



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

METODI DI INTELLIGENZA ARTIFICIALE A SUPPORTO
DELLO SVILUPPO DI PRODOTTI ECOSOSTENIBILI NELLA
MANIFATTURA ADDITIVA

ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS FOR DEVELOPING
ECO-SUSTAINABLE PRODUCTS IN ADDITIVE
MANUFACTURING

RELATORE:

PROF. MARCO MANDOLINI

TESI DI LAUREA DI:

LORENZO TEODORI

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

I. Ringraziamenti

Con la presente tesi si conclude un percorso accademico che consiste in una laurea triennale tanto sperata e sudata. Sono felice di aver avuto e aver incontrato nel percorso delle persone care al mio fianco. Proprio a proposito di questo, ci tengo a ringraziarli pubblicamente.

Ringrazio tutta la mia famiglia mia madre, mio padre, i miei fantastici due fratelli Fabio e Riccardo: grazie a loro, che mi hanno supportato economicamente e moralmente, credendo in me nei momenti più difficili. Ora capisco che i richiami e gli incoraggiamenti più pesanti erano sempre fatti per il mio bene.

Ringrazio la mia ragazza Giulia con tutto l'amore che ho, perché lei più di chiunque altro ha condiviso con me i momenti più brutti e ha visto la mia fragilità che a volte è venuta fuori dopo delle delusioni. La ringrazio perché ha sempre avuto delle parole di conforto o gesti semplici, come un abbraccio, che però sono stati fondamentali. Ovviamente anche nei tanti momenti di gioia (come in questo giorno) lei c'è sempre stata.

Grazie ai miei zii Nicola e Emilia perché mi hanno sempre voluto bene come un figlio.

Ringrazio poi tutti i miei amici più cari. Il gruppo storico Dripsante: Ale, Bizz, Chico, Davide Debe, Edo Cat, Gimmi, Giorgio, Jacky, Leo, Luca, Nic; gli amici di una vita, che, quando ero giù, mi hanno sempre risollevato con una risata. Grazie ai miei coinquilini Dani, Fil e Matte, a cui tengo particolarmente, perché con loro ho condiviso le esperienze più belle di questo percorso universitario fino ad oggi. In tanti ricordi di questa esperienza loro erano al mio fianco.

In generale, non posso che sperare di avere sempre nella vita delle persone come loro al mio fianco.

Infine, un ringraziamento anche al mio relatore e tirocinante, il prof. Marco Mandolini, che con impegno profuso è stato sempre a disposizione affinché io potessi raggiungere gli obiettivi che lui mi aveva prefissato nonostante il tempo esiguo a disposizione.

So di aver fatto del mio meglio per completare questo percorso, anche se potevo essere un po' più celere.....scusa mamma, ma come dicono in America:

BEGGARS CAN'T BE CHOOSERS!!!

II. Sommario

I. Ringraziamenti	1
II. Sommario	i
III. Elenco delle figure	iii
IV. Elenco delle tabelle	iv
Abstract	1
1 Introduzione	2
1.1 Tecnologie Innovative: Additive Manufacturing	2
1.2 Tecniche di supporto ad AM: Artificial Intelligence	3
1.3 Di cosa si parlerà e metodo di ricerca	3
2 Metodo	5
2.1 Prisma Flow Diagram	5
2.2 Procedimento di revisione	7
2.2.1 Sito e stringa di ricerca di ricerca.	8
2.2.2 Classificazione degli articoli.	8
2.2.3 Prima fase di selezione	9
2.2.4 Seconda fase di selezione	9
3 Caso studio	11
3.1 Keywords e sinonimi	11
3.2 Elenco delle stringhe di ricerca e risultati	11
3.2.1 Stringa 1	13
3.2.2 Stringa 2	13
3.2.3 Stringa 3	13
3.2.4 Stringa 4	14
3.2.5 Stringa 5	14
3.2.6 Stringa 6	14
3.2.7 Stringa 7	14
3.2.8 Stringa 8	15
3.2.9 Stringa 9	15
3.2.10 Stringa 10	15
3.2.11 Stringa 11	15
3.2.12 Stringa 12	16

3.2.13	Stringa 13	16
3.2.14	Stringa 14	16
3.2.15	Stringa 15	17
3.2.16	Stringa 16	17
3.2.17	Stringa 17	17
3.2.18	Stringa 18	18
3.2.19	Stringa 19	18
3.2.20	Stringa 20	18
3.2.21	Stringa 21	19
3.2.22	Stringa 22	19
3.2.23	Stringa 23	19
3.2.24	Stringa 24	20
3.2.25	Stringa 25	20
3.2.26	Stringa 26	20
3.2.27	Stringa 27	20
3.2.28	Stringa 28	21
3.2.29	Stringa 29	21
3.2.30	Stringa 30	21
3.2.31	Stringa 31	22
3.3	Articoli esclusi dalla seconda fase	22
4	Analisi e discussione dei risultati	24
4.1	Analisi rispetto all'anno di pubblicazione	24
4.2	Analisi rispetto alla casa editrice	25
4.3	Studio degli articoli	26
4.4	Clustering degli articoli	26
4.4.1	Benefici ambientali dell'AI nella manifattura additiva	26
4.4.2	AI a supporto della progettazione	36
5	Conclusioni	37
6	Bibliografia	38

III. Elenco delle figure

Figura 1-1 Esempio di stampante 3D _____	2
Figura 2-1. Diagramma di flusso per revisioni sistematiche che includono ricerche da database, registri e altre fonti.[39] _____	6
Figura 2-2 Tabella di Excel sulla classificazione delle stringhe di ricerca e gli argomenti scelti _____	8
Figura 2-3 Seconda tabella di Excel riguardo gli articoli scartati dalla fase 1 ____	9
Figura 2-4 Colonne aggiunte alla prima tabella di Excel riguardo la seconda fase.10	
Figura 4-1. Grafico che rappresenta la distribuzione degli articoli rispetto all'anno di pubblicazione. _____	24
Figura 4-2. Case editrici espresse graficamente. _____	25

IV. Elenco delle tabelle

Tabella 2-1. Fasi del metodo utilizzato	7
Tabella 2-2. Differenze e similitudini tra i due metodi	7
Tabella 4-1. Case editrici di provenienza degli articoli.....	25

Abstract

L'additive manufacturing (AM) ha dimostrato un notevole potenziale nel ridurre l'impatto ambientale della produzione industriale attraverso l'ottimizzazione dei processi e la creazione di prodotti personalizzati e leggeri. Tuttavia, per massimizzare l'efficienza e ridurre ulteriormente l'impatto ambientale, è essenziale integrare strategie avanzate di Intelligenza Artificiale (IA) nei processi di AM. Questo studio si propone di esaminare e valutare criticamente i metodi e le applicazioni dell'IA per migliorare l'uso dell'additive manufacturing per prodotti ecosostenibili.

Dopo una revisione approfondita della letteratura scientifica e tecnica, sono stati identificati e analizzati diversi approcci di IA utilizzati nell'ambito della manifattura additiva e della sostenibilità ambientale.

Sono stati esaminati i benefici in termini di riduzione degli sprechi di materiale, miglioramento della qualità dei componenti e riduzione del consumo energetico.

Basandosi sui risultati della revisione e sull'analisi critica degli articoli, sono state fornite raccomandazioni pratiche per l'industria e la ricerca al fine di promuovere l'adozione diffusa di tecnologie avanzate di Artificial Intelligence nell'Additive Manufacturing per prodotti ecosostenibili.

Questo studio contribuisce a una migliore comprensione delle potenzialità dell'IA nel contesto della produzione additiva sostenibile.

1 Introduzione

Nel contesto dello sviluppo tecnologico prende sempre più piede l'interesse per il rispetto e la salvaguardia del pianeta. Ecco che allora tutte le nuove scoperte e i passi avanti fatti negli ultimi anni mirano verso questa direzione. Tecnologie obsolete e poco sviluppabili in questo contesto stanno lasciando piano piano il passo a quelle più "green". Sempre tenendo in considerazione le dure leggi del mercato, oggi si è di fronte a nuovi mezzi per rendere tutto più sostenibile. Proprio in questo senso è evidente come uno dei principali campi di sviluppo sia dato dall'additive manufacturing.

1.1 Tecnologie Innovative: Additive Manufacturing

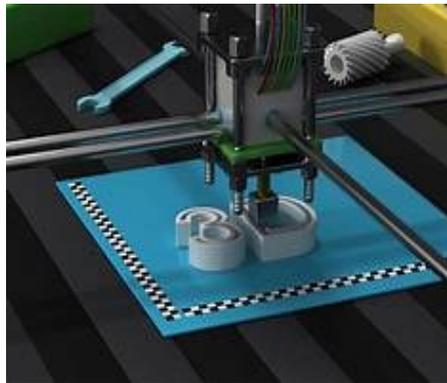


Figura 1-1 Esempio di stampante 3D

Tale processo permette di realizzare oggetti generando e sommando strati successivi di materiale, anziché sottrarli ad un pezzo pieno come nelle tecniche di manifattura più tradizionali. Numerosi sono i vantaggi che può apportare (oltre ovviamente a quello ambientale):

- Possibilità di produrre oggetti di maggiori dimensioni.
- Ottenere delle forme più complesse, magari non realizzabili con la manifattura sottrattiva.
- Poter scegliere una gamma assai più ampia di materiali.
- Operare con tempi di produzione ridotti rispetto al passato.
- Diminuire l'utilizzo della manodopera grazie alla digitalizzazione.

Come detto, nell'attuale contesto di crescente consapevolezza ambientale e ricerca di soluzioni sostenibili, l'additive manufacturing si presenta come una tecnologia promettente per la produzione di prodotti ecosostenibili. Infatti, più nel concreto, tra le tante possibilità offerte da questa metodologia, si può evidenziare:

- L'impiego di materiali riciclati
- La riduzione degli sprechi di materiale
- La personalizzazione dei componenti
- Riduzione del consumo energetico

Tuttavia, affinché l'additive manufacturing possa veramente contribuire alla sostenibilità ambientale, è essenziale massimizzare l'efficienza e ottimizzare i processi di produzione.

1.2 Tecniche di supporto ad AM: Artificial Intelligence

Ecco allora che è fondamentale implementarlo attraverso l'utilizzo delle tecniche di artificial intelligence, una disciplina che consiste nell'abilità di una macchina di mostrare capacità umane quali il ragionamento, l'apprendimento, la pianificazione e la creatività.

Essa permette ai sistemi di capire il proprio ambiente, mettersi in relazione con quello che percepisce e risolvere problemi, e agire verso un obiettivo specifico. Il computer riceve i dati (già preparati o raccolti tramite sensori, come una videocamera), li processa e risponde.

I sistemi di IA sono capaci di adattare il proprio comportamento analizzando gli effetti delle azioni precedenti e lavorando in autonomia.

Essa permette ai sistemi di capire il proprio ambiente, mettersi in relazione con quello che percepisce e risolvere problemi, e agire verso un obiettivo specifico. Il computer riceve i dati (già preparati o raccolti tramite sensori, come una videocamera), li processa e risponde.

I sistemi di IA sono capaci di adattare il proprio comportamento analizzando gli effetti delle azioni precedenti e lavorando in autonomia.

1.3 Di cosa si parlerà e metodo di ricerca

La presente tesi si propone di esplorare come l'Intelligenza Artificiale possa essere impiegata per migliorare l'utilizzo dell'additive manufacturing nel contesto della produzione di prodotti ecosostenibili. Attraverso un'analisi dettagliata dei modelli e delle metodologie AI applicate all'ambito della stampa 3D, si cercherà di identificare le migliori pratiche e le strategie più efficaci per ottimizzare i processi di produzione e ridurre l'impatto ambientale.

Partendo da una panoramica sullo stato attuale dell'additive manufacturing e sulle sfide legate alla sostenibilità ambientale, verranno esplorati i principali approcci di Intelligenza Artificiale utilizzati per ottimizzare i processi di produzione. Saranno analizzate le tecniche di ottimizzazione e le soluzioni basate sull'apprendimento automatico applicate specificamente al contesto dell'additive manufacturing per prodotti ecosostenibili. In particolare, si andrà a vedere come i metodi di apprendimento automatico portino vantaggi alla stampa 3D nell'implementare i parametri di progetto e di processo, nello scegliere il materiale più ecologico riducendone lo spreco, ma senza compromettere l'efficienza.

Innanzitutto però, si partirà dalla revisione della letteratura, si cercherà di valutare l'efficacia e l'applicabilità dei modelli di Intelligenza Artificiale nell'ambito dell'additive manufacturing per prodotti ecosostenibili. Infatti, attraverso un metodo oggettivo, è stata fatta una ricerca di articoli scientifici interpolando le principali parole chiave dell'argomento trattato: additive manufacturing, artificial intelligence ed eco-design. Successivamente tali articoli sono stati analizzati fino ad arrivare ad una chiave di lettura generale.

L'obiettivo finale di questa tesi è contribuire a una migliore comprensione delle potenzialità dell'Intelligenza Artificiale nell'ottimizzazione dell'additive manufacturing per prodotti ecosostenibili, fornendo indicazioni pratiche e suggerimenti per il futuro sviluppo e l'implementazione di soluzioni sostenibili nel campo della produzione industriale.

2 Metodo

In questo capitolo sarà descritto il metodo utilizzato nell'attività di ricerca di fonti, dalla letteratura scientifica, che trattino di intelligenza artificiale per manifattura additiva nell'ambito della produzione sostenibile.

Il processo di revisione è avvenuto in modo più oggettivo possibile, ispirandosi al sistema PRISMA FLOW DIAGRAM.

2.1 Prisma Flow Diagram

Il diagramma di flusso PRISMA è uno strumento che può essere utilizzato per registrare le diverse fasi del processo di ricerca bibliografica, attraverso più risorse, e mostrare chiaramente come un ricercatore è passato da una serie di dati iniziali(database) a degli articoli finali.

La parola PRISMA è la sigla di Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses, ovvero rappresentazione grafica utilizzata per la revisione sistematica e la metanalisi. Questo diagramma di flusso viene utilizzato per indicare da quanti studi si è partiti, quanti ne sono stati esclusi e per quali ragioni, quanti ne sono stati selezionati per una valutazione più dettagliata e infine quanti sono stati inclusi nella revisione sistematica e nella metanalisi. Quindi è composto da quattro fasi:

1. **Identificazione:** in questa fase, si identificano gli studi rilevanti per la revisione attraverso la ricerca in database pertinenti e altre fonti.
2. **Selezione e eleggibilità:** questa fase coinvolge la scrematura dei titoli o degli abstract degli studi identificati per determinare se soddisfano i criteri di idoneità. Gli studi scelti sono poi valutati in dettaglio per stabilire se devono essere inclusi nella revisione.
3. **Inclusione:** infine, gli studi che soddisfano tutti i criteri vengono inclusi nella revisione sistematica.

Ogni passaggio è accompagnato dal numero di studi che lo superano, permettendo di tracciare il percorso da una grande quantità di letteratura potenzialmente rilevante a un numero gestibile di studi appropriati per la revisione sistematica.

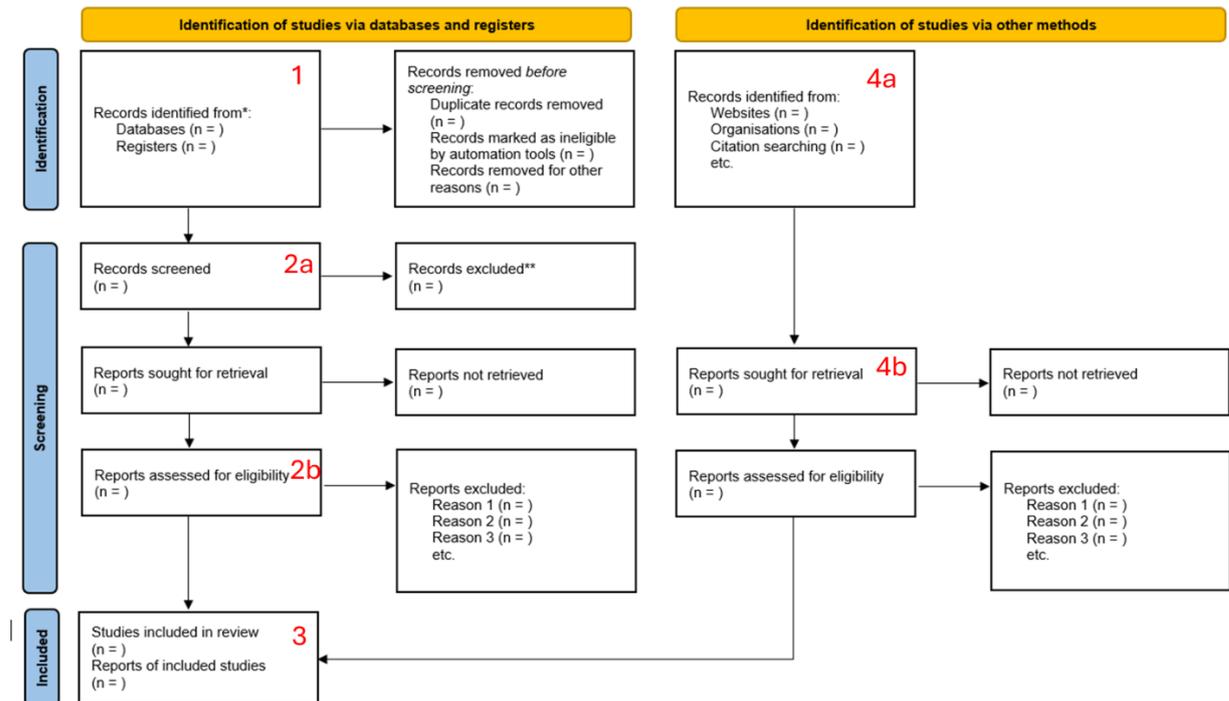


Figura 2-1. Diagramma di flusso per revisioni sistematiche che includono ricerche da database, registri e altre fonti.[39]

Nel punto 1 della prima colonna sono visibili i documenti raccolti inizialmente in cui possiamo subito rimuovere i duplicati.

Nel punto 2a della prima colonna sono riportati i documenti che vengono selezionati con maggiore accuratezza. Nel caso fossero scartati, bisogna giustificarne il motivo con una breve spiegazione.

Se i documenti trattati sono articoli, come nel caso della revisione che verrà esposta nel capitolo 3, essi devono essere scelti leggendo prima il sommario per una prima selezione (2a) e poi riletti più approfonditamente per intero per la seconda scrematura(2b).

La lettera “n” indica il numero di articoli trovati in quanto non è importante specificare ogni articolo, ma solo la motivazione dell’eliminazione di quelli scartati durante il processo.

Nella seconda colonna al punto 4a e 4b si trova l’identificazione e la selezione di articoli trovati attraverso metodi diversi.

Mentre la selezione è molto simile a quella della colonna di sinistra, nell’identificazione bisogna riferire il numero di siti e organizzazioni diverse utilizzate. Inoltre, bisogna riportare la dicitura “Citation searching”, ovvero quanti altri giornali hanno citato un articolo di interesse (di solito un database riporta questa informazione).

Nell’ultima riga del diagramma al punto 3 va inserito il numero finale di articoli che hanno superato le due fasi di selezione e che provengono sia dal lato destro (punto 4a e 4b) che da quello sinistro (1, 2a e 2b) del diagramma.

Per concludere, i benefici di utilizzare questo diagramma di flusso PRISMA sono molteplici:

- Aiuta ad organizzarsi.
- Documenta parte del processo di revisione.
- Induce altri ad utilizzare questo metodo
- Mostra se si è lavorato in maniera sistematica oppure no.

2.2 Procedimento di revisione

Il metodo utilizzato per la revisione della letteratura, riguardo l'argomento analizzato, ha seguito un procedimento sistematico e analitico. Si è ispirato al diagramma di flusso PRISMA, ma ha avuto un suo svolgimento differente.

Tabella 2-1. Fasi del metodo utilizzato

FASI	DETTAGLIO
Impostare sito e metodo di ricerca	Sito Scopus e ricerca tramite abstract, article title and keywords
Prima fase di selezione	Lettura di abstract e keywords di ogni articolo
Seconda fase di selezione	Lettura completa di ogni articolo
Raggruppare gli articoli in base alle somiglianze	Studio degli articoli e composizione di un quadro generale sull'argomento

Prima di passare ad un'analisi dettagliata di ogni fase, viene mostrato nella tabella di seguito le differenze e similitudini tra il procedimento svolto e quello descritto nel diagramma di flusso PRISMA:

Tabella 2-2. Differenze e similitudini tra i due metodi

CARATTERISTICHE	PRISMA	METODO UTILIZZATO
Diagramma di flusso	SI	NO
Classificazione in Excel	NO	SI
Archivio su Mendeley	NO	SI
Numerazione degli articoli	SI	SI
Doppia fase di selezione	SI	SI
Ricerca degli articoli anche da altri database	SI	SI

2.2.1 Sito e stringa di ricerca di ricerca.

Come database si utilizza uno specifico sito di ricerca, cioè "Scopus". Qui sono presenti diversi articoli riferiti alla letteratura scientifica di ogni tipo; quindi, per avere una direzione ben precisa su dove arrivare, è fondamentale avere dei parametri di ricerca.

Innanzitutto si è stabilito come filtro di ricerca quello di "Article title, abstract and keywords". Quest'ultime per essere selezionate correttamente dovevano centrare l'argomento di riferimento. Essendo il sito "Scopus" completamente in lingua inglese, bisogna selezionare le keywords in tale lingua. Esse si possono riportare scrivendo ognuna di esse tra le virgolette e separandole tra loro con la congiunzione AND: si è definita in questo modo la stringa di ricerca da riportare su "Scopus".

Una sola stringa di ricerca con le tre keywords non è però sufficiente per trovare un numero di articoli accettabili per avere un quadro chiaro della situazione. Per ampliare il raggio e avere maggiori risultati è utile trovare dei sinonimi per ognuna delle keywords.

Sostituendo le keywords con più sinonimi possibili si possono ottenere più stringhe di ricerca possibili; infatti ciascuna di essa viene costruita dalla combinazione di tutte le keywords e i loro sinonimi. A questo punto il numero di articoli trovati su Scopus aumenta di conseguenza.

2.2.2 Classificazione degli articoli.

Disponendo ora di un gran numero di articoli, bisogna raccogliergli e classificarli correttamente in modo che tutti siano tracciati: perciò si sceglie di utilizzare Excel.

In questa piattaforma si può creare una tabella (Figura 2-2) formata per ogni colonna da keywords, congiunzione AND ad unirle, la stringa di ricerca e di fianco gli articoli trovati. Infatti è possibile riportare ogni keywords interpolandole fino a formare su ogni riga una stringa di ricerca.

Nella colonna a fianco ad essa viene riportato il numero corrispondente agli articoli trovati dopo aver inserito la stringa su Scopus. Il numero viene assegnato ad ogni articolo in base all'ordine temporale in cui vengono scelti (dal meno recente al più recente). Gli articoli riportati in questa colonna sono stati scelti leggendo l'abstract e assicurandosi che siano presenti le keywords richieste dalla stringa di ricerca.

STRINGA DI RICERCA	ARTICOLI SCELTI (NUMERATI)
"keyword1" AND "keyword2" AND "keyword3"	
"sinonimo keyword1" AND "sinonimo keyword2" AND "sinonimo keyword3"	

Figura 2-2 Tabella di Excel sulla classificazione delle stringhe di ricerca e gli argomenti scelti

Utilizzando Excel il tracciamento degli articoli avviene in modo analitico, però non si sa nello specifico di che articolo si tratta e di cosa parla in quanto è semplicemente riportate come un numero. Per questo motivo Excel non permette di riportarli in modo completo e si utilizza la piattaforma Mendeley: esso funge da archivio ed è rapido da usare per la lettura completa di ogni articolo.

2.2.3 Prima fase di selezione

Gli articoli risultanti dalla stringa di ricerca possono essere più di uno, ma non tutti sono accettabili; infatti, può accadere che:

- dalla combinazione delle keywords si ottengano degli articoli che soddisfino i criteri ma che non affrontino tale argomento nell'ambito di ricerca corretto (meccanico, architettonico, edile, elettrico, ecc...).
- una delle keywords non sia effettivamente presente.

Se gli articoli presentano questo tipo di problematiche vanno eliminati in questa prima fase. Per mantenere il tracciamento ed evitare di sceglierli erroneamente nelle stringhe successive, è opportuno impostare su Excel un'altra tabella (Figura 2-3) dove vengono riportati tali articoli scartati in corrispondenza della stringa stessa.

Questa volta gli articoli vanno riportati con il proprio titolo completo e di fianco, sulla stessa riga, va inserita una motivazione.

STRINGA DI RICERCA SU SCOPUS CHE HA DATO RISULTATI COERENTI	ARTICOLI SCELTI FASE 1	ARTICOLI SCARTATI FASE 1	MOTIVAZIONE
Stringa di ricerca riportata su scopus che ha prodotto risultati*	Numero dell'articolo scelto*	Titolo degli articoli scartati	Spiegare perché è stato scartato

Figura 2-3 Seconda tabella di Excel riguardo gli articoli scartati dalla fase 1

2.2.4 Seconda fase di selezione

Dopo aver costruito queste due tabelle, si fa riferimento alla prima di esse per la seconda fase di selezione. Si procede infatti con la lettura approfondita degli articoli selezionati nella fase 1: questa volta non basta leggere keywords ed abstract, ma bisogna studiare bene l'articolo per vedere se tratta specificatamente l'argomento trattato. Questo passaggio è fondamentale perché, andando ad approfondire, si potrebbe andare incontro ad articoli che presentano incoerenze rispetto all'argomento di ricerca. Infatti alcuni articoli potrebbero:

- Non trattare approfonditamente una delle keywords.
- Trattare le parole chiave separatamente tra loro, senza centrare l'obiettivo.
- Trattare l'argomento in modo generale.
- Non porta nessuna novità e nessuno sviluppo alla ricerca.

Gli articoli che rientrano in uno dei punti sopracitati, devono essere scartati durante la seconda fase.

Su Excel (Figura 2-4) si aggiunge una colonna dove vengono inseriti tutti i numeri degli articoli che hanno superato la seconda fase di selezione: essi centrano perfettamente l'argomento in esame e offrono spunti per ricerche future.

Inoltre, si aggiunge anche un'altra colonna (Figura 2-4) dove sono invece inseriti i numeri degli articoli trovati e la corrispondente motivazione.

ARTICOLI SCELTI FASE 1 (NUMERATI)	ARTICOLI SCELTI FASE 2	ARTICOLI SCARTATI FASE 2 E MOTIVAZIONE
Articoli selezionati in precedenza*	Numero degli articoli scelti in questa fase	Numero degli articoli scartati + motivazione

Figura 2-4 Colonne aggiunte alla prima tabella di Excel riguardo la seconda fase.

Alla fine si arriva, così, ad avere in mano una serie di articoli tra le mani, di cui bisogna saper trovare la giusta chiave di lettura per comprendere meglio l'argomento preso in esame.

Proprio per tale motivo i vari articoli possono poi essere di nuovo raccolti in macro-argomenti, raggruppando tra loro quelli che presentano delle similitudini.

3 Caso studio

Il metodo presentato nel capitolo 2.2 è un procedimento analitico e valido per la revisione della letteratura scientifica. A dimostrazione di ciò, si propone di seguito come esso abbia permesso di arrivare a raccogliere un certo numero di articoli riguardo l'argomento in questione, ovvero: l'uso di modelli di intelligenza artificiale nell'ambito dell'additive manufacturing per la produzione di prodotti ecosostenibili.

3.1 Keywords e sinonimi

Cercando di rispettare il processo passo dopo passo, si è partiti impostando "Scopus" come sito di ricerca, filtrando i risultati per article title, abstract and keywords.

Di conseguenza è stato fondamentale individuare le tre keywords che centrassero precisamente l'argomento, nello specifico:

- 3D printing
- Artificial intelligence
- Eco-design

Ovviamente queste tre parole chiave, che sono state unite a formare una stringa di ricerca da riportare su Scopus, non sono state sufficienti per completare la ricerca, in quanto ha prodotto come risultato un solo articolo per la prima fase di selezione.

Si è deciso quindi di procedere con l'individuazione di sinonimi di queste tre keywords:

- **3D printing:** additive manufacturing, rapid prototyping.
- **Artificial intelligence:** machine learning, expert system, deep learning, data mining.
- **Eco-design:** sustainable design, environmental sustainability, green design, sustainability, life cycle assessment.

Dopo questo lavoro è visibile come il numero di parole chiave è aumentato notevolmente. Disponendo di 3 keywords riguardo il 3D printing, 5 riferiti all'artificial intelligence e 6 all'eco-design, si è deciso di interpolarli tra loro, ottenendo ben 90 stringhe di ricerca riportabili su Scopus scrivendole con le virgolette e collegate dalla congiunzione AND. Esse sono state anche riportate su Excel nello stesso modo.

3.2 Elenco delle stringhe di ricerca e risultati

Nel caso specifico le stringhe di ricerca hanno prodotto 38 articoli accettabili basandosi sull'abstract e sulle keywords, dopo la prima fase di selezione.

Di seguito sono riportate solo quelle che tra le 90 stringhe hanno prodotto risultati una volta riportati su Scopus.

1. "3D printing" AND "artificial intelligence" AND "eco-design".
2. "3D printing" AND "artificial intelligence" AND "environmental Sustainability".
3. "3D printing" AND "artificial intelligence" AND "sustainability".
4. "3D printing" AND "artificial intelligence" AND "life cycle assessment".
5. "3D printing" AND "machine learning" AND "green design".
6. "3D printing" AND "machine learning" AND "sustainability".
7. "3D printing" AND "expert system" AND "eco-design".
8. "3D printing" AND "expert system" AND "sustainability".
9. "3D printing" AND "expert system" AND "life cycle assessment".
10. "3D printing" AND "deep learning" AND "eco-design".
11. "Additive manufacturing" AND "artificial intelligence" AND "eco-design".
12. "Additive manufacturing" AND "artificial intelligence" AND "sustainable design".
13. "Additive manufacturing" AND "artificial intelligence" AND "green design".
14. "Additive manufacturing" AND "artificial intelligence" AND "sustainability".
15. "Additive manufacturing" AND "artificial intelligence" AND "life cycle assessment".
16. "Additive manufacturing" AND "machine learning" AND "eco-design".
17. "Additive manufacturing" AND "machine learning" AND "environmental sustainability".
18. "Additive manufacturing" AND "machine learning" AND "sustainability".
19. "Additive manufacturing" AND "expert system" AND "life cycle assessment".
20. "Additive manufacturing" AND "deep learning" AND "sustainable design".
21. "Additive manufacturing" AND "data mining" AND "sustainable design".
22. "Additive manufacturing" AND "data mining" AND "green design".
23. "Additive manufacturing" AND "data mining" AND "sustainability".
24. "Rapid prototyping" AND "artificial intelligence" AND "sustainable design".
25. "Rapid prototyping" AND "artificial intelligence" AND "environmental sustainability".
26. "Rapid prototyping" AND "artificial intelligence" AND "sustainability".
27. "Rapid prototyping" AND "machine learning" AND "green design".
28. "Rapid prototyping" AND "expert system" AND "sustainable design".
29. "Rapid prototyping" AND "expert system" AND "sustainability".
30. "Rapid prototyping" AND "deep learning" AND "sustainable design".
31. "Rapid prototyping" AND "data mining" AND "environmental sustainability".

Queste sono le 31 stringhe che hanno prodotto uno o due articoli come risultato della ricerca su Scopus. Pertanto, sarà analizzato di seguito come si è arrivati a questo risultato e gli articoli scartati dopo la prima fase di selezione, motivando la scelta.

Quelli che hanno passato la prima selezione sono stati numerati nell'ordine temporale in cui sono stati trovati. Dai risultati ottenuti per ogni stringa sono stati esclusi i duplicati che erano già stati trovati in una stringa di ricerca precedente.

3.2.1 Stringa 1

Dalla stringa "3D printing" AND "artificial intelligence" AND "eco-design" abbiamo ricavato 4 articoli, di cui solo uno ha superato la prima fase: [5]

Gli altri tre invece sono stati esclusi:

- "Jigs and fixtures in production: A systematic literature review" escluso perchè le keywords dell'articolo non erano coerenti con la stringa di ricerca.
- "Digital technologies for resource loop redesign in circular supply chains: A systematic literature review" escluso anch'esso perché le keywords non risultavano coerenti con la stringa di ricerca.
- "Regulatory push-pull and technological knowledge dynamics of circular economy innovation" non selezionato perché l'articolo fa riferimento a eco-design, ma non a 3D printing e artificial intelligence.

3.2.2 Stringa 2

Dalla stringa "3D printing" AND "artificial intelligence" AND "environmental sustainability" sono stati ricavati 3 articoli, di cui quelli scelti sono stati: [8]; [9]

Per quanto riguarda il terzo articolo: "Optimizing environmental sustainability in pharmaceutical 3D printing through machine learning" esso è stato escluso perché riguardante l'ambito farmaceutico.

3.2.3 Stringa 3

Per quanto riguarda la stringa "3D printing" AND "artificial intelligence" AND "sustainability", è stato scelto l'articolo: [10].

Gli articoli scartati sono invece:

- "The fourth industrial revolution in the food industry" perché tratta di eco-design e artificial intelligence, ma nell'ambito della food Industry.
- "Research status and prospect of machine learning in construction 3D printing" perché riguardante l'edilizia.
- "Food Quality 4.0: Sustainable Food Manufacturing for the Twenty-First Century" perchè relativo al Food Manufacturing.

3.2.4 *Stringa 4*

La stringa "3D printing" AND "artificial intelligence" AND "life cycle assessment" ha dato come risultato l'articolo [11] e l'articolo: "Internet of nonthermal food processing technologies (Iontp): Food industry 4.0 and sustainability" scartato perchè parlava delle tecnologie alimentari del future.

3.2.5 *Stringa 5*

Da "3D printing" AND "machine learning" AND "green design" si è scelto di selezionare [12] come articolo coerente alle keywords di ricerca. Sono stati invece eliminati:

- "A decision analysis model for material selection using simple ranking process" per via delle keywords non coerenti con la stringa di ricerca.
- Per lo stesso motivo è stato scartato anche "Regulatory push-pull and technological knowledge dynamics of circular economy innovation".

3.2.6 *Stringa 6*

"3D printing" AND "machine learning" AND "sustainability" ha dato come risultato accettabile gli articoli: [14]; [13], mentre quelli scartati dalla prima selezione sono:

- "One-Stop Fabrication of Flexible Sensors Based on Aqueous Printable Triboelectric Layer-Electrode Integrated Ink with Enhanced Heat-Resistance" perchè la keyword 3D printing non è presente.
- "Architectural 3D-Printed Structures Created Using Artificial Intelligence: A Review of Techniques and Applications" perchè tratta l'argomento nell'ambito dell'architettura.
- "Challenges and Future Perspectives for Additively Manufactured Polylactic Acid Using Fused Filament Fabrication in Dentistry" in quanto parla di additive manufacturing per industria dentale.
- "Machine Learning Customized Novel Material for Energy-Efficient 4D Printing" perchè riferito alla stampa in 4D.
- "Modelling of 3D concrete printing process: A perspective on material and structural simulations" poichè relativo al calcestruzzo.
- "A Review of the Application of Artificial Intelligence, Remote Sensing, and 3D Printing for the Sustainability of Civil Infrastructure" perchè riguardante l'ingegneria dentale.
- "Advances in Photovoltaic Technologies from Atomic to Device Scale" in quanto parla di fotovoltaico e inoltre le keywords non sono coerenti con la stringa di ricerca.

3.2.7 *Stringa 7*

L'articolo [15] è stato il risultato della stringa "3D printing" AND "expert system" AND "eco-design", che ha dato anche:

- "From linear to circular sustainable supply chain network optimisation: towards a conceptual framework" scartato poichè non coerente con la stringa di ricerca.
- "S-FMECA: A NOVEL TOOL FOR SUSTAINABLE PRODUCT DESIGN ADDITIVE MANUFACTURING" eliminato poichè non tratta di "expert system".
- "Digital technologies for resource loop redesign in circular supply chains: A systematic literature review" perchè non coerente anch'esso con la stringa suddetta.

3.2.8 Stringa 8

Da "3D printing" AND "expert system" AND "sustainability" si è riuscito ad ottenere articoli, di cui solo [16] ha superato la prima fase di selezione, mentre gli altri due:

- "Wearable multifunctional organohydrogel-based electronic skin for sign language recognition under complex environments" scartati perchè non coerente con la stringa.
- "Adapted techniques of explainable artificial intelligence for explaining genetic algorithms on the example of job scheduling" escluso poichè non parla di 3D printing e sustainability.

3.2.9 Stringa 9

La stringa "3D printing" AND "expert system" AND "life cycle assessment" ha dato come unico risultato l'articolo [17].

3.2.10 Stringa 10

Da "3D printing" AND "deep learning" AND "eco-design" si è ricavato un articolo coerente, ovvero [18] e tre articoli eliminati per diversi motivi:

- "Exploring the Consumer Acceptance of Nano Clothing Using a PLS-SEM Analysis" non era coerente con la stringa di ricerca.
- "Sustainability in Wood Products: A New Perspective for Handling Natural Diversity" si riferiva a prodotti in legno.
- "Strategies towards a more sustainable aviation: A systematic review" era compatibile solo alla keyword relativa a eco-design, ma non alle altre due.

3.2.11 Stringa 11

La stringa "additive manufacturing" AND "artificial intelligence" AND "eco-design" ha dato come risultato gli articoli [1]; [4] e gli articoli:

- "Industry 4.0 Technologies: Opportunities in the Sustainable Supply Chain Management" escluso perchè parla di additive manufacturing ed artificial intelligence, ma non di eco-design.

- "The Benefits of Using Industry 4.0 in the Manufacturing Sector" scartato poichè non argomenta in modo dettagliato "additive manufacturing".
- "Energy metaverse: the conceptual framework with a review of the state-of-the-art methods and technologies" eliminato in quanto le sue keywords non erano coerenti con la stringa di ricerca.

3.2.12 Stringa 12

A proposito di "additive manufacturing" AND "artificial intelligence" AND "sustainable design" si è ottenuto [2], [6] giudicati accettabili, a differenza del terzo:

"A Bibliometric Analysis of Sustainable Product Design Methods from 1999 to 2022: Trends, Progress, and Disparities between China and the Rest of the World" che è stato invece escluso perchè tratta di "sustainable design" dal punto di vista storico senza offrire spunti per le tecnologie future come additive manufacturing e artificial intelligence.

3.2.13 Stringa 13

[19] è stato ricavato dalla stringa "additive manufacturing" AND "artificial intelligence" AND "green design", così come diversi altri che però sono stati eliminati:

- "Developments in Fusion Deposition Modelling Process Using Industrial Robot" parlava di industria del robot.
- "The Role of the Product Design and Manufacturing System Dyad in Efficient Personalized Production" che trattava di manifattura del futuro, ma non centra le keywords richieste.
- "Industry 4.0 and Digitalisation in Healthcare" che riguardava l'ambito della sanità.
- "Supply Chain Integration for Sustainable Advantages" che affrontava il problema della sostenibilità ambientale, ma non delle altre due keywords.

3.2.14 Stringa 14

Dalla stringa "additive manufacturing" AND "artificial intelligence" AND "sustainability" si è selezionato [7], mentre altri articoli risultanti sono stati scartati:

- "A Conceptual Curriculum Design Approach for Educating Engineers of and for the Future" poichè si trattava di un articolo generic che non centrava correttamente le keywords della stringa.
- "Reshaping Industry: Adoption of Sustainable Techniques providing Remanufacturing Solutions in High-Tech industries" in quanto non trattava di additive manufacturing.
- "Intelligent engineering applications and applied sciences for sustainability" in quanto anch'esso non trattava di additive manufacturing.

- "The Contribution of Lean Management–Industry 4.0 Technologies to Improving Energy Efficiency" perchè parlava di sostenibilità energetica, ma nel campo del Lean Management.
- "Selective Complexity Determination at Cost Based Alternatives to Re-manufacture" in quanto le Keywords dell'articolo non erano coerenti con la stringa di ricerca.
- "Laser-based Technologies for Sustainable Manufacturing" perchè non trattava di additive manufacturing.
- "Factories of the Future" perché troppo generico non centrava le keywords richieste dalla stringa.

3.2.15 Stringa 15

"Additive manufacturing" AND "artificial intelligence" AND "life cycle assessment" hanno dato come risultato [20] e anche:

- "Revolutionizing the circular economy through new technologies: A new era of sustainable progress" che non è stato selezionato in quanto non tratta di sostenibilità nell'ambito della circular economy.
- "Supply chain network design with financial considerations: A comprehensive review" che è stato eliminato perchè non era coerente con la stringa di ricerca.

3.2.16 Stringa 16

Da "additive manufacturing" AND "machine learning" AND "eco-design" si sono ottenuti quattro articoli di cui solo [3] compatibile con la stringa di ricerca, mentre gli altri tre:

- "Global Workforce Challenges for the Mold Making and Engineering Industry" trattava di "eco-design" ma non nell'ambito di additive manufacturing.
- "Digital technologies for resource loop redesign in circular supply chains: A systematic literature review" presentava delle Keywords non coerenti con la stringa di ricerca.
- "Exploring the evolution of energy research in hospitality: Mapping knowledge trends, insights, and frontiers" che parlava di energia senza centrare le keywords della stringa di ricerca.

3.2.17 Stringa 17

Per "additive manufacturing" AND "machine learning" AND "environmental sustainability" i risultati sono stati tre e di questi [21] e [22] sono stati selezionati, mentre: "Industry 4.0 Vision for the Supply of Energy and Materials: Enabling Technologies and Emerging Applications" non è stato scelto perchè parlava di sostenibilità ambientale, additive manufacturing e machine learning riferiti all'approvvigionamento di energia.

3.2.18 Stringa 18

Da "additive manufacturing" AND "machine learning" AND "sustainability" sono stati ricavati diversi articoli, di cui però solo [23] è stato definito accettabile, a differenza di tutti gli altri che sono stati deselezionati per motivi diversi:

- "Recent Developments on Smart Manufacturing" troppo generic rispetto all' obiettivo della ricerca.
- "Architectural 3D-Printed Structures Created Using Artificial Intelligence: A Review of Techniques and Applications" coerente con la stringa, ma che si riferiva all'architettura del prodotto.
- "Challenges for the Corrosion Science, Engineering, and Technology Community as a Consequence of Growing Demand and Consumption of Materials: A Sustainability Issue" non coerente con la stringa.
- "Carbon dioxide separation and capture by adsorption: a review" riguardava il diossido di carbonio.
- "Quantum technology, artificial intelligence, machine learning, and additive manufacturing in the Asia-Pacific for Mars exploration" parlava di additive manufacturing e machine learning, ma non poneva come obiettivo finale la sostenibilità ambientale.
- "PRODUCT LIFE-CYCLE ENERGY FRAMEWORK IN FRICTION SCENARIOS" argomentava il problema della sostenibilità unendola all'utilizzo di machine learning, ma non ad additive manufacturing.

3.2.19 Stringa 19

"Additive manufacturing" AND "expert system" AND "life cycle assessment" hanno dato come risultato corretto [24], mentre sono stati eliminate: "Sustain Meter: A knowledge-based system for assessing sustainability of SMEs in the fashion industry" perchè riguardante l'industria della moda; e anche "An extensible complex spherical fuzzy decision making model based selection framework for the food waste treatment method" in quanto affrontava il problema dello spreco di cibo, che non rientra nel campo della ricerca.

3.2.20 Stringa 20

L'articolo [25] è stato trovato dalla stringa "additive manufacturing" AND "deep learning" AND "sustainable design", la quale ha prodotto altri risultati:

- "Development of Truss Material Evaluation Software Using Application of AHP-Entropy and TOPSIS Method" escluso perchè parlava di deep learning, ma non delle alter due keywords della stringa di ricerca.

- "A Review of Current Progress and Application of Machine Learning on 3D-Printed Concrete" deselezionato poichè riguardava l'industria edilizia e in particolare al calcestruzzo.
- "Communicating Supraparticles to Enable Perceptual, Information-Providing Matter" eliminato in quanto non coerente con la stringa di ricerca.

3.2.21 Stringa 21

Le keywords "additive manufacturing" AND "data mining" AND "sustainable design" hanno permesso di trovare [26] e altri due articoli che sono stati invece non selezionati:

- "Enhancing circular economy via detecting and recycling 2D nested sheet waste using Bayesian optimization technique based-smart digital twin" che trattava di sostenibilità in relazione all'ambito economico.
- "Raw materials for sports garments, seam technique, and applicable finishes: A review" che parlava di additive manufacturing per la produzione di capi sportive, senza alcun riferimento al data mining e alla sostenibilità ambientale dei prodotti.

3.2.22 Stringa 22

La stringa "additive manufacturing" AND "data mining" AND "green design" hanno dato come risultato [28] e altri tre articoli, che sono stati invece esclusi:

- "Exploring the application of analytics in supply chain during COVID-19 pandemic: a review and future research agenda" riguardante il periodo pandemico dovuto al COVID-19 e inoltre non coerente con le keywords della ricerca.
- "The quality of cost accounting systems in manufacturing firms: A literature review" riferito alla contabilità delle imprese manifatturiere.
- "A systematic review on social sustainability of artificial intelligence in product design" non coerente con la stringa di ricerca.

3.2.23 Stringa 23

"Additive manufacturing" AND "data mining" AND "sustainability" hanno dato due risultati: uno che presenta le keywords compatibili con quelli della stringa e di ricerca, ovvero [27] , mentre l'altro "2017 International Annual Conference of the American Society for Engineering Management, ASEM 2017" con le keywords non compatibili.

3.2.24 Stringa 24

[29] è stato ottenuto dalle keywords "rapid prototyping" AND "artificial intelligence" AND "sustainable design" ed è risultato accettabile, a differenza degli altri due: "A Systematic Review on the Implementation of Agility in Sustainable Design Development" escluso perchè trattava di sustainable design, ma non centrava le altre due keywords della stringa di ricerca; "Effect of combined different sources of alumina silicate on mechanical properties and carbonation depth of environmentally friendly geopolymeric composite based on metakaolin" eliminato in quanto non coerente con le keywords della stringa.

3.2.25 Stringa 25

Da "rapid prototyping" AND "artificial intelligence" AND "environmental sustainability" si è ottenuto [30], [31] e altri tre articoli che sono stati invece deselezionati da questa prima fase:

- "Selection of Industry 4.0 technologies for Lean Six Sigma integration using fuzzy DEMATEL approach" che parlava di artificial intelligence, ma in modo generico sulla Industry 4.0 e non sul rapid prototyping.
- "Tech for good: Imagine solving the world? Greatest challenges" il quale affrontava il problema della sostenibilità ambientale ma non c'entrava con le altre keywords.
- "Designing a conceptual green process model in software development: A mixed method approach" in cui non era presente l'argomento della stampa 3D.

3.2.26 Stringa 26

La stringa "rapid prototyping" AND "artificial intelligence" AND "sustainability" ha permesso di trovare tre articoli, di cui [32] è risultato accettabile, mentre gli altri due esclusi:

"Challenges and Future Perspectives for Additively Manufactured Polylactic Acid Using Fused Filament Fabrication in Dentistry" riferito all'ambito dentale e "Route selection and reaction engineering for sustainable metabolite synthesis" che non parla di rapid prototyping.

3.2.27 Stringa 27

[33] è stato ricavato dalle keywords "rapid prototyping" AND "machine learning" AND "green design", così come altri due articoli: "The Integration and Design of Green Concept in Jewelry under the Background of Information Technology" che è stato eliminato perchè parlava di tecnologie applicate ai gioielli; e "The use of random forests to support the decision-making process for sustainable manufacturing" che invece non è stato scelto in quanto trattava di sostenibilità ambientale, ma non centra le altre keywords.

3.2.28 *Stringa 28*

"Rapid prototyping" AND "expert system" AND "sustainable design" ha permesso di ricavare diversi articoli:

- [34] e [38] sono stati scelti.
- "EXPLORING THE MANIFESTATION OF DESIGN FOR MANUFACTURING AXIOMS IN STUDENTS' EARLY-STAGE ENGINEERING DESIGN CONCEPTS" il quale è stato escluso perchè parlava di rapid prototyping e sustainable design, ma non di expert system.
- "Machine Learning and Deep Learning Models Applied to Photovoltaic Production Forecasting" che è stato eliminato in quanto era coerente con le stringhe di ricercar, ma riferite alla produzione di fotovoltaici.
- "Impact of extended reality on architectural education and the design process" che è stato deselezionato perchè apparteneva all'ambito architettonico.
- "A TAXONOMY OF CUSTOMERS' CHARACTERISTICS INFLUENCING PRODUCT PERSONALISATION" il quale non è stato scelto poichè non era coerente con la stringa di ricerca.
- "A new VIKOR-based in-sample-out-of-sample classifier with application in bankruptcy prediction" che tratta di expert system, ma non delle altre due stringhe di ricerca.

3.2.29 *Stringa 29*

[35] è stato trovato da "rapid prototyping" AND "expert system" AND "sustainability". Altri due articoli, ottenuti da questa stringa, sono stati invece esclusi:

"A new concept for large additive manufacturing in construction: tower crane-based 3D printing controlled by deep reinforcement learning" coerente con la stringa, ma che trattava di costruzioni edilizie; e "Selection of Industry 4.0 technologies for Lean Six Sigma integration using fuzzy DEMATEL approach" che parlava in modo generic di Industry 4.0, ma non nello specifico di stampa 3D.

3.2.30 *Stringa 30*

La stringa "rapid prototyping" AND "deep learning" AND "sustainable design" ha permesso di ottenere altri quattro articoli, di cui [36] è stato scelto, a differenza di:

- "Applications of serious games in construction: the current state, classifications and a proposed process framework" che è stato escluso perchè relative all'edilizia.
- "Computational Design and Manufacturing of Sustainable Materials through First-Principles and Materiomics" il quale è stato deselezionato in quanto erano presenti le keywords sustainable design e deep learning, ma non rapid prototyping.

- "In-situ monitoring of sub-surface and internal defects in additive manufacturing: A review" che è stato eliminato poichè non aveva tra le keywords sustainable design e deep learning.

3.2.31 Stringa 31

Da "rapid prototyping" AND "data mining" AND "environmental sustainability" si è ottenuto [37] e altri due articoli che non sono stati scelti: "Re-use of polyamide-12 in powder bed fusion and its effect on process-relevant powder characteristics and final part properties" che trattava solo il problema della sostenibilità, ma non nell'ottica di rapid prototyping e deep learning; e "Applications of synthetic biology in health, energy, and environment" che non risultava avere keywords corrispondenti a quelli della stringa di ricerca.

3.3 Articoli esclusi dalla seconda fase

Dopo la prima fase, descritta nel capitolo precedente (3.2), sono stati ottenuti quindi 38 articoli. Nella seconda fase di selezione, il metodo analitico precedentemente descritto propone di leggere più approfonditamente gli articoli rimanenti con l'obiettivo di fare un'ulteriore scrematura di quegli articoli che dall'abstract sembravano essere coerenti con l'argomento di ricerca bibliografica, ma che poi risultano invece poco attinenti per varie motivazioni. Si è proceduto quindi in questo modo, andando ad eliminare alcuni dei 38 articoli.

In particolare, si è scelto di escludere i seguenti articoli:

- [5] che non parlava nello specifico di artificial intelligence;
- [9] il quale era solo una prefazione estratta da un libro;
- [15] perché non parlava di artificial intelligence in relazione all'additive manufacturing, ma la nominava semplicemente come tecnologia innovativa;
- [16] in quanto trattava troppo genericamente di additive manufacturing;
- [17] che non trattava di come artificial intelligence migliora additive manufacturing, ma li descrive separatamente;
- [18] in quanto troppo generico e non trattava nello specifico le tre keywords;
- [1] poiché non parlava di additive manufacturing, ma in generale di manifattura sostenibile;
- [4] perché anche in questo caso non parlava specificatamente di additive manufacturing;
- [6] il quale parlava generalmente di industry4.0 e non nello specifico di additive manufacturing e artificial intelligence;
- [20] perché affrontava la questione di come l'utilizzo di machine learning migliori la stampa 3D, ma solo per ottenere materiali in composito e non per ottenere prodotti ecosostenibili;

- [7] poiché trattava di riparazione e restauro dei prodotti di additive manufacturing tramite l'utilizzo di intelligenza artificiale, argomento non pertinente con quello posto in questione;
- [22] che affrontava solo il problema della sostenibilità e non di come i modelli di artificial intelligence possano essere applicati all'additive manufacturing per migliorarla nell'ottica del rispetto dell'ambiente;
- [25] perché non parlava di additive manufacturing;
- [27] poiché proponeva un discorso generale sulle industry4.0 ma non affronta veramente come l'artificial intelligence influenza l'additive manufacturing per migliorare la sostenibilità ambientale;
- [29] il quale parlava di digital twin e non trattava di prodotti ecosostenibili
- [30] perché non affronta il problema della sostenibilità ambientale dei prodotti ottenuti dall'utilizzo di artificial intelligence per additive manufacturing;
- [32] il quale non trattava di additive manufacturing;
- [33] poiché era la prefazione di un libro;
- [37] che non tratta di sostenibilità ambientale.

Questa nuova fase di selezione è stata utile per ottenere un quadro più chiaro della situazione e conoscere meglio l'argomento che finalmente poteva essere trattato con maggior rigore di logica e con più interesse.

I 19 articoli rimanenti sono stati giudicati pertinenti e completamente idonei per capire come l'intelligenza artificiale vada a migliorare la stampa tridimensionale nell'ottica della sostenibilità ambientale.

4 Analisi e discussione dei risultati

In questo capitolo si propone un'analisi dei dati raccolti, durante l'applicazione del metodo, per la selezione degli articoli. In particolare, si fa riferimento alla prima fase di selezione in cui i documenti raccolti erano 38.

I grafici mostrati di seguito permettono di far comprendere come si è evoluta la ricerca sull'utilizzo di artificial intelligence nell'additive manufacturing per ecodesign. I risultati sono stati studiati nel loro andamento rispetto all'anno in cui è stato pubblicato ogni articolo, dal giornale e dalla casa editrice di appartenenza.

Ovviamente, come si è visto nel capitolo precedente, non tutti gli articoli sono stati poi presi in considerazione alla fine del processo di selezione, ma si è scelto di considerarli comunque tutti e trentotto perché sono quelli più coerenti che sono stati proposti dal database di Scopus e perché tra l'altro almeno una delle keywords della stringa di ricerca utilizzata erano sempre presenti.

Con questi tipi di analisi descritti di seguito si possono guardare gli articoli da un punto di vista diverso: viene offerto quindi uno spunto per come affrontare il metodo di ricerca utilizzato. Infatti i risultati che verranno mostrati fanno vedere come si possono ricercare gli articoli sull'argomento trattato in base agli anni in cui c'è stato maggior sviluppo e alla casa editrice che ha mostrato maggior interesse.

4.1 Analisi rispetto all'anno di pubblicazione

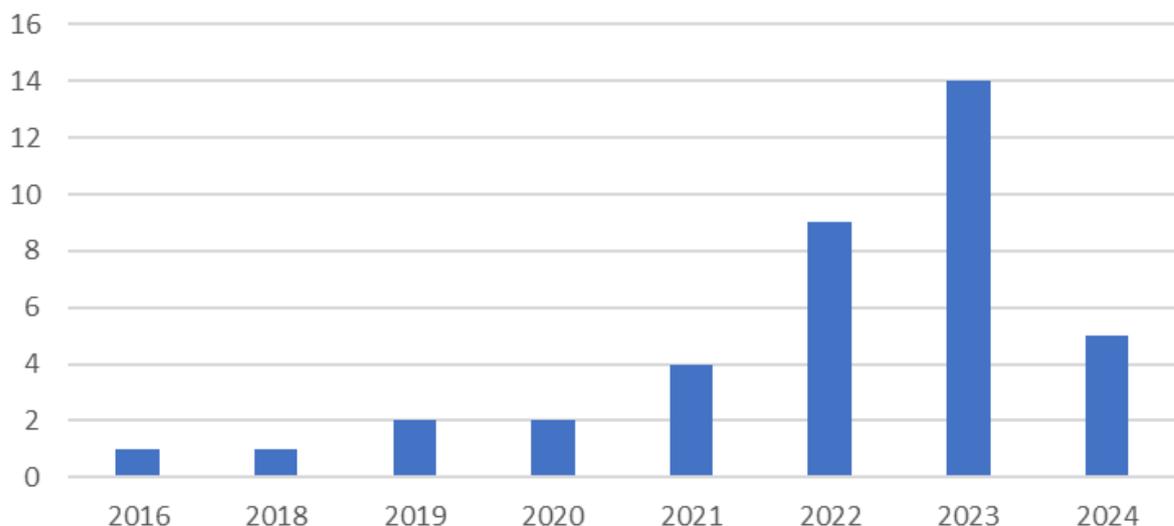


Figura 4-1. Grafico che rappresenta la distribuzione degli articoli rispetto all'anno di pubblicazione.

Considerando il 2024 come l'anno corrente e disponendo quindi di un numero minore di materiale, si può affermare che dal sito di ricerca è stato ricavato un maggior numero di articoli negli ultimi anni. Questo è un segnale evidente di come sia aumentato lo sviluppo e l'interesse sull'argomento trattato.

4.2 Analisi rispetto alla casa editrice

Tabella 4-1. Case editrici di provenienza degli articoli.

CASA EDITRICE	NUMERO DI ARTICOLI
Elsevier	19
Springer	7
Emerald	3
MDPI	3
KeAi Communications Co.	2
Shanghai University	1
Taylor and Francis Ltd.	1
Wiley	1
IEEE	1

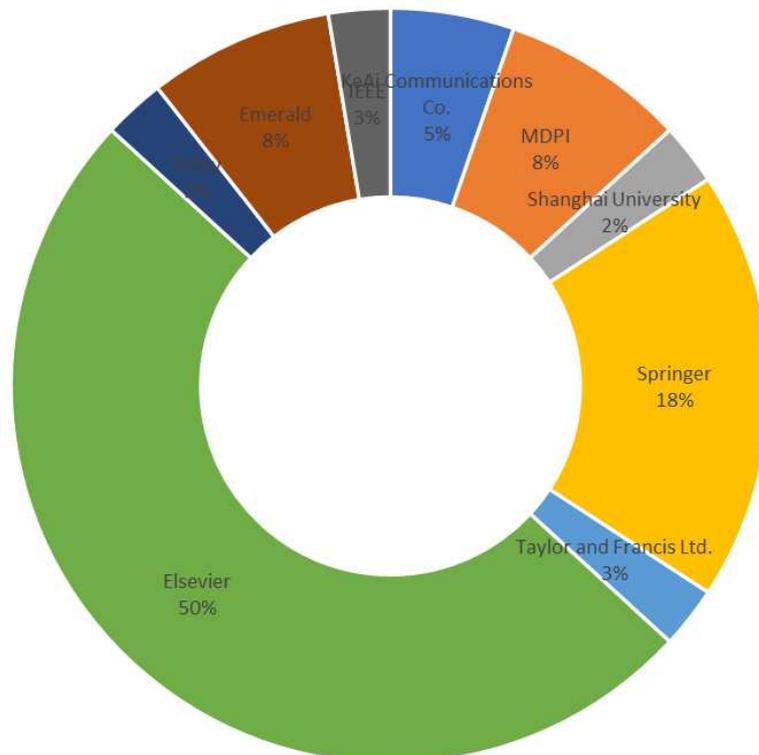


Figura 4-2. Case editrici espresse graficamente.

Dal grafico salta subito all'occhio come la casa editrice Elsevier sia la più dominante, in quanto il 50% degli articoli provenga da essa.

Si è provato anche a fare un'analisi sui giornali da cui provenivano gli articoli, ma non si è evidenziato nessun giornale predominante su tutti gli altri. Infatti i migliori risultati li hanno raccolti il Journal of "Cleaner Production" e il "Procedia CIRP" con appena 3 articoli ciascuno.

4.3 Studio degli articoli

I 19 articoli rimanenti sono molto più pertinenti e presentano tutte le keywords richieste, affrontandole come da argomento di tesi e senza sconfinare in altri ambiti.

Vanno infatti ad approfondire come l'artificial intelligence abbia migliorato le tecniche di additive manufacturing nell'ottica di un futuro sempre più sostenibile e nel rispetto dell'ambiente.

Infatti in alcuni articoli si parla di come il machine learning porti ad accrescere le performance dell'additive manufacturing riducendo il margine di errore nel design e quindi riducendo anche lo spreco.

In altri si apprende come l'artificial intelligence permetta di scegliere il materiale più attinente in base alla sostenibilità ambientale e al prodotto che vogliamo ottenere.

Oppure permette di ottenere prodotti di minor peso rispetto ad uno fatto senza l'utilizzo del deep learning, diminuendo quindi la quantità di materiale necessaria.

Infine si hanno vantaggi anche dal punto di vista energetico: produzione più semplice e più veloce porta a un minor bisogno di energia.

4.4 Clustering degli articoli

4.4.1 Benefici ambientali dell'AI nella manifattura additiva

Raggruppando gli articoli in base a cosa vada a migliorare, in termini di sostenibilità ambientale, l'utilizzo dei modelli di intelligenza artificiale nell'ambito di additive manufacturing, è possibile individuare tre gruppi. Infatti tali tecnologie portano delle migliorie dal punto di vista dell'energia, dello spreco di materiale e della qualità o difetti del prodotto. Si elencano di seguito gli articoli di questi tre macro-raggruppamenti e le motivazioni che li accomunano:

4.4.1.1 Gruppo 1: ENERGIA

Gli articoli che fanno parte di questo gruppo [8], [2], [3], [21], [24], [28], [36] hanno mostrato nel dettaglio come ridurre il consumo energetico dell'additive manufacturing, utilizzando metodi di intelligenza artificiale, per ridurre l'impatto ambientale. Questo è possibile rendendo più semplice e veloce la stampa tridimensionale utilizzando metodi di apprendimento automatico. Nel dettaglio di ogni articolo:

1. [8]: l'articolo propone un sistema di supporto alle decisioni per il processo di stampa 3D basato su sistemi di produzione fisica cyber (CPPS), che permette agli utenti di valutare dinamicamente l'impronta di carbonio in base al consumo di energia e materiale per il loro oggetto stampato in 3D.

Gli autori hanno sviluppato un framework CPPS per la sostenibilità del processo di stampa 3D, che integra quattro elementi fondamentali: il mondo fisico, l'acquisizione dei dati, il mondo cyber e la visualizzazione. Hanno condotto esperimenti basati sull'array ortogonale Taguchi L-9 con acido polilattico (PLA) come materiale di filamento per stimare il consumo di energia e l'impronta di carbonio. Hanno anche eseguito un'analisi statistica per indagare l'effetto del design del prodotto e dei parametri di stampa sulle risposte e determinare la combinazione ottimale di questi parametri per minimizzare l'impronta di carbonio.

Gli autori hanno dimostrato che il parametro di design (scala) ha l'effetto più significativo su tutte le risposte, mentre i parametri di processo (infill e altezza del layer) possono essere regolati in base al feedback delle risposte. Hanno fornito una raccomandazione per la combinazione ottimale di parametri di processo per una scala del 100% per minimizzare l'impronta di carbonio. Hanno anche evidenziato i vantaggi del CPPS rispetto alle misurazioni temporali normali, come la possibilità di fornire una raccomandazione istantanea dei parametri per ogni nuovo design del prodotto e un supporto decisionale per la valutazione ambientale o economica.

2. [2]: esaminare i parametri e le strategie influenti sulla sostenibilità ambientale della produzione additiva (AM) e proporre un nuovo framework per automatizzare la valutazione degli impatti ambientali del processo.

Il metodo si basa sulla revisione sistematica della letteratura su vari parametri di progettazione e processo legati alla sostenibilità ambientale dell'AM, utilizzando la metodologia Life Cycle Assessment (LCA) e il Machine Learning (ML).

Come risultato si è ottenuto l'identificazione di 14 parametri di progettazione e 10 parametri di processo che influenzano la sostenibilità ambientale dell'AM, con una discussione sui loro impatti diretti e indiretti. L'impatto diretto più evidente è quello del **risparmio energetico**. Si utilizza un framework basato sull'integrazione tra ML e il concetto di co-progettazione prodotto-processo per automatizzare la valutazione degli impatti ambientali dell'AM.

3. [3]: articolo scientifico che esplora l'uso dell'apprendimento automatico (ML) per automatizzare la valutazione del ciclo di vita (LCA) dei processi di produzione additiva (AM).

Propone un framework metodologico per integrare l'LCA con il ML, al fine di sviluppare metodi alternativi digitalizzati che supportino i processi decisionali durante le fasi di pianificazione e progettazione.

L'articolo presenta un caso di studio basato sul processo di AM di fusione a filamento fuso (FFF), utilizzando diversi algoritmi di ML per predire 18 categorie di impatto ambientale, tra cui, anche in questo caso, il **risparmio energetico**.

4. [21]: lo scopo di questo articolo è di presentare un nuovo approccio basato sull'apprendimento automatico per estrarre le caratteristiche geometriche correlate all'energia dal processo di stereolitografia a proiezione di immagini maschera (MIP SLA).

Come metodologia gli autori hanno usato l'analisi della varianza principale (PCA) per estrarre le caratteristiche dai predittori geometrici selezionati, e hanno confrontato quattro casi di modelli di regressione lineare per stimare e prevedere il consumo energetico del processo MIP SLA.

I modelli di regressione che usano le componenti principali critiche estratte dalla PCA hanno mostrato le migliori prestazioni in termini di R-quadrato aggiustato, errore quadratico medio (RMSE) e valore P. Inoltre, le componenti principali critiche hanno mostrato una chiara tendenza di clustering in base ai livelli di potenza.

Questo lavoro dimostra l'efficacia dell'approccio basato sull'apprendimento automatico per collegare le caratteristiche geometriche con il consumo energetico del processo MIP SLA. Questo lavoro può contribuire a stabilire l'inventario del ciclo di vita (LCI) per i processi di fabbricazione additiva e a valutare il loro impatto ambientale.

5. [24]: lo studio fatto in questo documento si pone di sviluppare un sistema esperto basato sulla sostenibilità per la selezione tra la produzione additiva (PA) e la lavorazione CNC di componenti metallici, considerando i parametri di prodotto, processo e sistema.

Come indicatori di sostenibilità sono stati presi in considerazione il consumo energetico e l'uso di materiali ausiliari (in relazione al costo del processo) durante le fasi di fabbricazione e lavorazione dei materiali. Sono state confrontate tre tecnologie: BJP (binder jetting process), DMLS (direct metal laser sintering) e CNC (computer numerical control) machining.

Si è utilizzato il software Exsys Corvid® per creare due sistemi esperti: MSUSTAIN1 per valutare la fattibilità delle tecnologie e MSUSTAIN2 per fornire consigli sulla sostenibilità. L'utilizzo del processo analitico gerarchico (AHP) per assegnare punteggi alle tecnologie in base all'uso di materiali ausiliari.

Il sistema esperto è stato verificato confrontando la sostenibilità di BJP e CNC nella fabbricazione di un componente in acciaio inossidabile 316L. I risultati hanno mostrato che BJP ha indicatori di sostenibilità energetica più favorevoli rispetto a CNC, considerando la fabbricazione di componenti fattibili per entrambe le tecnologie.

6. [28]: l'articolo presenta un metodo basato sull'apprendimento profondo e sull'ottimizzazione dello sciame di particelle per modellare e ridurre il consumo energetico della produzione additiva (AM).

Gli autori propongono di utilizzare i dati relativi al design, come la geometria, l'orientamento e la posizione delle parti, per prevedere il consumo energetico dell'AM tramite una rete neurale profonda. Inoltre, introducono un algoritmo di ottimizzazione dello sciame di particelle guidato dall'apprendimento profondo (DLD-PSO) per trovare le migliori impostazioni dei parametri di design per minimizzare il consumo energetico.

Gli autori applicano il loro metodo a un caso di studio basato su un sistema di sinterizzazione laser selettiva (SLS) e confrontano le prestazioni del modello di previsione e dell'algoritmo di ottimizzazione con altri metodi esistenti. I risultati mostrano che il metodo proposto è in grado di modellare con precisione il consumo energetico dell'AM e di ridurlo fino al 30% rispetto al caso base.

L'articolo fornisce un approccio innovativo per analizzare e ottimizzare il consumo energetico dell'AM basato sui dati relativi al design, che sono facilmente accessibili prima della produzione.

7. [36]: La pagina è un articolo scientifico pubblicato sulla rivista Journal of Cleaner Production nel 2023, che propone un nuovo metodo di apprendimento profondo per prevedere il consumo energetico nella produzione additiva (AM).

Il metodo proposto, chiamato Variational Scale-aware Transformer (VST), sfrutta una rete multistadio che incorpora informazioni multi-scala da un piccolo dataset, adattandosi alle variazioni dimensionali e alla complessità geometrica dei modelli CAD.

Il VST supera i metodi esistenti basati su machine learning e deep learning, che richiedono molte etichette annotate e trascurano le variazioni dimensionali dei prodotti, portando a prestazioni scarse con un alto budget sperimentale.

Essp viene valutato su un dataset multi-scala costruito dagli autori, usando sia esperimenti numerici che fisici, e dimostra di poter raggiungere una notevole precisione nella predizione del consumo energetico con modesti costi computazionali e sperimentali.

Il VST può essere utilizzato per il design di basso budget dell'efficienza energetica in AM, aiutando i progettisti a ridisegnare la geometria delle parti e adottare i parametri di processo ottimali per una produzione più pulita e sostenibile in AM.

Come mostrato nel dettaglio, i vari articoli propongono vari studi, e di conseguenza vari metodi, per portare miglioramenti all'additive manufacturing attraverso l'intelligenza artificiale. Infatti, si può notare come sia [2] che [3] si basino sulla valutazione del ciclo vita (LCA), che con l'aiuto di machine learning, porti dei miglioramenti a livello di impatto ambientale, tra cui quindi anche l'energia.

Altri articoli descrivono nel dettaglio le tipologie di software utilizzati, mentre in altri ci si sofferma molto sulle applicazioni, come brevemente descritto nei punti sopra.

L'ultimo articolo descritto [36] propone un metodo citato con la sigla VST che propone di agire direttamente sui modelli CAD.

E' visibile comunque come questi studi abbiano tutti la stessa finalità in comune: ridurre l'impatto ambientale.

4.4.1.2 Gruppo 2: SPRECO E MATERIALE

In questo gruppo gli articoli [8], [2], [34], [38], [11], [19] hanno in comune l'obiettivo di diminuire lo spreco o scegliere il materiale più ecologico. Ciò è possibile migliorando i parametri di progetto al fine ottenere un prodotto efficiente e con minor spreco di materiale.

Nel dettaglio gli articoli:

1. [8]: articolo già riassunto nel paragrafo 4.4.1.1 al punto 1. Dal punto di vista del materiale, oltre al risparmio energetico, il framework descritto permette agli utenti di valutare dinamicamente l'impronta di carbonio in base al consumo di energia e materiale per il loro oggetto stampato in 3D. Hanno condotto esperimenti basati sull'array ortogonale Taguchi L-9 con acido polilattico (PLA) come materiale di filamento per stimare il consumo di energia e l'impronta di carbonio. Alla fine, sono arrivati a fornire una raccomandazione per la combinazione ottimale di parametri di processo per una scala del 100% per minimizzare l'impronta di carbonio.
2. [2]: già riassunto nel paragrafo 4.4.1.1 al punto 2. Viene fatta un'analisi dei parametri di progetto e di processo che abbiano degli impatti diretti o indiretti sulla sostenibilità ambientale. Tra questi c'è anche la riduzione dello spreco di materiale.
3. [34]: uno studio che esplora come la progettazione assistita da computer e le simulazioni possano aiutare a creare prodotti ottimizzati e leggeri con la tecnologia di fusione a letto di polvere laser (L-PBF).
Si basa su una revisione della letteratura e un caso virtuale di ottimizzazione del design di una trave a sbalzo. Lo scopo è di evidenziare i benefici ambientali, economici e sociali della produzione additiva rispetto ai metodi convenzionali. Il risultato dimostra come la produzione additiva possa influenzare la funzionalità, il peso, il tempo di produzione e il consumo di risorse dei componenti metallici. Lo studio confronta anche tre metodi di ottimizzazione del design: topologia, nido d'ape e reticolo.
Lo studio aggiunge alle conoscenze sugli aspetti di sostenibilità della produzione additiva, sottolineando l'importanza della progettazione assistita da simulazioni per migliorare l'efficienza delle risorse e la qualità dei prodotti. Lo studio suggerisce anche aree di ricerca future per approfondire il tema.
4. [38]: l'articolo esplora i fattori abilitanti per l'implementazione della produzione additiva (AM) per la sostenibilità nelle operazioni.

Gli autori hanno identificato 19 fattori abilitanti per l'AM sostenibile (SAM) attraverso una revisione sistematica della letteratura e li hanno classificati in tre aree: sociale, economica e ambientale. Hanno poi applicato l'approccio DEMATEL per analizzare le relazioni causali tra i fattori e costruire un diagramma causa-effetto. DEMATEL è l'acronimo di "Decision Making Trial and Evaluation Laboratory". Si tratta di un metodo di modellizzazione strutturale che aiuta ad analizzare le relazioni causa-effetto tra i componenti di un sistema complesso. Il metodo valuta le relazioni interdipendenti tra i fattori e ne individua quelli critici attraverso un modello strutturale visivo. Il DEMATEL è considerato un metodo efficace per l'identificazione dei componenti di una catena causa-effetto di un sistema complesso.

Gli autori hanno trovato che la riduzione del peso, la riduzione del tempo di commercializzazione e la personalizzazione di massa sono i fattori più critici per la sostenibilità. Hanno anche identificato i fattori causa ed effetto e hanno fornito delle implicazioni per i praticanti, i policy maker e i ricercatori.

L'articolo contribuisce a colmare il divario nella letteratura sull'AM sostenibile, fornendo una lista di fattori abilitanti e una mappatura delle loro interrelazioni. L'articolo offre anche una prospettiva globale sulla sostenibilità dell'AM e suggerisce delle aree per future ricerche.

5. [11]: Si tratta di una revisione scientifica che esplora il potenziale della tecnologia di stampa 3D nell'upcycling dei rifiuti plastici e biomasse in composti sostenibili. E' un articolo incentrato molto sui rifiuti plastici della stampa in 3D, ma propone anche come una delle tecniche future per questo problema, sia senz'altro l'utilizzo dell'intelligenza artificiale.

Esso descrive i diversi metodi per trasformare i rifiuti plastici in materie prime per la stampa 3D, come il riciclaggio primario, secondario, terziario e quaternario, e i loro vantaggi e svantaggi.

Discute i benefici ambientali e le sfide tecniche dell'utilizzo di biomasse di scarto, come residui agricoli, alimentari e forestali, come riempitivi nei compositi stampati in 3D.

Illustra il processo di pirolisi per convertire le biomasse di scarto in biocarbone, che presenta una maggiore stabilità termica e facilità di macinazione rispetto alle biomasse grezze, e le sue applicazioni nella stampa 3D di compositi rinforzati con biocarbone.

6. [19]: la pagina presenta una revisione completa dello stato attuale della fabbricazione additiva (AM), una tecnologia che rivoluziona il modo di produrre beni e componenti in vari settori.

Descrive i principi fondamentali, le caratteristiche chiave, le categorie principali e i materiali utilizzati nei processi di additive manufacturing (AM). Inoltre, esamina le diverse applicazioni di AM per la fabbricazione e la rimanifattura di parti, componenti e prodotti.

Valuta i progressi attuali in AM, come il progresso nella stampa 3D multimateriale e di grandi dimensioni, il miglioramento della velocità e dell'efficacia, la precisione e l'accuratezza, l'automazione e la sostenibilità.

Indaga alcune delle sfide attuali che affronta AM, come i limiti dei materiali, i costi, la proprietà intellettuale e la sostenibilità. Inoltre, analizzando gli articoli di revisione su vari aspetti di AM, la pagina fornisce una panoramica più completa del tema.

Infine, la pagina conclude con i punti salienti delle prospettive future e delle tendenze emergenti in additive manufacturing, come l'utilizzo di metodi di intelligenza artificiale per migliorare l'applicazione di additive manufacturing dal punto di vista dei materiali e la sostenibilità degli stessi.

In questo paragrafo, anche se alcuni articoli non trattano nello specifico come utilizzare l'intelligenza artificiale in additive manufacturing, essi ci anticipano comunque su che punti la ricerca scientifica può andare ad operare per ridurre lo spreco di materiale. Si propone di migliorarne il design, di produrre oggetti più leggeri e di scegliere materiali ecosostenibili ma comunque efficienti. Incentiva quindi la ricerca futura ad operare su questo campo a come utilizzare le potenzialità dell'artificial intelligence.

4.4.1.3 Gruppo 3: QUALITA' E DIFETTI

[12], [13], [23], [26], [31], [34], [38], sono gli articoli che hanno affrontato l'argomento con il fine di migliorare la qualità del prodotto e riducendo i difetti dello stesso per avere degli sviluppi sostenibili e positivi sul fronte del rispetto dell'ambiente. Questo può avvenire prevedendo già dalla progettazione come l'utilizzo di modelli di machine learning per additive manufacturing riduca l'errore nella realizzazione del prodotto riducendone i difetti e migliorando il design. A proposito di ciò si riassumono di seguito gli articoli:

1. [12]: La pagina presenta un articolo di ricerca che propone un nuovo metodo di apprendimento automatico per l'identificazione dei difetti nella produzione additiva (AM) usando metallo. Il metodo utilizza una rete neurale basata su un modello avversario gaussiano fuzzy con codificatore quantile e rinforzo spaziale. Il metodo è stato testato su dati di monitoraggio automatico raccolti da una piattaforma AM distribuita con capacità di calcolo integrate. Il metodo ha raggiunto un'accuratezza di addestramento del 98%, una precisione media del 57%, un errore quadratico medio del 58%, una F-misura del 71% e un tasso di rilevamento dei difetti del 78%.
2. [13]: l'articolo descrive lo sviluppo di un framework di sistema di produzione ciberfisico per l'analisi della stampa 3D.
L'obiettivo è proporre un framework di sistema di produzione ciberfisico (CPPS) per una stampante 3D per:
 - (i) monitorare il processo, i parametri e l'impronta di carbonio;
 - (ii) prevedere la vita utile residua (RUL) dell'ugello;
 - (iii) prescrivere i parametri di stampa 3D ottimali per minimizzare l'impronta di carbonio e il tempo di stampa, contemporaneamente alla qualità superficiale desiderata.

Il metodo consiste nell'utilizzare dispositivi intelligenti, sensori, software open source e algoritmi di apprendimento automatico per acquisire, analizzare e visualizzare i dati relativi al prodotto e al processo di stampa 3D. La sperimentazione è basata sull'array ortogonale Taguchi L27 per studiare l'influenza dei parametri di stampa sulle caratteristiche di prestazione. Sviluppo di modelli di regressione per prescrivere i parametri di stampa ottimali e di un modello auto regressivo per prevedere la RUL dell'ugello.

Il framework CPPS proposto ha dimostrato la sua utilità come strumento di supporto alle decisioni per il monitoraggio in tempo reale, la visualizzazione e il controllo di una stampante 3D. Il modello prognostico ha previsto la RUL dell'ugello a circa 300 ore. Il modello prescrittivo ha fornito una combinazione ottimale di parametri di stampa per la minimizzazione simultanea dell'impronta di carbonio specifica e del tempo di stampa alla qualità superficiale mirata.
3. [23]: in questo caso si tratta di un approccio di apprendimento profondo per il monitoraggio in tempo reale del processo di sinterizzazione laser selettiva e il rilevamento dei difetti di arricciatura mediante termografia a infrarossi e reti neurali convoluzionali.

Si cerca investigare sull'uso delle reti neurali convoluzionali (CNN) per controllare la qualità in situ del processo di sinterizzazione laser selettiva (SLS) di polveri di poliammide, usando le immagini termiche a infrarossi come dati di input.

Sono state registrate le immagini termiche di un processo SLS con difetti artificialmente indotti di arricciatura, causati da una riduzione della temperatura del processo. Sono state usate diverse architetture di CNN, tra cui VGG-16, Xception e ResNet50, per classificare le immagini in parti accurate o difettose. Sono state usate anche le mappe di calore Grad-CAM per visualizzare le aree importanti per le predizioni delle CNN.

Il modello VGG-16 ha ottenuto un'accuratezza media di rilevamento dei difetti di arricciatura del 98,54%, superando gli altri modelli. Le mappe di calore Grad-CAM hanno mostrato che le CNN erano in grado di rilevare le aree arricciate e non la temperatura ridotta del letto di polvere.

4. [26]: L'articolo presenta una revisione sistematica della letteratura sul ruolo dell'intelligenza artificiale (AI) nel design industriale, che è la pratica di migliorare la funzione, il valore e l'estetica dei prodotti per ottimizzare la soddisfazione del cliente. Gli autori propongono una metodologia di revisione basata sull'apprendimento non supervisionato per identificare, classificare e analizzare gli articoli rilevanti. Sei nuclei intellettuali relativi all'AI nel design industriale sono formulati e discussi, e tre tendenze future sono suggerite: design sostenibile ed eco-innovazione, fiducia nell'uso dell'AI nel design industriale, e fusione dell'AI con altre tecnologie emergenti.
5. [31]: La pagina è un articolo scientifico che propone un sistema basato sull'apprendimento automatico per monitorare e ottimizzare i parametri di processo nella stampa 3D.
Gli autori usano sia modelli di apprendimento automatico a ciclo aperto che a ciclo chiuso e li integrano per analizzare l'effetto dei parametri di processo sulla qualità delle parti stampate. Usano anche un sistema di controllo fuzzy per generare parametri di processo ottimizzati.
I risultati mostrano che il sistema è in grado di prevedere lo stato di connessione tra le linee stampate e di regolare i parametri di processo in modo dinamico per ottenere una migliore qualità delle parti. Confrontano il loro sistema con altri metodi esistenti e dimostrano la sua superiorità.
6. [34]: già riassunto al paragrafo 4.4.1.2 al punto 3.
7. [38]: già riassunto al paragrafo 4.4.1.2 al punto 4.

In generale questo paragrafo mostra articoli che vanno a migliorare il design e come esso impatti sulla sostenibilità ambientale. Questo può avvenire prevedendo già dalla progettazione come l'utilizzo di modelli di machine learning per additive manufacturing riduca l'errore nella realizzazione del prodotto riducendone i difetti.

4.4.2 AI a supporto della progettazione

Gli articoli che saranno elencati di seguito sono stati raccolti in due gruppi in base a dove si è andata ad analizzare la manifattura additiva, per intervenire con metodi di apprendimento automatico, per avere dei miglioramenti di efficienza e di rispetto per l'ambiente. Ecco allora che si è visto come l'intelligenza artificiale possa agire sulla forma del prodotto e sul materiale utilizzato dalla stampa 3D.

4.4.2.1 Gruppo 1: variabile di forma

Gli articoli:

- [8], [2], [3], [21], [24], [28] descritti nel paragrafo 4.4.1.1;
- [23], [26] descritti nel paragrafo 4.4.1.3;
- [34] descritto nel paragrafo 4.4.1.2;

mostrano come bisogna agire sui parametri della forma del prodotto per migliorare i vari aspetti della sostenibilità come il minor consumo di energia, la riduzione dello spreco di materiale e la diminuzione dei difetti.

4.4.2.2 Gruppo 2: variabile del materiale

Gli articoli:

- [13] descritto nel paragrafo 4.4.1.3;
- [24] descritto nel paragrafo 4.4.1.1;
- [34] descritto nel paragrafo 4.4.1.2;

Scegliere materiali ecologici o riciclabili e ridurre l'utilizzo di quelli più inquinanti mantenendo comunque l'efficienza del prodotto o addirittura migliorarlo attraverso lo studio dei modelli di artificial intelligence applicati all'additive manufacturing.

5 Conclusioni

Nella prima parte di questa tesi è stato mostrato il metodo di ricerca degli articoli, utilizzati poi per affrontare l'argomento trattato. Si è preso spunto da un metodo riconosciuto, PRISMA, e poi si è scelto di utilizzarne uno con alcune differenze e similitudini. Il metodo è risultato il più possibile oggettivo e analitico, ottenendo dei buoni risultati in termini di materiale a disposizione per affrontare il problema.

Facendo un riassunto di ciò che è stato affrontato nella seconda parte di questa tesi si può concludere che i miglioramenti che i metodi di intelligenza artificiale possono apportare alla manifattura additiva sono notevoli e molto importanti in termini di rispetto dell'ambiente. Andando a scardinare nel dettaglio in che campo si hanno i maggiori balzi in avanti, si è notato come questi avvengano dal punto di vista del risparmio energetico e della riduzione dei difetti.

Nel primo caso ciò avviene grazie all'applicazione di metodi di apprendimento automatico che abbiano l'obiettivo di ridurre il tempo dei processi, oltre che renderli più semplici andando a migliorare i parametri di progetto e di processo.

Nel secondo caso l'intelligenza artificiale è andata a prevedere i difetti del prodotto già dalla fase di progettazione, evitando di dover ricercare tali difetti a prodotto già finito. Ciò può rappresentare una svolta sia in termini impatto ambientale, ma anche dal punto di vista della performance del prodotto.

La ricerca degli articoli ha mostrato però che ci sono stati meno sviluppi in termini di spreco di materiale nell'utilizzo di artificial intelligence in ambito additive manufacturing. E' stato più volte evidenziato come esso sia uno degli obiettivi fondamentali per la ricerca futura, ma c'è da segnalare come essa debba intervenire meglio su come l'artificial intelligence possa essere integrata nella manifattura additiva, in quanto sono stati trovati pochi riscontri.

Andando a scandagliare invece su quali parametri l'intelligenza artificiale vada ad agire, notiamo come essa intervenga soprattutto su quelli di progetto come la forma e quindi il design.

Maggiori passi avanti dovranno essere fatti, in questo senso, nella scelta del materiale. Non sempre gli articoli usati come fonti hanno chiarito quale possa essere il materiale più adatto per l'ottenimento di un prodotto ecologico, ma anche performante, come richiesto in base all'utilizzo.

6 Bibliografia

- [1] Tamym, L., Benyoucef, L., Nait Sidi Moh, A., & El Ouadghiri, M. D. (2023). *Big Data Analytics-based life cycle sustainability assessment for sustainable manufacturing enterprises evaluation*. *Journal of Big Data*, 10(1), 170.
- [2] Naser, A. Z., Defersha, F., Pei, E., Zhao, Y. F., & Yang, S. (2023). *Toward automated life cycle assessment for additive manufacturing: A systematic review of influential parameters and framework design*. *Sustainable Production and Consumption*, 41, 253–274.
- [3] Naser, A. Z., Defersha, F., Xu, X., & Yang, S. (2023). *Automating life cycle assessment for additive manufacturing with machine learning: Framework design, dataset buildup, and a case study*. *Journal of Manufacturing Systems*, 71, 504–526.
- [4] Rodrigues Dias, V. M., Jugend, D., de Camargo Fiorini, P., Razzino, C. do A., & Paula Pinheiro, M. A. (2022). *Possibilities for applying the circular economy in the aerospace industry: Practices, opportunities and challenges*. *Journal of Air Transport Management*, 102, 102227.
- [5] Malik, A., Ul Haq, M. I., Raina, A., & Gupta, K. (2022). *3D printing towards implementing Industry 4.0: sustainability aspects, barriers and challenges*. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*, 49(3), 491–511.
- [6] de Sousa Jabbour, A. B. L., Jabbour, C. J. C., Foropon, C., & Godinho Filho, M. (2018). *When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors*. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 18–25.
- [7] Aziz, N. A., Adnan, N. A. A., Wahab, D. A., & Azman, A. H. (2021). *Component design optimisation based on artificial intelligence in support of additive manufacturing repair and restoration: Current status and future outlook for remanufacturing*. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126401.
- [8] Kumar, R., Rogall, C., Thiede, S., Herrmann, C., & Sangwan, K. S. (2021). *Development of a Decision Support System for 3D Printing Processes based on Cyber Physical Production Systems*. *Procedia CIRP*, 98, 348–353.
- [9] Keivanpour, S. (2022). *Approaches, Opportunities, and Challenges for Eco-design 4.0*. In *Approaches, Opportunities, and Challenges for Eco-design 4.0: A Concise Guide for Practitioners and Students*. Springer International Publishing.

- [10] Abdelhamid, Z., Mohamed, H., & Kelouwani, S. (2024). *The use of machine learning in process–structure–property modeling for material extrusion additive manufacturing: a state-of-the-art review*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 46(2), 70.
- [11] Hassan, M., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2024). *3D printing in upcycling plastic and biomass waste to sustainable polymer blends and composites: A review*. Materials & Design, 237, 112558.
- [12] Kong, L., Wang, Z., & He, Q. (2023). *Numerical analysis of fault detection in additive manufacturing based on sustainable automation techniques*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 00170-023-12624-2
- [13] Sangwan, K. S., Kumar, R., Herrmann, C., Sharma, D. K., & Patel, R. (2023). *Development of a cyber physical production system framework for 3D printing analytics*. Applied Soft Computing, 146, 110719.
- [14] Qin, J., Hu, F., Liu, Y., Witherell, P., Wang, C. C. L., Rosen, D. W., Simpson, T. W., Lu, Y., & Tang, Q. (2022). *Research and application of machine learning for additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 52, 102691.
- [15] Mehrpouya, M., Dehghanghadikolaei, A., Fotovvati, B., Vosooghnia, A., Emamian, S. S., & Gisario, A. (2019). *The Potential of Additive Manufacturing in the Smart Factory Industrial 4.0: A Review*. Applied Sciences, 9(18), 3865.
- [16] Singh, M., Goyat, R., & Panwar, R. (2024). *Fundamental pillars for industry 4.0 development: implementation framework and challenges in manufacturing environment*. The TQM Journal, 36(1), 288–309.
- [17] Huang, Z., Shen, Y., Li, J., Fey, M., & Brecher, C. (2021). *A Survey on AI-Driven Digital Twins in Industry 4.0: Smart Manufacturing and Advanced Robotics*. Sensors, 21(19), 6340.
- [18] Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Gonzalez, E. S. (2022). *Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability*. Sustainable Operations and Computers, 3, 203–217.
- [19] Kanishka, K., & Acherjee, B. (2023). *Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials, developments, and challenges*. Journal of Manufacturing Processes, 107, 574–619.
- [20] Cai, R., Wen, W., Wang, K., Peng, Y., Ahzi, S., & Chinesta, F. (2022). *Tailoring interfacial properties of 3D-printed continuous natural fiber reinforced polypropylene composites through parameter optimization using machine learning methods*. Materials Today Communications, 32, 103985.
- [21] Yang, Y., He, M., & Li, L. (2019). *A new machine learning based geometry feature extraction approach for energy consumption estimation in mask image projection stereolithography*. Procedia CIRP, 80, 741–745.

- [22]Javaid, M., Haleem, A., Pratap Singh, R., Khan, S., & Suman, R. (2022). *Sustainability 4.0 and its applications in the field of manufacturing. Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 2, 82–90
- [23]Klamert, V., Schmid-Kietreiber, M., & Bublin, M. (2022). *A deep learning approach for real time process monitoring and curling defect detection in Selective Laser Sintering by infrared thermography and convolutional neural networks*. *Procedia CIRP*, 111, 317–320
- [24]Perera, J. C., Gopalakrishnan, B., Bisht, P. S., Chaudhari, S., & Sundaramoorthy, S. (2023). *A Sustainability-Based Expert System for Additive Manufacturing and CNC Machining*. *Sensors*, 23(18), 7770.
- [25]Agrawal, R., Majumdar, A., Kumar, A., & Luthra, S. (2023). *Integration of artificial intelligence in sustainable manufacturing: current status and future opportunities*. *Operations Management Research*, 16(4), 1720–1741.
- [26]Tsang, Y. P., & Lee, C. K. M. (2022). *Artificial intelligence in industrial design: A semi-automated literature survey*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 112, 104884.
- [27]Calabrese, A., Costa, R., Tiburzi, L., & Brem, A. (2023). *Merging two revolutions: A human-artificial intelligence method to study how sustainability and Industry 4.0 are intertwined*. *Technological Forecasting and Social Change*, 188, 122265.
- [28]Qin, J., Liu, Y., Grosvenor, R., Lacan, F., & Jiang, Z. (2020). *Deep learning-driven particle swarm optimisation for additive manufacturing energy optimisation*. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118702.
- [29]He, B., & Bai, K.-J. (2021). *Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review*. *Advances in Manufacturing*, 9(1), 1–21.
- [30]Tamir, T. S., Xiong, G., Shen, Z., Leng, J., Fang, Q., Yang, Y., Jiang, J., Lodhi, E., & Wang, F.-Y. (2023). *3D printing in materials manufacturing industry: A realm of Industry 4.0*. *Heliyon*, 9(9), e19689.
- [31]Tamir, T. S., Xiong, G., Fang, Q., Yang, Y., Shen, Z., Zhou, M., & Jiang, J. (2023). *Machine-learning-based monitoring and optimization of processing parameters in 3D printing*. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(9), 1362–1378.
- [32]KEK, V., S., V., P., B., & R., M. (2016). *Rapid prototyping process selection using multi criteria decision making considering environmental criteria and its decision support system*. *Rapid Prototyping Journal*, 22(2), 225–250.
- [33]Sadiku, M. N. O., Ajayi-Majebi, A. J., & Adebo, P. O. (2023). *Emerging Technologies in Manufacturing*. In *Emerging Technologies in Manufacturing*. Springer International Publishing.

- [34]Nyamekye, P., Lakshmanan, R., Tepponen, V., & Westman, S. (2024). *Sustainability aspects of additive manufacturing: Leveraging resource efficiency via product design optimization and laser powder bed fusion*. *Heliyon*, 10(1), e23152.
- [35]Yang, S., Page, T., Zhang, Y., & Zhao, Y. F. (2020). *Towards an automated decision support system for the identification of additive manufacturing part candidates*. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(8), 1917–1933.
- [36]Wang, K., Xu, J., Zhang, S., Tan, J., & Qin, J. (2023). *Towards low-budget energy efficiency design in additive manufacturing based on variational scale-aware transformer*. *Journal of Cleaner Production*, 393, 136168.
- [37]Nasrin, T., Pourkamali-Anaraki, F., & Peterson, A. M. (2023). *Application of machine learning in polymer additive manufacturing: A review*. *Journal of Polymer Science*.
- [38]Sonar, H., Ghosh, S., Singh, R. K., Khanzode, V., Akarte, M., & Ghag, N. (2024). *Implementing Additive Manufacturing for Sustainability in Operations: Analysis of Enabling Factors*. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 3205–3219.
- [39]Theodoridis, T., & Kraemer, J. (n.d.). Literature Reviews: systematic searching at various levels. <https://libguides.derby.ac.uk/literature-reviews/prisma-lr#:~:text=PRISMA is an evidence-based, research%2C particularly evaluations of interventions>