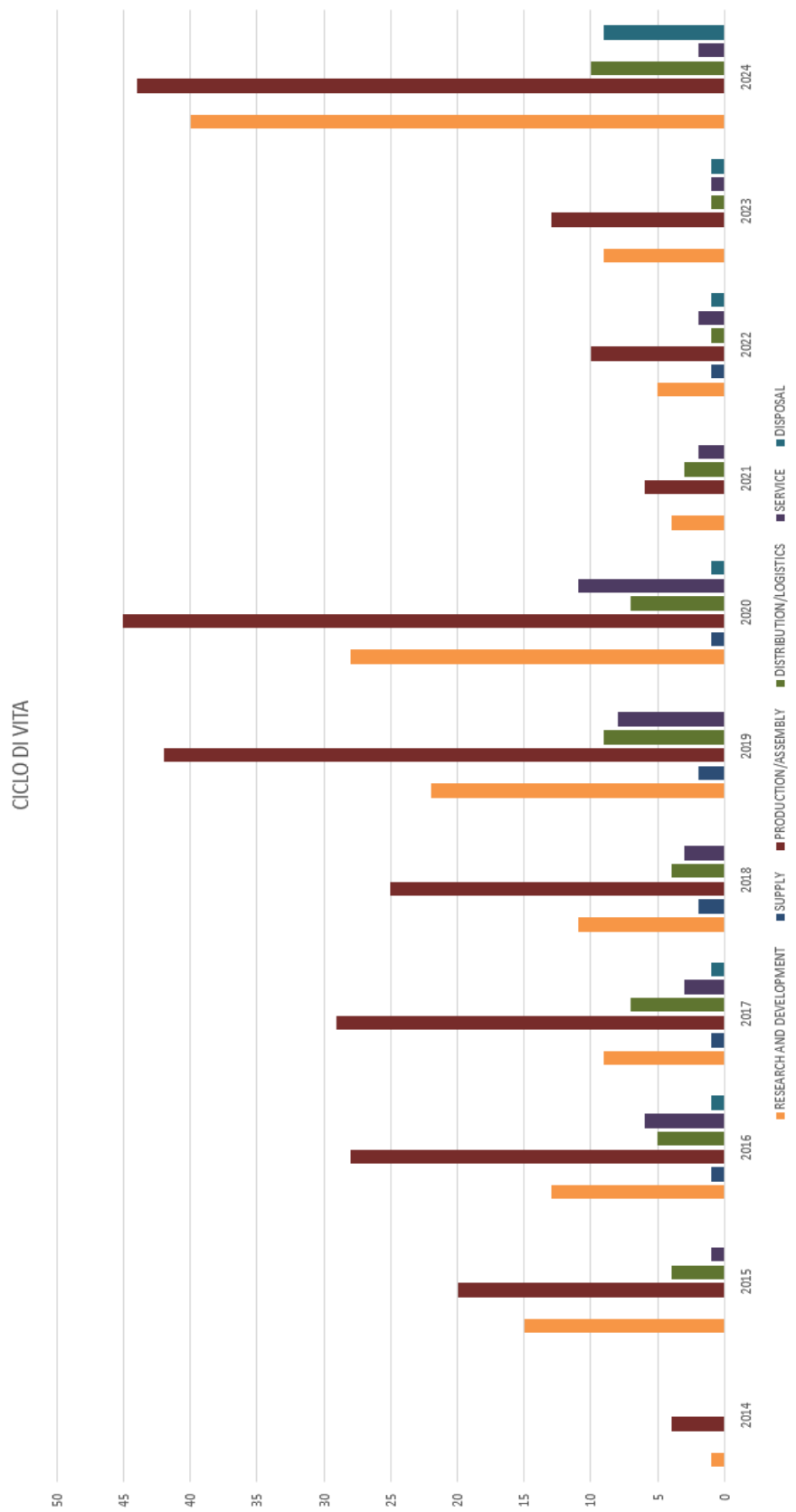


Figura 23: distribuzione annuale per le fasi di ciclo di vita del prodotto



#### 8.4.4 RQ4: Tecnologie implementate

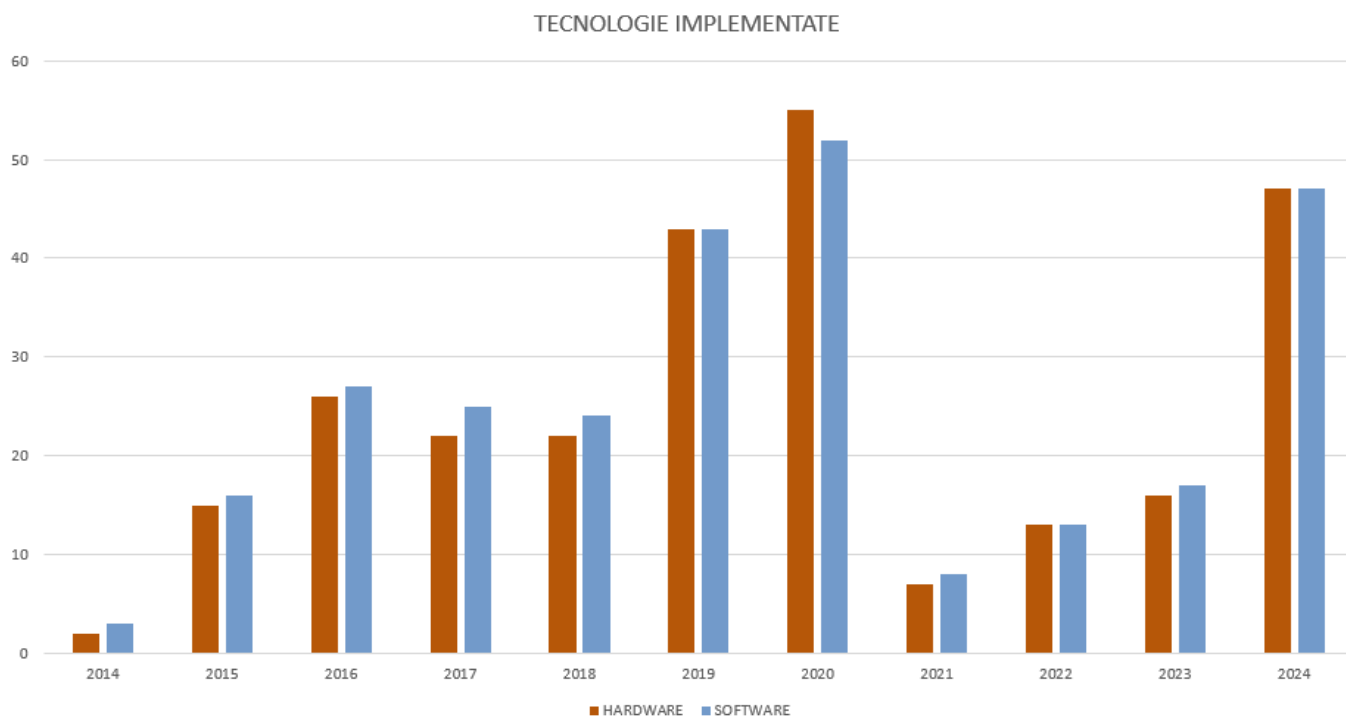


Figura 24: distribuzione annuale per le tecnologie implementate

Le tecnologie implementate nelle learning factory riguardano l'evoluzione congiunta delle soluzioni hardware e software, che nel tempo hanno seguito un percorso di sviluppo sostanzialmente parallelo. A partire dal 2014 si osserva una crescita graduale, seguita da una prima fase di consolidamento tra il 2016 e il 2018 e da un picco molto marcato nel 2019, culminato nel 2020, quando entrambe le categorie raggiungono i valori massimi. Questo andamento riflette il ruolo sempre più centrale delle learning factory come piattaforme sperimentali per testare e integrare le tecnologie abilitanti tipiche dell'Industria 4.0. Lato hardware, gli sviluppi hanno riguardato principalmente l'introduzione di sensori intelligenti, sistemi RFID per la tracciabilità dei materiali, linee di assemblaggio automatizzate e robot collaborativi (*cobot*). Questi elementi hanno reso le learning factory ambienti ideali per simulare scenari produttivi complessi e valutare l'impatto di soluzioni innovative prima della loro applicazione su larga scala. In particolare, le tecnologie RFID sono state ampiamente utilizzate per il monitoraggio dei flussi di materiali, mentre i robot collaborativi hanno permesso di esplorare nuove forme di interazione uomo-macchina, con particolare attenzione agli aspetti ergonomici e di sicurezza.

Dal lato software, le learning factory hanno sperimentato lo sviluppo e l'adozione di sistemi MES (Manufacturing Execution Systems), strumenti di simulazione e modellazione digitale, piattaforme di realtà aumentata e, più recentemente, *digital twin*. Queste tecnologie hanno consentito non solo di riprodurre virtualmente processi reali, ma anche di integrare funzioni di analisi predittiva e manutenzione preventiva, migliorando la gestione dei dati di produzione. L'introduzione del *digital twin*, in particolare, ha rappresentato una vera svolta, poiché permette di testare scenari multipli in tempo reale e di formare studenti e operatori attraverso esperienze realistiche e immersive (Al Geddawy et al. 2020; Iyer et al. 2024).

Il calo osservato nel 2021 può essere collegato all'impatto della pandemia, che ha rallentato molte attività sperimentali; tuttavia, a partire dal 2022, la curva è tornata a crescere fino a registrare un forte recupero nel 2024. Questo recente picco è probabilmente legato sia al consolidamento progressivo delle tecnologie di Industria 4.0, sia all'apertura verso paradigmi più avanzati, come l'Industria 5.0, in cui le learning factory stanno iniziando a integrare strumenti per la produzione sostenibile, sistemi di monitoraggio energetico e piattaforme di intelligenza artificiale applicata al controllo qualità (Oberc et al. 2020).

Nel complesso, il grafico mostra come le learning factory non si limitino più a un ruolo puramente educativo, ma si configurino come veri e propri sistemi di innovazione, in cui hardware e software evolvono in parallelo, consentendo a università e imprese di testare nuove soluzioni in condizioni controllate ma realistiche. La complementarità tra le due dimensioni è evidente: l'hardware consente l'interazione fisica e la sperimentazione diretta, mentre il software offre strumenti analitici e predittivi per supportare decisioni più rapide e consapevoli. Le evoluzioni più recenti indicano inoltre una crescente attenzione verso l'integrazione tra le due componenti, con sistemi cyber-fisici che combinano tecnologie digitali e fisiche, creando scenari di fabbrica sempre più vicini a quelli reali (Hennig et al. 2019).

## 9. FASE 8: RISPOSTA ALLE DOMANDE DI RICERCA

Questo capitolo ha come obiettivo quello di dare una risposta completa e precisa alle quattro domande di ricerca alla base del lavoro di tesi. Per far questo è stata utilizzata l'analisi derivante dalla statistica descrittiva effettuata nei precedenti capitoli, insieme agli spunti ed alle tematiche emerse dallo screening completo degli articoli presenti nel Corpus.

### 9.1 RQ 1: Quali sono gli scopi principali delle Learning Factory esistenti?

Dall'analisi del corpus emerge che le learning factory rispondono principalmente a tre scopi: education, industrial training e ricerca. Nate come ambienti per apprendere in contesti realistici ma controllati, le learning factory si sono progressivamente evolute da strumento didattico universitario a laboratorio utilizzato anche in condivisione da università e imprese per la formazione continua e la sperimentazione di soluzioni innovative. Questa duplice funzione spiega il loro ruolo centrale sia nei percorsi accademici legati all'Industria 4.0, sia nei più recenti modelli di Industry 5.0, orientati alla sostenibilità e alla centralità umana. Dal grafico in figura 21 l'education è presente come scopo nell'84% degli articoli del Corpus, l'industrial training nel 61% e la ricerca nel 42%.

In ambito educativo, le learning factory si configurano come spazi esperienziali in cui gli studenti possono applicare i concetti teorici appresi a processi e impianti reali. Tisch et al. (2016) descrivono questo approccio action-oriented come un ciclo continuo di progettazione, esecuzione e riflessione, che aiuta a comprendere in modo concreto la complessità dei sistemi produttivi. Lagorio et al. (2024) evidenziano inoltre che la combinazione di processi fisici e digitali – grazie a simulazioni e digital twin – consente agli studenti di sperimentare decisioni ingegneristiche (es. individuazione dei processi in base alla tipologia di produzione, configurazione del Manufacturing Execution System) in condizioni realistiche ma prive di rischi. Diversi autori hanno poi contribuito a definire modelli per progettare e gestire efficacemente queste strutture formative: Rauch et al. (2020) propongono una classificazione utile per standardizzare i diversi tipi di learning factory in contesti accademici. In particolare sono state ricavate 4 classi che rappresentano le aree funzionali che una Learning Factory può avere, ovvero la ricerca, l'insegnamento, il training industriale ed il management.

Bender et al. (2015) introducono la *Learning Factory 2.0* sviluppata presso la Ruhr-Universität Bochum, concepita come un ambiente formativo completamente integrato che collega in modo diretto lo sviluppo del prodotto con la fase produttiva. L'obiettivo educativo di questo ambiente è quello di potenziare le competenze interdisciplinari degli studenti, permettendo loro di comprendere come progettazione, pianificazione e produzione siano strettamente interconnesse. Inoltre, la Learning Factory favorisce lo sviluppo di capacità comunicative, collaborazione e problem solving attraverso attività pratiche e scenari di simulazione, in contesti industriali complessi e digitalizzati.

Allo stesso modo, Gräßler et al. (2016) presentano la *Learning Factory* dell'Università di Paderborn, progettata per rappresentare in modo olistico l'intero processo di creazione del prodotto, secondo i principi del *Systems Engineering*. L'obiettivo pedagogico principale è offrire agli studenti un'esperienza formativa completa, che integri conoscenze tecniche e gestionali lungo l'intero ciclo di vita del prodotto, dalla concezione alla produzione. Attraverso un approccio interdisciplinare basato su progetti, la Learning Factory mira a sviluppare competenze pratiche, metodologiche e sociali, rafforzando la capacità degli studenti di gestire la complessità dei moderni sistemi industriali in modo collaborativo.

Prinz et al. (2016) sottolinea l'importanza della modularità e della coerenza metodologica tra obiettivi didattici, strumenti e scenari di apprendimento. Nel complesso, queste esperienze dimostrano che la

learning factory rappresenta un modello formativo efficace per far passare gli studenti dalla teoria alla pratica, rafforzando la preparazione tecnica e trasversale richiesta al giorno d'oggi dal settore industriale in base ai principi di Industry 4.0 e, più recentemente, Industry 5.0.

Il secondo ambito, quello dell'industrial training, riguarda la formazione dei lavoratori e dei tecnici già inseriti nelle imprese. Wagner et al. (2020) mostrano come le learning factory consentano di formare il personale su nuove tecnologie, come cobot, sistemi di tracciabilità RFID o software MES, senza interferire con la produzione reale. Questa logica "protetta" permette di aggiornare competenze e testare innovazioni in modo rapido ed economicamente sostenibile. Tvenge et al. (2020) interpretano le learning factory come laboratori socio-tecnici, in cui è possibile sperimentare nuovi modelli di collaborazione uomo-macchina e promuovere una cultura aziendale orientata al miglioramento continuo.

Sadaj et al. (2020) descrivono la *Service Learning Factory* sviluppata presso la Graz University of Technology, un ambiente formativo esperienziale dedicato al settore dell'intralogistica. L'obiettivo didattico è offrire a tecnici, operatori e clienti industriali un'esperienza pratica nell'utilizzo di servizi digitali e sistemi automatizzati, attraverso scenari realistici che riproducono i flussi e le criticità tipiche di un impianto logistico. In questo senso, la metodologia di training mira a rafforzare le competenze operative e decisionali, consentendo ai partecipanti di affrontare situazioni come guasti, gestione dei costi e ottimizzazione dei processi, in linea con le esigenze della logistica 4.0. Parallelamente, Riemann et al. (2020) presentano un modello di *industrial training* basato sull'impiego della realtà virtuale, integrata nelle learning factory del *Center for Industrial Productivity* della TU Darmstadt, con l'obiettivo di favorire il trasferimento delle competenze nel contesto produttivo reale. Attraverso esercitazioni immersive adattabili al profilo dei partecipanti, la realtà virtuale permette di simulare processi complessi e riprodurre condizioni operative realistiche, promuovendo un apprendimento interattivo, la riflessione sulle prestazioni e la personalizzazione dei contenuti formativi in base alle esigenze aziendali.

Queste esperienze mostrano come le learning factory rappresentino oggi una "palestra industriale" per facilitare l'introduzione delle tecnologie 4.0 e ridurre il divario tra teoria e pratica nei processi produttivi.

Negli ultimi anni si è rafforzata anche la funzione di ricerca, con tre filoni particolarmente ricorrenti nelle learning factory. Il primo riguarda la collaborazione uomo-robot, argomento cardine al giorno d'oggi anche per quanto riguarda l'industrial training: Kemény et al. (2018) analizzano l'integrazione di sistemi collaborativi in una learning factory, mostrando come definire layout, compiti e interazioni in modo sicuro e produttivo, e come utilizzare l'ambiente di LF per sperimentare configurazioni Human Robot Collaboration prima dell'introduzione in reparto. Il secondo filone è quello della digitalizzazione tramite digital twin e integrazione fisico-virtuale: Pfeiffer et al. (2018) presentano la smart factory di MTA SZTAKI come infrastruttura universitaria che connette linea reale, modellazione e controllo software, abilitando test "what-if", confronti tra scenari e validazioni rapide che in seguito ricadranno sia su didattica sia su ricerca applicata. Il terzo filone riguarda sostenibilità ed efficienza energetica: Kölbl et al. (2019) descrivono la rete "Green Factories Bavaria", in cui le learning factory operano come living lab per misurare consumi, sperimentare contromisure e condividere buone pratiche di risparmio energetico e produzione a basso impatto.

È inoltre evidente che, nella maggior parte dei casi, i tre scopi delle learning factory appena discussi si intrecciano all'interno della stessa struttura. In particolare, percorsi di education e attività di ricerca vengono spesso progettati in modo congiunto: i progetti accademici mirano a far maturare competenze tecniche agli studenti su specifici temi, mentre in parallelo gli stessi progetti alimentano nuove linee di ricerca condotte insieme agli studenti e ai docenti. Questa integrazione rafforza la natura stessa della learning factory come un unico ecosistema in cui formazione, sperimentazione e produzione di nuova conoscenza si sostengono reciprocamente, valorizzando al massimo il suo ruolo di ponte tra università, sia da un punto di vista accademico che di ricerca, e industria.

## 9.2 RQ 2: Quali sono i principali contenuti didattici/di apprendimento delle Learning Factory esistenti?

Dall'analisi condotta a partire da Marzo (2024) e successivamente approfondita in questo lavoro di tesi sono stati individuati due macro-ambiti che racchiudono i principali contenuti didattici presenti nel corpus di articoli analizzati. Il primo riguarda le operations, comprendendo tutti quei contributi che mettono al centro lo sviluppo di tecnologie industriali, la gestione dei processi produttivi e l'apprendimento attraverso esperienze dirette. Il secondo riguarda le tematiche manageriali e di innovazione, che includono studi focalizzati su competenze gestionali, imprenditorialità, sostenibilità e trasformazione digitale, ponendo l'attenzione sul legame tra industria ed economia più che sugli aspetti tecnici del processo. Come mostrato anche dai risultati quantitativi dell'analisi (figura ...), i temi legati alle operations risultano però predominanti rispetto a quelli di tipo manageriale, un risultato coerente con la natura stessa delle learning factory, nate per trasferire concetti teorici in ambienti di lavoro pratici e reali.

Per quanto riguarda i contenuti didattici legati alle operations, la letteratura evidenzia come le learning factory rappresentino un contesto ideale per l'acquisizione di competenze tecniche e metodologiche proprie della produzione industriale. Maheso et al. (2019) mostrano come l'approccio esperienziale consenta di comprendere in modo diretto la logica del Lean Manufacturing, fornendo agli studenti e ai tecnici strumenti concreti per analizzare i flussi produttivi, ridurre gli sprechi e migliorare le prestazioni operative. L'apprendimento è fortemente basato sull'azione e sull'osservazione dei risultati, con un focus su metriche come tempi di ciclo, bilanciamento delle linee e qualità di processo. Nello stesso ambito, Weller et al. (2018) descrivono un modello di learning factory orientato alla digitalizzazione delle operations, in cui vengono integrate tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 – sensori IoT, sistemi di tracciabilità e piattaforme di monitoraggio dati – per insegnare agli studenti come la raccolta e l'analisi in tempo reale delle informazioni di produzione possano supportare decisioni più rapide ed efficienti. Entrambi gli studi sottolineano come il valore didattico risieda nel contatto diretto con situazioni produttive realistiche, dove la teoria incontra la pratica e le competenze si sviluppano attraverso la sperimentazione attiva e la riflessione sui risultati.

Il secondo ambito, relativo alle tematiche di business e innovazione manageriale, riguarda la capacità delle learning factory di formare competenze più ampie, che comprendono , l'analisi economica e l'approccio strategico all'innovazione. Sihm et al. (2018) analizzano le learning factory come piattaforme per lo sviluppo di capacità manageriali legate al change management e alla trasformazione digitale, evidenziando come le attività formative non si limitino alle competenze tecniche ma comprendano anche la gestione del cambiamento organizzativo, la comunicazione interna e la leadership nei contesti di transizione tecnologica. In una prospettiva complementare, Enke

et al. (2019) mostrano come la learning factory possa essere utilizzata come ambiente per promuovere la cultura dell'innovazione e dell'imprenditorialità, avvicinando gli studenti ai principi dell'economia circolare e dei modelli di business digitali. In questi casi, il valore formativo risiede nella capacità di integrare dimensioni economiche, strategiche e tecnologiche in un contesto esperienziale, permettendo di comprendere non solo “come” funzionano i processi, ma anche “perché” vengono gestiti in un certo modo e quali implicazioni hanno sulle performance aziendali.

### 9.3 RQ 3: Quali sono le fasi del ciclo di vita del prodotto analizzate dalle Learning Factory esistenti?

L'analisi avviata da Marzo (2024) e proseguita in questo lavoro individua sei fasi del ciclo di vita che le learning factory possono esplorare in modo strutturato: ricerca e sviluppo (R&S), supply, production/assembly, distribution/logistics, service e disposal. L'idea di fondo è usare l'ambiente cyber-fisico e i dati di laboratorio per far vedere “dal vivo” come decisioni progettuali, operative e gestionali impattino costi, qualità, tempi, impatti ambientali e, in ultima analisi, il valore del prodotto lungo il suo sviluppo.

Nella ricerca e sviluppo, le learning factory si occupano della progettazione di prodotti e famiglie di prodotto, integrando modellazione, prototipazione rapida e test pratici in laboratorio. Schützer et al. (2017) mostrano un ambiente didattico che riproduce l'intero processo di sviluppo di un compressore alternativo a pistone, così da far esercitare gli studenti su scelte di design, iterazioni e validazioni progressive in ottica ingegneristica. In parallelo, Bender et al. (2015) integrano progettazione e produzione nella stessa learning factory, enfatizzando principi di simultaneous engineering e il passaggio fluido dal concept alla messa in fabbrica, utile per valutare precocemente impatti su processi e tempi.

Nella production/assembly l'attenzione è sulla realizzazione fisica: bilanciamento, tracciabilità, tempi di ciclo, ergonomia e qualità. Schreiber et al. (2016) presentano un impianto manuale flessibile per l'assemblaggio che consente di riconfigurare postazioni di lavoro e sequenze produttive, così da confrontare layout e metodologie di lavoro e misurare gli effetti delle modifiche apportate grazie agli indicatori operativi. Sul fronte dell'integrazione tecnologica, Centea et al. (2020) analizzano prestazioni e limiti di sistemi RFID per linee di assemblaggio “intelligenti”, offrendo linee guida pratiche per il design della linea e per la raccolta dati in tempo reale. Aljinovic et al. (2020) analizzano il processo di assemblaggio collaborativo di un piccolo veicolo per bambini nella *Learning Factory* dell'Università di Spalato. L'esperimento studia la collaborazione uomo-robot (HRC) durante la fase di assemblaggio dell'assale e delle ruote, valutando diversi scenari operativi per ottimizzare i tempi e migliorare l'ergonomia del lavoro. Menn et al. (2018) presentano la *Learning Factory* della Technische Universität di Berlino, focalizzata sull'assemblaggio di compressori integrali per macchine speciali. L'attività principale consiste nel montaggio e smontaggio del corpo compressore e della guarnizione a gas secco (*dry gas seal*), consentendo ai partecipanti di acquisire competenze pratiche sulle operazioni meccaniche e di precisione.

La fase di supply guarda alla supply chain a monte (fornitura di materiali, gestione scorte e variabilità della domanda). Gjeldum et al. (2017) sviluppano un simulatore didattico del Bullwhip Effect per ambienti di learning factory, utile a capire come politiche d'ordine e ritardi informativi amplifichino le oscillazioni sulle tempistiche di fornitura, cercando quindi di identificare quali contromisure

introdurre. Müller et al. (2017) descrivono una *Learning Factory* dedicata alla simulazione dei flussi di materiali, sviluppata presso la Technische Universität di Berlino e sperimentata alla Vietnamese-German University. Il nucleo formativo riguarda la gestione del flusso di approvvigionamento e la pianificazione della produzione in un sistema chiuso, in cui studenti e operatori devono bilanciare l'assemblaggio e il disassemblaggio di carrelli in funzione della domanda del cliente. Attraverso la raccolta dati, la modellazione e la simulazione dei flussi, i partecipanti apprendono come ottimizzare le scorte, ridurre i ritardi e migliorare l'efficienza della supply chain interna

La fase di distribution/logistics nelle learning factory riguarda principalmente l'intralogistica, ossia il movimento, lo stoccaggio e il controllo dei flussi di materiali all'interno di un impianto. Nella Logistics Learning Factory descritta da Hummel et al. (2015), l'attenzione è rivolta alla progettazione di sistemi logistici collaborativi, in cui persone e tecnologie digitali operano insieme per rendere i processi più flessibili e reattivi. In questo contesto, l'impiego di sistemi cyber-fisici (CPPS) e di un controllo decentralizzato dei flussi consente di gestire in modo più efficiente le operazioni, riducendo i tempi di risposta e migliorando la capacità del sistema di adattarsi a cambiamenti o imprevisti operativi.

Nella fase di service l'enfasi è su manutenzione e aggiornamenti durante l'uso dei macchinari utilizzati nell'industria. Jooste et al. (2020) presentano un percorso in una learning factory in cui i partecipanti progettano piani di manutenzione per macchine avanzate, integrando aspetti tecnici, costi e affidabilità: un modo concreto per collegare politiche manutentive e disponibilità degli asset.

Infine, la fase di disposal guarda a fine vita ed economia circolare. Hagen et al. (2020) introducono una Live LCA che collega l'infrastruttura cyber-fisica della learning factory a modelli di valutazione ambientale in tempo reale, così da supportare decisioni su riuso, riciclo o smaltimento e far vedere l'effetto delle scelte di processo sugli impatti complessivi. Wagner et al. (2014) descrivono la *iFactory*, una Learning Factory progettata per esplorare la progettazione di prodotti in un contesto produttivo riconfigurabile, con particolare attenzione al riuso e al riciclo dei materiali. I prodotti sviluppati in questo ambiente sono pensati per essere facilmente smontabili e riutilizzabili in più cicli di apprendimento, in modo da ridurre sprechi e favorire la sperimentazione continua. Le attività formative permettono agli studenti di comprendere come il design modulare e la progettazione per il disassemblaggio (*Design for Disassembly*) supportino il recupero dei componenti e la sostenibilità dei processi, collegando direttamente la fase di fine vita del prodotto ai principi dell'economia circolare

Dal grafico xx emerge che, tra le fasi del ciclo di vita analizzate, R&D e production/assembly risultano essere più analizzate all'interno del Corpus, in particolare rispettivamente presenti nel 50% e nel 75% degli articoli.

Nelle aziende manifatturiere sono infatti le due aree che costituiscono il core business e generano il maggior valore aggiunto e profitto. Coerentemente, gli investimenti in formazione e risorse si concentrano soprattutto su questi ambiti. Per la ricerca e sviluppo si ricorre spesso a partnership con le università, finanziando learning factory orientate a valorizzare le competenze degli studenti nello sviluppo di nuovi prodotti o servizi. Per la produzione, lo scopo prioritario è l'industrial training, con l'obiettivo di formare nuovi addetti e sperimentare soluzioni di ottimizzazione delle linee.

## 9.4 RQ 4: Quali sono le principali tecnologie implementate/utilizzate all'interno delle Learning Factory esistenti?

Lo sviluppo di nuove tecnologie rappresenta uno dei principi cardine che accompagnano l'evoluzione delle Learning Factory, nate non solo come ambienti formativi ma anche come veri e propri laboratori di sperimentazione tecnologica. In questi contesti, il ciclo di innovazione avviene spesso in parallelo: da un lato si sviluppano e testano nuove soluzioni hardware — dispositivi, robot, sensori, infrastrutture fisiche — dall'altro si progettano strumenti software in grado di controllarle, simularle e integrarle in modo intelligente. Questa combinazione rende le Learning Factory luoghi per connettere ricerca, sviluppo e formazione industriale.

Sul piano hardware, le innovazioni più ricorrenti riguardano l'automazione, la robotica collaborativa e i sistemi di tracciabilità. Gjeldum et al. (2018) presentano lo sviluppo di un sistema RFID per la tracciabilità in tempo reale dei componenti lungo la linea di assemblaggio, con un'architettura di sensori e antenne che dialogano con un software di raccolta dati centralizzato; questa soluzione, testata nella learning factory di Spalato, permette di misurare con precisione tempi e sequenze operative, migliorando controllo e qualità del processo. Kemény et al. (2018) illustrano invece l'integrazione di robot collaborativi nella learning factory di MTA SZTAKI, con particolare attenzione alla sicurezza e all'ergonomia: il lavoro mostra come sia possibile progettare celle ibride uomo-robot in cui i sensori di forza e visione artificiale consentono un'interazione diretta tra operatore e macchina. In modo analogo, Jooste et al. (2020) descrivono l'introduzione di postazioni di manutenzione dotate di bracci robotici e interfacce adattive per simulare scenari di predictive maintenance, dove l'obiettivo è far esercitare i partecipanti su procedure di intervento automatizzate e assistite.

Dal punto di vista software, le tecnologie emergenti sono legate soprattutto a digital twin, realtà aumentata e intelligenza artificiale applicata al controllo di processo. Lutters et al. (2023) mostrano lo sviluppo di una piattaforma software per la sincronizzazione continua tra il modello digitale e la parte fisica della fabbrica, con algoritmi che aggiornano in tempo reale lo stato di macchine, buffer e flussi; la learning factory diventa così un ambiente dinamico in cui testare strategie di ottimizzazione e predizione.

Zancul et al. (2020) inoltre presentano l'uso di tecnologie di machine vision basate su smart camera dotate di CPU e GPU integrate, capaci di eseguire reti neurali convoluzionali (CNN) per l'ispezione visiva automatica.

Diversi studi mostrano inoltre casi in cui hardware e software si sviluppano in modo integrato, generando sistemi ibridi che rappresentano l'essenza stessa dell'approccio cyber-fisico. Schreiber et al. (2016) propongono la learning factory BERTHA come laboratorio di assemblaggio manuale flessibile, in cui hardware (postazioni modulari e dispositivi di misura) e software (sistema di raccolta e analisi dati) vengono integrati per valutare prestazioni, tempi e sequenze operative, con finalità sia formative sia di ricerca applicata.

Nel complesso, le tecnologie sviluppate o implementate all'interno delle Learning Factory spaziano quindi su più livelli: sensori, robot e infrastrutture intelligenti rappresentano la dimensione hardware; piattaforme digitali, digital twin e sistemi di analisi costituiscono la dimensione software. Questa capacità di integrare sviluppo tecnologico, validazione e formazione è ciò che rende le Learning Factory strumenti centrali per accompagnare la trasformazione digitale in chiave Industry 4.0 e, più recentemente, Industry 5.0.



## 10. FASE 9: SPUNTI PER RICERCA FUTURA, IMPLEMENTAZIONI E LIMITAZIONI

### 10.1 Spunti per ricerca futura

In questo paragrafo per ogni research question sono stati identificati alcuni possibili spunti che possono essere approfonditi in letteratura sulle Learning Factory

#### 10.1.1 RQ1: Quali sono gli scopi principali delle Learning Factory esistenti?

Nell'analisi del corpus è stato possibile evidenziare dei gap di ricerca riguardanti gli scopi delle Learning Factory. In particolare è possibile notare come l'argomento dell'Industry 5.0 sia stato ancora poco esplorato in relazione all'importanza che già possiede in ambito industriale. Inoltre, dall'analisi effettuata sul corpus, è stato evidenziato come argomento ancora poco approfondito quello dell'integrazione tra ricerca e education nelle Learning Factory, due aspetti che nelle università sono a stretto contatto.

In particolare, si può ipotizzare lo sviluppo di ambienti accademici che combinino in modo più stretto didattica e ricerca, favorendo un apprendimento interattivo che consenta agli studenti non solo di accrescere le proprie competenze, ma anche di approfondire criticamente quanto appreso attraverso attività sperimentali e progettuali ed essere coinvolti attivamente nelle attività di ricerca svolte all'interno delle Learning Factory. Un ulteriore spunto di ricerca riguarda anche l'integrazione dei principi di Industry 5.0 all'interno delle Learning Factory, con l'obiettivo di promuovere percorsi didattici mirati all'apprendimento dei concetti di sostenibilità, human centricity e resilienza. La ricerca potrebbe inoltre concentrarsi su come trasferire tali principi nei reali ambienti di lavoro, che risultano essere poco allineati all'evoluzione che l'industria contemporanea sta vivendo.

Infine, un'altra direzione di sviluppo riguarda la creazione di reti e collaborazioni internazionali tra Learning Factory, finalizzate alla condivisione di esperienze, metodologie e casi studio, al fine di favorire la standardizzazione dei modelli formativi e il trasferimento delle migliori pratiche a livello globale.

#### 10.1.2 RQ2: Quali sono i principali contenuti didattici/di apprendimento delle Learning Factory esistenti?

Il gap di ricerca evidenziato riguardante la seconda research question è stato quello della carenza di Learning Factory che trattano tematiche legate al business e al management. In particolare, è presente un gap riguardo il collegamento tra le attività operative e quelle manageriali, attività che nell'industria sono strettamente legate.

Se in passato le Learning Factory si sono concentrate prevalentemente su aspetti tecnici e operativi, un'evoluzione naturale è quella di integrare la dimensione gestionale, economica e strategica nei percorsi di apprendimento esperienziale. In questa prospettiva, le Learning Factory potrebbero diventare veri e propri ambienti dove sperimentare approcci di decision-making, in cui gli studenti imparano non solo a progettare e ottimizzare processi produttivi, ma anche a comprendere come tali processi si inseriscano in un contesto più ampio di obiettivi economici, competitivi e organizzativi.

Un esempio di Learning Factory manageriale è la Chair of Production Systems (LPS) sita all'Università di Bochum (Wagner et al. 2015).

L'integrazione tra competenze tecniche e manageriali permetterebbe agli studenti di sviluppare una visione a 360 gradi dell'impresa, comprendendo come le decisioni prese in ambito operativo influenzino direttamente la redditività, la sostenibilità e la capacità innovativa dell'azienda. In questo senso, le Learning Factory potrebbero essere utilizzate per simulare situazioni gestionali complesse, in cui occorre bilanciare risorse, tempi, costi e qualità, adottando un approccio di problem-solving basato su dati reali.

### 10.1.3 RQ3: Quali sono le fasi del ciclo di vita del prodotto analizzate dalle Learning Factory esistenti?

I gap evidenziati per quanto riguarda le fasi del ciclo di vita di un prodotto sono stati identificati nelle fasi di distribution/logistics, service e disposal. Queste fasi, anche in base alla natura ed allo scopo delle Learning Factory, non sono state abbastanza approfondite dagli articoli contenuti all'interno del corpus, ed è possibile quindi delineare delle possibili direzioni di ricerca future a riguardo.

Una delle future direzioni di ricerca riguarda l'esplorazione della fase di logistica all'interno delle Learning Factory. Finora l'attenzione si è concentrata soprattutto sulle fasi di produzione e assemblaggio, ma le recenti sfide di natura gestionale e ecologica rendono necessario estendere l'analisi a tutte le attività legate al flusso dei materiali lungo l'intero ciclo di vita del prodotto. In questo contesto, le Learning Factory possono diventare ambienti ideali per testare soluzioni innovative di logistica, attraverso l'integrazione di sensori, sistemi di tracciabilità e piattaforme digitali (es, RFID, IoT, sistemi UWB), utili a quantificare e ottimizzare i flussi delle merci in entrata e in uscita con un'attenzione particolare al recupero e al riciclo dei materiali.

Un'altra linea di ricerca promettente potrebbe riguardare la gestione dei materiali a fine vita. Le Learning Factory possono essere impiegate per sperimentare, in un ambiente controllato, processi di disassemblaggio, separazione dei materiali e ricondizionamento, con l'obiettivo di valutare in tempo reale gli impatti economici e ambientali delle diverse strategie di recupero. Inoltre, la combinazione tra attività formative e attività sperimentali consente di acquisire competenze specialistiche nella gestione circolare dei flussi, supportando la formazione di profili professionali ancora carenti o poco presenti nel settore industriale, in particolare in merito alla responsabilità ambientale e ai principi dell'economia circolare.

Infine, sarebbe opportuno approfondire anche la fase di service e manutenzione del prodotto, con particolare attenzione alla previsione e gestione dei guasti. I tempi di inattività dei macchinari comportano infatti conseguenze significative per le imprese, sia a livello operativo che economico. Affrontare questo tema nelle Learning Factory permetterebbe di sviluppare e testare strategie di manutenzione predittiva basate su dati e sensori in grado di rilevare le anomalie in anticipo e pianificare per tempo gli interventi. Ciò consentirebbe anche di ottimizzare l'approvvigionamento dei pezzi di ricambio, riducendo i tempi di fermo macchina e migliorando l'efficienza complessiva dei processi produttivi. Inoltre le Learning Factory consentirebbero la formazione sull'utilizzo degli algoritmi predittivi che a volte risultano difficili da apprendere ed utilizzare senza un'adeguata istruzione ed applicazione su casi reali. Infatti questi protocolli devono essere appresi sia dal personale addetto alla manutenzione sia dal personale preposto al controllo dei processi, per poter intervenire prontamente.

#### 10.1.4 RQ 4: Quali sono le principali tecnologie implementate/utilizzate all'interno delle Learning Factory esistenti?

Un gap di ricerca evidenziato nell'analisi del corpus sulla research question legata alle tecnologie hardware e software riguarda l'applicazione dei software di intelligenza artificiale nella formazione dei lavoratori. È possibile quindi definire linee future di ricerca su quest'ambito all'interno delle Learning Factory.

Sebbene l'AI venga già utilizzata in diversi casi per l'analisi dei dati e l'ottimizzazione dei processi in ambito industriale, è ancora raro l'impiego di algoritmi capaci di modificare in modo dinamico i percorsi di apprendimento relativi a processi produttivi in base al comportamento dell'utente. Sistemi adattivi basati su performance, tempi di risposta o livelli di difficoltà potrebbero personalizzare l'esperienza formativa, supportando meglio gli operatori in fase di apprendimento e aumentando l'efficacia del training. Questa direzione risulterebbe particolarmente utile in contesti ad alta complessità tecnologica, dove sarebbe fondamentale tener traccia delle reali capacità degli addetti per indirizzarli dove questi ultimi rispettano gli standard dell'azienda e massimizzano il proprio lavoro.

## 10.2 Implicazioni accademiche e pratiche

La Systematic Literature Review ha avuto l'obiettivo di delineare lo stato dell'arte attuale delle Learning Factory, tracciando, attraverso le quattro domande di ricerca, i punti chiave relativi alla progettazione e all'utilizzo di questi ambienti.

Una prima implicazione accademica potrebbe essere quella di realizzare studi comparativi tra Learning Factory sviluppate in ambito universitario e Learning Factory sviluppate in contesti industriali, con l'obiettivo di analizzare come queste differiscano per modalità di apprendimento, tecnologie adottate e risorse utilizzate. Effettuando questo studio si individuerrebbero analogie e differenze utili per poter definire in seguito dei modelli di Learning Factory ibridi, adatti sia alla didattica che all'industrial training, consentendo anche di costruire o consolidare le collaborazioni tra università e imprese. In questo ambito, le Learning Factory industriali potrebbero trarre vantaggio dall'approccio metodologico rigoroso tipico del contesto universitario.

Un'ulteriore area di ricerca particolarmente promettente riguarda la creazione di network internazionali tra Learning Factory. L'obiettivo sarebbe quello di costruire piattaforme condivise per raccogliere e scambiare dati su ricerche o altre attività effettuate, confrontare metodologie didattiche e tecnologie impiegate, nonché monitorare in modo coordinato i risultati ottenuti nei diversi contesti. Un simile approccio permetterebbe di ampliare in modo significativo la base empirica a disposizione della comunità scientifica, favorendo attività di benchmarking tra paesi e contesti industriali differenti. L'obiettivo di questo confronto è quello di comprendere come adattare i modelli di Learning Factory a sistemi educativi, settori produttivi e culture differenti.

Un'interessante implicazione pratica riguarda il potenziale delle Learning Factory come ambienti di co-progettazione industriale, in cui le imprese possono coinvolgere attivamente i propri lavoratori nei processi di innovazione. Quest'implicazione deriva dai nuovi concetti cardine dell'Industria 5.0, che mette al centro dell'azienda l'uomo stimolando coinvolgimento e partecipazione. Di conseguenza l'ambiente migliore per coinvolgere l'uomo e renderlo partecipe nello sviluppo potrebbero essere le Learning Factory. L'obiettivo è quello di portare i dipendenti ad essere non solo dei semplici destinatari di formazione, ma protagonisti attivi nell'individuazione di criticità operative, nella proposta di soluzioni e nella sperimentazione di nuove tecnologie o configurazioni di processo.

Questo approccio partecipativo favorisce una maggiore aderenza tra l'innovazione progettata e le esigenze reali della produzione, poiché le soluzioni vengono validate direttamente da chi le utilizzerà. Dal punto di vista organizzativo, ciò si traduce in una più efficace gestione del cambiamento, poiché il coinvolgimento dei lavoratori fin dalle fasi iniziali di sviluppo di un processo produttivo o del relativo impianto favorisce accettazione, responsabilizzazione e senso di appartenenza all'azienda.

### 10.3 Limitazioni

In questo paragrafo è possibile menzionare alcune limitazioni riscontrate nella stesura della tesi.

Una prima limitazione è stata l'utilizzo del software Citation Gecko in supporto alla fase di snowballing. Il software utilizzato presenta alcune limitazioni che hanno impedito di svolgere un'analisi completa della rete citazionale degli articoli individuati tramite forward snowballing. Al contrario, per gli articoli identificati attraverso il backward snowballing è stato possibile individuare cluster significativi, rappresentativi dei principali trend emersi in letteratura. Gli stessi limiti del software hanno reso impossibile estendere tale analisi anche agli articoli del forward snowballing.

Un'ulteriore criticità è stata riscontrata nella presenza di articoli suggeriti nella fase di snowballing che, pur risultando pertinenti ai temi di indagine, non erano indicizzati nel database Scopus e quindi non conformi ai criteri di inclusione ed esclusione stabiliti da Marzo (2024). L'esclusione di tali fonti, pur giustificata da ragioni metodologiche, potrebbe aver limitato l'inclusione nella revisione della letteratura di contributi pubblicati in riviste meno note ma legati a casi studio applicativi o innovazioni sviluppate in contesti industriali.

Infine, la Systematic Literature Review condotta non entra nel merito di come determinate tecnologie, quali ad esempio digital twin o intelligenza artificiale, vengano applicate all'interno delle Learning Factory. Parimenti, l'implementazione di approcci relativi ad Industry 4.0 e Industry 5.0 viene studiata nella Systematic Literature Review ma non approfondita nello specifico. Queste limitazioni aprono la possibilità di condurre in futuro analisi della letteratura verticali relative a come i concetti citati possano integrarsi con le Learning Factory.

## 11. BIBLIOGRAFIA

- Abele, E., Bauerdick, C.J.H., Strobel, N., Panten, N., 2016. ETA Learning Factory: A Holistic Concept for Teaching Energy Efficiency in Production. *Procedia CIRP* 54, 83–88.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.051>
- Abele, E., Chryssolouris, G., Sihn, W., Metternich, J., ElMaraghy, H., Seliger, G., Sivard, G., ElMaraghy, W., Hummel, V., Tisch, M., Seifermann, S., 2017a. Learning factories for future oriented research and education in manufacturing. *CIRP Annals* 66, 803–826.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.005>
- Abele, E., Flum, D., Strobel, N., 2017b. A Systematic Approach for Designing Learning Environments for Energy Efficiency in Industrial Production. *Procedia Manufacturing* 9, 9–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.001>
- Abele, E., Metternich, J., Tisch, M., Chryssolouris, G., Sihn, W., ElMaraghy, H., Hummel, V., Ranz, F., 2015. Learning Factories for Research, Education, and Training. *Procedia CIRP* 32, 1–6.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.187>
- Adam, M., Hofbauer, M., Mandl, B., 2019. Integration of IT Into a Lean Basic Training: Target Group-Specific Insights and Recommendations. *Procedia Manufacturing* 31, 52–59.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.009>
- Ahmad, R., Masse, C., Jituri, S., Doucette, J., Mertiny, P., 2018. Alberta Learning Factory for training reconfigurable assembly process value stream mapping. *Procedia Manufacturing* 23, 237–242.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.023>
- Ahmad, Rafiq, David Romero, Mauricio Arredondo-Soto, Rabeea Shahid, Enrique Cuan-Urquizo, Carlos Vazquez, and Armando Roman. 2024. “Insights into the ‘PiTech Academy’ Learning Platform for Small Manufacturing Businesses and Learning Factories.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2*, 233–240. Springer.
- Ahmad, Shayaan, Roberto Monroy, and Rafiq Ahmad. 2024. “Integrated Smart Monitoring Technologies for Plastic Sorting and Classification Applicable to Learning Factories Design.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 197–204. Springer.
- Al Faruq, M.S.S., Sunoko, A., Ibda, H., Wahyudi, K., 2023. Digital Learning Management using OpenAI ChatGPT: A Systematic Literature Review. *IJLTER* 22, 21–41.  
<https://doi.org/10.26803/ijlter.22.12.2>
- Al Khatib, A., Malhaire, J.-M., Dauvé, S., Fougères, A.-J., 2023. PROJECT-BASED LEARNING FOR ENGINEERING STUDENTS IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0: APPLICATION TO AUTOMOTIVE ASSEMBLY SYSTEM. *Proc. Des. Soc.* 3, 2965–2974.  
<https://doi.org/10.1017/pds.2023.297>
- Alfnes, E., Romsdal, A., Strandhagen, J.O., Von Cieminski, G., Romero, D. (Eds.), 2023. *Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Responsible Manufacturing, Service, and Logistics Futures: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2023, Trondheim, Norway, September 17–21, 2023, Proceedings, Part II, IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer Nature Switzerland, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-43666-6>
- AlGeddawy, T., 2019. A Simplified Changeable Learning Factory Design Based on a Granularity Complexity Model. *Procedia Manufacturing* 38, 654–662.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.084>

- Al-Geddawy, T., 2020. A Digital Twin Creation Method for an Opensource Low-cost Changeable Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 51, 1799–1805. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.250>
- Aljinovic, A., Crnjac, M., Nikola, G., Mladineo, M., Basic, A., Ivica, V., 2020. Integration of the human-robot system in the learning factory assembly process. *Procedia Manufacturing* 45, 158–163. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.088>
- Alnaji, Sam, and Eric Lutters.2024. “Employing PLM in Learning Factories: A Project-Driven Architecture.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 3–10. Springer.
- Alonso-Perez, J.L., Cardenas-Maciel, S.L., Trujillo-Navarrete, B., Reynoso-Soto, E.A., Cazarez-Cazarez, N.R., 2022. An approach for designing smart manufacturing for the research and development of dye-sensitize solar cell. *J Intell Manuf* 33, 2307–2320. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01794-z>
- Al-Shararah, Mohamed Afi, Jelena Milisavljevic Syed, Orhan Sahin, Asmaa Alqamy, and Konstantinos Salonitis.2024. “Using the Learning Factory for the Integration of Sustainability in the Engineering Curricula in Higher Education.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 337–348. Springer.
- Al-Shararah, Mohamed, John Patsavalelis, and Konstantinos Salonitis.2024. “Using Augmented Reality and Learning Factories to Deliver Effective Manufacturing Training Programs.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 214–221. Springer.
- Alves, C., Putnik, G., 2019. Experiential Learning of CAD Systems Interoperability in Social Network-based Education. *Procedia CIRP* 84, 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.07.002>
- Anas, M., Shahzad, S.J.H., Yarovaya, L., 2024. The use of high-frequency data in cryptocurrency research: a meta-review of literature with bibliometric analysis. *Financ Innov* 10, 90. <https://doi.org/10.1186/s40854-023-00595-y>
- Andersen, A.-L., Brunoe, T.D., Nielsen, K., 2019. Engineering Education in Changeable and Reconfigurable Manufacturing: Using Problem-Based Learning in a Learning Factory Environment. *Procedia CIRP* 81, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.002>
- Andrés, M., Álvaro, G., Julián, M., n.d. Advantages of Learning Factories for Production Planning based on shop floor simulation: A step towards smart factories in Industry 4.0.
- Angrisani, L., Arpaia, P., Bonavolontá, F., Moccaldi, N., Schiano Lo Moriello, R., 2020. A “learning small enterprise” networked with a FabLab: An academic course 4.0 in instrumentation and measurement. *Measurement* 150, 107063. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107063>
- Angrisani, L., Arpaia, P., Capaldo, G., Moccaldi, N., Salatino, P., Ventre, G., 2018. Evolution of the academic FabLab at University of Naples Federico II. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1065, 022013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/2/022013>
- Assad, F., Konstantinov, S., Rushforth, E.J., Vera, D.A., Harrison, R., 2020. A Literature Survey of Energy Sustainability in Learning Factories, in: *2020 IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Presented at the 2020 IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), IEEE, Warwick, United Kingdom, pp. 361–366. <https://doi.org/10.1109/INDIN45582.2020.9442119>
- Assuad, C.S.A., Tvenge, N., Martinsen, K., 2020. System dynamics modelling and learning factories for manufacturing systems education. *Procedia CIRP* 88, 15–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.003>

- Athinarayanan, R., Newell, B., Garcia, J., Ostanek, J., Diao, X., Sundararajan, R., Zhang, H., Richards, G., 2019. Learning in Context with Horizontally & Vertically Integrated Curriculum in a Smart Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 31, 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.015>
- Auberger, E., Karre, H., Ramsauer, C., 2019. Introduction of a new product in an operating assembly process at Graz University of Technology’s LEAD Factory. *Procedia Manufacturing* 31, 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.017>
- Baena, F., Guarin, A., Mora, J., Sauza, J., Retat, S., 2017. Learning Factory: The Path to Industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 9, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.022>
- Balve, P., Albert, M., 2015. Project-based Learning in Production Engineering at the Heilbronn Learning Factory. *Procedia CIRP* 32, 104–108. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.215>
- Balve, P., Ebert, L., 2019. Ex Post Evaluation of a Learning Factory – Competence Development Based on Graduates Feedback. *Procedia Manufacturing* 31, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.002>
- Barth, Jonas, Nada Ruizcic, Mark Mennenga, Vasiliki Panagiotopoulou, Mathias Wolf, Ricardo Vega Ayora, Massoud Sattari, Gesine Kippe, Astrid Weyand, Stefan Seyfried, Jeff Mangers, Sebastian Thiede, Jan Felix Niemeyer, Zahra Ghazanfari Poor Kholeniyani, Natalie Perusich, Joachim Metternich, Matthias Weigold, Christoph Herrmann, Vera Hummel, Anja Braun, and Panagiotis Stavropoulos.2024. “Development of an IALF Overarching Learning Module for Circular Economy.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 366–373. Springer.
- Bauernhansl, T., Tzempetonidou, M., Rossmeissl, T., Groß, E., Siegert, J., 2018. Requirements for designing a cyber-physical system for competence development. *Procedia Manufacturing* 23, 201–206. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.017>
- Behrendt, Martin, Thomas Schlegel, Gisela Lanza, and Eberhard Abele.2022. “Digital Learning Factory Ecosystems for Competency Development in Future Manufacturing.”*Procedia CIRP* 107: 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.242>
- Bellucci, M., Chiurco, A., Cimino, A., Ferro, D., Longo, F., Padovano, A., 2022. Learning Factories: a review of state of the art and development of a morphological model for an Industrial Engineering Education 4.0, in: *2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*. Presented at the 2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), IEEE, Palermo, Italy, pp. 260–265. <https://doi.org/10.1109/MELECON53508.2022.9843084>
- Bender, B., Kreimeier, D., Herzog, M., Wienbruch, T., 2015. Learning Factory 2.0 – Integrated View of Product Development and Production. *Procedia CIRP* 32, 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.226>
- Bittercann, Victor, Michael Spitzhirn, and Sebastian Thiede.2024. “Interactive Digitally Supported Design of Human-Centric Workplaces in Learning Factories.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 241–248. Springer.
- Bjørnsten, Thomas Bøgevald, Tine Juhl Wade, Camilla Nellemann, and Lasse Christiansen.2024. “Extending the Learning Factory Through Virtual Reality.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 79–88. Springer.
- Blöchl, S.J., Michalicki, M., Schneider, M., 2017. Simulation Game for Lean Leadership – Shopfloor Management Combined with Accounting for Lean. *Procedia Manufacturing* 9, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.031>

- Blöchl, S.J., Schneider, M., 2016. Simulation Game for Intelligent Production Logistics – The PuLL® Learning Factory. *Procedia CIRP* 54, 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.100>
- Blume, S., Madanchi, N., Böhme, S., Posselt, G., Thiede, S., Herrmann, C., 2015. Die Lernfabrik – Research-based Learning for Sustainable Production Engineering. *Procedia CIRP* 32, 126–131. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.113>
- Böhner, J., Weeber, M., Kuebler, F., Steinhilper, R., 2015. Developing a Learning Factory to Increase Resource Efficiency in Composite Manufacturing Processes. *Procedia CIRP* 32, 64–69. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.05.003>
- Bortolini, M., Ferrari, E., Galizia, F.G., Mora, C., 2019. Implementation of Reconfigurable Manufacturing in the Italian Context: State-of-the-Art and Trends. *Procedia Manufacturing* 39, 591–598. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.425>
- Botha, N., Marais, S., 2021. Development of a Graphical User Interface as a Learning Tool for Artificial Intelligence, in: 2021 Rapid Product Development Association of South Africa - Robotics and Mechatronics - Pattern Recognition Association of South Africa (RAPDASA-RobMech-PRASA). Presented at the 2021 Rapid Product Development Association of South Africa - Robotics and Mechatronics - Pattern Recognition Association of South Africa (RAPDASA-RobMech-PRASA), IEEE, South Africa, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/RAPDASA-RobMech-PRAS53819.2021.9829102>
- Brenner, B., Hummel, V., 2016. A Seamless Convergence of the Digital and Physical Factory Aiming in Personalized Product Emergence Process (PPEP) for Smart Products within ESB Logistics Learning Factory at Reutlingen University. *Procedia CIRP* 54, 227–232. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.108>
- Brooks, S., McFarlane, D., Thorne, A., Ling, Z., Hawkridge, G., Danaei, D., Tadeja, S., Ratchev, S., Rama Murthy, S., Kazantsev, N., Pattinson, S., Velu, C., Bohné, T., 2023. Design of a Demonstrator Environment for Investigating Multi-Factory Production and Operation Challenges, in: Thomas, A., Murphy, L., Morris, W., Dispenza, V., Jones, D. (Eds.), *Advances in Transdisciplinary Engineering*. IOS Press. <https://doi.org/10.3233/ATDE230908>
- Brüggemann, H., Stempin, S., Meier, J.-M., 2020. Consideration of digitalization for the purpose of resource efficiency in a learning factory. *Procedia Manufacturing* 45, 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.085>
- Brunoe, T.D., Mortensen, S.T., Andersen, A.-L., Nielsen, K., 2019. Learning Factory with Product Configurator for Teaching Product Family Modelling and Systems Integration. *Procedia Manufacturing* 28, 70–75. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.012>
- Buergin, J., Minguillon, F.E., Wehrle, F., Haefner, B., Lanza, G., 2017. Demonstration of a Concept for Scalable Automation of Assembly Systems in a Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 9, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.026>
- Buth, L., Juraschek, M., Posselt, G., Herrmann, C., 2018. Supporting SMEs towards adopting mixed reality : A training concept to bring the reality-virtuality continuum into application, in: 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Presented at the 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), IEEE, Porto, pp. 544–549. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2018.8471990>
- Büth, L., Juraschek, M., Sangwan, K.S., Herrmann, C., Thiede, S., 2020. Integrating virtual and physical production processes in learning factories. *Procedia Manufacturing* 45, 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.082>



- Cachay, J., Wennemer, J., Abele, E., & Tenberg, R. (2012). Study on Action-Oriented Learning with a Learning Factory Approach. *Procedia CIRP*, 3, 158–163.
- Cano-Suñén, E., Martínez, I., Fernández, Á., Zalba, B., Casas, R., 2023. Internet of Things (IoT) in Buildings: A Learning Factory. *Sustainability* 15, 12219. <https://doi.org/10.3390/su151612219>
- Catti, Paolo, Artur Freitas, Eliseu Pereira, Gil Gonçalves, Rui Pedro Lopes, Nikolaos Nikolaidis, and Kosmas Alexopoulos. 2024. “Data Analytics and AI for Quality Assurance in Manufacturing: Challenges and Opportunities.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 205–212. Springer.
- Centea, D., Singh, I., Boer, J., 2020a. RFID in Manufacturing: An Implementation Case in the SEPT Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 51, 543–548. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.076>
- Centea, D., Singh, I., Elbestawi, M., 2019. SEPT Approaches for Education and Training using a Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 31, 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.018>
- Centea, D., Singh, I., Wanyama, T., Magolon, M., Boer, J., Elbestawi, M., 2020b. Using the SEPT Learning Factory for the Implementation of Industry 4.0: case of SMEs. *Procedia Manufacturing* 45, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.079>
- Centea, D., Singh, I., Yakout, M., Boer, J., Elbestawi, M., 2020c. Opportunities and Challenges in Integrating Additive Manufacturing in the SEPT Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 45, 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.080>
- Chauhan, A., Mohana, R., 2022. Implementing LDA Topic Modelling Technique to Study User Reviews in Tourism, in: *2022 Seventh International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*. Presented at the 2022 Seventh International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC), IEEE, Solan, Himachal Pradesh, India, pp. 357–360. <https://doi.org/10.1109/PDGC56933.2022.10053153>
- Chelini, J., Richert, D., 2023. Teaching Engineering Design for Industry 4.0 Using a Cyber-Physical Learning Factory. *IFAC-PapersOnLine* 56, 4699–4704. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.994>
- Chemenew, Peter, Poorya Ghafoorpoor Yazdi, Mitchell Berends, Matthijs Bruijn , Alberto Martinetti, and Nina Trauemicht. 2024. “Learning Factory Concept Tailored for Engineering Programmes for Underserved Communities.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 75–82. Springer.
- Choi, Doan Ngoc Chi Nan, Chan Hian Leng, Tran Van Trung, and Su Myat Phyo. 2024. “A Method to Handle Concept Drift in Predicting Remaining Useful Life.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 163–170. Springer.
- Christiansen, Lasse, Jonas Frendrup, and Natalie Petrusch. 2024. “On the Quick and Dirty Learning Factory Within the Industry: A Dual Case Study.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 13–20. Springer.
- Conrad, A., Oberc, H., Wannöffel, M., Kuhlenkötter, B., 2019. Co-determination – An interdisciplinary concept to train PhD students from different disciplines. *Procedia Manufacturing* 31, 129–135. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.020>
- Cunha, C.D., Cardin, O., Gallot, G., Viaud, J., 2021. Designing the Digital Twins of Reconfigurable Manufacturing Systems: application on a smart factory. *IFAC-PapersOnLine* 54, 874–879. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.103>

- Czarski, M., Ng, Y.T., Vogt, M., Juraschek, M., Thiede, B., Tan, P.S., Thiede, S., Herrmann, C., 2020. A Mixed Reality application for studying the improvement of HVAC systems in learning factories. *Procedia Manufacturing* 45, 373–378. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.039>
- Dahl, H., Tvenge, N., Assuad, C.S.A., Martinsen, K., 2023. A Learning Approach for Future Competencies in Manufacturing using a Learning Factory. *Procedia CIRP* 118, 1039–1043. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.178>
- Dallasega, P., Revolti, A., Sauer, P.C., Schulze, F., Rauch, E., 2020. BIM, Augmented and Virtual Reality empowering Lean Construction Management: a project simulation game. *Procedia Manufacturing* 45, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.059>
- Dalm, Kris, Markus Wengle, Patrick Leber, and Gautam Kevadiya.2024. “Application of Collaborative Robots in Research and Education in Learning Factories.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 277–284. Springer.
- Darun, M.R., Palm, D., Athinarayanan, R., Hummel, V., Von Leipzig, K., 2019. The Learning Factory – A New Stimulus to Enhance International Collaboration. *Procedia Manufacturing* 31, 290–295. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.046>
- De Marchi, Matteo, Maximilian Oehler, Chiara Nezzi, Erwin Rauch, and Dominik Matt.2024. “Computer Vision in a Digital Twin Based Manufacturing Process to Enable Dynamic Task Allocation in Learning Factories.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 105–112. Springer.
- Deuse, Jochen, René Wöstmann, Marius Syberg, Nikolai West, David Wagstyl, and Victor Hernandez Moreno.2024. “Establishing a Machine Learning and Internet of Things Learning Infrastructure by Operating Transnational Cyber-Physical Brewing Labs.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 171–178. Springer.
- Devika, Raj, P., Venugopal, A., Thiede, B., Herrmann, C., Sangwan, K.S., 2020. Development of the Transversal Competencies in Learning Factories. *Procedia Manufacturing* 45, 349–354. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.031>
- Dorka, Frithjof, Kaoutar El Otmami, Maximilian Hentsch, Nils Künstler, and Daniel Palm.2024. “Using Large Language Models to Facilitate the Utilization of Specific Application Programming Interfaces in Learning Factories.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2*, 346–352. Springer.
- Dvorak, Julia, Rick Hörstnig, Kevin Gleich, Julian Linterst, Marvin Carl May, and Gisela Lanza.2024. “Circular Production in Learning Factories: A Teaching Concept.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 358–365. Springer.
- Eder, M., Hulla, M., Mast, F., Ramsauer, C., 2020a. On the application of Augmented Reality in a learning factory working environment. *Procedia Manufacturing* 45, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.030>
- Eder, M., Ketenci, A., Auberger, E., Gotthard, M., Ramsauer, C., 2020b. Integration of low-cost digital energy meters in learning factory assembly lines. *Procedia Manufacturing* 45, 202–207. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.095>
- Elbestawi, M., Centea, D., Singh, I., Wanyama, T., 2018. SEPT Learning Factory for Industry 4.0 Education and Applied Research. *Procedia Manufacturing* 23, 249–254. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.025>
- ElMaraghy, H., ElMaraghy, W., 2015. Learning Integrated Product and Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 32, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.222>

- ElMaraghy, H., Moussa, M., ElMaraghy, W., Abbas, M., 2017. Integrated Product / System Design and Planning for New Product Family in a Changeable Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 9, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.008>
- Engelhardt-Nowitzki, C., Aburaia, M., Otrebski, R., Rauer, J., Orsolits, H., 2020. Research-based teaching in Digital Manufacturing and Robotics – the Digital Factory at the UAS Technikum Wien as a Case Example. *Procedia Manufacturing* 45, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.089>
- Enke, J., Glass, R., Kreß, A., Hambach, J., Tisch, M., Metternich, J., 2018a. Industrie 4.0 – Competencies for a modern production system. *Procedia Manufacturing* 23, 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.028>
- Enke, J., Kraft, K., Metternich, J., 2015. Competency-oriented Design of Learning Modules. *Procedia CIRP* 32, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.211>
- Enke, J., Metternich, J., Bentz, D., Klaes, P.-J., 2018b. Systematic learning factory improvement based on maturity level assessment. *Procedia Manufacturing* 23, 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.160>
- Enke, J., Tisch, M., Metternich, J., 2016. Learning Factory Requirements Analysis – Requirements of Learning Factory Stakeholders on Learning Factories. *Procedia CIRP* 55, 224–229. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.026>
- Enke, Jan, Matthias Burghardt, Thomas Bauernhansl, and Eberhard Abele.2020. “Developing Competencies for the Digital Transformation: A Learning Factory Approach.”*Procedia Manufacturing* 45: 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.094>
- Enke, Jan, Sebastian Müller, Anika Kühn, and Eberhard Abele.2017. “Requirements for Learning Factories of the Future.”*Procedia Manufacturing* 9: 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.005>
- Erdmann, J.G., Hummela, V., Leipzig, K.V., Schuhmacher, J., 2020. Development and implementation of an autonomous control system for target-optimised use of intralogistics transport systems in the Learning Factory Werk 150 at Reutlingen University. *Procedia Manufacturing* 45, 405–410. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.044>
- Erol, S., Hold, P., 2016. Keeping Track of the Physical in Assembly Processes, in: 2016 IEEE 20th International Enterprise Distributed Object Computing Workshop (EDOCW). Presented at the 2016 IEEE 20th International Enterprise Distributed Object Computing Workshop (EDOCW), IEEE, Vienna, Austria, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/EDOCW.2016.7584365>
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., Sihm, W., 2016. Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production. *Procedia CIRP* 54, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.162>
- Faller, C., Feldmüller, D., 2015. Industry 4.0 Learning Factory for regional SMEs. *Procedia CIRP* 32, 88–91. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.117>
- Faller, C., Höftmann, M., 2018. Service-oriented communication model for cyber-physical-production-systems. *Procedia CIRP* 67, 156–161. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.192>
- Ferreira, Elizabeth, and Louis Louw.2024. “Teaching Human-Centered Design of Collaborative Robot Cells in a Learning Factory: A Study on Workload, Trust and Usability.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 233–240. Springer.
- Fuertes, J.J., González-Herbón, R., Rodríguez-Ossorio, J.R., González-Mateos, G., Alonso, S., Morán, A., 2023. Guidelines to develop demonstration models on industry 4.0 for engineering

- training. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 36, 1465–1481. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2189308>
- Galdeano, Maialen, Jenaro Guiasola, and José Gutiérrez-Bernardo. 2024. “A Project-Based Learning Approach for the Development of Learning Factory in the Engineering Curriculum.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2*, 39–49. Springer.
- Gan, Jingxian, and Yong Qi. 2021. “Selection of the Optimal Number of Topics for LDA Topic Model—Taking Patent Policy Analysis as an Example.” *Entropy* 23 (10): 1301. <https://doi.org/10.3390/e23101301>
- García, Á., Bregon, A., Martínez-Prieto, M.A., 2022. Towards a connected Digital Twin Learning Ecosystem in manufacturing: Enablers and challenges. *Computers & Industrial Engineering* 171, 108463. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108463>
- Ghafoorpoor Yazdi, Poorya, Andrea Sbaragli, Leon Peters, Francesco Pilati, and Sebastian Thiede. 2024. “Cyber Physical System for Reconfigurable Learning Factories: Combining 3D Simulations, Reconfigurable Layouts and Real-Time Locating Systems.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 28–35. Springer.
- Gjeldum, N., Mladineo, M., Crnjac, M., Veza, I., Aljinovic, A., 2018. Performance analysis of the RFID system for optimal design of the intelligent assembly line in the learning factory. *Procedia Manufacturing* 23, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.162>
- Gjeldum, N., Mladineo, M., Veza, I., 2016. Transfer of Model of Innovative Smart Factory to Croatian Economy Using Lean Learning Factory. *Procedia CIRP* 54, 158–163. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.096>
- Gjeldum, Nikola, Marko Štefanić, and Mladen Šivak. 2017. “A Learning Factory for the Assembly Process Improvement Using Lean Tools.” *Procedia Manufacturing* 9: 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.022>
- Glass, R., Metternich, J., 2020. Method to measure competencies - a concept for development, design and validation. *Procedia Manufacturing* 45, 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.056>
- Glass, R., Miersch, P., Metternich, J., 2018. Influence of learning factories on students’ success – a case study. *Procedia CIRP* 78, 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.307>
- Goerke, M., Schmidt, M., Busch, J., Nyhuis, P., 2015. Holistic Approach of Lean Thinking in Learning Factories. *Procedia CIRP* 32, 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.221>
- Görke, M., Bellmann, V., Busch, J., Nyhuis, P., 2017. Employee Qualification by Digital Learning Games. *Procedia Manufacturing* 9, 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.040>
- Gotthardt, S., Hulla, M., Eder, M., Karre, H., Ramsauer, C., 2019. Digitalized milk-run system for a learning factory assembly line. *Procedia Manufacturing* 31, 175–179. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.028>
- Goyal, Astha, and Indu Kashyap. 2024. “A Data-Driven Analysis to Determine the Optimal Number of Topics ‘K’ for Latent Dirichlet Allocation Model. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 35 (1): 310–322. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v35.i1.pp310-322>
- Grano, Alice, Gábor Princz, Selim Erol, and Roman Hörbe. 2024. “A Data Management Concept for Learning Factories to Support Scenario-Based Learning of Advanced Manufacturing Data Analytics for SMEs.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2*, 278–285. Springer.
- Gräßler, I., Pöhler, A., Pottebaum, J., 2016a. Creation of a Learning Factory for Cyber Physical Production Systems. *Procedia CIRP* 54, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.063>

- Gräßler, I., Taplick, P., Yang, X., 2016b. Educational Learning Factory of a Holistic Product Creation Process. *Procedia CIRP* 54, 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.103>
- Grimmel, Philipp, Lukas Siemon, Gerrit Posselt, and Mark Mennenga.2024. “A Game-Based Learning Approach for Enterprise Organization.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2*, 269–277. Springer.
- Grøn, H.G., Lindgren, K., Nielsen, I.H., 2020. Presenting the UCN Industrial Playground for teaching and researching Industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 45, 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.094>
- Gronau, N., Ullrich, A., Teichmann, M., 2017. Development of the Industrial IoT Competences in the Areas of Organization, Process, and Interaction Based on the Learning Factory Concept. *Procedia Manufacturing* 9, 254–261. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.029>
- Grube, D., Malik, A.A., Bilberg, A., 2019. SMEs can touch Industry 4.0 in the Smart Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 31, 219–224. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.035>
- Gualtieri, L., Rojas, R., Carabin, G., Palomba, I., Rauch, E., Vidoni, R., Matt, D.T., 2018. Advanced Automation for SMEs in the I4.0 Revolution: Engineering Education and Employees Training in the Smart Mini Factory Laboratory, in: *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. Presented at the 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), IEEE, Bangkok, Thailand, pp. 1111–1115. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2018.8607719>
- Häfner, Benedikt, Julian Dölle, Yannick Werner, Lydia Hartmann, Hans-Christoph Müller, and Eberhard Abele.2024. “A Data-Driven Learning Factory Concept for Action-Oriented Engineering Education.”*Procedia CIRP* 137: 652–657. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.083>
- Hagen, J., O. Schmögir, R. Arafat, M. Juraschek, J. Brand, and C. Herrmann.2024. “Biologicalisation in Learning Factories – Learning Concept and Lab-Demonstrator for Bio-Fluids for Metal Processing.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2*, 100–107. Springer.
- Hagen, Lennart, Maximilian Lanza, Franziska Schenk, and Gisela Lanza.2020. “A Virtual Learning Factory Approach for Teaching Cyber-Physical Production Systems.”*Procedia Manufacturing* 45: 331–336. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.059>
- Hambach, J., Diezemann, C., Tisch, M., Metternich, J., 2016. Assessment of Students’ Lean Competencies with the Help of Behavior Video Analysis – Are Good Students Better Problem Solvers? *Procedia CIRP* 55, 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.012>
- Hambach, J., Tenberg, R., Metternich, J., 2015. Guideline-based Video Analysis of Competencies for a Target-oriented Continuous Improvement Process. *Procedia CIRP* 32, 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.212>
- Hegedic, M., Greguric, P., Golec, M., Gudlin, M., 2022. Development of Learning Factory Directory - DoLF, in: *2022 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*. Presented at the 2022 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), IEEE, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH53737.2022.9751321>
- Helm, R., Reise, C., Rößle, D., 2014. Learning Factories for Sustainable Manufacturing - A Generic Design Approach. *AMR* 1018, 517–524. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.517>
- Hennig, M., Reisinger, G., Trautner, T., Hold, P., Gerhard, D., Mazak, A., 2019. TU Wien Pilot Factory Industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 31, 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.032>

- Henning, M., Hagedorn-Hansen, D., Von Leipzig, K., 2017. METACOGNITIVE LEARNING: SKILLS DEVELOPMENT THROUGH GAMIFICATION AT THE STELLENBOSCH LEARNING FACTORY AS A CASE STUDY. SAJIE 28. <https://doi.org/10.7166/28-3-1845>
- Hentsch, Maximilian, Christian Kuhn, Nils Künstler, Frithjof Dorka, and Daniel Palm.2024. “Concept for a Low-Cost Implementation of Automatic Cycle Time Measurements in Learning Factories.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 329–336. Springer.
- Heredia-Marin, I.B., Tijerina-Berzosa, A., Vazquez-Badillo, P.E., Osorio-Oliveros, R., Vazquez-Hurtado, C., 2022. Work in Progress: Developing Competencies by Designing an Adaptive Automated Storage And Retrieval System Using ROS, in: 2022 IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE). Presented at the 2022 IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE), IEEE, Santos, Brazil, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/EDUNINE53672.2022.9782352>
- Herstätter, P., Wildbolz, T., Hulla, M., Ramsauer, C., 2020. Data acquisition to enable Research, Education and Training in Learning Factories and Makerspaces. *Procedia Manufacturing* 45, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.019>
- Herstätter, Patrick, Matthias Wolf, Marvin Rantschl, and Christian Ramsauer.2024. “Complementing Learning Factories with Virtual Reality Technology – Examination and Summary of Practical Applications.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 55–62. Springer.
- Hofmann, C., Lauber, S., Haefner, B., Lanza, G., 2018. Development of an agile development method based on Kanban for distributed part-time teams and an introduction framework. *Procedia Manufacturing* 23, 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.159>
- Hulla, M., Hammer, M., Karre, H., Ramsauer, C., 2019. A case study based digitalization training for learning factories. *Procedia Manufacturing* 31, 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.027>
- Hummel, V., Hyra, K., Ranz, F., Schuhmacher, J., 2015. Competence Development for the Holistic Design of Collaborative Work Systems in the Logistics Learning Factory. *Procedia CIRP* 32, 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.111>
- Iyer, Suveg V., Kuldip Singh Sangwan, and Dhiraj.2024. “Federated Interoperable Digital Twins for Collaborative Learning Factories.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 137–144. Springer.
- Jamaludin, K.A., Ealangov, S., Saleh, S.N.H.M., Zabidi, N.A., Alias, N., Yasin, M.H.M., Alias, B.S., 2023. Reshaping the Curriculum for Academy in Factory in Malaysia. *Front. Psychol.* 14, 1120611. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1120611>
- Jing, Z., Turi, J.A., Lu, S., Rosak-Szyrocka, J., 2023. Sustainability through Factory-Based Learning in Higher Education. *Sustainability* 15, 5376. <https://doi.org/10.3390/su15065376>
- Jolliffe, Ian T., and Jorge Cadima. 2016. “Principal Component Analysis: A Review and Recent Developments.”*Philosophical Transactions of the Royal Society A* 374 (2065): 20150202.<https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Jooste, J.L., Louw, L., Leipzig, K.V., Conradie, P.D.F., Asekun, O.O., Lucke, D., Hagedorn-Hansen, D., 2020. Teaching maintenance plan development in a learning factory environment. *Procedia Manufacturing* 45, 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.040>
- Jovanovski, Bojan, Robert Minovski, Aleksandar Argiloski, and Mihaela Zlateska.2024. “Smart Learning Factory – Skopje: Boosting the Lean 4.0 Journey in South-East Europe.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 258–268. Springer.

- Juraschek, M., Cerdas, F., Posselt, G., Herrmann, C., 2017. Experiencing Closed Loop Manufacturing in a Learning Environment. *Procedia Manufacturing* 9, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.046>
- Juraschek, Max, Lennart Büth, Gerrit Posselt, and Christoph Herrmann.2018. “Mixed Reality in Learning Factories.”*Procedia Manufacturing* 23: 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.009>
- Kang, Juyeon, Gabriela Riegler, Ewald Gerhard, and Ewald Graf.2024. “Learning Factory-Based Training for Cyber-Physical Production Systems Using Virtual and Physical Twin Integration.”*Procedia CIRP* 137: 732–737. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.096>
- Karbas, Atieh, Fazel Ansari, and Sebastian Schlund.2024. “How Inclusive is Manufacturing? An Analysis of Today’s Workplace Design.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 266–276. Springer.
- Karre, H., Hammer, M., Kleindienst, M., Ramsauer, C., 2017. Transition towards an Industry 4.0 State of the LeanLab at Graz University of Technology. *Procedia Manufacturing* 9, 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.006>
- Karre, H., Hammer, M., Ramsauer, C., 2018. Learn how to cope with volatility in operations at Graz University of Technology’s LEAD Factory. *Procedia Manufacturing* 23, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.154>
- Karre, H., Hammer, M., Ramsauer, C., 2019. Building capabilities for agility in a learning factory setting. *Procedia Manufacturing* 31, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.010>
- Kemény, Z., Beregi, R., Nacsa, J., Kardos, C., Horváth, D., 2018. Human–robot collaboration in the MTA SZTAKI learning factory facility at Győr. *Procedia Manufacturing* 23, 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.001>
- Kemény, Z., Beregi, R.J., Erdős, G., Nacsa, J., 2016a. The MTA SZTAKI Smart Factory: Platform for Research and Project-oriented Skill Development in Higher Education. *Procedia CIRP* 54, 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.060>
- Kemény, Z., Beregi, R.J., Erdős, G., Nacsa, J., 2023. Co-Creation of Production Resources and Processes in Pilot and Learning Factories—a Case Study. *IFAC-PapersOnLine* 56, 7820–7825. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1148>
- Kemény, Z., Nacsa, J., Erdős, G., Glawar, R., Sihm, W., Monostori, L., Ilie-Zudor, E., 2016b. Complementary Research and Education Opportunities—A Comparison of Learning Factory Facilities and Methodologies at TU Wien and MTA SZTAKI. *Procedia CIRP* 54, 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.064>
- Kemény, Zsolt, Richárd Beregi, János Nacsa, Robert Glawar, and Wilfried Sihm.2018. “Expanding Production Perspectives by Collaborating Learning Factories—Perceived Needs and Possibilities.”*Procedia Manufacturing* 23: 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.002>
- Kippe, Gesine, Massoud Sattari Toriki, Markus Beckmann, Ricardo Vega Ayora, and Thomas Gries.2024. “The Role of Learning Factories in Validating and Marketing AI Technologies: A Case Study on Overcoming Industrial Rollout Challenges.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 189–196. Springer.
- Kipper, L.M., Iepsen, S., Dal Forno, A.J., Frozza, R., Furstenau, L., Agnes, J., Cossul, D., 2021. Scientific mapping to identify competencies required by industry 4.0. *Technology in Society* 64, 101454. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101454>

- Kleinwort, R., Semm, T., Falger, P.M., Zaeh, M.F., 2018. Integration of an Android Application into the Learning Factory for Optimized Machining. *Procedia Manufacturing* 23, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.153>
- Kleppe, P.S., Bjelland, O., Hansen, I.E., Mork, O.-J., 2022. Idea Lab: Bridging Product Design and Automatic Manufacturing in Engineering Education 4.0, in: 2022 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). Presented at the 2022 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), IEEE, Tunis, Tunisia, pp. 195–200. <https://doi.org/10.1109/EDUCON52537.2022.9766542>
- Kneissl, Matthias, Erika Kinsky, Michael Haslgrübler, Hermann Löff, and Peter Pöschl.2024. “A Collaborative Learning Factory Approach for Skill Development in Human–Robot Interaction.”*Procedia CIRP* 137: 411–416. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.061>
- Koh, Linus, Philipp Stricker, Julia Reisinger, and Fazel Ansari.2024. “DigiTeachVR: Digitally-Enhanced Teaching Platform for Improving Data Science Skills and Virtual Reality Competences in Cross-Disciplinary Engineering Education.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2*, 50–57. Springer.
- Kohlweiss, A., Auberger, E., Ketenci, A., Ramsauer, C., 2020. Integration of a teardown approach at Graz University of Technology’s LEAD Factory. *Procedia Manufacturing* 45, 240–245. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.101>
- Kolesnyk, O., Bubeník, Ing.P., Čapek, J., 2021. Cloud platform for learning factories. *Transportation Research Procedia* 55, 561–567. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.022>
- Königs, Lisa Chloé, Benjamin Höhne, and Jörg Longmuß.2024. “Balancing Immersion and Simplicity: Unlocking Extended Reality’s Potential for Dynamic Learning in Industries.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2*, 189–196. Springer.
- Kreimeier, D., Morlock, F., Prinz, C., Krückhans, B., Bakir, D.C., Meier, H., 2014. Holistic Learning Factories – A Concept to Train Lean Management, Resource Efficiency as Well as Management and Organization Improvement Skills. *Procedia CIRP* 17, 184–188. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.040>
- Kreitlein, Sebastian, Andreas Höft, Stefan Schwender, and Jürgen Franke.2015. “Green Factories Bavaria: A Network of Distributed Learning Factories for Energy Efficient Production.”*Procedia CIRP* 32: 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.219>
- Kreß, A., Metternich, J., 2020. System development for the configuration of learning factories. *Procedia Manufacturing* 45, 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.086>
- Kumar, D., Kukreja, V., 2024. Image segmentation, classification, and recognition methods for wheat diseases: Two Decades’ systematic literature review. *Computers and Electronics in Agriculture* 221, 109005. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109005>
- Kumar, R., Patil, O., Nath S, K., Rohilla, K., Singh Sangwan, K., 2021a. Machine Vision and Radio-Frequency Identification (RFID) based Real-Time Part Traceability in a Learning Factory. *Procedia CIRP* 104, 630–635. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.106>
- Kumar, Rishi, Patil, O., Nath S, K., Sangwan, K.S., Kumar, Rajneesh, 2021b. A Machine Vision-based Cyber-Physical Production System for Energy Efficiency and Enhanced Teaching-Learning Using a Learning Factory. *Procedia CIRP* 98, 424–429. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.128>
- Künstler, Nils, Maximilian Hentsch, Frithjof Dorka, and Daniel Palm.2024. “Methodical Approach to the Introduction of Asset Administration Shell in Learning Factories.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2*, 313–320. Springer.



- Küsters, D., Praß, N., Gloy, Y.-S., 2017. Textile Learning Factory 4.0 – Preparing Germany’s Textile Industry for the Digital Future. *Procedia Manufacturing* 9, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.035>
- Lagorio, A., Cimini, C., 2024. Towards 5.0 skills acquisition for students in industrial engineering: the role of learning factories. *Procedia Computer Science* 232, 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.031>
- Lagorio, A., Pinto, R., Golini, R., 2016. Research in urban logistics: a systematic literature review. *IJPDLM* 46, 908–931. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2016-0008>
- Lagorio, A., Zenezini, G., Mangano, G., Pinto, R., 2022. A systematic literature review of innovative technologies adopted in logistics management. *International Journal of Logistics Research and Applications* 25, 1043–1066. <https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1850661>
- Lang, S., Reggelin, T., Jobran, M., Hofmann, W., 2018. Towards a Modular, Decentralized and Digital Industry 4.0 Learning Factory, in: 2018 Sixth International Conference on Enterprise Systems (ES). Presented at the 2018 Sixth International Conference on Enterprise Systems (ES), IEEE, Limassol, pp. 123–128. <https://doi.org/10.1109/ES.2018.00026>
- Lanza, G., Minges, S., Stoll, J., Moser, E., Haefner, B., 2016. Integrated and Modular Didactic and Methodological Concept for a Learning Factory. *Procedia CIRP* 54, 136–140. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.107>
- Lanza, G., Moser, E., Stoll, J., Haefner, B., 2015. Learning Factory on Global Production. *Procedia CIRP* 32, 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.081>
- Leal, L.F., Fleury, A., Zancul, E., 2020. Starting up a Learning Factory focused on Industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 45, 436–441. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.049>
- Leber, Patrick, Markus Wengle, Gautam Kevadiya, and Kris Dalm. 2024. “Intralogistics in Learning Factories.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 20–27. Springer.
- Li, F., Yang, J., Wang, J., Li, S., Zheng, L., 2019. Integration of digitization trends in learning factories. *Procedia Manufacturing* 31, 343–348. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.054>
- Liao, R., Hu, L., Yu, J., Chen, Y., Chen, M., Yan, J., Li, X., Han, X., Jike, C., Yu, G., Wang, J., Liao, Q., Xia, L., Bai, X., Shi, J., Jiang, T., Du, L., Zhang, T., 2024. Association between TB delay and TB treatment outcomes in HIV-TB co-infected patients: a study based on the multilevel propensity score method. *BMC Infect Dis* 24, 457. <https://doi.org/10.1186/s12879-024-09328-7>
- Liebrecht, C., Hochdörffer, J., Treber, S., Moser, E., Erbacher, T., Gidion, G., Lanza, G., 2017. Concept Development for the Verification of the Didactic Competence Promotion for the Learning Factory on Global Production. *Procedia Manufacturing* 9, 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.019>
- Lindgren, Kurt, Helge Glindvad Grøn, and Lasse Christiansen. 2024. “Empowering STEM Students with Digital Skills: A Training Approach at UCN Industrial Playground.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 58–66. Springer.
- Lindner, Marija, N. Beyer, M. Juraschek, F. Cerdas, W. Yakti, C. Ulrichs, and C. Herrmann. 2024. “Designing Natural User Interfaces in Virtual Reality: A Comparative Study of Text and Audio Task Instructions for Operator Training in Learning Factories.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 47–54. Springer.
- Lindvig, K., Mathiasen, H., 2020. Translating the Learning Factory model to a Danish Vocational Education Setting. *Procedia Manufacturing* 45, 90–95. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.077>

- Liyanawaduge, N.N., Kumarasinghe, E.M.H.K., Iyer, S.S., Kulatunga, A.K., Lakmal, G., 2023. Digital Twin & Virtual Reality Enabled Conveyor System to Promote Learning Factory Concept, in: 2023 IEEE 17th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS). Presented at the 2023 IEEE 17th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), IEEE, Peradeniya, Sri Lanka, pp. 85–90. <https://doi.org/10.1109/ICIIS58898.2023.10253555>
- Louw, L., Deacon, Q., 2020. Teaching Industrie 4.0 technologies in a learning factory through problem-based learning: case study of a semi-automated robotic cell design. *Procedia Manufacturing* 45, 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.105>
- Louw, L., Droomer, M., 2019. Development of a low cost machine vision based quality control system for a learning factory. *Procedia Manufacturing* 31, 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.042>
- Louw, L., Walker, M., 2018. Design and implementation of a low cost RFID track and trace system in a learning factory. *Procedia Manufacturing* 23, 255–260. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.026>
- Lozano, C.V., Vijayan, K.K., 2020. Literature review on Cyber Physical Systems Design. *Procedia Manufacturing* 45, 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.020>
- Lugaresi, G., Frigerio, N., Matta, A., 2020. A New Learning Factory Experience Exploiting LEGO For Teaching Manufacturing Systems Integration. *Procedia Manufacturing* 45, 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.106>
- Lugaresi, Giovanni, Nicla Frigerio, Ziwei Lin, Mengyi Zhang, and Andrea Matta.2024. “A New Teaching Approach Exploiting Lab-Scale Models of Manufacturing Systems for Simulation Classes.”*Journal of Simulation* 18 (3): 460–475. <https://doi.org/10.1080/17477778.2023.2174458>
- Lutters, E., Damgrave, R., 2023. Digital twinning as the basis for integration of education and research in a learning factory. *Procedia CIRP* 120, 1463–1468. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.194>
- Madsen, O., Møller, C., 2017. The AAU Smart Production Laboratory for Teaching and Research in Emerging Digital Manufacturing Technologies. *Procedia Manufacturing* 9, 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.036>
- Maheso, N., Mpofo, K., Ramatsetse, B., 2019. A Learning Factory concept for skills enhancement in rail car manufacturing industries. *Procedia Manufacturing* 31, 187–193. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.030>
- Mahmood, Kashif, Tauno Otto, Vladimir Kuts, Walter Terkaj, Gianfranco Modoni, Marcello Urgo, Giorgio Colombo, Geza Haidegger, Peter Kovacs, and Johan Stahre.2021. “Advancement in Production Engineering Education through Virtual Learning Factory Toolkit Concept.”*Proceedings of the Estonian Academy of Sciences* 70 (4): 374–382. <https://doi.org/10.3176/proc.2021.4.02>
- Mahmood, Kashif, Tauno Otto, Vladimir Kuts, Walter Terkaj, Marcello Urgo, and Geza Haidegger.2021. “Development of Virtual Learning Factory Toolkit for Production Engineering Education.”*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1140 (1): 012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1140/1/012039>
- Mahmoodpour, M., Lobov, A., 2019. A knowledge-based approach to the IoT-driven data integration of enterprises. *Procedia Manufacturing* 31, 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.045>
- Makumbe, S., Hattingh, T., Plint, N., Esterhuizen, D., 2018. Effectiveness of using Learning Factories to impart Lean principles in mining employees. *Procedia Manufacturing* 23, 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.163>

- Manetas, Christos, Theofilos Mastos, Robert Hellbach, Dimitrios Kanellos, Xanthí Bamplotou, Angelos Papadopoulos, and Kosmas Alexopoulos.2024. “Development and Validation of a Training Framework Towards the Integration of Smart Micro-grids into Manufacturing: A Case from the Lifts’ Industry.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 125–136. Springer.
- Manten, K., Katzenschlager, S., Brümmer, L.E., Schmitz, S., Gaeddert, M., Erdmann, C., Grilli, M., Pollock, N.R., Macé, A., Erkosar, B., Carmona, S., Ongarello, S., Johnson, C.C., Sacks, J.A., Faehling, V., Bornemann, L., Weigand, M.A., Denking, C.M., Yerlikaya, S., 2024. Clinical accuracy of instrument-based SARS-CoV-2 antigen diagnostic tests: a systematic review and meta-analysis. *Virology* 21, 99. <https://doi.org/10.1186/s12985-024-02371-5>
- Marian, R., Campbell, D., Jin, Z., Stumptner, M., Chahl, J., 2019. Challenges in Implementing Industry 4 Laboratories and Learning Factories in Academia, in: 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Presented at the 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), IEEE, Macao, Macao, pp. 506–510. <https://doi.org/10.1109/IEEM44572.2019.8978634>
- Marmier, F., Deniaud, I., Rasovska, I., Michalak, J.-L., 2021. Towards a proactive vision of the training for the 4.0 Industry: From the required skills diagnostic to the training of employees. *IFAC-PapersOnLine* 54, 1144–1149. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.135>
- Marshall, I.J., Kuiper, J., Wallace, B.C., 2016. RobotReviewer: evaluation of a system for automatically assessing bias in clinical trials. *Journal of the American Medical Informatics Association* 23, 193–201. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocv044>
- Marshall, I.J., Wallace, B.C., 2019. Toward systematic review automation: a practical guide to using machine learning tools in research synthesis. *Syst Rev* 8, 163, s13643-019-1074–9. <https://doi.org/10.1186/s13643-019-1074-9>
- Martin, Michael, Edwin Blum, Dominik Wöllstein, and Gisela Lanza.2024. “Mastering the Future of Production: A Training Concept for Digital Twins.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 121–128. Springer.
- Martinez, P., Vargas-Martinez, A., Roman-Flores, A., Ahmad, R., 2020. A science mapping study on learning factories research. *Procedia Manufacturing* 45, 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.072>
- Martínez-Arellano, Giovanna, and Svetan Ratchev.2024. “Improving the Development and Reusability of Industrial AI Through Semantic Models.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 179–188. Springer.
- Masoumi, S., Shahraz, S., 2022. Meta-analysis using Python: a hands-on tutorial. *BMC Med Res Methodol* 22, 193. <https://doi.org/10.1186/s12874-022-01673-y>
- Massa, Janneke, and Eric Lutters.2024. “Guiding the Design of Effective Learning Factories: Requirements of a Design Approach for Resilience.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 145–152. Springer.
- Masse, C., Martinez, P., Mertiny, P., Ahmad, R., 2019. A Hybrid Method Based on Systems Approach to Enhance Experiential Learning in Mechatronic Education, in: 2019 7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA). Presented at the 2019 7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA), IEEE, Delft, Netherlands, pp. 403–407. <https://doi.org/10.1109/ICCMA46720.2019.8988746>

- Matt, D.T., Rauch, E., Dallasega, P., 2014. Mini-factory – A Learning Factory Concept for Students and Small and Medium Sized Enterprises. *Procedia CIRP* 17, 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.057>
- Mattsson, S., Salunke, O., Fast-Berglund, Å., Li, D., Skoogh, A., 2018. Design concept towards a human-centered learning factory. *Procedia Manufacturing* 25, 526–534. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.121>
- Mavrikios, D., Alexopoulos, K., Georgoulas, K., Makris, S., Michalos, G., Chryssolouris, G., 2019. Using Holograms for visualizing and interacting with educational content in a Teaching Factory. *Procedia Manufacturing* 31, 404–410. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.063>
- Mavrikios, D., Sipsas, K., Smparounis, K., Rentzos, L., Chryssolouris, G., 2017. A Web-based Application for Classifying Teaching and Learning Factories. *Procedia Manufacturing* 9, 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.002>
- Mazzuto, G., Antomarioni, S., Marcucci, G., Ciarapica, F.E., Bevilacqua, M., 2022. Learning-by-Doing Safety and Maintenance Practices: A Pilot Course. *Sustainability* 14, 9635. <https://doi.org/10.3390/su14159635>
- Mehrtash, Moein, Dan Centea, and Tom Wanyama.2024. “Development of Experiential Learning Framework for Autonomous Vehicle Education.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2*, 117–124. Springer.
- Menn, J.P., Sieckmann, F., Kohl, H., Seliger, G., 2018. Learning process planning for special machinery assembly. *Procedia Manufacturing* 23, 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.164>
- Merkel, L., Atug, J., Berger, C., Braunreuther, S., Reinhart, G., 2018. Mass Customization and Paperless Assembly in the Learning Factory for Cyber-Physical-Production Systems: Learning Module ‘From Paperbased to Paperless Assembly,’ in: 2018 IEEE 18th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT). Presented at the 2018 IEEE 18th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), IEEE, Mumbai, pp. 270–271. <https://doi.org/10.1109/ICALT.2018.00130>
- Merkel, L., Atug, J., Merhar, L., Schultz, C., Braunreuther, S., Reinhart, G., 2017. Teaching Smart Production: An Insight into the Learning Factory for Cyber-Physical Production Systems (LVP). *Procedia Manufacturing* 9, 269–274. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.034>
- Merz, R., Hoch, R., Drexel, D., 2020. A Cloud-Based Research and Learning Factory for Industrial Production. *Procedia Manufacturing* 45, 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.097>
- Meštrović Amanda, Aljinović, Marincic Žitnić, Peko Ivan, Gjeldum Nikola, Madleine Marko, Bilić Boženko, Bašić Andrej, and Veža Ivica.2024. “Artificial Intelligence Forecasting of Digital Twin Assembly Line Performances within Learning Factory Environment.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 213–220. Springer.
- Mladineo, M., Veza, I., Gjeldum, N., Crnjac, M., Aljinovic, A., Basic, A., 2019. Integration and testing of the RFID-enabled Smart Factory concept within the Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 31, 384–389. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.060>
- Moldavska, A., Abreu-Peralta, J.V., 2016. Learning Factories for the Operationalization of Sustainability Assessment Tools for Manufacturing: Bridging the Gap between Academia and Industry. *Procedia CIRP* 54, 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.104>
- Molina Vargas, D.G., Vijayan, K.K., Mork, O.J., 2020. Augmented Reality for Future Research Opportunities and Challenges in the Shipbuilding Industry: A Literature Review. *Procedia Manufacturing* 45, 497–503. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.063>

- Mortensen, S.T., Madsen, O., 2018. A Virtual Commissioning Learning Platform. *Procedia Manufacturing* 23, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.167>
- Mortensen, S.T., Nygaard, K.K., Madsen, O., 2019. Outline of an Industry 4.0 Awareness Game. *Procedia Manufacturing* 31, 309–315. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.049>
- Motz, Patrick, Elias Milloch, Lukas Christ, Tim Dickershoff, and Bernd Kuhlenkötter.2024. “Competency-Based Development and Implementation of a Learning Factory Environment for Human-Robot Interaction.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 302–312. Springer.
- Mourtzis, D., Angelopoulos, J., Dimitrakopoulos, G., 2020a. Design and development of a flexible manufacturing cell in the concept of learning factory paradigm for the education of generation 4.0 engineers. *Procedia Manufacturing* 45, 361–366. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.035>
- Mourtzis, D., Boli, N., Dimitrakopoulos, G., Zygomalas, S., Koutoupes, A., 2018. Enabling Small Medium Enterprises (SMEs) to improve their potential through the Teaching Factory paradigm. *Procedia Manufacturing* 23, 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.014>
- Mourtzis, D., Siatras, V., Angelopoulos, J., Panopoulos, N., 2020b. An Augmented Reality Collaborative Product Design Cloud-Based Platform in the Context of Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 45, 546–551. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.076>
- Mueller, Fabian Alexander, Nicolas Kremer, Sophie Weiler, Jochen Nelles, Cinzia Lacopetta, and Markus Hammer.2024. “From Sustainable Production to Smart Building Management: How to Develop a Comprehensive Sustainability Concept for a Learning Factory.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 329–336. Springer.
- Mukku, V.D., Lang, S., Reggelin, T., 2019. Integration of LiFi Technology in an Industry 4.0 Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 31, 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.037>
- Müller, B.C., Menn, J.P., Seliger, G., 2017. Procedure for Experiential Learning to Conduct Material Flow Simulation Projects, Enabled by Learning Factories. *Procedia Manufacturing* 9, 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.047>
- Müller-Frommeyer, L.C., Aymans, S.C., Bargmann, C., Kauffeld, S., Herrmann, C., 2017. Introducing Competency Models as a Tool for Holistic Competency Development in Learning Factories: Challenges, Example and Future Application. *Procedia Manufacturing* 9, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.015>
- Neacșu (Dobrișan), G.C., Nițu, E.L., Gavriluță, A.C., Vlad, G.G., Dobre, E.M., Gheorghe, M., Stan, M.M., 2024. Process Analysis and Modelling of Operator Performance in Classical and Digitalized Assembly Workstations. *Processes* 12, 533. <https://doi.org/10.3390/pr12030533>
- Nelles, Jochen, Fabian Alexander Müller, Kiran Ramnane, Erin Blackwell, Mandar P. Atre, Chris De Guzman, Cinzia Lacopeta, Sarah Bingen, and Markus Hanmer.2024. “Skill Awareness Framework for Learning Design – Re-focusing Experiential Learning Towards Skills that Matter Most in Times of GenAI.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 153–160. Springer.
- Nielsen, C.P., Malik, A.A., Hansen, D.G., Bilberg, A., 2019. Low-Cost 3D Scanning in a Smart Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 38, 824–831. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.163>
- Niemeyer, C.L., Gehrke, I., Müller, K., Küsters, D., Gries, T., 2020. Getting Small Medium Enterprises started on Industry 4.0 using retrofitting solutions. *Procedia Manufacturing* 45, 208–214. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.096>

- Nitu, E.L., Gavriluta, A.C., 2019. Lean Learning Factory at the University of Pitesti. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 591, 012095. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/591/1/012095>
- Noga, Marek, Martin Juhás, and Martin Gulan.2024. “Harnessing the Potential of Hybrid Virtual Commissioning for Enhanced Educational Ecosystems.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 89–96. Springer.
- Nöhring, F., Rieger, M., Erohin, O., Deuse, J., Kuhlenkötter, B., 2015. An Interdisciplinary and Hands-on Learning Approach for Industrial Assembly Systems. *Procedia CIRP* 32, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.112>
- Oberc, H., Fahle, S., Prinz, C., Kuhlenkötter, B., 2020. A Practical Training Approach in Learning Factories to Make Artificial Intelligence Tangible. *Procedia CIRP* 93, 467–472. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.074>
- Oberc, H., Kuhlenkötter, B., 2020. Methodology for the development of transformation concepts for digital challenges in the production site. *Procedia Manufacturing* 45, 485–490. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.060>
- Oberc, H., Prinz, C., Glogowski, P., Lemmerz, K., Kuhlenkötter, B., 2019. Human Robot Interaction – learning how to integrate collaborative robots into manual assembly lines. *Procedia Manufacturing* 31, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.005>
- Oberc, H., Reuter, M., Wannöffel, M., Kuhlenkötter, B., 2018. Development of a learning factory concept to train participants regarding digital and human centered decision support. *Procedia Manufacturing* 23, 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.011>
- Oberhausen, C., Plapper, P., 2015. Value Stream Management in the “Lean Manufacturing Laboratory.” *Procedia CIRP* 32, 144–149. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.087>
- Ogbemhe, J., Mpofu, K., Tlale, N., Ramatsetse, B., 2019. Application of robotics in rail car manufacturing learning factory: A case of welding complex joints. *Procedia Manufacturing* 31, 316–322. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.050>
- Ogorodnyk, O., Granheim, M., Holtskog, H., Ogorodnyk, I., 2017. Roller Skis Assembly Line Learning Factory – Development and Learning Outcomes. *Procedia Manufacturing* 9, 121–126. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.045>
- Ogorodnyk, O., Granheim, M.V., Holtskog, H., 2016. Preconditions for Learning Factory A Case Study. *Procedia CIRP* 54, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.076>
- Olearczyk, Jennifer, Max Juraschek, Benjamin Effner, and Christoph Herrmann.2024. “System Architecture for Extended Reality and Hybrid Learning Factory Environments.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 169–177. Springer.
- Omidvarkarjan, D., Conrad, J., Herbst, C., Klahn, C., Meboldt, M., 2020. Bender – An Educational Game for Teaching Agile Hardware Development. *Procedia Manufacturing* 45, 313–318. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.023>
- Önal Süzek, T., 2017. Using latent semantic analysis for automated keyword extraction from large document corpora. *Turk J Elec Eng & Comp Sci* 25, 1784–1794. <https://doi.org/10.3906/elk-1511-203>
- Orozco, E., Cárdenas, P.C., López, J.A., Rodriguez, C.K., 2024. Low-cost desktop learning factory to support the teaching of artificial intelligence. *HardwareX* 18, e00528. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00528>

- Padovano, Antonio, Chiara Sammarco, Nasia Balakera, and Fotios Konstantinidis.2024. “Towards Sustainable Cognitive Digital Twins: A Portfolio Management Tool for Waste Mitigation.”*Computers & Industrial Engineering* 198: 110715. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110715>
- Panagiotopoulou, Vasiliki C., Aikaterini Paraskevopoulou, Milda Margairytė, Elitsa Ivova Petkova, and Panagiotis Stavropoulos.2024. “Customisable Training Programme on Best Industrial Practices for Sustainability, Circular Economy and Energy Efficiency.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 382–389. Springer
- Papacharalampopoulos, Alexios, Anamaria Korfiati, and Panagiotis Stavropoulos.2024. “Discussing Key Aspects of Industry 5.0 in Teaching Factories: Manufacturing Processes Level.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 337–345. Springer.
- Pechmann, A., Wermann, J., Colombo, A.W., Zarte, M., 2019. Using a semi-automated job-shop production system model to prepare students for the challenges of Industrial Cyber-Physical Systems. *Procedia Manufacturing* 31, 377–383. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.059>
- Pereira, Francisco, Manuel Patrício, Rui Pedro Lopes, and Paulo Leitão.2024. “An Augmented Reality Intelligent Guide for the Automotive Industry.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 197–204. Springer.
- Permin, Eike, Lina Castillo, Dillon Weber, Sayyam Alam, and Christoph Moisel.2024. “Perspectives, Application Gaps, and Involvement of Citizen Developers in Digital Factory Management.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 11–19. Springer.
- Petrusch, N., Schliephack, W., Kohl, H., 2020. Evaluation Model for Mobility Design of Learning Factories. *Procedia CIRP* 91, 659–664. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.224>
- Petrusch, N., Sieckmann, F., Menn, J.P., Kohl, H., 2019. Integration of Active Pharmaceutical Ingredient production into a pharmaceutical Lean Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 31, 245–250. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.039>
- Pilati, F., Faccio, M., Gamberi, M., Regattieri, A., 2020. Learning manual assembly through real-time motion capture for operator training with augmented reality. *Procedia Manufacturing* 45, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.093>
- Pittschellis, R., 2015. Multimedia Support for Learning Factories. *Procedia CIRP* 32, 36–40. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.001>
- Plorin, D., Jentsch, D., Hopf, H., Müller, E., 2015. Advanced Learning Factory (aLF) – Method, Implementation and Evaluation. *Procedia CIRP* 32, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.115>
- Plorin, Julia, and Egon Müller.2014. “Development of a Learning Factory Concept for Competence Development in Energy Efficiency.”*Procedia CIRP* 17: 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.106>
- Posada, J., Zorrilla, M., Dominguez, A., Simoes, B., Eisert, P., Stricker, D., Rambach, J., Dollner, J., Guevara, M., 2018. Graphics and Media Technologies for Operators in Industry 4.0. *IEEE Comput. Graph. Appl.* 38, 119–132. <https://doi.org/10.1109/MCG.2018.053491736>
- Posselt, G., Böhme, S., Aymans, S., Herrmann, C., Kauffeld, S., 2016. Intelligent Learning Management by Means of Multi-sensory Feedback. *Procedia CIRP* 54, 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.061>
- Potthoff, Leonie, Rolf Nausstead, and Lisa Gunnemann.2024. “Escape Rooms as a Tool for Sustainable Knowledge Transfer in Learning Factories on the Topic of Lean Management.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 249–257. Springer.

- Prati, Bastian, Norman Günther, Simon Wilbers, Ron van de Sand, and Jörg Reiff-Stephan.2024. “Transfer of Industry 4.0 Knowledge to SMEs Employing the Concept of a Learning Factory as a Roadshow.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 286–293. Springer.
- Prinz, C., Kreggenfeld, N., Kuhlenkötter, B., 2018. Lean meets Industrie 4.0 – a practical approach to interlink the method world and cyber-physical world. *Procedia Manufacturing* 23, 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.155>
- Prinz, C., Kreimeier, D., Kuhlenkötter, B., 2017. Implementation of a Learning Environment for an Industrie 4.0 Assistance System to Improve the Overall Equipment Effectiveness. *Procedia Manufacturing* 9, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.004>
- Prinz, C., Morlock, F., Freith, S., Kreggenfeld, N., Kreimeier, D., Kuhlenkötter, B., 2016. Learning Factory Modules for Smart Factories in Industrie 4.0. *Procedia CIRP* 54, 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.105>
- Protic, A., Jin, Z., Marian, R., Abd, K., Campbell, D., Chahl, J., 2020. Implementation of a Bi-Directional Digital Twin for Industry 4 Labs in Academia: A Solution Based on OPC UA, in: 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Presented at the 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), IEEE, Singapore, Singapore, pp. 979–983. <https://doi.org/10.1109/IEEM45057.2020.9309953>
- Purdon, K., Setati, T., Marais, S., 2021. Manufacturing and Evaluation of the Open-Source AR3 Robot Arm for Educational Uses, in: 2021 Rapid Product Development Association of South Africa - Robotics and Mechatronics - Pattern Recognition Association of South Africa (RAPDASA-RobMech-PRASA). Presented at the 2021 Rapid Product Development Association of South Africa - Robotics and Mechatronics - Pattern Recognition Association of South Africa (RAPDASA-RobMech-PRASA), IEEE, South Africa, pp. 01–05. <https://doi.org/10.1109/RAPDASA-RobMech-PRAS53819.2021.9829064>
- Quinn, W., Cionca, V., Withephanich, K., Ozturk, C., 2022. A Learning Factory Framework: Challenges and Solutions for an Irish University\*. *IFAC-PapersOnLine* 55, 631–636. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.471>
- Ralph, B.J., Schwarz, A., Stockinger, M., 2020. An Implementation Approach for an Academic Learning Factory for the Metal Forming Industry with Special Focus on Digital Twins and Finite Element Analysis. *Procedia Manufacturing* 45, 253–258. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.103>
- Ramsauer, Christian, Kai Ridele, Matthias Wolf, and Markus Hamner ,2024. “Experiences from 10 years LEAD Factory and a Roadmap for the Next Decade.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 3–12. Springer.
- Ranf, Alexander, Manfred Wanninger, Daniel Gorsek, Daniel Schulze, Christopher Prinz, and Bernd Kuhlenkötter.2024. “Design and Validation of a Learning Factory with Adaptive Human-Robot Collaboration.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 293–301. Springer.
- Ranf, Alexander, Manfred Wanninger, Daniel Gorsek, Daniel Schulze, Christopher Prinz, and Bernd Kuhlenkötter.2024. “In-house Workshop Supported by Learning Factory Infrastructure as a Basis for the Human-Centred, Participative Design of Flexible Production Planning Based on Platform-Based Knowledge Management.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 302–312. Springer.



- Rasovic, N., Vučina, A., Obad, M., 2019. Stress analysis of lifting table using finite element method. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 659, 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012012>
- Rasovska, Iveta, Robert Glawar, Andreas Sihm, and Thomas Wögerer.2022. “A Framework for Competence Development in Learning Factories for Digital Transformation.”*Procedia CIRP* 107: 321–326. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.079>
- Rauch, E., Morandell, F., Matt, D.T., 2019. AD Design Guidelines for Implementing I4.0 Learning Factories. *Procedia Manufacturing* 31, 239–244. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.038>
- Reining, Christopher, Tobias Wichmann, and Eberhard Abele.2022. “Digital Learning Factory Modules for Teaching Data Analytics in Production.”*Procedia CIRP* 107: 327–332. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.080>
- Reining, N., Kauffeld, S., Herrmann, C., 2019. Students’ interactions: Using video data as a mean to identify competences addressed in learning factories. *Procedia Manufacturing* 31, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.001>
- Reise, C., Phan, L., 2016. Sustainable Manufacturing in Vietnamese Engineering Education – Approaches from the Vietnamese-German University. *Procedia CIRP* 40, 341–346. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.059>
- Rentzos, Loucas, Dimitris Mavrikios, Panagiotis Stavropoulos, George Chryssolouris, Owen F. Kiritsis, and Servet Kayis.2014. “Integrating the Teaching Factory Concept in Manufacturing Education.”*Procedia CIRP* 17: 189–194. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.129>
- Reuter, M., Oberc, H., Wannöffel, M., Kreimeier, D., Klippert, J., Pawlicki, P., Kuhlenkötter, B., 2017. Learning Factories’ Trainings as an Enabler of Proactive Workers’ Participation Regarding Industrie 4.0. *Procedia Manufacturing* 9, 354–360. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.020>
- Ricker, Patrick, Johannes Arndt, Anna Charlotte Kinder, Till Kunkel, Gunnar Oja, Leona Omann, and Kirsten Tracht.2024. “Improving Human-Robot Interaction Through Decision Support and Workplace-Based Learning: Prototype of a Workshop Assistance System for Adaptive Task Sharing Between Robots and Humans.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 285–292. Springer.
- Rieder, Jonas S. I., and Doris Aschenbrenner.2024. “A User-Study on Proximity-Based Scene Transitioning for Contextual Information Display in Learning and Smart Factories.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 205–213. Springer.
- Riemann, T., Kreß, A., Roth, L., Klipfel, S., Metternich, J., Grell, P., 2020. Agile Implementation of Virtual Reality in Learning Factories. *Procedia Manufacturing* 45, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.029>
- Roll, M., Ifenthaler, D., 2021. Learning Factories 4.0 in technical vocational schools: can they foster competence development? *Empirical Res Voc Ed Train* 13, 20. <https://doi.org/10.1186/s40461-021-00124-0>
- Ropin, H., Pflieger-Landthaler, A., Irsa, W., 2020. A FabLab as integrative part of a Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 45, 355–360. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.033>
- Rosenmeyer, Janik, and Joachim Metternich.2024. “Human-Centered Design for Digital Machine Learning Assistance Systems in Work-Based Learning.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 155–162. Springer.
- Rossmeißl, T., Groß, E., Tzempetonidou, M., Siegert, J., 2019. Living Learning Environments. *Procedia Manufacturing* 31, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.004>

- Rouschaal, Philipp, Philipp Schwarzl, Matthias Wolf, Maria Hulla, and Christian Ramsauer.2024. “Towards a Learning Factory-Based Training for SMEs for Flexible Assembly Planning.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 294–301. Springer.
- Rüdele, Kai, Markus Hammer, and Matthias Wolf.2024. “Resource Productivity Taught Well: How Learning Factories Can Support Knowledge Transfer on a Multifaceted Subject.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 36–46. Springer.
- Rüdele, Kai, Thomas Streßler, and Christian Ramsauer.2024. “Circular Economy in Learning Factories Using the Example of Transfer Molding.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 349–357. Springer.
- Rybski, C., Jochem, R., 2016. Benefits of a Learning Factory in the Context of Lean Management for the Pharmaceutical Industry. *Procedia CIRP* 54, 31–34. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.106>
- Sackey, S.M., Bester, A., Adams, D., 2017. INDUSTRY 4.0 LEARNING FACTORY DIDACTIC DESIGN PARAMETERS FOR INDUSTRIAL ENGINEERING EDUCATION IN SOUTH AFRICA. *SAJIE* 28. <https://doi.org/10.7166/28-1-1584>
- Sadaj, E.A., Hulla, M., Ramsauer, C., 2020. Design Approach for a Learning Factory to train Services. *Procedia Manufacturing* 45, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.064>
- Saffert, Anne-Sophie, Marc Schmalz, Michael Spitzhir, and Thomas Linner.2024. “A Cyber-Physical Toolbox for Teaching Digital Construction – Technical Configuration, Learning Tactics and Hands-On Testing and Evaluation in Dedicated Courses.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 83–91. Springer.
- Sala, R., Pirola, F., Pezzotta, G., 2023. On the development of the Digital Shadow of the Fischertechnik Training Factory Industry 4.0: an educational perspective. *Procedia Computer Science* 217, 640–649. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.260>
- Salagianni, Konstantina, Panagiotis Aivaliotis, Panagiotis Karagiannis, Katerina Bakopoulou, and Sotiris Makris.2024. “Virtual Reality Training Applications Evaluation Framework Towards Industry’s Human-Centricity.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 63–70. Springer.
- Salcedo Gil, Raquel, Anna-Sophie Ulfert, Sonja Rispens, and Pascale Le Blanc.2024. “Optimizing Training for Human-Robot Collaboration in Learning Factories: An Employee-Centered Perspective.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 249–257. Springer.
- Sallati, C., Bertazzi, J.D.A., Schützer, K., 2019. Professional skills in the Product Development Process: the contribution of learning environments to professional skills in the Industry 4.0 scenario. *Procedia CIRP* 84, 203–208. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.214>
- Sanchez Giralt, J.A., Tusman, G., Wallin, M., Hallback, M., Perez Lucendo, A., Sanchez Galindo, M., Abad Santamaria, B., Paz Calzada, E., Garcia Garcia, P., Rodriguez Huerta, D., Canabal Berlanga, A., Suarez-Sipmann, F., 2024. Clinical validation of a capnodynamic method for measuring end-expiratory lung volume in critically ill patients. *Crit Care* 28, 142. <https://doi.org/10.1186/s13054-024-04928-w>
- Sanderson, David, Zi Wang, David Bainbridge, and Svetan Ratchev.2024. “Omnifactory: A National Training and Research Testbed for Smart Manufacturing Systems.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 321–328. Springer.
- Sangwan, K.S., Herrmann, C., Soni, M.S., Jaxhar, S., Posselt, G., Sihag, N., Bhakar, V., 2018. Comparative Analysis for Solar Energy Based Learning Factory: Case Study for TU Braunschweig and BITS Pilani. *Procedia CIRP* 69, 407–411. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.018>

- Šaravanja, Luka, Željko Stojkić, Igor Bošnjak, and Ivica Veža.2024. “The Concept of Digital Transformation of SMEs Through the Implementation of ERP and MES Systems and Lean Tools.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 241–248. Springer.
- Schäfers, P., Mütze, A., Nyhuis, P., 2019. Integrated Concept for Acquisition and Utilization of Production Feedback Data to Support Production Planning and Control in the Age of Digitalization. *Procedia Manufacturing* 31, 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.036>
- Schallock, B., Rybski, C., Jochem, R., Kohl, H., 2018. Learning Factory for Industry 4.0 to provide future skills beyond technical training. *Procedia Manufacturing* 23, 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.156>
- Schmidbauer, Christina, Titanilla Komenda, and Sebastian Schlund.2020. “Teaching Cobots in Learning Factories – User and Usability-Driven Implications.”*Procedia Manufacturing* 45: 398–404. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.043>
- Schmidl, E., Fischer, E., Steindl, J., Wenk, M., Franke, J., 2021. Reinforcement learning for energy reduction of conveying and handling systems. *Procedia CIRP* 97, 290–295. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.240>
- Scholz, M., Kreitlein, S., Lehmann, C., Böhner, J., Franke, J., Steinhilper, R., 2016. Integrating Intralogistics into Resource Efficiency Oriented Learning Factories. *Procedia CIRP* 54, 239–244. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.067>
- Schreiber, S., Funke, L., Tracht, K., 2016. BERTHA - A Flexible Learning Factory for Manual Assembly. *Procedia CIRP* 54, 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.163>
- Schreiber, Sonja, Lars Funke, and Kirsten Tracht.2016. “BERTHA – A Flexible Learning Factory for Manual Assembly.”*Procedia CIRP* 54: 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.163>
- Schröder, Adrian, Michael Spitzhirn, Lina Katrin Lau, and Tobias Kutzler.2024. “Interoperability of Digitization Solutions as a Crucial Element for Collaborative, Hybrid Work Planning.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2, 222–232. Springer.
- Schrohn, Timo, Vera Hummel, Jan Schumacher, and Konrad von Leipzig.2024. “Investigation of AI Algorithms for the Clustering and Combination of Pick and Stow Operations in Warehouses and Development of a Learning Module for Undergraduates.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 221–232. Springer.
- Schuh, G., Prote, J.-P., Dany, S., Cremer, S., Molitor, M., 2017. Classification of a Hybrid Production Infrastructure in a Learning Factory Morphology. *Procedia Manufacturing* 9, 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.007>
- Schuhmacher, J., Hummel, V., 2016. Decentralized Control of Logistic Processes in Cyber-physical Production Systems at the Example of ESB Logistics Learning Factory. *Procedia CIRP* 54, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.095>
- Schuhmacher, J., Hummel, V., 2019. Self-organization of changeable intralogistics systems at the ESB Logistics Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 31, 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.031>
- Schulze, C., Blume, S., Herrmann, C., Thiede, S., 2019. Energy Storage Technologies to foster Energy Flexibility in Learning Factories. *Procedia Manufacturing* 31, 330–336. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.052>
- Schumacher, B.C., Kohl, H., 2020. Learning Environment for Introduction in Discrete-Event Simulation for Design and Improvement of New and Existing Material Flow Systems, in: 2020

- Winter Simulation Conference (WSC). Presented at the 2020 Winter Simulation Conference (WSC), IEEE, Orlando, FL, USA, pp. 3224–3235. <https://doi.org/10.1109/WSC48552.2020.9384099>
- Schumacher, B.C., Steinbach, A., Vi, N.H., Yükseltürk, A., Kohl, H., Krüger, J., Quoc, H.N., 2020. Design alternatives for internationally distributed learning factories in global production engineering. *Procedia Manufacturing* 45, 392–397. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.042>
- Schützer, K., Rodrigues, L.F., Bertazzi, J.A., Durão, L.F.C.S., Zancul, E., 2017. Learning Environment to Support the Product Development Process. *Procedia Manufacturing* 9, 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.018>
- Schwinn, Aileen, Christian Köhler, Lukas Lang, and Michael Spitzhirn.2024. “Connecting Work System Planning, Optimization and Training Processes via Simulation Model: Use Case and Critical Reflection.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 97–104. Springer.
- Seitz, K.-F., Nyhuis, P., 2015. Cyber-Physical Production Systems Combined with Logistic Models – A Learning Factory Concept for an Improved Production Planning and Control. *Procedia CIRP* 32, 92–97. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.220>
- Seyfried, Stefan, Lukas Nagel, Astrid Weyand, and Matthias Weigold.2024. “A Learning Factory as a Competence Centre for Climate-Neutral Production.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 321–328. Springer.
- Shakirov, E., Brandl, F.J., Bauer, H., Kattner, N., Becerril, L., Fortin, C., Lindemann, U., Reinhart, G., Uzhinsky, I., 2019. Integration of Engineering and Manufacturing Change Management: Infrastructure and Scenarios for Teaching and Demonstration. *Procedia CIRP* 81, 535–540. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.151>
- Sieckmann, F., Petrusch, N., Kohl, H., 2020. Effectivity of Learning Factories to convey problem solving competencies. *Procedia Manufacturing* 45, 228–233. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.099>
- Siegert, J., Schlegel, T., Zarco, L., Bauernhansl, T., 2020a. Order-Oriented Learning Factories: Why and How Learning Factories Have to Adapt. *Procedia Manufacturing* 45, 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.053>
- Siegert, J., Zarco, L., Schlegel, T., Bauernhansl, T., 2020b. Software Control System Requirements for Ultra-Flexible Learning Factories. *Procedia Manufacturing* 45, 442–447. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.050>
- Sievers, T.S., Schmitt, B., Rückert, P., Petersen, M., Tracht, K., 2020. Concept of a Mixed-Reality Learning Environment for Collaborative Robotics. *Procedia Manufacturing* 45, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.034>
- Simons, S., Abé, P., Nesar, S., 2017. Learning in the AutFab – The Fully Automated Industrie 4.0 Learning Factory of the University of Applied Sciences Darmstadt. *Procedia Manufacturing* 9, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.023>
- Singh, I., Centea, D., Elbestawi, M., 2019. IoT, IIoT and Cyber-Physical Systems Integration in the SEPT Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 31, 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.019>
- Sörensen, A., Mitra, R., Hulthén, E., Hartmann, T., Clausen, E., 2022. Bringing the Entrepreneurial Mindset into Mining Engineering Education. *Mining, Metallurgy & Exploration* 39, 1333–1344. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00620-1>

- Sorko, S.R., Trattner, C., Komar, J., 2020. Implementing AR/MR – Learning factories as protected learning space to rise the acceptance for Mixed and Augmented Reality devices in production. *Procedia Manufacturing* 45, 367–372. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.037>
- Spillane, D.R., Menold, J., Parkinson, M.B., 2020. Broadening participation in learning factories through Industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 45, 534–539. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.074>
- Spillias, S., Tuohy, P., Andreotta, M., Annand-Jones, R., Boschetti, F., Cvitanovic, C., Duggan, J., Fulton, E., Karcher, D., Paris, C., Shellock, R., Trebilco, R., 2023. Human-AI Collaboration to Identify Literature for Evidence Synthesis. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3099291/v1>
- Srivastava, D.K., Kumar, V., Ekren, B.Y., Upadhyay, A., Tyagi, M., Kumari, A., 2022. Adopting Industry 4.0 by leveraging organisational factors. *Technological Forecasting and Social Change* 176, 121439. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121439>
- Stavropoulos, Panagiotis, Harilaos Bikas, and Dimitris Mourtzis. 2018. “Collaborative Machine Tool Design: The Teaching Factory Paradigm.” *Procedia Manufacturing* 23: 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.004>
- Sterne, J.A.C., Savović, J., Page, M.J., Elbers, R.G., Blencowe, N.S., Boutron, I., Cates, C.J., Cheng, H.-Y., Corbett, M.S., Eldridge, S.M., Emberson, J.R., Hernán, M.A., Hopewell, S., Hróbjartsson, A., Junqueira, D.R., Jüni, P., Kirkham, J.J., Lasserson, T., Li, T., McAleenan, A., Reeves, B.C., Shepperd, S., Shrier, I., Stewart, L.A., Tilling, K., White, I.R., Whiting, P.F., Higgins, J.P.T., 2019. RoB 2: a revised tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ* 14898. <https://doi.org/10.1136/bmj.14898>
- Stojkić, Ž., Bošnjak, I., 2019. Development of Learning Factory at FSRE, University of Mostar. *Procedia Manufacturing* 31, 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.029>
- Streitzig, C., Oetting, A., 2016. Railway Operation Research Centre – A Learning Factory for the Railway Sector. *Procedia CIRP* 54, 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.071>
- Sudhoff, M., Prinz, C., Kuhlenkötter, B., 2020. A Systematic Analysis of Learning Factories in Germany - Concepts, Production Processes, Didactics. *Procedia Manufacturing* 45, 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.081>
- Svasta, P., Illyefalvi-Vitez, Z., Illes, B., 2016. Learning factories for open schooling and collaboration on science education, in: 2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Presented at the 2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), IEEE, Pilsen, Czech Republic, pp. 494–499. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2016.7563248>
- Szabó, Dániel, Fanni Csikós, Viktória Panker, and Izabella Kovács. 2024. “Learning Factories in Practice: The Example and Development Proposal of Mini Company Located in the Automotive Science Park Based on International Best Practices.” *Engineering Proceedings* 79 (56). <https://doi.org/10.3390/engproc2024079056>
- Tan, H.-S., Ivander, Oktarina, R., Reynaldo, V., Sharina, C., 2020. Conceptual development of learning factory for industrial engineering education in Indonesia context as an enabler of students’ competencies in industry 4.0 era. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 426, 012123. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012123>
- Teichmann, M., Ullrich, A., Gronau, N., 2019. Subject-oriented learning - A new perspective for vocational training in learning factories. *Procedia Manufacturing* 31, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.012>

- Teichmann, Malte, Virginie Lentkemann, and Norbert Gronau.2024. “Digitalization, Demographic Change and Decarbonization: Eight Pivotal Competencies for Learning Factories.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 313–320. Springer.
- Tharot, K., Duong, Q.B., Riel, A., Thiriet, J.-M., 2023. A Cybersecurity Training Concept for Cyber-physical Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 120, 1375–1380. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.179>
- Thiede, B., Posselt, G., Kauffeld, S., Herrmann, C., 2017. Enhancing Learning Experience in Physical Action-orientated Learning Factories Using a Virtually Extended Environment and Serious Gaming Approaches. *Procedia Manufacturing* 9, 238–244. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.042>
- Thiede, S., Juraschek, M., Herrmann, C., 2016. Implementing Cyber-physical Production Systems in Learning Factories. *Procedia CIRP* 54, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.098>
- Thiede, Sebastian, Shui Yang, and Poorya Ghafoorpoor Yazdi.2024. “Circular Manufacturing Systems in Learning Factories.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 374–381. Springer.
- Tisch, M., Hertle, C., Abele, E., Metternich, J., Tenberg, R., 2016. Learning factory design: a competency-oriented approach integrating three design levels. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 29, 1355–1375. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1033017>
- Tisch, M., Hertle, C., Cachay, J., Abele, E., Metternich, J., Tenberg, R., 2013. A Systematic Approach on Developing Action-oriented, Competency-based Learning Factories. *Procedia CIRP* 7, 580–585. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.036>
- Tisch, M., Laudemann, H., Kreß, A., Metternich, J., 2017. Utility-based Configuration of Learning Factories Using a Multidimensional, Multiple-choice Knapsack Problem. *Procedia Manufacturing* 9, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.017>
- Tisch, Michael, and Jan Metternich.2017. “Potentials and Limits of Learning Factories in Research, Innovation Transfer, Education, and Training.”*Procedia Manufacturing* 9: 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.027>
- Tritsch, U., and H. Brüggemann.2024. “Learning Environment for Digital Twin Technologies and M2M Communication.”In Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1, 129–136. Springer.
- Tvenge, N., Martinsen, K., Holtskog, H., 2019. Learning factories as laboratories for socio-technical experiments. *Procedia Manufacturing* 31, 337–342. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.053>
- Tvenge, N., Martinsen, K., Kolla, S.S.V.K., 2016. Combining Learning Factories and ICT- based Situated Learning. *Procedia CIRP* 54, 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.031>
- Tvenge, N., Ogorodnyk, O., 2018. Development of evaluation tools for learning factories in manufacturing education. *Procedia Manufacturing* 23, 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.157>
- Tvenge, N., Ogorodnyk, O., Østbø, N.P., Martinsen, K., 2020. Added value of a virtual approach to simulation-based learning in a manufacturing learning factory. *Procedia CIRP* 88, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.007>
- Umeda, Y., Hongo, Y., Goto, J., Kondoh, S., 2022. Digital Triplet and its Implementation on Learning Factory. *IFAC-PapersOnLine* 55, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.160>
- Umeda, Y., Ota, J., Shirafuji, S., Kojima, F., Saito, M., Matsuzawa, H., Sukekawa, T., 2020. Exercise of digital kaizen activities based on ‘digital triplet’ concept. *Procedia Manufacturing* 45, 325–330. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.025>

- Vailati, S., Zanchi, M., Cimini, C., Lagorio, A., 2023. A Classification Framework for Analysing Industry 4.0 Learning Factories, in: Alfnes, E., Romsdal, A., Strandhagen, J.O., Von Cieminski, G., Romero, D. (Eds.), *Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Responsible Manufacturing, Service, and Logistics Futures*, IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 392–402.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-031-43666-6\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43666-6_27)
- Van Der Veer, A., Madern, T., Van Lenthe, F.J., 2024. Tunneling, cognitive load and time orientation and their relations with dietary behavior of people experiencing financial scarcity – an AI-assisted scoping review elaborating on scarcity theory. *Int J Behav Nutr Phys Act* 21, 26.  
<https://doi.org/10.1186/s12966-024-01576-9>
- Van Dijk, S.H.B., Brusse-Keizer, M.G.J., Bucsán, C.C., Van Der Palen, J., Doggen, C.J.M., Lenferink, A., 2023. Artificial intelligence in systematic reviews: promising when appropriately used. *BMJ Open* 13, e072254. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2023-072254>
- Vázquez-Hurtado, C., Altamirano-Avila, E., Roman-Flores, A., Vargas-Martinez, A., 2023. Towards a Mixed Virtual Reality Environment Implementation to Enable Industrial Robot Programming Competencies within a Cyber-Physical Factory, in: *2023 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. Presented at the 2023 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), IEEE, Kuwait, Kuwait, pp. 1–8.  
<https://doi.org/10.1109/EDUCON54358.2023.10125175>
- Vázquez-Hurtado, Carlos, Edison Altamirano-Avila, Consuelo Rodriguez-Padilla, Rafiq Ahmad, José I. Gómez Quiñones, José Manuel Rodríguez-Delgado, and Adán Flores-Ramírez. 2024. “Virtual Twin for the Smart Factory as a Tool to Enable Robotics Skills Acquisition.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 1, 113–120. Springer.
- Veza, I., Gjeldum, N., Mladineo, M., 2015. Lean Learning Factory at FESB – University of Split. *Procedia CIRP* 32, 132–137. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.223>
- Veza, I., Gjeldum, N., Mladineo, M., Celar, S., Peko, I., Cotic, M., Ljumovic, P., Stojkic, Z., 2017. Development of Assembly Systems in Lean Learning Factory at the University of Split. *Procedia Manufacturing* 9, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.038>
- Vieira, Renan Esposito, Eduardo Zancul, and Klaus Schützer. 2024. “Learning Factories in New Business Development: A Framework Proposition.” In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 161–168. Springer.
- Vijayan, K.K., Mork, O.J., 2020. IdeaLab: A Learning Factory Concept for Norwegian Manufacturing SME. *Procedia Manufacturing* 45, 411–416.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.045>
- Vijayan, K.K., Mork, O.J., Giske, L.A.L., 2019. Integration of a Case Study into Learning Factory for Future Research. *Procedia Manufacturing* 31, 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.041>
- Vogel, C., Lindner, F., Kratzsch, A., 2023. Practical Engineering Education: Use of collaborative robots in the context of Industry 5.0, in: *2023 World Engineering Education Forum - Global Engineering Deans Council (WEEF-GEDC)*. Presented at the 2023 World Engineering Education Forum - Global Engineering Deans Council (WEEF-GEDC), IEEE, Monterrey, Mexico, pp. 1–11.  
<https://doi.org/10.1109/WEEF-GEDC59520.2023.10344213>
- Vogt, M., Uhlig, B., Sangwan, K.S., Herrmann, C., Thiede, S., 2019. Implementation of a cyber-physical cooling storage station in a learning factory. *Procedia Manufacturing* 31, 142–147.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.022>

- Vojtko, Tadeáš, Anna Vargová, Martin Gulan, and Martin Juhás.2024. “An IoT Learning Factory Demonstrator of Remote Diagnostics Using Low-Cost Didactic Devices.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 28–38. Springer.
- Wagner, P., Prinz, C., Wannöffel, M., Kreimeier, D., 2015. *Learning Factory for Management, Organization and Workers’ Participation*. *Procedia CIRP* 32, 115–119.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.118>
- Wagner, U., AlGeddawy, T., ElMaraghy, H., Müller, E., 2014. *Product Family Design for Changeable Learning Factories*. *Procedia CIRP* 17, 195–200.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.119>
- Wagner, U., AlGeddawy, T., ElMaraghy, H., Müller, E., 2015. *Developing products for changeable learning factories*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 9, 146–158.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.11.001>
- Wagner, Ulf, Tarek AlGeddawy, Hoda A. ElMaraghy, and Eberhard Müller.2012. “The State-of-the-Art and Prospects of Learning Factories.”*Procedia CIRP* 3: 109–114.
- Wahjusaputri, S., Bunyamin, B., 2022. *Development of teaching factory competency-based for vocational secondary education in Central Java, Indonesia*. *IJERE* 11, 353.  
<https://doi.org/10.11591/ijere.v11i1.21709>
- Wang, Kaifeng, Lei Wang, Wenqiang Yu, Fang He, Shuhan Ren, and Peihua Gu.2024. “Progress and Reflection of Learning Factory.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 108–116. Springer.
- Wank, A., Adolph, S., Anokhin, O., Arndt, A., Anderl, R., Metternich, J., 2016. *Using a Learning Factory Approach to Transfer Industrie 4.0 Approaches to Small- and Medium-sized Enterprises*. *Procedia CIRP* 54, 89–94. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.068>
- Wanyama, Tom, Dan Centea, and Moein Mehrtash.2024. “Learning Factory for Integrating Engineering Technology and Business Management Education.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 92–99. Springer.
- Weeber, M., Frötschner, B., Böhner, J., Steinhilper, R., 2016a. *Energy Efficiency in Assembly Systems*. *Procedia CIRP* 44, 334–340. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.021>
- Weeber, M., Gebbe, C., Lutter-Günther, M., Böhner, J., Glasschroeder, J., Steinhilper, R., Reinhart, G., 2016b. *Extending the Scope of Future Learning Factories by Using Synergies Through an Interconnection of Sites and Process Chains*. *Procedia CIRP* 54, 124–129.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.102>
- Weißflog, Luise, Pierre Grzona, and Matthias Thier.2024. “Balancing the Three-Legged Stool of Learning Factories.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 67–74. Springer.
- Wengle, Markus, and Thomas Dietmüller.2024. “‘Zukunftsfabrik Bodensee’: A Production Network Combined of Two Different Learning Factories.”In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024*, Volume 2, 137–144. Springer.
- Weyand, A., Lehnert, S., Alish, V., Weigold, M., 2023. *Approach for the implementation of resource analysis methods in learning factories*. *Production & Manufacturing Research* 11, 2209152.  
<https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2209152>
- Weyand, Astrid, Sebastian Thiede, Jeff Mangers, Peter Plapper, Atacan Ketenci, Matthias Wolf, Vasiliki C. Panagiotopoulou, Panagiotis Stavropoulos, Gesine Köppe, Thomas Gries, and Matthias



- Weigold.2022. "Sustainability and Circular Economy in Learning Factories – Case Studies." *Procedia Manufacturing* 55: 559–566. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4080162>
- Wiech, M., Böllhoff, J., Metternich, J., 2017. Development of an Optical Object Detection Solution for Defect Prevention in a Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 9, 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.037>
- Wienbruch, T., Leineweber, S., Kreimeier, D., Kuhlenkötter, B., 2018. Evolution of SMEs towards Industrie 4.0 through a scenario based learning factory training. *Procedia Manufacturing* 23, 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.007>
- Witeck, G.R., Alves, A.C., 2023. Worldwide Lean Learning Factories, in: Volume 8: Engineering Education. Presented at the ASME 2023 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, New Orleans, Louisiana, USA, p. V008T09A017. <https://doi.org/10.1115/IMECE2023-112983>
- Wolf, M., Ketenci, A., Weyand, A., Weigold, M., Ramsauer, C., 2022. Learning Factories and Sustainable Engineering—Competencies for Students and Industrial Workforce. *IEEE Eng. Manag. Rev.* 50, 115–122. <https://doi.org/10.1109/EMR.2022.3195452>
- Wollenberg, Tim, Vera Hummel, Jan Schumacher, and Konrad von Leipzig.2024. "Investigation of Digital Twin Awareness Factors in Learning Factory Environment."In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 145–154. Springer.
- Xie, Yuzhuo, Weimin Zhang, Ziwei Jia, and Liyan Zhao.2024. "VR-Based Learning Platform for the Application of BPP Classification in 5G Learning Factory."In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 1*, 71–78. Springer.
- Xu, P., Wei, Z., Shuai, W., 2023. Feature Model Construction Of Learning Factories Based On Authentic Learning Theory: A Case Study Of The School Of Micro-Nano Electronics At Zhejiang University. <https://doi.org/10.21427/KTZE-FV54>
- Yang, S., Liu, H., Zhang, Y., Arndt, T., Hofmann, C., Häfner, B., Lanza, G., 2020. A Data-Driven Approach for Quality Analytics of Screwing Processes in a Global Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 45, 454–459. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.052>
- Zancul, E., Martins, H.O., Lopes, F.P., Da Silva Neto, F.A.T.V., 2020. Machine Vision applications in a Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 45, 516–521. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.069>
- Zarte, M., Wermann, J., Heeren, P., Pechmann, A., 2019. Concept, Challenges, and Learning Benefits Developing an Industry 4.0 Learning Factory with Student Projects, in: 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Presented at the 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), IEEE, Helsinki, Finland, pp. 1133–1138. <https://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972065>
- Zhang, W., Cai, W., Min, J., Fleischer, J., Ehrmann, C., Prinz, C., Kreimeier, D., 2020. 5G and AI Technology Application in the AMTC Learning Factory. *Procedia Manufacturing* 45, 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.066>
- Zhang, Yang, Christian Poulsen, Cong Liu, and Lotta Jin Hwa Salling.2024. "Designing of an AM Learning Factory Using Interactive Videos as a Didactic Approach."In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2*, 21–27. Springer.
- Zumpe, Florian, Martin Zumpe, Marc Münnich, Marian Süße, and Steffen Ihlenfeldt.2024. "Application of the Learning Factory Morphology to Integrate a Hydrogen Energy System into the E<sup>3</sup>-factory."In *Proceedings of the 14th Conference on Learning Factories 2024, Volume 2*, 178–188. Springer.

