



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO
Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

ADDITIVE MANUFACTURING E SUPPLY CHAIN: UNA SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Relatore:
Anna Corinna Cagliano

Correlatori:
Giovanni Zenezini
Eleonora Atzeni

Candidato:
Martina Piazza

Anno accademico 2022/2023

A Mamma e Papà.

Indice

Introduzione	4
1 Additive Manufacturing e Supply Chain	6
1.1 Logistica, Supply Chain e Supply Chain Management	6
1.1.1 Definizione di Logistica	7
1.1.2 Definizione di Supply Chain (SC)	8
1.1.3 Definizione di Supply Chain Management (SCM)	10
1.1.4 Focus sul network distributivo	11
1.1.5 Le sfide e la supply chain del futuro	14
1.2 Additive Manufacturing (AM)	17
1.2.1 Definizione	17
1.2.2 Storia ed evoluzione della tecnologia	18
1.2.3 Le categorie di processo	19
1.2.4 I materiali	22
1.2.5 Vantaggi e limiti dell'Additive Manufacturing	23
1.2.6 Il mercato globale: applicazioni e settori	25
1.3 Applicazione dell'Additive Manufacturing alla Supply Chain (SC-AM)	29
1.3.1 SC-AM con struttura centralizzata	29
1.3.2 SC-AM con struttura decentralizzata o distribuita	31
1.3.3 SC-AM con struttura intermedia o ad hub	32
1.3.4 SC-AM con struttura estrema o domestica	34
1.3.5 Vantaggi e limiti di SC-AM	35

2	Obiettivi e metodologia di ricerca	37
2.1	Obiettivi	37
2.2	Descrizione della metodologia	38
3	Analisi della letteratura e risultati	46
3.1	Analisi della distribuzione degli articoli e degli autori	47
3.2	Analisi delle riviste	51
3.3	Analisi delle metodologie e degli strumenti di ricerca	59
3.4	Analisi dei processi e delle tecnologie di Additive Manufacturing	62
3.5	Analisi delle applicazioni e dei settori industriali	64
3.6	Analisi dei contenuti del tema 1: Struttura del Network	67
3.6.1	Confronto tra strutture SC-AM	68
3.6.2	Aspettativa accademica sulla migliore configurazione SC-AM	70
3.6.3	Struttura SC-AM decentralizzata vs. centralizzata vs. intermedia	73
3.6.4	Struttura SC-AM domestica	78
3.7	Risultati dell'analisi dei contenuti del tema 1	80
3.8	Analisi dei contenuti del tema 2: Gestione dell'inventario	83
3.8.1	Politiche di gestione dell'inventario	83
3.8.2	Gestione di materie prime, semilavorati, prodotti finiti	87
3.8.3	Stock di sicurezza	90
3.9	Risultati dell'analisi dei contenuti del tema 2	93
3.10	Analisi dei contenuti del tema 3: Trasporti e logistics service providers	95
3.10.1	Logistics service providers (LSP)	95
3.10.2	Trasporti a lunga distanza e dell'ultimo miglio	98
3.10.3	AM mobile	102
3.11	Risultati dell'analisi dei contenuti del tema 3	105
3.12	Riepilogo dei principali risultati dell'analisi	107

4	Discussioni e conclusioni	112
4.1	Benefici del lavoro di tesi	112
4.2	Research gaps e sviluppi futuri	113
4.3	Conclusioni	115
	Bibliografia	117
	Sitografia	130
	Ringraziamenti	134

Elenco delle figure

1.1	Le attività logistiche [6]	7
1.2	Le fasi della Supply Chain [9]	8
1.3	Le attività del Supply Chain Management [11]	10
1.4	Confronto tra Supply Chain tradizionale e digitale [16]	15
1.5	Le tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 [18]	16
1.6	Vantaggi produttivi per l'Additive Manufacturing (Attaran, 2017)	24
1.7	Tasso di adozione dell'Additive Manufacturing nel mondo [26]	25
1.8	Additive Manufacturing e settori industriali [26]	27
1.9	SC-AM in uno scenario centralizzato [27]	30
1.10	SC-AM in uno scenario decentralizzato [27]	32
1.11	Configurazioni di SC-AM in base al tasso di decentramento (Cantini et al., 2022)	33
1.12	SC-AM in uno scenario estremo [27]	34
2.1	Keywords usate per la ricerca degli articoli	41
2.2	Procedura di Snowballing (Wholin, 2014)	43
2.3	Procedura di selezione del campione di analisi	44
3.1	Numero di articoli per tema di ricerca	47
3.2	Andamento temporale degli articoli	48
3.3	Nazionalità degli autori	49
3.4	Frequenza degli autori	50
3.5	Classificazione in quartili [31]	52

3.6	Frequenza delle riviste	53
3.7	Distribuzione geografica delle riviste	54
3.8	Distribuzione dei quartili delle riviste	55
3.9	5-Year Impact Factor delle riviste	57
3.10	Riviste più frequenti e 5-IF	58
3.11	Analisi delle metodologie di ricerca	60
3.12	Analisi dei software risolutivi	61
3.13	Analisi dei processi di Additive Manufacturing	62
3.14	Analisi delle tecnologie di Power Bed Fusion	63
3.15	Analisi dei settori industriali	64
3.16	Settori industriali negli anni	65
3.17	Principali argomenti del tema 1	68
3.18	Strutture SC-AM confrontate in letteratura	68
3.19	Aspettativa accademica sulla struttura SC-AM	70
3.20	Aspettativa accademica sulla struttura SC-AM negli anni	71
3.21	Strutture SC-AM e settori industriali	72
3.22	Confronto tra struttura SC-AM centralizzata e decentralizzata (Rinaldi et al., 2022)	73
3.23	Strutture SC-AM e metodologie di ricerca	74
3.24	Strutture SC-AM e KPI	75
3.25	Confronto tra SC-AM centralizzata, decentralizzata e inter- media (Khajavi et al., 2014; Khajavi et al., 2018)	77
3.26	Struttura SC-AM domestica e metodologie di ricerca	78
3.27	Sintesi dei risultati per il tema 1	81
3.28	Argomenti principali del tema 2	83
3.29	Politiche d’inventario e metodologie di ricerca	84
3.30	Politiche d’inventario e settori industriali	85
3.31	Politiche d’inventario e KPI	87
3.32	Impatto dell’Additive Manufacturing sull’inventario delle ma- terie prime (Knofius et al., 2021)	88
3.33	Gestione dei materiali e metodologie di ricerca	89

3.34	Gestione dei materiali e settori industriali	90
3.35	Stock di sicurezza in diversi scenari SC-AM (Liu et al., 2014) .	91
3.36	Stock di sicurezza e settori industriali	92
3.37	Sintesi dei risultati per il tema 2	93
3.38	Argomenti principali del tema 3	95
3.39	Logistics service providers e metodologie di ricerca	98
3.40	Trasporti e metodologie di ricerca	99
3.41	Trasporti e KPI	100
3.42	Argomenti del tema 3 negli anni	101
3.43	AM mobile e metodologie di ricerca	102
3.44	AM mobile e KPI	103
3.45	Argomenti principali del tema 3 e settori industriali	104
3.46	Sintesi dei risultati per il tema 3	105
3.47	Riepilogo dei risultati	109
4.1	Research gaps	115

Introduzione

Ad oggi, la sempre più crescente competizione aziendale a livello globale, fa sì che il principale obiettivo del supply chain management sia organizzare un'efficace ed efficiente gestione dell'intera supply chain, le cui attività logistiche sono diventate sempre più rilevanti sia come incidenza sui costi che come fattore determinante per il livello di servizio e la soddisfazione dei clienti [1]. Questo desiderio di ottenere supply chain resilienti, sostenibili, reattive, ma al contempo efficienti, ha portato alla nascita della Quarta Rivoluzione Industriale e dell'Industria 4.0, concepita per consentire una produzione industriale completamente automatizzata e connessa tramite l'adozione di una combinazione di tecnologie denominate "tecnologie abilitanti" in quanto progettate per rivitalizzare i sistemi di produzione e i processi, oltre che per creare una supply chain digitalizzata e intelligente [2].

Tra le nove tecnologie individuate nel Piano Nazionale per l'Impresa 4.0, l'Additive Manufacturing, ovvero la produzione additiva, riveste un'importanza fondamentale nel consentire la trasformazione digitale. Infatti, secondo uno studio condotto da HP nel 2020, il 96% dei produttori leader di componenti industriali in Europa riconosce l'importanza dell'Additive Manufacturing. Pertanto, essi prevedono di attribuire i maggiori investimenti nei prossimi cinque anni alla produzione additiva. Inoltre, il 57% degli intervistati ha affermato che l'Additive Manufacturing fornisce il supporto di cui hanno bisogno per accorciare la supply chain e raggiungere gli obiettivi di sostenibilità, reattività e flessibilità necessari per soddisfare le fluttuazioni della domanda [3]. Per tutti questi motivi, si ritiene necessario concentrare uno

studio su questa tecnologia abilitante ed in particolare sulla sua applicazione alla supply chain.

Questo elaborato di tesi consiste in una Systematic Literature Review di articoli pubblicati sulla banca dati *Scopus* dal 2010 al 2022 in merito a tre particolari temi di ricerca, e rispettive domande, nell'ambito dell'applicazione dell'Additive Manufacturing alla supply chain:

1. *Struttura del Network*: quali sono le implicazioni dell'implementazione dell'Additive Manufacturing sulla struttura della supply chain e sui network distributivi corrispondenti?
2. *Gestione dell'inventario*: nell'ambito dell'integrazione dell'Additive Manufacturing nella produzione tradizionale, come impatta sulla gestione dei materiali e sulle politiche di gestione dell'inventario?
3. *Trasporti e logistics service providers*: come si sviluppa il processo di trasporto e consegna di parti additive su richiesta? E che ruolo avranno i fornitori di servizi logistici?

Lo scopo principale di questo elaborato è fornire un nuovo quadro descrittivo, al fine di indagare lo stato dell'arte, le maggiori tendenze e le criticità che possono rendersi utili per gli studi di ricerca futuri.

Sulla base delle precedenti considerazioni, il lavoro è strutturato come segue. All'interno del primo capitolo è presentato un excursus generale sulla definizione e sull'importanza dell'Additive Manufacturing come tecnologia abilitante per la digitalizzazione della supply chain e della logistica. Successivamente inizia il vero e proprio lavoro di revisione sistematica della letteratura, di cui metodologia e obiettivi sono esplicitati nel secondo capitolo. Il terzo capitolo riporta l'analisi descrittiva e critica degli articoli scelti per questo elaborato di tesi, divisi per classe di interesse, con commento dei risultati ottenuti. Infine, nell'ultimo capitolo, si riportano i principali risultati e le conclusioni che la revisione sistematica degli articoli ha evidenziato, al fine di fornire un quadro chiaro e schematico dello stato dell'arte dell'argomento trattato.

Capitolo 1

Additive Manufacturing e Supply Chain

Questo capitolo si propone di fornire le principali nozioni riguardanti gli argomenti oggetto dello studio, dei quali verrà revisionata sistematicamente la letteratura al capitolo 3, al fine di facilitarne la comprensione dei risultati.

1.1 Logistica, Supply Chain e Supply Chain Management

I termini Supply Chain, Supply Chain Management e Logistica sono spesso utilizzati in modo intercambiabile o come sinonimi, soprattutto in ambito aziendale, poiché risulta difficile definirne i confini. Tuttavia, i tre concetti sono diversi. Pertanto, è rilevante effettuare un'analisi e un confronto di questi, al fine di comprendere in quale maniera siano legati e come essi si interfaccino.

1.1.1 Definizione di Logistica

Secondo il Council of Logistics Management, “la logistica è il processo di pianificazione, implementazione e controllo del flusso efficiente ed efficace oltre che dello stoccaggio di merci, servizi e informazioni correlate dal punto di origine al punto di consumo allo scopo di conformarsi alle esigenze del cliente” [4]. Pertanto, quando parliamo di logistica, ci riferiamo alla pianificazione, esecuzione e controllo per far arrivare i prodotti ai clienti, dallo stabilimento di produzione, nella giusta quantità, qualità e tempi [5].

Se si dovesse scomporre la logistica, al suo interno troveremmo tutti quei processi a partire dalla ricezione dei materiali dai fornitori, l’organizzazione degli ordini, il magazzinaggio, la gestione dell’inventario (logistica *inbound*), processi come imballaggio, trasporto e consegna ai clienti (logistica *outbound*) nonché la gestione dei resi (logistica inversa) [5].

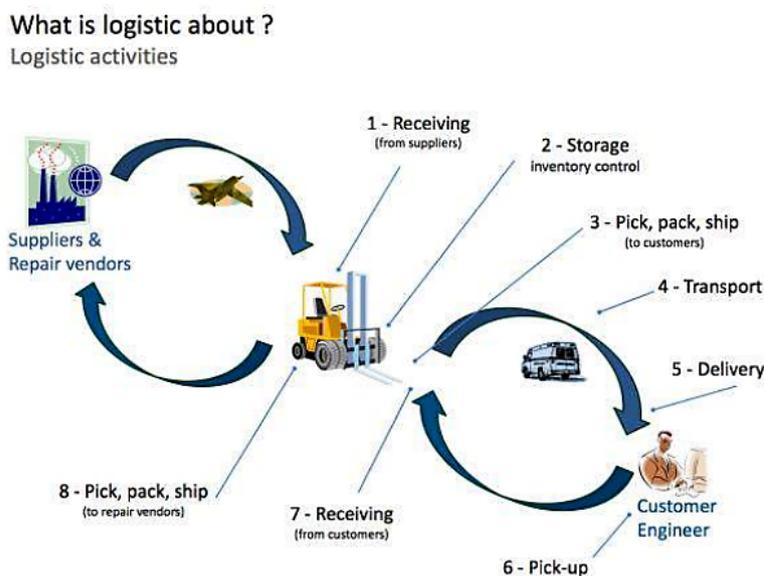


Figura 1.1: Le attività logistiche [6]

I costi della logistica rappresentano circa il 10% del PIL del paese e, a livello aziendale, hanno un’incidenza del 20-40% sul costo totale dei prodotti e sulla soddisfazione del cliente. Per questo motivo la logistica è principal-

mente un'attività data in gestione a terzi. Infatti, circa il 70% delle attività logistiche del paese coinvolge i *logistics service providers*, ovvero aziende di trasporto e magazzinaggio [5].

1.1.2 Definizione di Supply Chain (SC)

La supply chain e la sua gestione includono funzioni al di sopra della logistica. Quest'ultima è essa stessa parte della supply chain, la quale comprende le singole attività funzionali e le relazioni tra i vari attori dall'inizio del ciclo di vita del prodotto fino alla fine della sua vita utile.

Lo scopo principale è che tutte le parti della supply chain collaborino in modo inter-funzionale al fine di ottimizzare i processi [7].

Pertanto, la supply chain è definita come “un sistema connesso di organizzazioni, attività, informazioni, risorse e attori progettato per reperire, produrre e spostare le merci dall'origine alla destinazione finale, in genere da un fornitore a un cliente finale” [8].

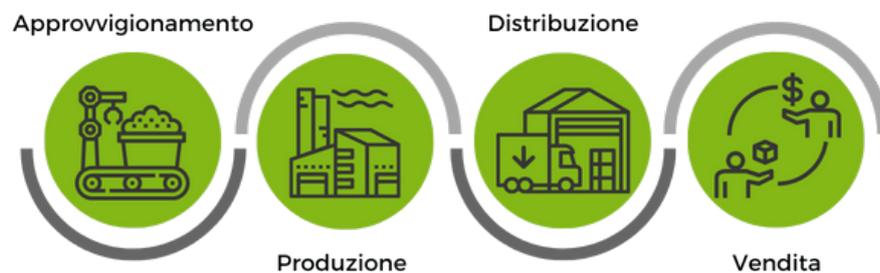


Figura 1.2: Le fasi della Supply Chain [9]

La figura 1.2 individua tre macro-fasi in cui è possibile scomporre la supply chain. Queste fasi, a loro volta scomponibili in processi minori, consentono al prodotto di raggiungere alla fase finale di vendita [9].

- *Approvvigionamento*: riguarda tutti i processi che permettono alle materie prime di raggiungere lo stabilimento di produzione. Questa fase introduce il concetto di *just in time*, il quale consente di fornire i materiali necessari per la produzione senza sprechi o ridondanza nel magazzino;
- *Produzione*: consiste nell'attività di trasformazione delle materie prime nei beni necessari a soddisfare la domanda del mercato. Questa fase si focalizza sul concetto di *lean manufacturing*, un metodo sistematico di produzione finalizzato all'eliminazione degli sprechi all'interno del sistema produttivo;
- *Distribuzione*: comprende tutte le attività e le operazioni che partono dal magazzino di prodotti finiti fino alla consegna al cliente. Questa fase può includere la definizione delle reti di distribuzione, la gestione dell'inventario, l'organizzazione dei magazzini e il trasporto alle società di distribuzione (grossisti, rivenditori, piattaforme di e-commerce), le quali rappresentano i canali di vendita, oppure direttamente a casa del consumatore. In questa fase è compresa anche la logistica inversa.

1.1.3 Definizione di Supply Chain Management (SCM)

Ad oggi, visto il sempre più crescente livello di competizione aziendale in modo globale, risulta indispensabile un'efficace ed efficiente gestione dell'intera supply chain. Secondo il Council of SCM Professionals, "la gestione della supply chain comprende la pianificazione e la gestione di tutte le attività coinvolte nell'approvvigionamento, nella conversione e in tutte le attività di gestione della logistica. È importante sottolineare che include anche il coordinamento e la collaborazione con i partner di canale, che possono essere fornitori, intermediari, fornitori di servizi di terze parti e clienti. In sostanza, la gestione della supply chain integra la gestione della domanda e dell'offerta all'interno e tra le aziende" [10]. Pertanto, si tratta della gestione sinergica non solo del flusso di merci, ma anche del flusso di informazioni e risorse finanziarie tra fornitori e produttori, grossisti e rivenditori e consumatori con il fine ultimo di ottimizzare i processi.

La gestione di questi flussi è affidata alla figura del Supply Chain Management [9], il quale si occupa di diverse attività [11].



Figura 1.3: Le attività del Supply Chain Management [11]

È importante evidenziare che le aree strategiche di interesse nella gestione della supply chain sono cambiate nel corso degli anni. In precedenza, si era più interessati al funzionamento interno di un'azienda operante sul mercato come entità separata, senza legami significativi con altre aziende. Tuttavia, con l'uso diffuso di Internet, oggi è necessario collaborare con tutte le aziende coinvolte nei processi logistici per realizzare un prodotto finale destinato dal cliente.

La distribuzione fisica delle merci è un nodo critico della supply chain e sta diventando ogni anno più importante come impatto sui costi e come fattore determinante dei livelli di servizio e della soddisfazione del cliente. Pertanto, oggi è fondamentale considerare le reti, lo stoccaggio e il trasporto come leve per aggiungere valore e mantenere o migliorare il vantaggio competitivo [12].

1.1.4 Focus sul network distributivo

Con una crescente enfasi sulla riduzione dei costi e sul miglioramento dei livelli di servizio, l'organizzazione di un network distributivo efficiente ed efficace diventa un obiettivo primario del Supply Chain Management [12].

Un network distributivo è un insieme di nodi costituito dai depositi (di fabbrica, centrali, periferici, transit point) e dai punti vendita, connessi tra loro dai sistemi di trasporto. Lo scopo del network distributivo è quello di definire il livello di controllo sui flussi e sui collegamenti logistici dai fornitori alle fabbriche produttive e dalle fabbriche produttive al mercato, oltre che sui rapporti con le terze parti logistiche.

Ottimizzare la catena distributiva significa quindi affrontare una moltitudine di decisioni sia a livello strategico che operativo: progettazione del magazzino, pianificazione del trasporto, definizione del numero di magazzini da implementare e dove posizionarli, linee guida per la gestione dell'inventario e allocazione corretta dell'inventario nella rete. Inoltre, una parte centrale di qualsiasi progetto di ottimizzazione della rete di distribuzione riguarda lo sviluppo di vari scenari di configurazione e di strutture al fine ultimo di migliorare la rete nel suo insieme piuttosto che i singoli componenti [12].

A seguire, è fornita una breve nozione dei tre fattori logistici (strutture, inventario, trasporti) che insieme a quelli funzionali (sistema informativo, make or buy e strategia dei prezzi) formano i sei punti chiave che il SCM deve tenere in considerazione per l'ottimizzazione del network distributivo [13].

- *Strutture*: si tratta dei luoghi in cui i prodotti vengono fabbricati, assemblati e stoccati, ovvero impianti di produzione e magazzini. Le decisioni riguardanti l'ubicazione, le dimensioni e la flessibilità di queste strutture dipenderanno dal tipo di gestione desiderato, in particolare se puntare maggiormente a obiettivi di efficienza o a quelli di reattività. Ad esempio, per un'azienda che fornisce ricambi auto, potrebbe essere importante migliorare i tempi di risposta e ridurre i tempi di attesa per le richieste dei clienti. Pertanto, essa tenderà a scegliere più siti di stoccaggio sparsi e, quindi, strutture decentralizzate, pur considerando i maggiori costi di gestione e la minore efficienza. Al contrario, la decisione di centralizzare le strutture significa maggiori tempi di attesa, minori costi di gestione e maggiore efficienza a scapito della reattività;
- *Inventario*: si intendono le tre categorie di inventario (materie prime, semilavorati e prodotti finiti), i quali esistono per equilibrare la discrepanza tra domanda e offerta. Ha senso mantenerli quando avere delle scorte in magazzino permette di ottenere delle economie di scala maggiori dei costi di stoccaggio e delle gestione delle scorte, senza dimenticare il rischio di costi di obsolescenza del capitale non sfruttato. Perciò, le decisioni in questione riguardano il quando e di quanto effettuare un ordine di consegna, quale politica di gestione delle scorte adottare, se detenere delle scorte di sicurezza per soddisfare meglio l'incertezza della domanda e il livello di servizio fornito;

- *Trasporti*: ha a che fare con la scelta del mezzo di trasporto da utilizzare, il tipo e il numero dei mezzi, i luoghi da raggiungere e i percorsi da percorrere. La scelta della modalità di trasporto influenzerà la posizione degli impianti. Ad esempio, se i clienti sono disposti a pagare per un livello di servizio più elevato, l'azienda potrebbe decidere di decentralizzare la configurazione per ottenere metodi di spedizione più veloci e più costosi. Al contrario, l'azienda opterà per un tipo di trasporto in grado di contenere i costi del prodotto. Un metodo per migliorare la reattività senza sacrificare in modo significativo l'efficienza è esternalizzare la funzione di trasporto tramite la stipula di un contratto con una società di logistica esterna per la consegna dei prodotti finiti, oppure decidere di collaborare con altre società della stessa dimensione e livello per la condivisione di veicoli e percorsi di consegna.

Il sistema trasporto rappresenta l'anello che unisce le attività della filiera, occupando in media il 50% dei costi per la logistica [12]. Pertanto, l'outsourcing e la contrattazione orizzontale dei trasporti stanno diventando sempre più frequenti.

Questi tre driver rappresentano dei settori che varieranno nei loro potenziali impatti e nelle sfide da affrontare, ma operando sempre in un formato circolare e interrelato, in cui vari segmenti o impatti possono sovrapporsi avendo un riscontro in settori precedenti o successivi (Sun and Zhao, 2017).

1.1.5 Le sfide e la supply chain del futuro

Nel corso dei decenni, la tendenza delle imprese manifatturiere a delocalizzare le proprie attività produttive ha portato a generare filiere molto lunghe, nelle quali “la mente” dell’impresa risiedeva nel Paese di creazione, mentre la produzione si trovava nei Paesi in via di sviluppo per via dei costi del lavoro ridotti e una maggiore accessibilità alle materie prime, fattori i quali permettevano di raggiungere importanti benefici di costo. Tuttavia, filiere logistiche di questo tipo sono rigide, fragili e poco reattive ad eventuali cambiamenti del mercato.

Nel frattempo, il mercato ha cominciato a richiedere velocità di reazione e flessibilità e i consumatori, sempre più ben abituati dai *big players* quali *Amazon* ed *Apple*, sono diventati maggiormente orientati alla personalizzazione dei prodotti e alla rapidità di consegna (Zanardini and Bacchetti, 2015). Inoltre, alcuni eventi dirompenti, come la pandemia di Covid-19, hanno creato nuove sfide per le imprese. Pertanto, esse hanno iniziato a sviluppare nuove strategie di gestione della supply chain per prepararsi a possibili nuovi scenari dirompenti, inclusa la volatilità nel ciclo economico globale [14].

La ricerca di una maggiore resilienza, sostenibilità e reattività delle filiere logistiche ha portato alla nascita della Quarta Rivoluzione Industriale e dell’Industria 4.0. Essa, dopo che la terza rivoluzione industriale ha visto il mondo dell’e-commerce cambiare completamente il modo di acquistare prodotti e servizi in tutto il mondo, è quella Digital Supply Chain, ovvero un nuovo approccio alla progettazione, esecuzione e comunicazione della supply chain che cambierà per sempre il processo di produzione e distribuzione [1].

Il termine Industria 4.0 è stato utilizzato per la prima volta come ipotesi di progetto alla Fiera di Hannover 2011 in Germania. Nel 2012 il gruppo di lavoro ha presentato alla Confederazione tedesca una serie di raccomandazioni per l’attuazione del Piano Industria 4.0, diventato poi fonte di ispirazione per tutti i Paesi [15].

L’industria 4.0 è concepita per consentire una produzione industriale completamente automatizzata e connessa tramite l’adozione di una combinazione di

tecnologie denominate “tecnologie abilitanti” in quanto progettate per rivitalizzare i sistemi di produzione e i processi, oltre che per creare una supply chain digitalizzata e intelligente [2].

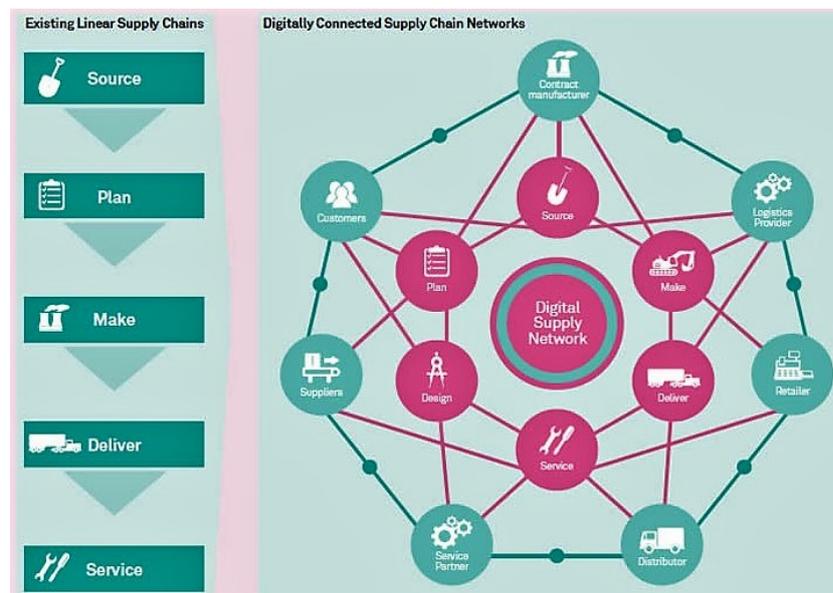


Figura 1.4: Confronto tra Supply Chain tradizionale e digitale [16]

La Digital Supply Chain, frutto dell'Industria 4.0, consiste in una filiera totalmente integrata attraverso un'unica piattaforma condivisibile. È un nuovo sistema veloce, agile, reattivo e altamente efficace che fa risparmiare tempo e soddisfa le esigenze dei clienti [17].

Il Piano Nazionale Impresa 4.0, varato per andare incontro alla quarta rivoluzione industriale, individua nove categorie di tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 [18].

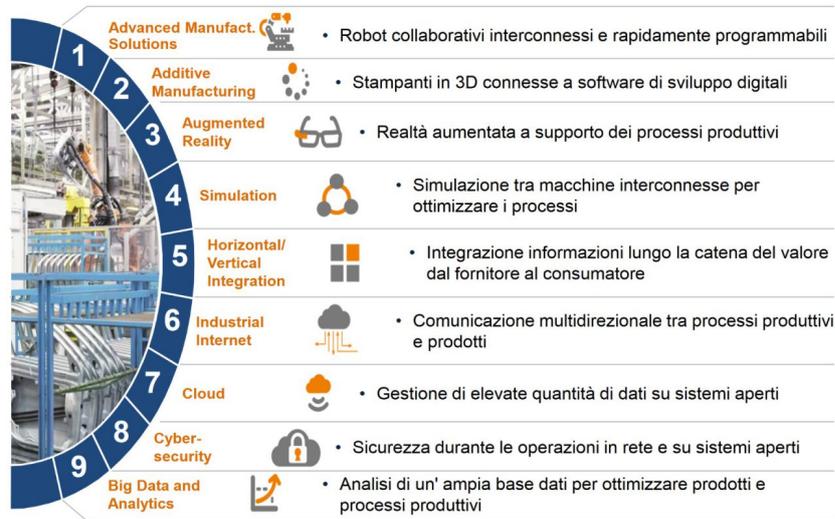


Figura 1.5: Le tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 [18]

Tra le nove tecnologie abilitanti in figura 1.5, il presente studio si concentrerà sull'Additive Manufacturing, ovvero la produzione additiva, ed in particolare sulla sua applicazione alla supply chain.

Uno studio condotto da HP nel 2020, collaborando con 3dbpm Research, evidenzia il ruolo fondamentale dell'Additive Manufacturing nel consentire la trasformazione digitale. Secondo lo studio, il 96% dei produttori leader di componenti industriali in Europa riconosce l'importanza della produzione additiva in quanto aiuta a ridurre il time-to-market per i nuovi prodotti e accelera la digitalizzazione dei processi di produzione. Gli intervistati prevedono di attribuire i maggiori investimenti nei prossimi cinque anni alla produzione additiva. Inoltre, il 57% degli intervistati ha affermato che l'Additive Manufacturing fornisce il supporto di cui hanno bisogno per accorciare le catene di approvvigionamento e raggiungere gli obiettivi di sostenibilità, reattività e flessibilità necessari per soddisfare le fluttuazioni della domanda [3].

Per tutti questi motivi, si ritiene di grande rilevanza concentrare uno studio di ricerca su questa tecnologia abilitante in merito alla sua evoluzione, trend e gap di ricerca in relazione alla supply chain e alla sua digitalizzazione.

1.2 Additive Manufacturing (AM)

1.2.1 Definizione

ASTM International (American Society for Testing and Materials), attraverso il documento ISO/ASTM52921-1, *Standard Vocabulary for Additive Manufacturing - Coordinate Systems and Test Methodologies*, definisce l'Additive Manufacturing come “il processo di aggregazione dei materiali in modo da realizzare un oggetto, solitamente partendo da un modello tridimensionale e procedendo per sovrapposizione strato su strato, al contrario di ciò che accade nei processi sottrattivi o di tradizionale lavorazione per asportazione di truciolo” [19].

L'Additive Manufacturing è nota colloquialmente come stampa 3D e anche come prototipazione rapida (RP) o produzione digitale diretta (DDM) (Durach et al., 2017). La stampa 3D consiste nella fabbricazione di oggetti attraverso la deposizione di materiale, utilizzando una testina di stampa o un ugello, ed è un termine spesso utilizzato in un ambito non tecnico. Fino ad oggi, il termine stampa 3D è stato spesso associato a macchine di fascia bassa per prezzo e/o capacità complessiva.

La produzione additiva è un processo *design driven manufacturing* che prende come input iniziale un modello 3D (progettazione CAD) dell'oggetto da realizzare, seguito da un processo semi-automatico atto a convertire il file del modello in formato STL (Standard Triangulation Language) tramite i più diffusi software di progettazione. Questo processo scompone (*slicing*) l'oggetto in strati (*layers*), i quali sono poi stampati con una stampante 3D [20]. Dopo la fase di stampaggio, si effettuano gli ultimi lavori di rifinitura. Una caratteristica chiave della stampa 3D è la fabbricazione precisa di parti di materiali diversi (plastica o metallo), le quali vengono applicate strato dopo strato per assemblare l'oggetto finito. La sua particolarità è che i componenti che prima venivano fabbricati singolarmente ora possono essere realizzati in un'unica soluzione e poi assemblati o saldati insieme, riducendo sensibilmente i costi produttivi e migliorando le prestazioni finali dell'oggetto [21].

1.2.2 Storia ed evoluzione della tecnologia

La produzione additiva sembra essere “al centro dell’attenzione” solo da pochi anni. Questo perché i processi di produzione tradizionali sono sottrattivi nella storia della produzione. Ma, in realtà, gli inizi di questa tecnologia di produzione risalgono alla fine degli anni ’70, quando furono inventate e introdotte sul mercato le prime stampanti a getto d’inchiostro.

I primi passi verso la nuova tecnologia di stampa 3D di oggetti fisici da dati digitali sono stati fatti nel 1981 dal designer automobilistico giapponese Hideo Kodama, il quale deposita un brevetto per la prototipazione rapida, e nel 1984 dall’ingegnere Charles Hull che inventa la tecnica della *Stereolitografia* (SLA), brevettata poi nel 1986. SLA è una tecnica che consiste nell’utilizzo di una fonte di luce in un serbatoio di resina, la quale si indurisce creando l’oggetto 3D strato dopo strato. Sempre in quell’anno, Hull fonda la società 3D Systems e sviluppa la prima stampante 3D industriale, disponibile in commercio dal 1988 [20]. Nel 1989, Carl Deckard registra in un brevetto la tecnica SLS (*Selective Laser Sintering*), un processo di sinterizzazione selettiva che utilizza un raggio di luce laser per sinterizzare una polvere plastica o metallica. In seguito, SLS si evolve nelle tecniche DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*), massima espressione della *Metal Additive Manufacturing*, e SLM (*Selective Laser Melting*) [21]. Nel frattempo, Scott Crump sviluppa nel 1992 una rivoluzionaria tecnologia additiva, denominata FDM (*Fused Deposition Modeling*), la quale consiste nell’utilizzo di un filamento polimerico riscaldato da un resistore e alimentato attraverso un ugello. La solidificazione avviene strato dopo strato, conferendo all’oggetto la sua forma. Questa tecnologia è stata ideata per la prototipazione ed è oggi la più diffusa.

Nel 1993 il MIT (Massachusetts Institute of Technology) decide di applicare la tecnologia di stampa delle stampanti 2D a quelle 3D, utilizzando le testine di stampa per spruzzare collanti sulle polveri. Nel 1995, Z Corporation ottiene una licenza esclusiva da MIT e inizia a sviluppare stampanti 3D per il mercato generale, vendute dal 1997. Negli ultimi anni ‘90 altre società sviluppano stampanti 3D [20].

Ma la vera spinta per questa tecnologia si ha nel 2005, quando l'ingegnere Adrian Bowyer inventa la prima stampante 3D a colori open source, ad alta risoluzione e autoreplicante. Nel 2009, MakerBot Industries, una società di hardware open source per stampanti 3D, inizia a vendere kit fai-da-te che gli acquirenti potevano acquistare per costruire le proprie stampanti.

Infine, nel 2014, la NASA lancia una stampante 3D nello spazio, creando il primo oggetto extraterrestre stampato in 3D [22].

La produzione additiva è ampiamente accessibile oggi, ma non è sempre stato così. All'inizio, la maggior parte dei processi di stampa 3D erano brevettati, limitando le opzioni e le macchine disponibili. Nel corso del tempo più tecnologie sono diventate di dominio pubblico e, di conseguenza, sempre più aziende e persone hanno iniziato a utilizzarle [23].

1.2.3 Le categorie di processo

Sempre facendo riferimento alla norma ISO/ASTM52921-1, le seguenti sette famiglie di processi permettono di raggruppare le tecnologie di produzione additiva [23]:

1. *Binder Jetting*: funziona spruzzando legante liquido su un letto di polvere, solidificandolo in una sezione trasversale. Ogni strato viene stampato all'incirca allo stesso modo in cui una tradizionale stampante su carta stampa l'inchiostro (qui una soluzione legante) su un foglio di carta (qui uno strato di polvere). Dopo che ogni sezione trasversale è terminata, un rullo automatico deposita ulteriore polvere per formare il livello successivo dell'oggetto. La ripetizione di questo processo costruisce l'oggetto uno strato alla volta. Questa è una delle migliori opzioni per la stampa 3D a colori, ideale per la produzione di prodotti per l'uso finale.
2. *Directed Energy Deposition*: questo processo fonde il filo metallico come materia prima utilizzata per formare un oggetto all'interno di una camera a vuoto tramite un flusso di energia termica (fornito da un laser,

raggio di elettroni o arco di plasma) che viene utilizzato per fondere i materiali metallici mentre vengono depositati. La deposizione tramite laser può essere utilizzata per riparare o aggiungere volume a oggetti metallici preesistenti, nonché per fabbricare nuovi oggetti.

3. *Material Extrusion*: l'estrusione di materiale riguarda la tecnologia *Fused deposition modeling*. Il processo può essere facilmente inteso come disegnare con una pistola per colla a caldo molto precisa. Funziona estrudendo il materiale attraverso un ugello per stampare una sezione trasversale di un oggetto, quindi spostandosi verticalmente per ripetere il processo per un nuovo strato. L'ugello della stampante contiene riscaldatori resistivi che fondono la plastica mentre scorre attraverso la punta e forma gli strati. La plastica estrusa si indurisce mentre si lega allo strato sottostante. La ripetizione di questo processo costruisce l'oggetto uno strato alla volta. Questa tecnologia è oggi una delle più comuni e diffuse.
4. *Material Jetting*: le stampanti a getto di materiale assomigliano alle tradizionali stampanti su carta. La testina di stampa si sposta attorno all'area di stampa depositando selettivamente goccioline di materiale di costruzione, le luci UV che circondano la testina di stampa passano sopra il materiale e lo polimerizza, solidificandolo in posizione. La ripetizione di questo processo costruisce l'oggetto uno strato alla volta. Gli stampatori che utilizzano questo processo sono spesso capaci di stampare utilizzando più materiali in un unico lavoro.
5. *Powder Bed Fusion*: si tratta di un processo in cui l'energia termica fonde selettivamente le regioni di un letto di polvere. Vi sono diverse tecniche appartenenti a questo processo. *Direct metal laser sintering* (DMLS) sinterizza strati di metallo in polvere in una camera di gas inerte. Quando uno strato è finito, il letto di polvere si abbassa e un rullo automatizzato aggiunge un nuovo strato di materiale che viene sinterizzato per formare la sezione successiva del modello. DMLS è

una tecnica di produzione di additivi metallici simile alla *Selective laser sintering* (SLS), con la differenza che quest'ultima si riferisce sia alla sinterizzazione di polveri termoplastiche che metalliche. SLS è una tecnologia efficace sia in termini di costi che di tempo, il che la rende ideale per la prototipazione e la produzione per l'uso finale. Il processo è diverso dalla tecnologia *Selective laser melting* (SLM), in quanto SLS sinterizza solo la polvere invece di ottenere una fusione completa.

6. *Sheet Lamination*: si tratta di un processo in cui fogli di materiale vengono stratificati e incollati l'uno sull'altro per formare un oggetto. La stampante taglia un contorno dell'oggetto in quella sezione trasversale per essere successivamente rimosso dal materiale in eccesso circostante. La ripetizione di questo processo costruisce l'oggetto uno strato alla volta. L'incollatura dei fogli può avvenire tramite la saldatura a ultrasuoni allo stato solido per fissare insieme strisce di metallo, costruendo un oggetto da un foglio di materiale. Successivamente, il materiale in eccesso viene tagliato via utilizzando una fresa per completare la sezione trasversale. Questa tecnica è ideale per applicazioni speciali come componenti finali di alto valore.
7. *Vat Photopolymerization*: si basa sul processo di solidificazione selettiva di polimeri liquidi mediante radiazioni elettromagnetiche (fornite da laser o simile). Il noto processo di *Stereolitografia* (SLA) rientra in questa categoria. SLA utilizza un laser per disegnare ogni strato di un modello in una resina fotopolimerica (plastica reattiva alla luce), polimerizzandola uno strato alla volta tramite un raggio di luce UV.

1.2.4 I materiali

I materiali sono una componente chiave per il mercato della produzione additiva. Essi variano a seconda della tecnologia impiegata ma è possibile sostanzialmente suddividerli in quattro famiglie: polimeri, metalli, ceramiche e compositi. Ognuna di queste è in continua fase di sviluppo, soprattutto in riferimento ai temi di sostenibilità e riduzione dell'impatto ambientale.

Tra i polimeri più comunemente usati ci sono i filamenti ABS per la loro flessibilità e resistenza agli urti e l'acido polilattico (PLA), il quale ha il vantaggio di essere biodegradabile poiché ottenuto da risorse rinnovabili come l'amido di mais. Il polietilene tereftalato (PET) è comunemente usato nelle bottiglie di plastica monouso, è abbastanza duro e ha un'eccellente resistenza chimica. Il polietilene ad alta densità (HPDE) è uno dei materiali plastici più comuni, utilizzato nella produzione additiva senza particolari precauzioni. Non è tossico e ha un basso assorbimento d'acqua. Per questo motivo viene utilizzato nelle applicazioni alimentari. Inoltre, ha un'elevata resistenza chimica, che lo rende ideale per applicazioni nell'industria chimica ed elettrica. Durevole e trasparente, il policarbonato (PC) è un materiale altamente durevole e resistente al calore, particolarmente adatto per la progettazione di parti ottiche, schermi protettivi e ornamenti. Vi sono poi dei polimeri ad alte prestazioni, ovvero filamenti con proprietà meccaniche simili al metallo. Il polipropilene è un altro materiale termoplastico ampiamente utilizzato nell'industria automobilistica. Infine, vi è anche il Nylon.

In merito ai metalli, tra i più comunemente usati troviamo l'alluminio (resistente e leggero), l'acciaio (per le applicazioni industriali) e le leghe di nichel. Inoltre, ci sono metalli per uso medico, come gallio, cobalto-cromo e titanio. I metalli preziosi sono utilizzati principalmente nella gioielleria.

I compositi sono caratterizzati dall'aggiunta di fibre alla matrice plastica per ottenere una maggiore resistenza a parità di peso. La fibra di carbonio è la fibra predominante nell'industria della stampa 3D, oltre alla fibra di vetro e al Kevlar. Ci sono, poi, materiali ibridi che combinano plastiche (solitamente PLA) e polveri (in genere legno, bambù, sughero) per creare nuovi colori,

superfici o proprietà. Mentre i materiali solubili HIPS (High Impact Polystyrene) e PVA (Polyvinyl Acetate) permettono la realizzazione di oggetti flessibili molto usati nell'industria della moda. Infine, vi sono i materiali di alta precisione, quali le resine, grazie alle quali si possono ottenere oggetti precisi e con superfici lisce [24].

La produzione additiva in ceramica è oggi utilizzata da una fetta di mercato di nicchia per la ricerca e la prototipazione rapida in particolari settori come l'aerospaziale, la difesa, l'odontoiatria e l'ingegneria chimica, interessati alla produzione di piccoli volumi.

Un rapporto IDTechX evidenzia la crescita della ceramica nella produzione additiva. Il suo valore è stimato a 400 milioni di dollari entro il 2032, sette volte quello che è oggi [25].

1.2.5 Vantaggi e limiti dell'Additive Manufacturing

La produzione additiva è un processo innovativo capace di apportare numerosi vantaggi sia a livello di processo che di prodotto, vantaggi che ne hanno permesso lo sviluppo e la diffusione.

In primo luogo, essa non necessita di particolari attrezzature poiché si tratta di una progettazione e produzione digitalizzata, il che la rende altamente flessibile in termini di personalizzazione sulla base delle richieste dei clienti senza alcun costo aggiuntivo di riprogettazione e operazioni di assemblaggio, trattandosi di un pezzo unico, oltre che tempi ridotti e minor consumo di energia. In secondo luogo, permette di ottenere prodotti di elevata complessità geometrica, difficilmente ottenibili con le tecniche di produzione convenzionali. Vi è inoltre minor consumo di materiali per unità di prodotto, grazie ai minori sprechi di materiali e alla possibilità di riuso degli scarti, nonché l'opportunità di lavorare materiali difficili e di natura inconsueta.

Grazie alla prototipizzazione e alla progettazione virtuale dei prodotti, il time-to-market è ridotto, mentre il ciclo di vita del prodotto ha maggior durata di quello tradizionale (Attaran, 2017).

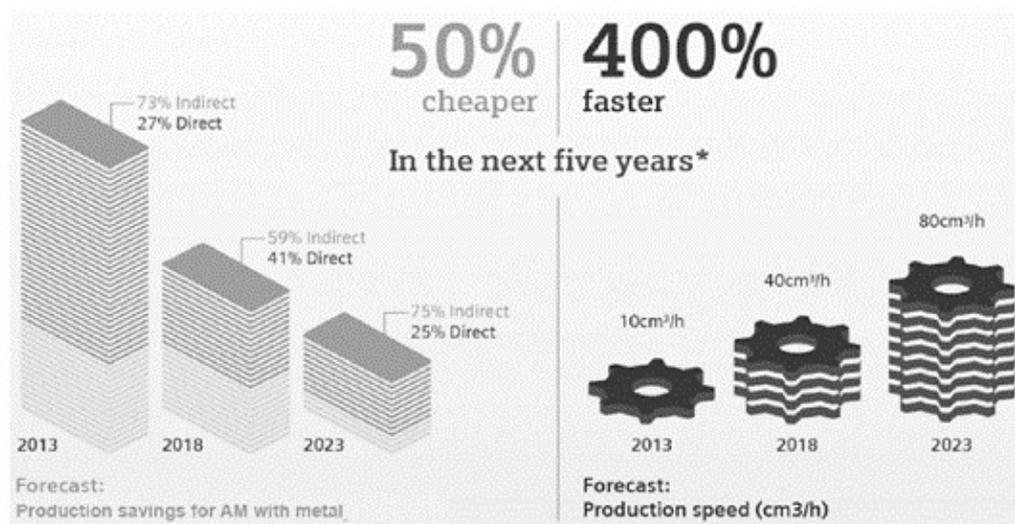


Figura 1.6: Vantaggi produttivi per l'Additive Manufacturing (Attaran, 2017)

I limiti tecnologici includono la disponibilità limitata e l'alto costo dei materiali di base (Berman, 2012), l'alto costo delle macchine aggiuntive e il costo orario generalmente elevato del lavoro (Li et al., 2017).

Inoltre, i diritti di proprietà intellettuale e industriale nella progettazione dei prodotti sono raramente chiari, la qualità del prodotto non può sempre essere standardizzata (Verboeket and Krikke, 2019) e vi sono costi di post-elaborazione non trascurabili (Chekurov et al., 2018).

1.2.6 Il mercato globale: applicazioni e settori

Il mercato mondiale dell'Additive Manufacturing è stato valutato a circa 12,6 miliardi di dollari USA nel 2020. Statista prevede che il settore crescerà a un tasso di crescita annuo di circa il 17% tra il 2020 e il 2023 e di circa il 24% tra il 2023 e il 2025. Si prevede che l'Additive Manufacturing avrà un impatto economico globale di circa 550 miliardi di dollari USA all'anno entro il 2025 (Thiesse et al., 2015).

Secondo un rapporto di EY, l'81% delle aziende sudcoreane intervistate nel 2019 ha deciso applicare la tecnologia additiva alle loro operazioni, mentre il 14% di quelle aziende la stava prendendo in considerazione. La Cina ha avuto un tasso di adozione simile, mentre Spagna e Italia risultano essere più indietro [26].

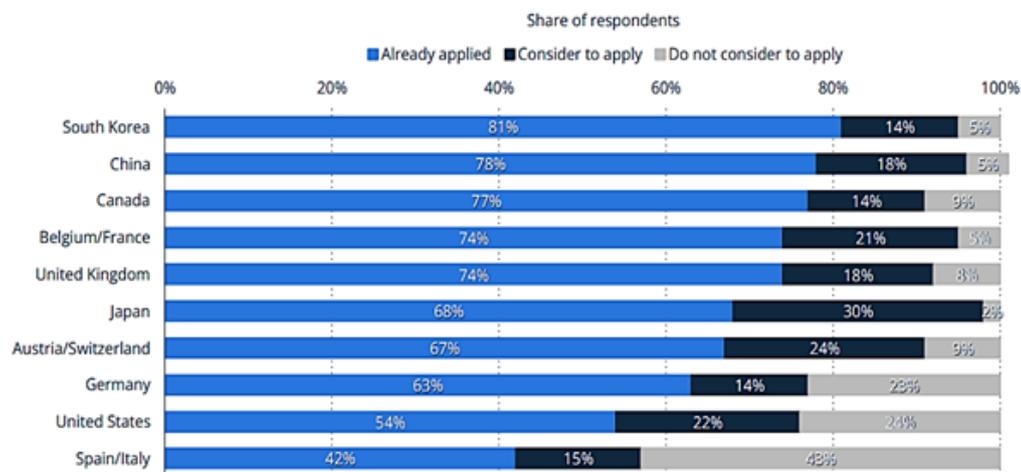


Figura 1.7: Tasso di adozione dell'Additive Manufacturing nel mondo [26]

Tuttavia, nel 2019, oltre la metà di tutte le aziende manifatturiere additive si trovava in Europa. Le Americhe contenevano circa il 32% delle aziende di produzione additiva in tutto il mondo, seguite dall'Asia con una quota del 13% [26].

Inoltre, sempre nel 2019, circa il 50% dell'uso industriale totale di questa tecnologia è stato assorbito dalla produzione tramite stampa 3D di componenti

e prodotti finali direttamente commercializzabili [27].

Nel complesso, si possono identificare quattro diverse aree di applicazione della produzione additiva [27]:

- *Prototipazione*: la prototipazione con tecniche additive (*Rapid Prototyping*) consente di testare diversi modelli e versioni dei componenti per ottenere un feedback immediato (estetico e/o funzionale) e migliorare i progetti;
- *Produzione indiretta*: la produzione indiretta (*Rapid Tooling*), si riferisce alla produzione additiva di strumenti, come stampi, raccordi e centri, necessari per fabbricare prodotti;
- *Produzione diretta*: la produzione diretta (*Rapid Manufacturing*) utilizza la tecnologia additiva per fabbricare direttamente il prodotto finale o i suoi componenti. Questo processo produttivo può portare alla creazione di oggetti con proprietà meccaniche superiori rispetto allo stesso prodotto utilizzando tecniche di produzione convenzionali;
- *Produzione di parti di ricambio*: è una naturale evoluzione della produzione diretta che utilizza la tecnologia additiva per la produzione di componenti per il post-vendita di macchinari/impianti. Un vantaggio chiave è la possibilità di stampare i componenti su richiesta e *in loco*. In questo modo non sarà necessario stocarli lungo la supply chain.

Per quanto riguarda i settori di interesse, secondo il rapporto di Wohlers Associates, nel 2019 circa il 20% dei ricavi delle vendite nel mercato mondiale della produzione additiva è stato generato dall'industria automobilistica. Un altro 20% è stato generato dall'industria manifatturiera, mentre l'industria aerospaziale globale ha rappresentato il 18% del fatturato totale [26].

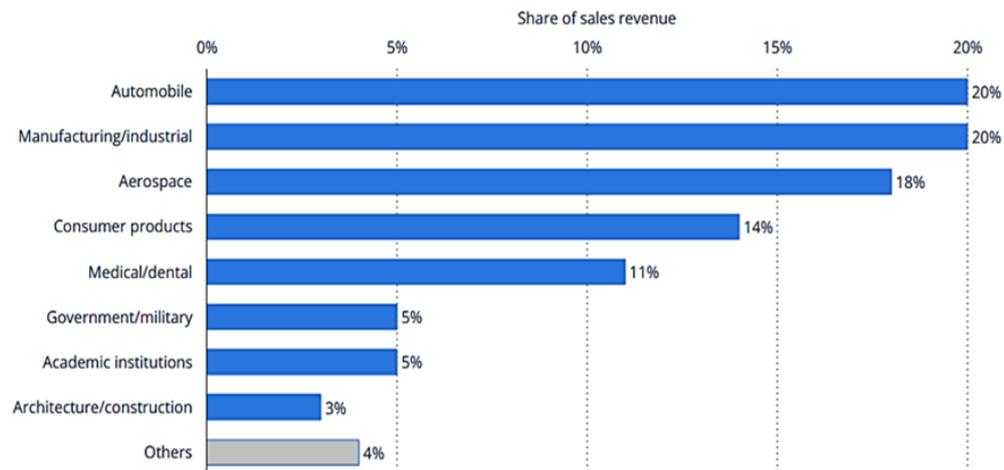


Figura 1.8: Additive Manufacturing e settori industriali [26]

Una delle maggiori preoccupazioni nell'industria automobilistica e aerospaziale è la riduzione del peso del veicolo garantendo allo stesso tempo robustezza e sicurezza. La manifattura additiva consente di superare i limiti progettuali dei metodi tradizionali creando componenti che garantiscono un peso inferiore e prestazioni ancora più elevate rispetto a parti simili prodotte con metodi tradizionali.

L'Additive Manufacturing ha vaste applicazioni anche nel mondo biomedico. Poiché l'anatomia di ogni singolo paziente è unica, vi è una notevole necessità di personalizzazione dei prodotti biomedici per la sostituzione di protesi articolari, lavori odontoiatrici, stent vascolari e altri impianti biomedici. La produzione additiva offre l'opportunità di fabbricare questi prodotti su richiesta del singolo paziente utilizzando una varietà di materiali metallici, plastici o ceramici e impiegando la tomografia computerizzata per ottenere i dati anatomici del paziente, dai quali viene generato un modello CAD dell'impianto specifico da realizzare (Emelogu et al., 2016).

Una potenziale applicazione in campo biomedico entro il 2032 è la stampa di organi di tutto il corpo in modo da avere dei trapianti perfetti senza rischio di rigetto (Royal Academy of Engineering, 2013).

La produzione additiva sta, inoltre, iniziando a farsi strada anche in ambi-

to della produzione domestica di beni di consumo, in quanto le stampanti 3D permettono di produrre in piena autonomia piccoli oggetti per la casa, giocattoli e altro ancora [20]. Questo, a lungo termine, può diventare un problema serio per le aziende manifatturiere perchè i clienti potrebbero ridurre il numero di ordini e concentrarsi sulla produzione a casa (Halassi et al., 2018). Dato che le possibili applicazioni della stampa 3D nell'industria manifatturiera sono considerate relativamente note e che i loro vantaggi sono consolidati, l'impatto sulle attività logistiche dei produttori e sulla supply chain oggi potrebbe essere significativo, anche se ancora difficile da comprendere [27].

1.3 Applicazione dell'Additive Manufacturing alla Supply Chain (SC-AM)

L'Additive Manufacturing, come già detto, è considerata una rivoluzione industriale non solo per la produzione ma anche per le filiere logistiche (Berman, 2012). L'introduzione dell'Additive Manufacturing all'interno della supply chain ne altera la struttura a seconda del luogo della filiera in cui viene implementata tale tecnologia. Pertanto, esistono quattro diversi tipi di configurazione in cui può trovarsi la supply chain basata sulla produzione additiva (Gallinaro, 2021). La prima è la configurazione tradizionale di partenza, generalmente utilizzata per la produzione sottrattiva in modo da ottenere economie di scala. Tuttavia, la diffusione della produzione additiva offre tre nuove configurazioni di supply chain.

1.3.1 SC-AM con struttura centralizzata

In questo scenario le tecnologie additive sono implementate nell'impianto centrale, presso l'Original Equipment Manufacturer (OEM) che spesso decide di affiancare la produzione additiva a quella tradizionale, dotandosi di stampanti 3D per produrre la domanda, mentre i nodi del network distributivo si occuperanno di spedire il prodotto finito al cliente.

La produzione, quindi, si trova a monte della supply chain. Così facendo, l'OEM beneficerà di tutti i vantaggi produttivi elencati in precedenza oltre che della riduzione dell'inventario disponibile. Inoltre, egli può beneficiare di un effetto di pooling aggregando la domanda dalle ubicazioni dei servizi a valle, tramite siti web di e-commerce, e massimizzare l'utilizzo della stampante 3D. Successivamente, gli ordini vengono imballati e spediti al cliente tramite un fornitore di servizi logistici. Uno svantaggio di questa configurazione è che le parti additive richiedono ancora il trasporto e la distribuzione a valle, il che limita i risparmi sui costi logistici e la riduzione dei tempi di consegna.

Questo approccio è consigliato per i prodotti che non hanno un tempo di risposta critico o che rientrano nella categoria “slow-moving” qualora si trattasse di pezzi di ricambio (Holmstrom et al., 2010).

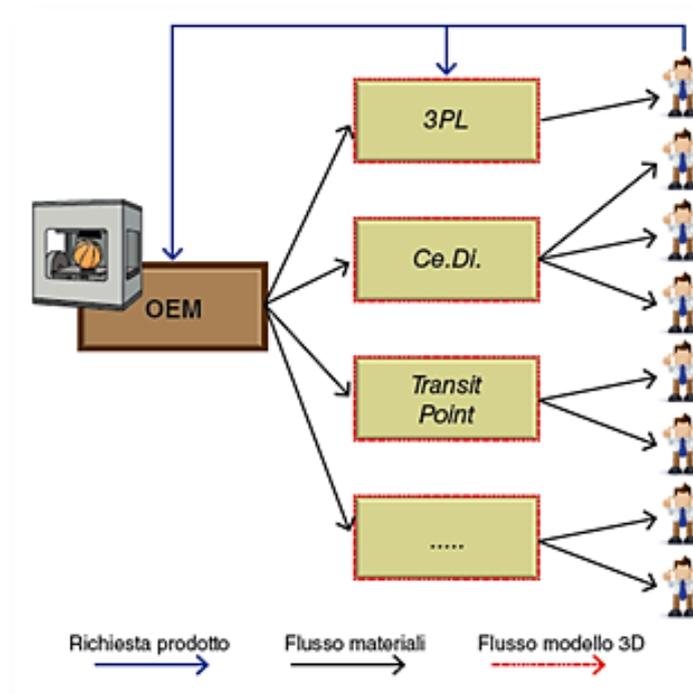


Figura 1.9: SC-AM in uno scenario centralizzato [27]

1.3.2 SC-AM con struttura decentralizzata o distribuita

Questo scenario si ottiene quando le tecnologie additive sono posizionate a valle della supply chain in strutture che generalmente si occupano della distribuzione, chiamate sedi di servizio (*service location*), prossime ai luoghi di utilizzo del prodotto, cioè vicino al cliente. In questo modo la produzione si svincola dall'OEM e si sposta più a valle, andando a integrarsi con il network distributivo e le sue strutture (Transit Point, Ce.Di ecc.). In questo modo l'OEM si occuperà esclusivamente della fornitura dei modelli di progettazione del prodotto, mentre i nodi distributivi forniranno il servizio di produzione e distribuzione del prodotto finito al cliente, smettendo di partecipare alla catena solo come fornitori di servizi logistici poiché adesso coinvolti nella produzione. Il vantaggio è nella riduzione dei costi logistici e dell'inventario disponibile. Ma comporta un esborso iniziale elevato a causa delle spese sia per le stampanti 3D che per la logistica associata e il personale di supporto specializzato. Pertanto, questa metodologia può essere utilizzata quando la domanda è sufficientemente elevata da giustificare un investimento di capitale o quando il costo di acquisto di una stampante 3D per sede di servizio viene ripagato dalla riduzione dei costi logistici e di inventario o dal miglioramento del tempo di risposta ai clienti, legato alla riduzione del tempo di fornitura (Liu et al., 2014).

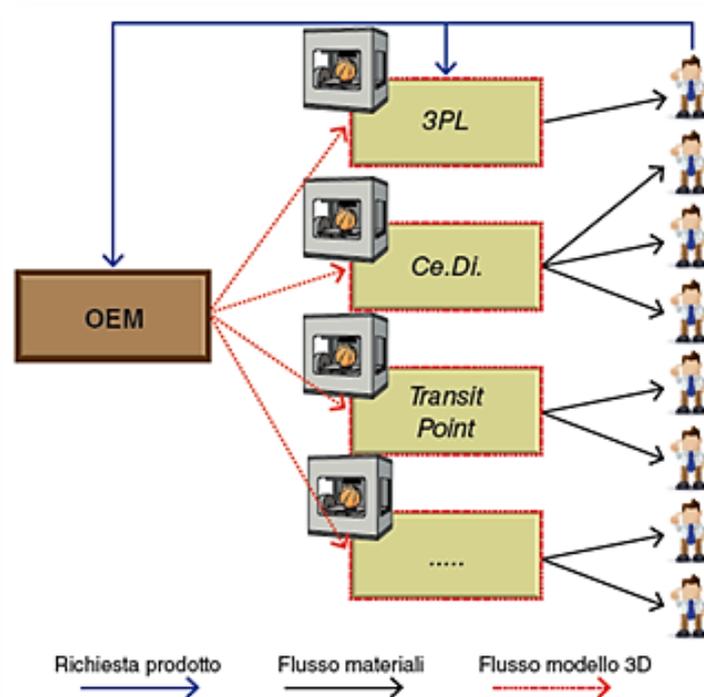


Figura 1.10: SC-AM in uno scenario decentralizzato [27]

1.3.3 SC-AM con struttura intermedia o ad hub

Esistono delle configurazioni intermedie tra la struttura completamente centralizzata e quella completamente decentralizzata. Un esempio è la “hub configuration” in cui la produzione si trova vicino ai centri di domanda regionali o centri distributivi (DC) che comprendono più sedi dei clienti, i prodotti sono stoccati in diversi punti di deposito e il numero di DC rappresenta una soluzione intermedia tra la centralizzazione e la decentralizzazione. La configurazione ad hub consente di beneficiare dei vantaggi di entrambe le configurazioni: ad esempio, richiede un numero inferiore di macchine produttive e meno forza lavoro per soddisfare la domanda, un minore trasbordo e una consegna più rapida ed economica (Khajavi et al., 2018).

Nella figura sottostante, vengono presentate diverse configurazioni di supply chain in base al tasso di decentramento (Deg). Deg=0 corrisponde a una configurazione SC totalmente decentralizzata, Deg=1 è una configurazione centralizzata e i valori intermedi sono configurazioni SC ibride.

In questo modo si possono vedere le principali differenze tra le varie strutture in una supply chain a due livelli che serve i clienti, soprattutto per quanto riguarda la dimensione del network distributivo, il quale si allunga man mano che si passa da una configurazione totalmente decentralizzata ad una completamente centralizzata (Cantini et al., 2022).

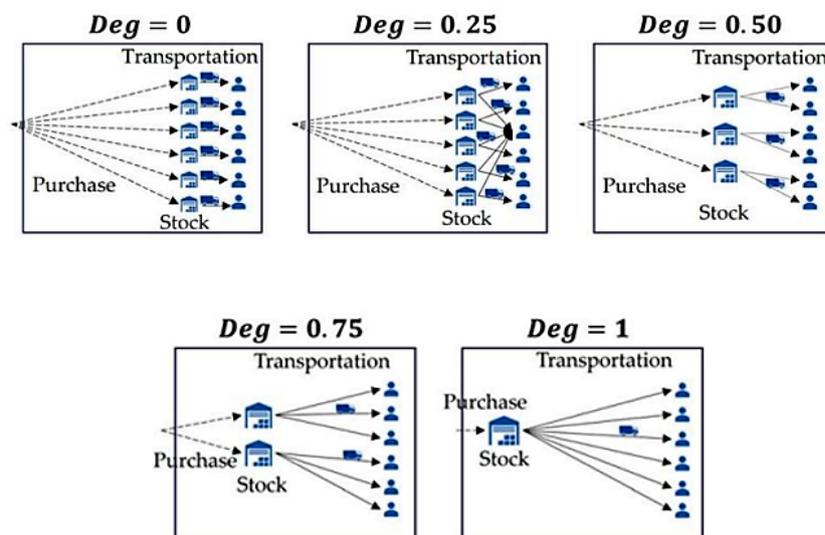


Figura 1.11: Configurazioni di SC-AM in base al tasso di decentramento (Cantini et al., 2022)

1.3.4 SC-AM con struttura estrema o domestica

Nello scenario più radicale, lo spostamento della produzione arriva al nodo più a valle della filiera, ovvero presso il consumatore finale. I consumatori stessi, infatti, possono creare autonomamente il prodotto desiderato, apportando modifiche direttamente dal modello base fornito dal produttore. L'OEM dovrà, quindi, pensare solo a vendere modelli originali e materiali per la stampa e a distribuirli al cliente. Sembra chiaro che questa configurazione potrebbe causare delle trasformazioni estreme a livello del flusso di materiali, non più prodotti finiti ma generalmente materie prime, il che si tradurrebbe in un radicale cambiamento degli scenari di stoccaggio e trasporto delle merci. Tuttavia, i limiti di produzione della stampa 3D descritti nel precedente paragrafo suggeriscono che questo scenario estremo non si applicherà a tutti i prodotti e materiali, almeno non in un prossimo futuro (Bogers et al., 2016).

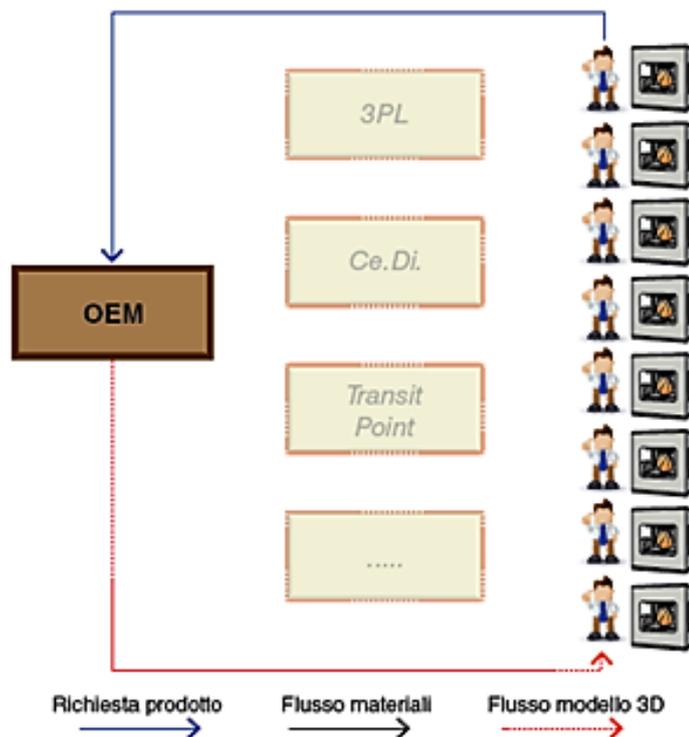


Figura 1.12: SC-AM in uno scenario estremo [27]

1.3.5 Vantaggi e limiti di SC-AM

A prescindere dallo scenario futuro, le filiere logistiche saranno costrette a modificare la propria configurazione attuale, seppur con intensità diverse, per superare le sfide logistiche attuali.

La riduzione dei trasporti del prodotto finito dovuti alla disintermediazione della supply chain fornisce il beneficio della riduzione dei costi di trasporto, minori emissioni di CO₂, bassi rischi di danni da trasporto e brevi delivery time al cliente (Whu et al., 2022). La riduzione dell'esigenza di avere delle scorte di prodotto finito o pezzi di ricambio per fronteggiare l'oscillazione della domanda fa ridurre i costi di warehousing lunga tutta la supply chain. Pertanto, si ottiene una supply chain più economica e sostenibile (Son et al., 2021; Yadav and Kumar, 2022). Inoltre, vi è l'opportunità di fornire prodotti anche in posti difficili da raggiungere con trasporti convenzionali (Westerweel et al., 2021). Vediamo un aumento di valore quando si tratta di relazioni con i clienti e altri stakeholder. Ciò si riflette in una maggiore disponibilità a pagare e in una minore dipendenza dai fornitori di componenti (Gallinaro, 2021).

Tra i limiti che impediscono l'implementazione di tecnologie additive nella catena di fornitura c'è la mancanza di conoscenze e competenze degli attori della catena di fornitura relative alla progettazione digitale e alle piattaforme di co-creazione (Verboeket and Krikke, 2019). Infatti, i prodotti additivi dovrebbero essere progettati in base alle specifiche esigenze del cliente, sulla base di una piattaforma di co-design che consenta la co-creazione di valore con i clienti, il trasferimento e la distribuzione dei file di progetto.

L'ipotesi del decentramento richiede più macchinari per la produzione additiva, con conseguenti costi fissi più elevati a livello di catena di approvvigionamento. Inoltre, l'approvvigionamento di materiali per la produzione additiva dipende dai fornitori e la loro disponibilità non può sempre essere garantita. Tuttavia, è chiaro che le differenze nella composizione della filiera porteranno a grandi cambiamenti nel settore della distribuzione e della logistica. In effetti, l'introduzione della produzione additiva all'interno delle filiere tradi-

zionali è dirompente per il mondo della logistica così come lo conosciamo, in quanto trasforma non solo le attività di produzione, ma anche la distribuzione, il coordinamento e la condivisione delle informazioni, la gestione dell'inventario e l'approvvigionamento dei materiali, nonché il trasporto di essi e il ruolo di attori come i provider logistici (Jermittiparsert, 2019). Per questo motivo è importante concentrare uno studio approfondito e capire a che punto è arrivato il mondo della ricerca in merito a tali argomenti.

Capitolo 2

Obiettivi e metodologia di ricerca

2.1 Obiettivi

In questo capitolo verranno descritti nel dettaglio la metodologia di ricerca, gli strumenti e i vari step di analisi eseguiti con l'obiettivo di revisionare sistematicamente le pubblicazioni in merito agli argomenti appena descritti nel precedente capitolo.

L'oggetto della ricerca, ovvero l'applicazione dell'Additive Manufacturing alla supply chain, è considerato di grande rilevanza scientifica per via degli innumerevoli cambiamenti che questa tecnologia abilitante potrebbe portare alla supply chain e alla sua gestione ed organizzazione.

Lo scopo principale di questo elaborato è fornire un quadro descrittivo dell'argomento, la sua evoluzione nel tempo, quali sono le sue tendenze di ricerca, criticità, correlazioni principali e rendere utili le conclusioni ottenute agli studi di ricerca futuri.

2.2 Descrizione della metodologia

La metodologia scientifica di questo studio consiste in una “Systematic Literature Review” (SLR), ovvero in una revisione sistematica della letteratura che si propone come obiettivo quello di fornire un chiaro riassunto dello stato dell’arte per ogni oggetto di indagine o per ogni problema di interesse. Per definizione, una SLR identifica, seleziona e valuta criticamente la ricerca per rispondere a una domanda chiaramente formulata (Dewey and Drahota, 2016).

Pittway ne delinea sette principi chiave necessari (Pittway, 2008):

1. Trasparenza;
2. Chiarezza;
3. Integrazione;
4. Messa a fuoco;
5. Uguaglianza;
6. Accessibilità;
7. Copertura.

La biblioteca della Charles Sturt University ha prodotto una guida completa per le SLR. Questa guida fornisce una panoramica dei suoi sette step necessari in modo da utilizzare un rigoroso, replicabile e trasparente processo scientifico [28]:

1. Identificazione della domanda oggetto di ricerca;
2. Sviluppo di un protocollo di ricerca (keywords, database, criteri di inclusione ecc.);
3. Esecuzione della ricerca sistematica seguendo il protocollo al punto 2;

4. Selezione del campione di pubblicazioni;
5. Valutazione critica delle pubblicazioni;
6. Estrazione, analisi e sintesi dei dati;
7. Scrittura e pubblicazione dei risultati.

Un criterio pianificato a priori è stata la scelta della banca dati *Scopus* come unica fonte di dati per la ricerca e la selezione delle pubblicazioni. *Scopus* è il database creato dalla casa editrice *Elsevier* nel 2004 ed è accessibile gratuitamente dalla Biblioteca Multimediale del Politecnico di Torino. Le pubblicazioni non presenti in questo database sono state escluse dal campione di analisi.

Tenendo conto della vastità del tema “Additive Manufacturing e Supply Chain”, si è presentata la necessità di definire degli argomenti o delle domande di ricerca più specifiche in modo da restringere il campo ed effettuare un’opportuna SLR. Pertanto, in primo luogo, è stata effettuata una raccolta delle literature review già esistenti sul database *Scopus* in merito all’applicazione dell’Additive Manufacturing alla supply chain. In secondo luogo, è stata effettuata un’analisi dei temi trattati nelle precedenti literature review nonché la raccolta e l’analisi delle *future research questions*, ovvero le domande di ricerca futura poste dagli autori.

Diverse pubblicazioni si sono già occupate di valutare e sintetizzare la letteratura in merito all’applicazione dell’Additive Manufacturing alle attività del Supply Chain Management al fine di migliorarne la competitività (Sonar et al., 2022) oppure comprendere le strategie di implementazione della tecnologia additiva nella supply chain (Braziotis et al., 2019). Inoltre, gli autori si sono solitamente concentrati su un determinato settore industriale come quello dei pezzi di ricambio (Mecheter et al., 2022) oppure su determinati obiettivi per la supply chain, quali la sostenibilità (Subramani et al., 2022) o la resilienza (Naghshineh and Carvalho, 2022). Pertanto, nessuna pubblicazione precedente ha mappato la letteratura esistente sulla supply

chain abilitata dall'Additive Manufacturing (SC-AM) per quanto riguarda le implicazioni sulla struttura della supply chain, la corrispondente rete di distribuzione e l'ubicazione degli impianti di produzione. C'è anche una comprensione limitata delle procedure di gestione dell'inventario e di stoccaggio di materie prime, prodotti finiti e semilavorati, nonché della spedizione delle merci ai clienti. Inoltre, le precedenti review della letteratura si focalizzano solo su studi applicati al contesto manifatturiero, non considerando quello logistico e distributivo.

Questa procedura ha permesso di identificare quei temi non ancora esplorati dalle precedenti literature review, consentendo la formulazione delle seguenti domande di ricerca per questa SLR:

- *Tema 1:* Quali sono le implicazioni dell'implementazione dell'Additive Manufacturing sulla struttura della supply chain e sui network distributivi corrispondenti?
- *Tema 2:* Nell'ambito dell'integrazione dell'Additive Manufacturing nella produzione tradizionale, come impatta sulla gestione dei materiali e sulle politiche di gestione dell'inventario?
- *Tema 3:* Come si sviluppa il processo di trasporto e consegna di parti additive su richiesta? E che ruolo avranno i fornitori di servizi logistici?

Questo studio tenta di rispondere a tali domande costruendo diverse analisi sugli articoli individuati e selezionati.

Gli step successivi consistono nell'impostare un protocollo di ricerca quanto più completo e coerente affinché esso produca un opportuno campione di pubblicazioni. Questo è uno step delicato in quanto non sempre è possibile analizzare tutta la letteratura sull'argomento, la quale può essere molto numerosa e dispersiva. Quindi, è necessario prendere delle decisioni impostando un protocollo che contenga dei criteri di ricerca. Pertanto, sono state create delle apposite stringhe di ricerca contenenti le *keywords*, ovvero le parole chiave da inserire sulla banca dati per la ricerca delle pubblicazioni per ogni tema individuato.

ARGOMENTO	KEYWORDS
Additive Manufacturing	<i>"Additive Manufacturing" OR "3d printing" OR "Rapid Prototyping" OR "Direct Digital Manufacturing"</i>
Supply Chain	<i>"Supply chain" OR "logistics" OR "distribution network"</i>
Tema 1	<i>"structure" OR "configuration" OR "production localization" OR "facility location" OR "location-allocation"</i>
Tema 2	<i>"inventory" OR "inventory management" OR "material management" OR "warehouse" OR "stock allocation" OR "safety stock" OR "raw materials" OR "semi-finished"</i>
Tema 3	<i>"delivery" OR "transport" OR "vehicle" OR "logistic service provider" OR "logistics provider"</i>

Figura 2.1: Keywords usate per la ricerca degli articoli

Questo primo passo ha prodotto come risultato un totale di circa 537 pubblicazioni, il quale è considerato un numero eccessivo per gli scopi di questo lavoro di tesi.

Al fine di effettuare un primo scarto di quelle pubblicazioni non conformi all'attività di analisi, sono stati definiti i seguenti criteri di inclusione, oltre alla scelta di *Scopus* come unica banca dati:

- Le pubblicazioni sono avvenute nell'arco temporale 2010-2022 poiché vi è scarsità di materiale pubblicato prima del 2010. Inoltre, l'anno 2023 non è stato considerato poiché la fase di ricerca è avvenuta durante il mese di novembre 2022;
- Le pubblicazioni sono scritte in lingua inglese;
- Sono stati considerati solamente gli articoli e non altre tipologie di pubblicazioni (ad esempio, conference papers, libri, ecc.);
- È stata scelta la rivista come unica tipologia di fonte;
- Tutti gli articoli sono pertinenti al settore in esame;

- Lo stesso articolo non si ripete con titoli diversi in riviste differenti.

Questa fase ha permesso l'estrazione di un primo corpus di 231 articoli. In seguito, si è passati alla revisione del titolo e dell'abstract di ciascun articolo, step che ha portato all'esclusione degli articoli non inerenti ai temi presi in esame.

La fase finale del processo ha portato al perfezionamento del campione mediante la lettura dell'intero testo degli articoli selezionati. Qualche articolo mancante del corpo del testo è stato cercato su *Google Scholar* e su *ResearchGate* e, in caso di esito negativo, l'articolo in questione è stato scartato dall'analisi.

Questo processo di selezione ha prodotto un corpus di 101 articoli.

Una volta che è stato costruito definitivamente il set iniziale di articoli, si è passati ad un ulteriore perfezionamento del campione mediante lo step denominato *Snowballing*, ovvero processo a valanga, per identificare potenziali nuovi documenti da includere nell'analisi. Esso si compone delle procedure *backward* e *forward*. La prima sfrutta l'elenco delle referenze di ogni articolo e, in pratica, consiste nell'esaminare la bibliografia di ogni articolo. La bibliografia, infatti, contiene un elenco di tutti i lavori scritti e pubblicati in precedenza, così citati dal particolare articolo cui si fa riferimento. La seconda, invece, consiste nell'analizzare l'elenco delle citazioni di ogni articolo, ovvero di quegli articoli che citano quello preso in esame e che quindi sono stati scritti e pubblicati successivamente lo stesso (Wohlin, 2014).

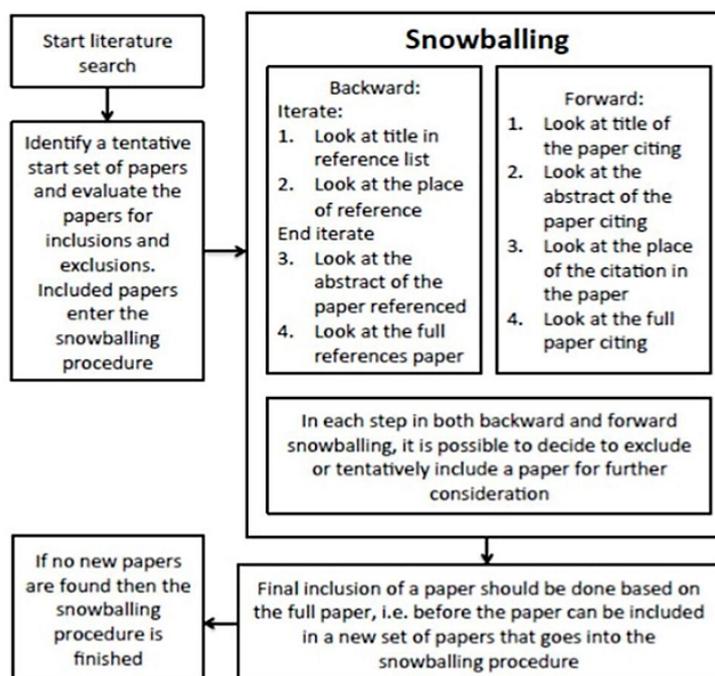


Figura 2.2: Procedura di Snowballing (Wholin, 2014)

Ogni nuovo articolo individuato tramite *Snowballing*, sia in avanti che all'indietro, è stato cercato su *Scopus* e se non presente, è stato scartato a priori. Viceversa, una volta trovato l'articolo, è stato letto prima l'abstract e poi il testo intero per valutarne la pertinenza agli argomenti oggetto dell'analisi. In caso di esito positivo, l'articolo è entrato a far parte del campione di ricerca, altrimenti ne è stato escluso. Le due procedure sono state ripetute fino a quando non sono stati trovati nuovi documenti.

Questa procedura ha permesso l'individuazione di 31 articoli aggiuntivi, dei quali circa l'80% è stato individuato tramite il metodo *backward*.

In conclusione, è stato prodotto un corpus finale di 132 articoli.

Nella figura sottostante è possibile prendere visione del quadro complessivo del processo di selezione e composizione del campione di analisi.



Figura 2.3: Procedura di selezione del campione di analisi

In seguito, le informazioni dei 132 articoli finali sono stati estratte ed esportate in un file di *Microsoft Excel* in formato .CSV ed il file è stato usato come database.

Per ogni articolo sono state riportate le seguenti informazioni:

- Autore;
- Titolo;
- Data di pubblicazione;
- Numero di citazioni (fino al 2022);
- Keywords;
- Scopo principale;
- Titolo della rivista
- Paese della rivista
- Indici di qualità della rivista (Quartile e 5-Year Impact Factor)

Allo scopo di classificare la letteratura all'interno del database, si è deciso di suddividere gli articoli in tre temi principali, estrapolati dalle domande di ricerca menzionate sopra. È chiaro, infatti, che esse consentono di esplorare il contesto della supply chain abilitata dalla produzione additiva con un focus sul network distributivo e sui suoi tre driver logistici descritti al paragrafo 1.1.4.

Pertanto, la letteratura sarà analizzata seguendo questi tre macro-filoni di ricerca:

1. *Struttura del Network*: tratta delle scelte di pianificazione e localizzazione della produzione additiva all'interno del network tradizionale per trovare la migliore configurazione in grado di affrontare le attuali sfide delle filiere logistiche e della logistica distributiva;
2. *Gestione dell'inventario*: questo filone si concentra sulle politiche di gestione dell'inventario e dei materiali, nonché sui tre tipi di magazzino (materie prime, semilavorati e prodotti finiti) quando viene integrata la produzione additiva all'interno del network logistico;
3. *Trasporti e logistics service providers*: questo filone indaga sulle scelte a livello di trasporto (sia di lunga distanza che dell'ultimo miglio) e veicoli, oltre che della distruzione e/o creazioni di nuovi ruoli delle aziende logistiche quando si integra la produzione additiva all'interno del network.

Infine, la letteratura è stata visionata e analizzata allo scopo di cogliere ed estrapolare le seguenti informazioni:

- Metodologie di ricerca;
- Processi e/o tecnologie di Additive Manufacturing;
- Argomenti principali per ognuno dei tre temi di ricerca;
- Risultati principali;
- KPI calcolati negli studi quantitativi;
- Contesti di applicazione e/o settori industriali.

Al termine della raccolta delle informazioni in forma sintetica e tabellare, ne è stata eseguita l'analisi grafica utilizzando *Microsoft Excel*. I risultati saranno discussi nel prossimo capitolo.

Capitolo 3

Analisi della letteratura e risultati

Questa sezione descrive il passaggio successivo alla selezione e composizione del dataset finale di pubblicazioni, ovvero l'analisi critica dello stesso. Infatti, i 132 articoli raccolti sono stati studiati e analizzati allo scopo di individuare argomenti già ampiamente trattati e argomenti ancora poco esplorati all'interno dei tre filoni di ricerca introdotti nel precedente capitolo.

In primo luogo, verranno descritte le analisi svolte a livello generale seguendo la suddivisione degli articoli nei tre temi di ricerca. In seguito, si scenderà nel dettaglio, passando all'analisi degli argomenti principali individuati per ognuno dei tre filoni.

3.1 Analisi della distribuzione degli articoli e degli autori

In questo paragrafo, si riportano alcune informazioni generali sugli articoli, che sono meglio schematizzati nel documento di *Microsoft Excel* usato come database, e sui loro autori.

Per prima cosa, si intende mostrare come i 132 articoli selezionati sono stati suddivisi nei tre filoni di ricerca contando il numero di articoli per ogni tema. Sia nella figura seguente che nelle prossime d'ora in avanti, per semplicità, ci si esprimerà come “Tema 1” per indicare il filone “Struttura del Network”, “Tema 2” equivale al tema “Gestione dell’inventario”, “Tema 3” indica il filone “Trasporti e logistics service providers”.

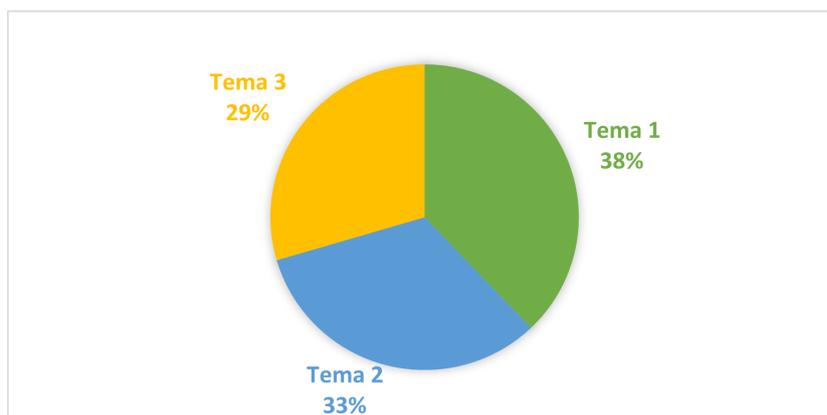


Figura 3.1: Numero di articoli per tema di ricerca

Come si evince dal grafico in figura 3.1, la distribuzione degli articoli all'interno dei tre temi non presenta grosse differenze dimensionali. Il tema 1 è il più trattato in quanto contiene 50 articoli su 132, contro i 43 che trattano del secondo tema e i 39 che indagano sugli argomenti del terzo tema di ricerca. Questo perchè, generalmente, il punto di partenza della trattazione riguarda la struttura del network logistico quando si integra la produzione additiva, i quali cambiamenti strutturali hanno un forte impatto sulle attività logistiche come la gestione dell'inventario e dei trasporti.

La figura sottostante mostra, invece, l'andamento delle pubblicazioni nel corso degli anni contando quanti articoli sono stati pubblicati in un determinato anno per ogni tema di ricerca.

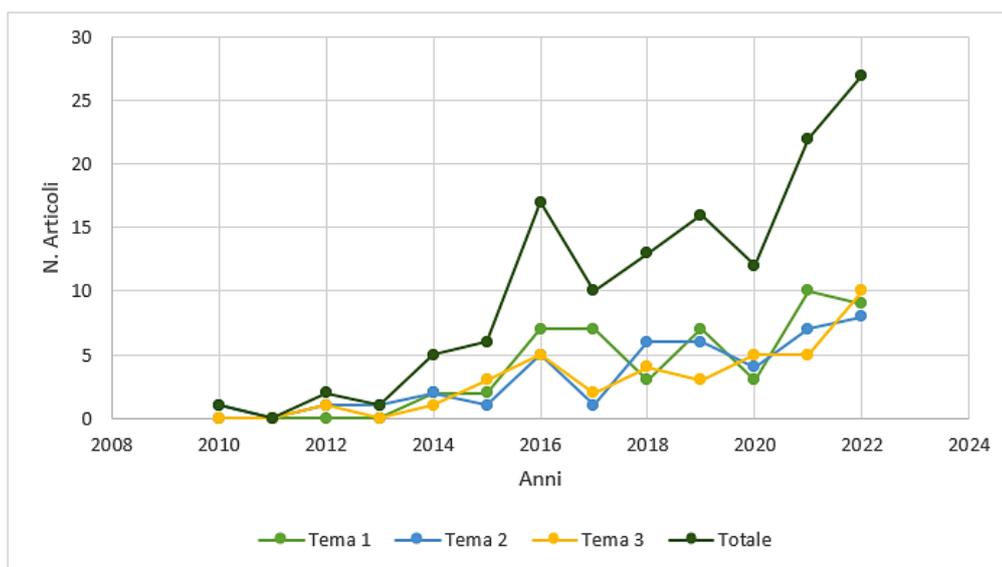


Figura 3.2: Andamento temporale degli articoli

Si nota che l'andamento generale degli articoli è sicuramente in crescita rispetto al 2010, anno di inizio delle pubblicazioni in merito.

La prima sostanziale crescita avviene nel 2016. Infatti, circa l'88% degli articoli è stato pubblicato dal 2016 in poi.

Nonostante si contino alcuni picchi negativi tra il 2017 e il 2020, in generale, si assiste a un trend positivo nel corso degli anni dato dal fatto che dal 2020 sono stati pubblicati quasi il 50% degli articoli.

Dato che, in media, la ricerca consistente non arriva a dieci anni, si prevede un aumento delle ricerche in merito a questi temi. Infatti, le sfide attuali e future, nonché la necessità di digitalizzare la supply chain tramite tecnologie come la produzione additiva, richiedono di effettuare sempre più studi in merito alle scelte e al comportamento delle filiere logistiche e dei suoi attori coinvolti.

L'analisi che segue si focalizza sugli autori dei 132 articoli del dataset al fine di individuare quali hanno principalmente scritto e pubblicato in merito all'argomento trattato.

In totale, sono stati individuati circa 300 autori diversi. Il grafico seguente mostra la loro distribuzione geografica in base alla raccolta dell'informazione circa la nazionalità di ogni autore tramite il sito *ResearchGate*.

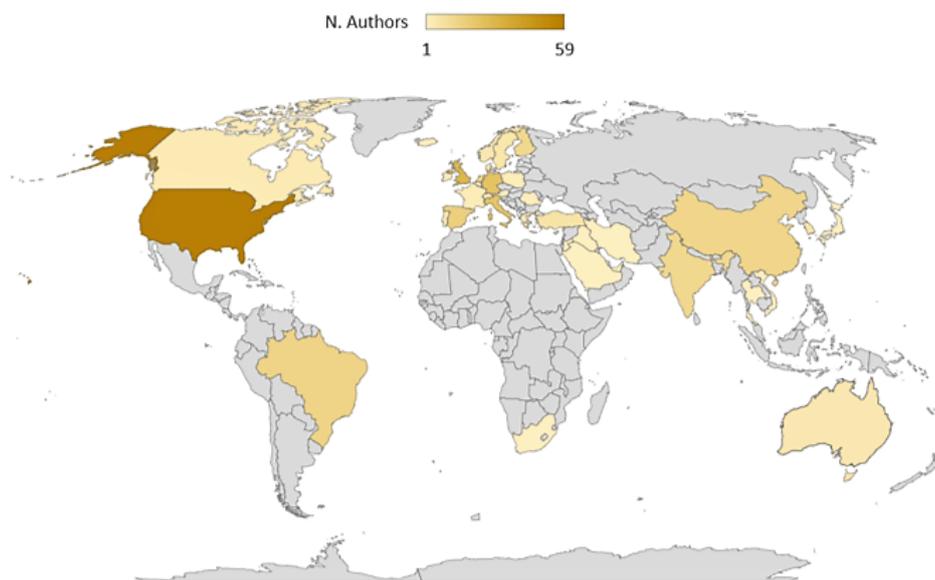


Figura 3.3: Nazionalità degli autori

In generale, gli autori sono distribuiti per il 55% in Europa, il 26% in America e il 17% in Asia. La restante minima parte degli autori proviene dall'Africa e dall'Australia.

Considerando i singoli Paesi, la percentuale più alta di autori (circa il 20%) è statunitense. A seguire, l'8% degli autori è di nazionalità tedesca mentre un altro 8% è di nazionalità italiana.

La restante parte degli autori americani è di nazionalità brasiliana (5%) e canadese (1%). Mentre gli altri autori europei sono in gran parte spagnoli (6%), olandesi (5%) oppure finlandesi (4,35%).

Per quanto riguarda gli autori asiatici, la maggior parte di essi è di nazionalità cinese.

Il grafico seguente mostra, invece, la frequenza degli autori ovvero quanti articoli si contano per ogni autore in modo da individuare quali sono quelli che hanno indagato maggiormente sui tre temi di ricerca. L'analisi è stata ottenuta ponendo come filtro un valore maggiore o uguale a 3 articoli scritti e pubblicati.

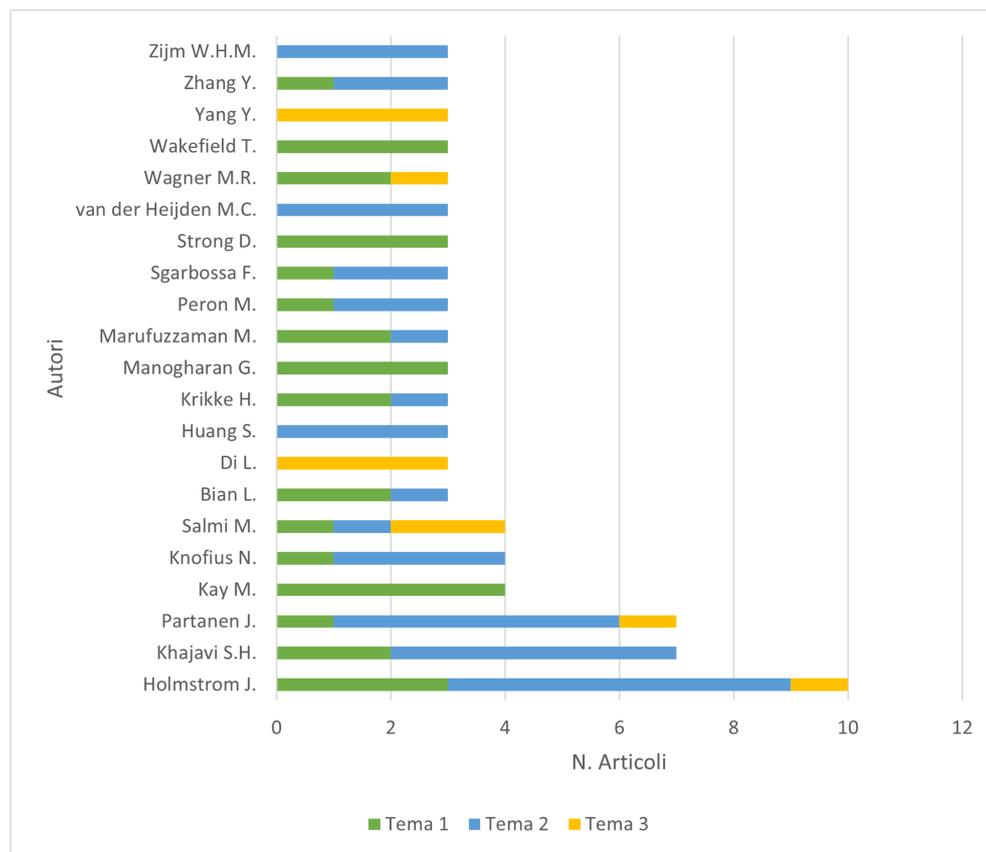


Figura 3.4: Frequenza degli autori

Per quanto riguarda il tema 1, l'autore più frequente è l'americano Michael Kay, il quale si concentra su SC-AM decentralizzate e intermedie, spesso in collaborazione con gli autori americani Strong, Wakefield e Manogharan.

In risalto anche gli studi dell'autore finlandese Jan Holmstrom, il quale si focalizza sulla migliore configurazione della supply chain in grado di affrontare le sfide del settore dei pezzi ricambio.

Per il tema 2, spiccano i numerosi lavori di Jan Holmstrom, spesso in colla-

borazione con gli autori finlandesi Siavash Khajavi e Jouni Partanen, soprattutto per lo studio delle politiche di inventario per la gestione dei pezzi di ricambio prodotti tramite Additive Manufacturing. Figurano anche i lavori degli olandesi Knofius, van der Heijden e Zijm.

Infine, per quanto riguarda il terzo tema, gli articoli più numerosi sono quelli scritti dagli autori americani Yiran Yang e Lei Di, i quali si occupano dei nuovi metodi di integrazione del trasporto con la produzione additiva.

3.2 Analisi delle riviste

In questo paragrafo, si riportano le analisi effettuate in merito alle riviste nelle quali sono stati pubblicati i 132 articoli in esame, al fine di individuare le riviste più frequenti. Inoltre, sono state raccolte le informazioni riguardanti il Paese di appartenenza di ogni rivista e la loro valutazione della qualità tramite la classificazione in quartili e il 5-Year Impact Factor (5-IF).

L'Impact Factor è un indice di letteratura sviluppato dall'Institute for Scientific Information nel 1961 per misurare il numero medio di citazioni ricevute nell'anno di riferimento da articoli pubblicati su riviste scientifiche negli anni precedenti. In particolare, il 5-Year Impact Factor indica il numero medio di citazioni ricevute dagli articoli pubblicati in una rivista negli ultimi cinque anni. Maggiore è tale indice, maggiore è l'impatto delle pubblicazioni della rivista sulla comunità scientifica di riferimento [29].

La classificazione in quartili deriva dalla misura dell'Impact Factor e si riferisce al fatto che ogni rivista viene posizionata in un determinato quartile in base all'importanza della rivista stessa. Il quartile più importante è indicato come Q1, poi a scalare ci sono Q2, Q3 e Q4. Le riviste classificate in Q1 sono le più avvalorate, mentre quelle in Q4 sono le meno accreditate in ambito scientifico [30].

Per assegnare un quartile di riferimento a una particolare rivista, tutte le riviste scientifiche che trattano un particolare argomento vengono prima ordinate per fattore di impatto decrescente. In secondo luogo, viene calcolato

il rapporto tra la posizione in graduatoria detenuta dalla rivista di interesse e il numero totale di riviste in graduatoria e si confronta questo rapporto con le seguenti soglie di passaggio da un quartile all'altro [31]:

QUARTILE	SOGLIA
Q1	$0.0 < x \leq 0.25$
Q2	$0.25 < x \leq 0.5$
Q3	$0.5 < x \leq 0.75$
Q4	$0.75 < x$

Figura 3.5: Classificazione in quartili [31]

I dati sull'5-Year Impact Factor e sui quartili per ogni rivista sono stato raccolti ed estratti presso il sito *Scimago Journal & Country Rank* [32].

Per i 132 articoli del corpus finale sono state individuate 79 diverse riviste. La figura sottostante vuole mettere in risalto le riviste che contengono il maggior numero di articoli in merito agli argomenti oggetto di analisi. Pertanto, è stato posto come filtro un valore maggiore o uguale a 2 articoli.

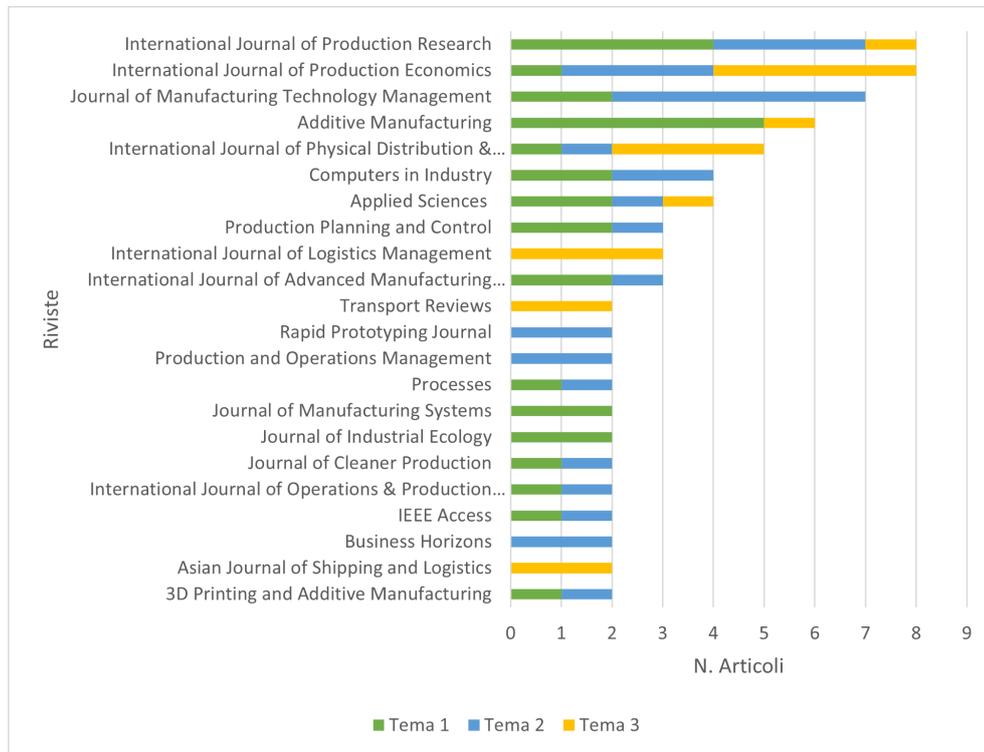


Figura 3.6: Frequenza delle riviste

Per quanto riguarda il tema 1, le due riviste più frequenti risultano essere *International Journal of Production Research* e *Additive Manufacturing*, entrambe della casa editrice *Taylor & Francis*. La prima è una rivista di natura interdisciplinare che si concentra su argomenti che trattano l'interfaccia tra ingegneria e gestione, comprendendo tutti gli aspetti della materia in relazione alle industrie manifatturiere e di processo, nonché alla produzione in generale considerando interi cicli di attività. La seconda pubblica esclusivamente nel campo della prototipazione rapida e virtuale, coprendo argomenti come il design per la produzione additiva.

Anche per il tema 2, una delle riviste più frequenti è *International Journal of Production Research*, oltre a *Journal of Manufacturing Technology Management* e *International Journal of Production Economics*. Queste ultime sono riviste multidisciplinari che combinano argomenti di produzione e gestione, strategia ed economia.

Infine, per il tema 3 troviamo, soprattutto, la rivista *International Journal of Production Economics* oltre a *International Journal of Logistics Management*, e *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. Le ultime sono due riviste leader di ricerca che collegano aree strategiche di gestione della catena di approvvigionamento e logistica aziendale in modo da costruire conoscenze sulla risoluzione di problemi critici di produzione e consumo.

Focalizzandoci sull'aspetto geografico, tramite la raccolta dell'informazione sul Paese di appartenenza di ogni rivista, la figura sottostante mette in mostra in quali Paesi si concentra la ricerca in merito agli argomenti oggetto di analisi conteggiando quante riviste appartengono a un determinato Paese.

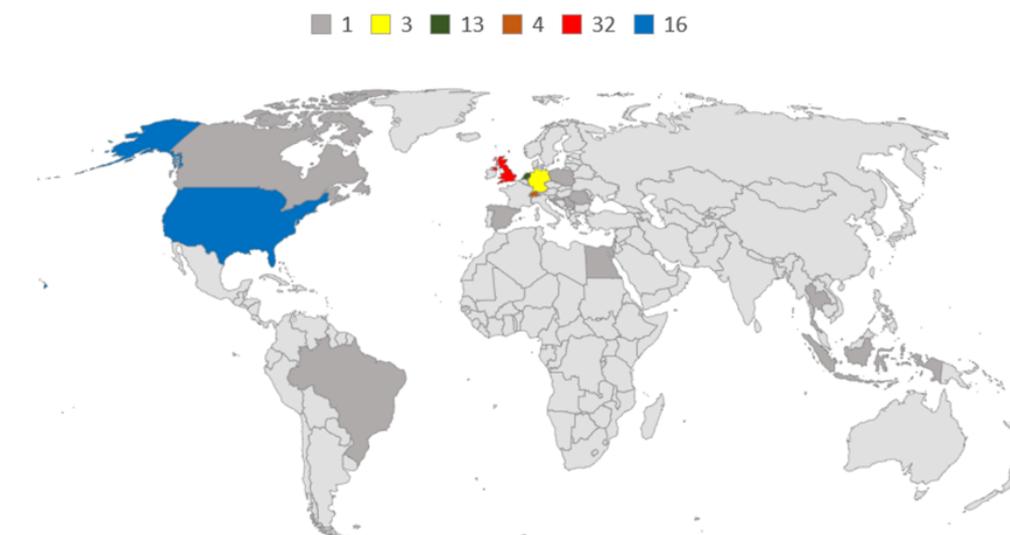


Figura 3.7: Distribuzione geografica delle riviste

Dal grafico in figura 3.7 si evince come, con 32 riviste su 79 totali, il Regno Unito sia il Paese maggiormente interessato a ricerche riguardanti la filiera logistica abilitata dalla produzione additiva. In seguito, vi sono gli Stati Uniti con 16 riviste e i Paesi Bassi con 13 riviste.

Focalizzandoci, invece, sulla qualità delle riviste, la tabella in figura 3.8 mira a scoprire se l'argomento esaminato ha maggiori probabilità di essere discusso in riviste di alta o bassa qualità, tramite la suddivisione in quartili e andando a contare quante riviste appartengono a un determinato quartile.

Quartile	Tema 1	Tema 2	Tema 3
Q1	68%	67%	63%
Q2	13%	23%	19%
Q3	5%	3%	7%
Q4	3%	0%	4%
Not assigned	11%	7%	7%

Figura 3.8: Distribuzione dei quartili delle riviste

Per tutti e tre i temi di ricerca, il 63-68% delle riviste fa parte del primo quartile, mentre tra il 13 e il 20% di esse fa parte del secondo quartile.

Le differenze di percentuale tra i tre temi sono minime. Tuttavia, il primo tema, è quello presente maggiormente in riviste di qualità Q1, anche se si discosta solamente di un punto percentuale rispetto al secondo tema e di 5 punti percentuali rispetto al terzo tema. Inoltre, al primo tema appartengono anche le riviste con la più alta percentuale di quartile non assegnato, mentre al terzo tema appartengono più riviste appartenenti a Q3 e Q4 rispetto agli due temi anche se si parla di percentuali minime, circa inferiori al 10%.

In generale, si può concludere che gran parte della letteratura che si occupa dei temi di struttura del network e trasporti fa parte di riviste di alta qualità, mentre la letteratura che si occupa dei temi di gestione dell'inventario fa quasi esclusivamente parte di riviste di alta qualità. Generalmente, ciò si traduce in una situazione positiva in termini di nuovi approcci, teorie o innovazioni che potrebbero essere sviluppati e portati in risalto dall'essere pubblicati in riviste accreditate. Oppure potrebbe trattarsi del fatto che l'attenzione della ricerca su questi temi è tanta perché si è ancora allo stato iniziale, considerando che prima del 2010 non si rilevano pubblicazioni e che la ricerca ha cominciato a

crescere nel 2016.

Un'ultima analisi in merito alle riviste riguarda il loro indice di qualità 5-Year Impact Factor per l'anno 2022, estrapolato dal sito *Scimago*. Questa analisi, di cui grafico è proposto in figura 3.9, è finalizzata ad individuare una correlazione tra le riviste più o meno influenti e gli oggetti della ricerca in modo da capire anche quale tendenza stanno seguendo gli articoli scientifici in merito ai temi oggetto di questo studio.

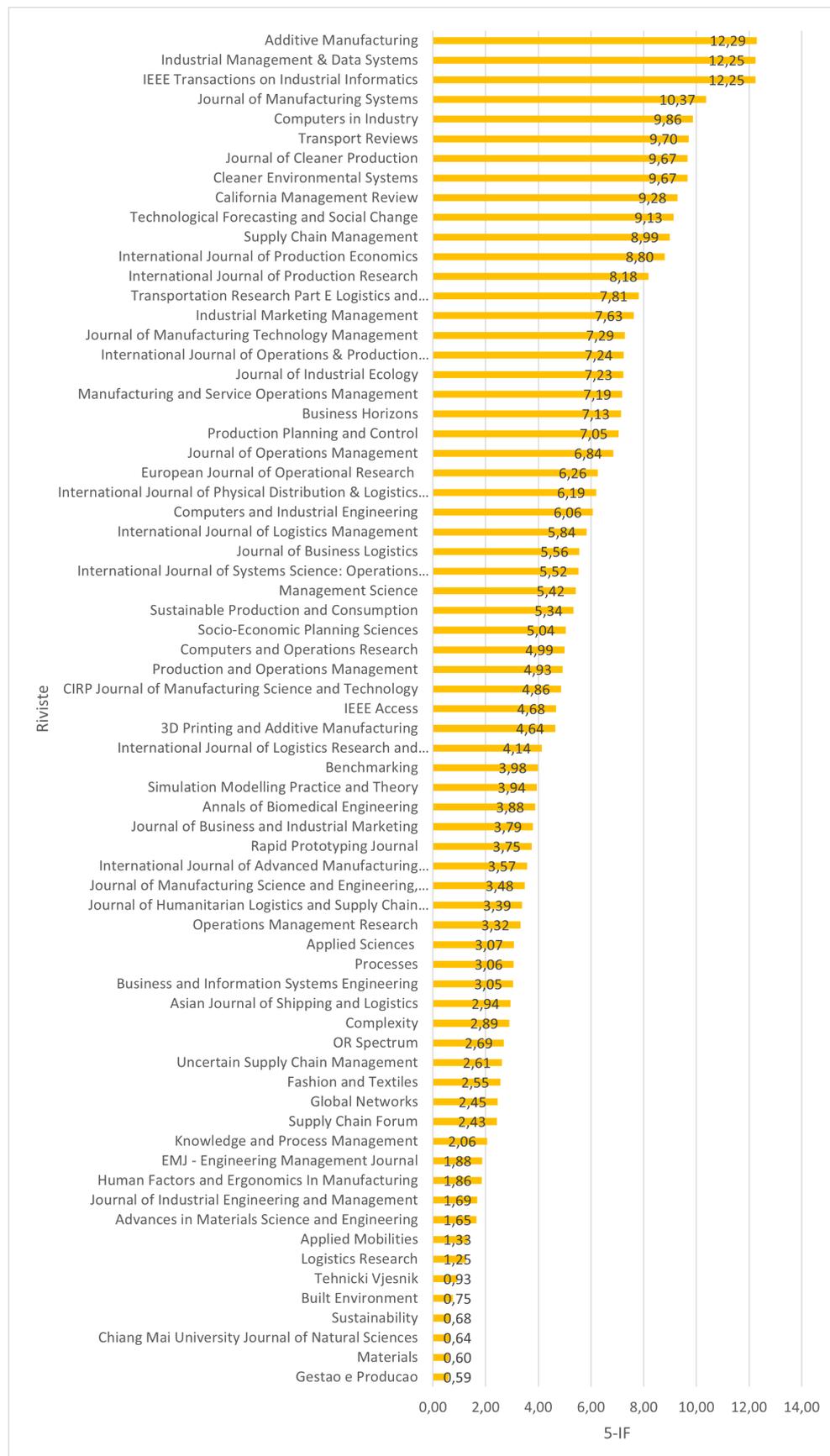


Figura 3.9: 5-Year Impact Factor delle riviste

La media dei 5-IF di tutte le riviste individuate risulta essere del 4,47. Questo non è un dato alto ma nemmeno negativo, in quanto in media ci sono state circa 4-5 citazioni nel 2022 per ogni articolo pubblicato dalla rivista nei cinque anni precedenti.

Un ulteriore dato positivo si ottiene considerando il fatto che le riviste più frequenti, menzionate durante l'analisi critica del grafico in figura 3.6, hanno tutte un 5-IF più che sopra la media, e in certi casi raddoppiato come, ad esempio, accade per la rivista *International Journal of Production Economics*, la quale è una delle riviste più frequenti per quanto riguarda il secondo tema di ricerca.

TEMA	RIVISTE PIÙ FREQUENTI	5-IF
3	International Journal of Logistics Management	5,84
3	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management	6,19
2-3	Journal of Manufacturing Technology Management	7,29
1-2	International Journal of Production Research	8,18
2	International Journal of Production Economics	8,80
1	Additive Manufacturing	12,29

Figura 3.10: Riviste più frequenti e 5-IF

Inoltre, la rivista *Additive Manufacturing* è quella con il più alto 5-IF pari 12,29 ed è anche quella più ricca di articoli appartenenti al primo tema di ricerca.

Dato l'elevato numero di citazioni ricevute dalle riviste che pubblicano ricerche su questo argomento, si può affermare che l'oggetto della ricerca è senza dubbio una tendenza, sebbene alcuni temi siano ancora in una fase di ricerca iniziale. Inoltre, il fatto che gli articoli e le ricerche su di esso siano pubblicati principalmente in ottime riviste di alta qualità rende il tutto strettamente connesso e correlato.

3.3 Analisi delle metodologie e degli strumenti di ricerca

Questo paragrafo vuole concentrare l'analisi sulle metodologie e sugli approcci alla ricerca più frequentemente usati dagli autori durante la trattazione degli argomenti relativi alla produzione additiva nelle filiere logistiche. Per questo motivo, ogni articolo è stato classificato in base alle seguenti metodologie di ricerca, ricavate dalla fase di lettura degli articoli:

- Simulazione
- Caso studio numerico
- Caso studio qualitativo
- Sondaggio/intervista
- Modello matematico/di ottimizzazione
- Modello concettuale/framework
- Literature review
- Metodo SCOR
- Metodo Multi-Criteria Decision Making (MCDM)
- Analisi quantitativa e/o statistica

Il grafico sottostante vuole mostrare la frequenza delle metodologie appena menzionate nei 132 articoli analizzati, conteggiando quanti articoli fanno uso di una determinata metodologia, per ogni tema di ricerca di appartenenza.

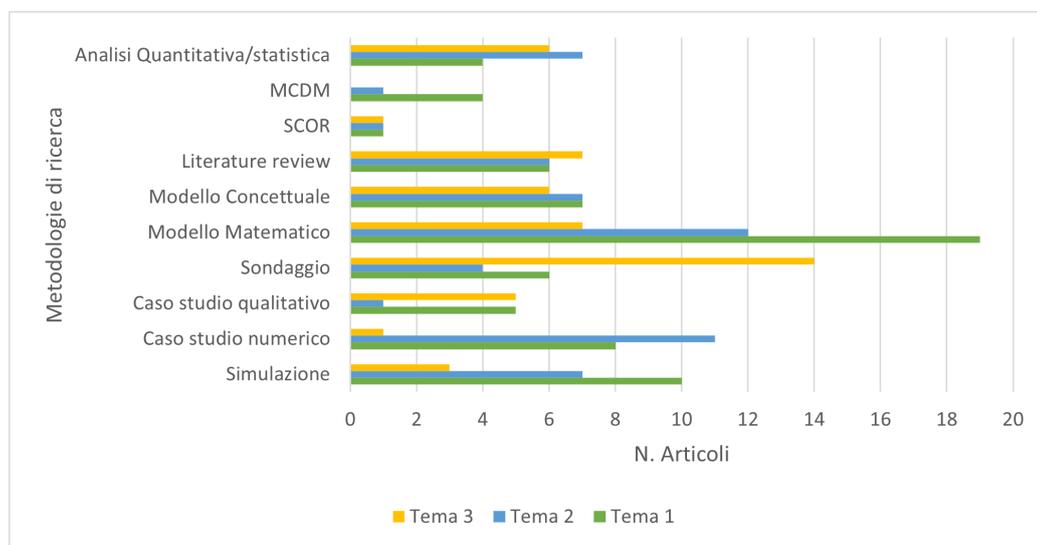


Figura 3.11: Analisi delle metodologie di ricerca

Il grafico in figura 3.11 dimostra che, in generale, per i temi 1 e 2 la metodologia prevalente prevede l'uso di un modello matematico o di ottimizzazione. I modelli matematici introdotti, per la loro complessità, sono spesso risolti tramite l'uso di algoritmi euristici e meta-euristici, i quali portano ad una soluzione non esatta ma approssimata. Questi temi di ricerca sono spesso discussi anche tramite casi studio numerici e simulazioni ad eventi discreti o che si basano sulla dinamica dei sistemi. Pertanto, gli autori utilizzano prevalentemente un approccio quantitativo nella trattazione degli argomenti riguardanti la struttura del network e la gestione dell'inventario.

Per quanto riguarda il tema 3, invece, vi è un cambio di approccio poiché le metodologie più utilizzate riguardano sondaggi e interviste agli attori logistici, i cui dati vengono solitamente analizzati statisticamente, oltre che modelli concettuali e revisioni della letteratura. Sono presenti anche dei modelli matematici euristici e meta-euristici, ma in misura minore. Pertanto, qui è utilizzato un approccio prettamente qualitativo.

Nei prossimi paragrafi, questa tipologia di analisi verrà vista più specificamente per ogni tema di ricerca, al fine di confermare o smentire per un particolare argomento trattato, le conclusioni generali dette sopra.

Un'ulteriore analisi riguarda quella sui software risolutivi usati negli studi quantitativi, quali modelli matematici e simulazioni, al fine di comprendere quali siano gli strumenti più utilizzati dagli autori.

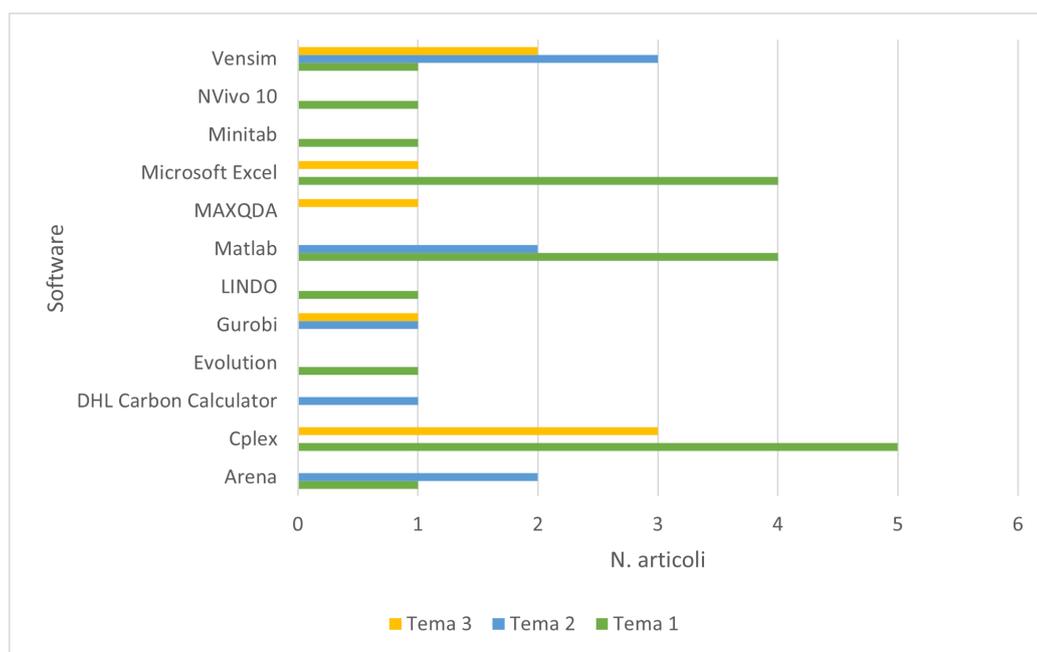


Figura 3.12: Analisi dei software risolutivi

Per quanto riguarda il tema 1, risultano essere più usati *Cplex*, *Matlab* e *Microsoft Excel*, ovvero software per analisi statistiche e calcoli numerici. All'interno del secondo tema di ricerca, sono maggiormente utilizzati i software di simulazione *Vensim* e *Arena*, oltre che *Matlab*.

I software più usati per il tema 3, ovvero *Vensim* e *Cplex*, sono presenti in numero minore poiché, come già detto, gli studi sono per la maggior parte qualitativi.

3.4 Analisi dei processi e delle tecnologie di Additive Manufacturing

In questa sezione l'analisi si focalizza sulle tecniche di produzione additiva per verificare se vi siano dei processi più studiati di altri nella loro applicazione alla supply chain. In particolare, vengono esplorate le sette categorie di processo di Additive Manufacturing, già ampiamente descritte al paragrafo 1.2.3.

La figura sottostante mostra la distribuzione delle tecnologie di Additive Manufacturing nei 132 articoli, divisi per i tre filoni di ricerca.

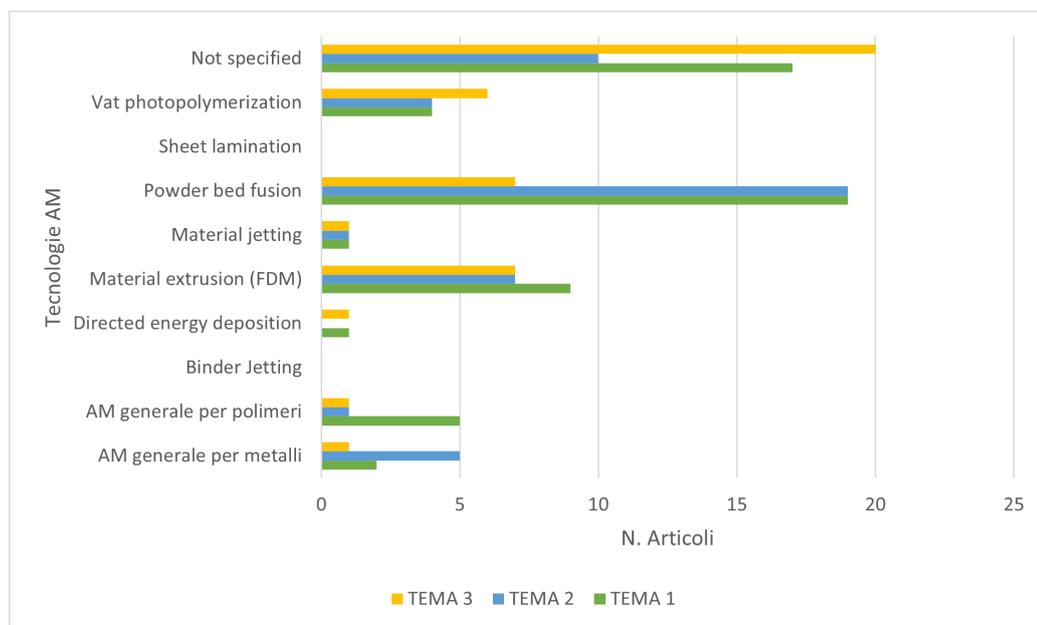


Figura 3.13: Analisi dei processi di Additive Manufacturing

Il grafico in figura 3.13 mostra che la maggior parte degli studi preferisce non menzionare categorie specifiche di processi o materiali specifici, ma indaga sulla produzione additiva o sulla stampa 3D in generale. Probabilmente ciò è dovuto al fatto che non vi siano delle differenze nel trattare i temi della supply chain in relazione ad una tecnica additiva specifica piuttosto che ad un'altra. Quello che succede a livello di struttura della supply chain,

inventario e trasporti va nella stessa direzione per tutti i processi di Additive Manufacturing.

La maggior parte della letteratura che decide di occuparsi di una categoria di processo, utilizza i processi di *Power Bed Fusion* e di *Material Extrusion* per via della loro popolarità e versatilità.

Nessun articolo, invece, indaga sui processi di *Binder Jetting* e *Sheet Lamination*.

Nello specifico, per quanto riguarda il processo di *Power Bed Fusion*, è stata effettuata un'analisi più approfondita, visibile in figura 3.14, sulle singole tecniche appartenenti a questa categoria, poiché esse sono numerose e diverse nei processi/materiali, allo scopo di individuare quelle maggiormente esplorate dagli autori.

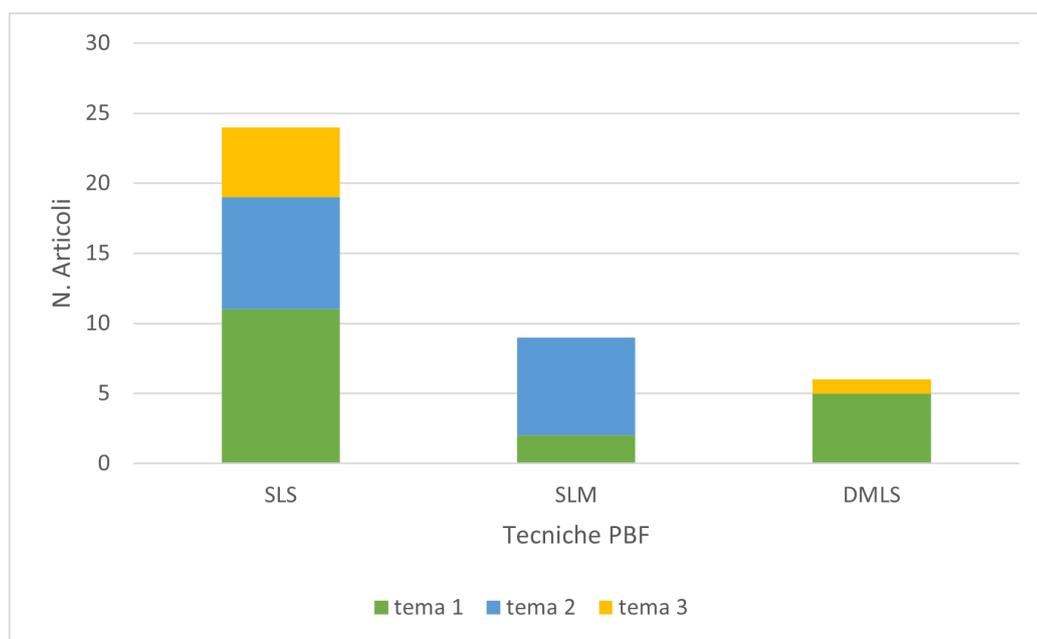


Figura 3.14: Analisi delle tecnologie di Power Bed Fusion

La tecnologia più discussa risulta essere la *Selective Laser Sintering* per tutti e tre i filoni di ricerca. Infatti, circa il 62% del totale degli articoli indaga su questa particolare tecnologia di sinterizzazione tramite laser di polveri termoplastiche e metalliche. Inoltre, negli articoli del tema 2 troviamo, anche

se in misura minore, la tecnologia *Selective Laser Melting*, mentre per gli articoli del primo tema si ha la tecnica *Direct Metal Laser Sintering*. Tuttavia, queste ultime rappresentano un'evoluzione della prima. Pertanto, anche qui non si riscontrano grandi differenze.

3.5 Analisi delle applicazioni e dei settori industriali

In questa sezione l'analisi si sposta sulle applicazioni e sui settori industriali, già descritti al paragrafo 1.2.6, per comprendere l'andamento di questi all'interno del campione di articoli; quindi, quali siano quelli più studiati dagli autori nelle loro ricerche in merito agli argomenti oggetto di analisi. Infatti, spesso la ricerca si focalizza su un settore manifatturiero specifico. Sebbene l'additive manufacturing fosse originariamente utilizzato per produrre prototipi, ora è sempre più utilizzata per applicazioni di uso finale industriale.

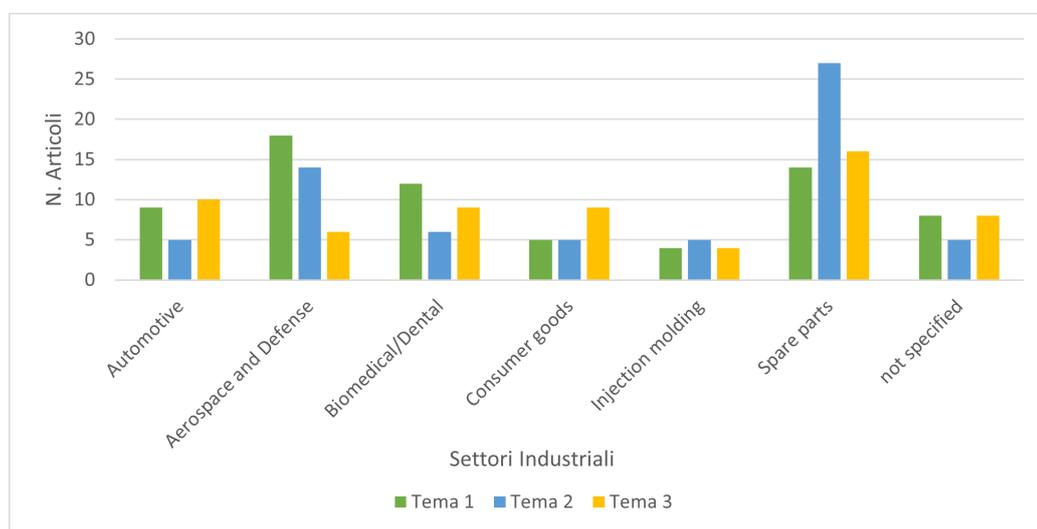


Figura 3.15: Analisi dei settori industriali

In generale, i settori maggiormente trattati sono l'aerospaziale, il quale comprende anche il settore dell'aviazione, e l'automotive, nonché il settore biomedico, probabilmente per i motivi e i vantaggi già menzionati al paragrafo 1.2.6.

Questi sono generalmente indagati nell'ambito della produzione diretta di prodotti finiti. Tuttavia, una percentuale tra il 20 e il 40% della letteratura si occupa della produzione e della gestione dei pezzi di ricambio (*spare parts*), soprattutto per quanto riguarda la gestione dell'inventario.

Pertanto, si evince che quando si passa alla trattazione di tematiche più logistiche e meno strutturali riguardo l'applicazione della produzione additiva, si tende ad analizzare un contesto di manutenzione piuttosto che di pura manifattura.

Un basso numero articoli si occupa del settore dello stampaggio ad iniezione e questo si collega al fatto che poca letteratura indaga sulla produzione indiretta ma preferisce concentrarsi su pezzi finiti e pezzi di ricambio.

La figura sottostante mostra l'andamento negli anni dei settori industriali indagati in questo studio, misurando il numero di articoli che indagano su uno specifico settore industriale per ogni anno dal 2010 al 2022.

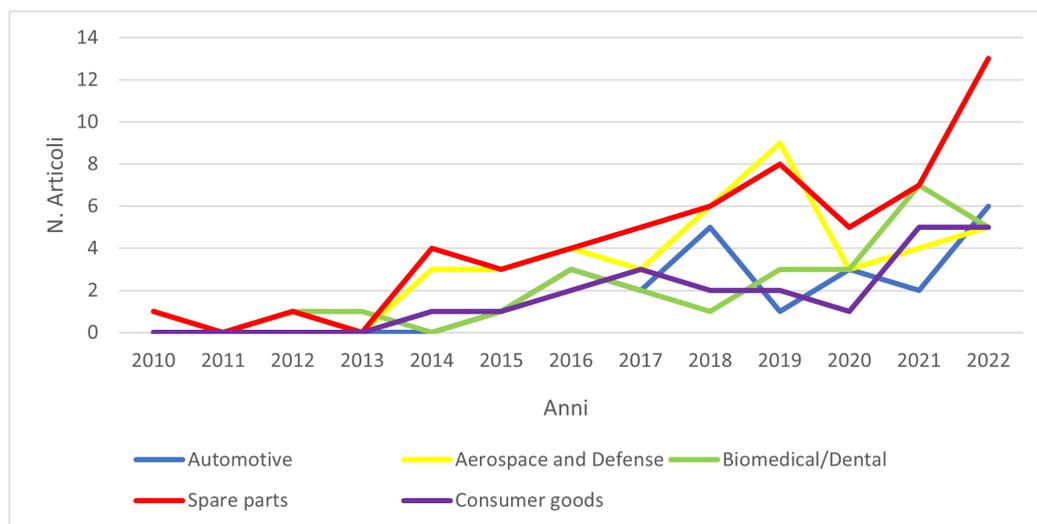


Figura 3.16: Settori industriali negli anni

Questa tendenza a studiare la gestione dei pezzi di ricambio è piuttosto crescente negli anni con un rilevante aumento degli articoli dal 2020 in poi, come si evince dalla figura 3.16. Ciò può essere dovuto al fatto che la gestione dell'inventario dei pezzi di ricambio all'interno della supply chain è un processo considerato da molti costoso e critico. Nello specifico, la principale criticità è data dall'incertezza su quando e in che quantità un particolare pezzo possa essere richiesto, il quale deriva dall'imprevedibilità del verificarsi dei guasti. Per questo motivo le aziende tendono a tenere un livello di inventario di pezzi di ricambio molto elevato, con conseguenti elevati costi di mantenimento dell'inventario e costi per il rischio di obsolescenza delle parti che non possono essere utilizzati a causa dell'innovazione (Huang et al., 2013). Queste sfide hanno, perciò, aperto la strada nella letteratura scientifica all'indagine sulla distribuzione dei pezzi di ricambio e sulla gestione del loro inventario (Chekurov et al., 2018) e su come l'introduzione della produzione additiva all'interno del network logistico possa essere una soluzione per la sfida chiave di mantenere un'elevata disponibilità dei pezzi di ricambio a basso costo (Khajavi et al., 2014).

Un numero minore di articoli sembra indaga il settore dei beni di consumo. Tuttavia, l'andamento negli anni del settore dei beni di consumo, mostrato in figura 3.16, potrebbe riflettere l'ultima tendenza nascente della stampa 3D domestica direttamente a cura del consumatore finale di oggetti quali giocattoli (Mckinnon, 2016), articoli di abbigliamento e piccola gioielleria (Halassi et al., 2018). Ciò causerebbe delle grandi trasformazioni a livello logistico, soprattutto per quanto riguarda il trasporto e lo stoccaggio delle merci. Pertanto, il grafico in figura 3.16 dimostra anche come, in futuro, il settore dei beni di consumo potrebbe rivelarsi un'area di ricerca invitante.

3.6 Analisi dei contenuti del tema 1: Struttura del Network

I 50 articoli selezionati per questo tema di ricerca indagano sulla composizione della supply chain una volta che si integra la produzione additiva con quella tradizionale. Si parla di integrazione, e non di sostituzione, della produzione tradizionale con quella additiva poiché molti autori sostengono che, in un periodo di tempo piuttosto lungo, la stampa 3D non sostituirà completamente il tradizionale processo di produzione (Thiesse et al., 2015).

Il desiderio di abbracciare la produzione additiva nasce dalla necessità di superare le attuali sfide logistiche e di business che hanno portato le aziende a volere supply chain sempre più flessibili e reattive, purché efficienti. Inoltre, nell'ultimo decennio, fattori come la globalizzazione, la concorrenza, il ridotto time-to-market e l'elevata produttività hanno reso l'impatto della logistica sulla supply chain più grande che in passato. Di conseguenza, i ricercatori hanno iniziato a studiare come migliorare le attività logistiche e agire sulla configurazione della supply chain si è rivelato un modo efficace per farlo. Pertanto, la letteratura spesso si indaga sulla configurazione strutturale che dovrebbe avere la supply chain abilitata dalla produzione additiva; quindi, pone la propria attenzione sulle scelte di localizzazione della produzione additiva all'interno della supply chain per trovare la migliore configurazione SC-AM capace di affrontare tutte queste attuali sfide.

Come già detto, l'introduzione dell'Additive Manufacturing nella produzione tradizionale può abilitare quattro possibili strutture di SC, di cui una centralizzata tradizionale più tre nuove configurazioni: decentralizzata (o distribuita), intermedia (o ad hub) e domestica (o estrema), le quali potrebbero sconvolgere l'attuale network logistico. Esse sono ampiamente descritte al paragrafo 1.3.

Analizzando la letteratura appartenente a questo filone di ricerca, si nota che il 48% di essa confronta da un punto di vista quantitativo due o più di queste strutture SC-AM, mentre la restante parte ne analizza una singola, sempre a

livello quantitativo, con il fine di studiarne la progettualità e le performance a livello di supply chain.

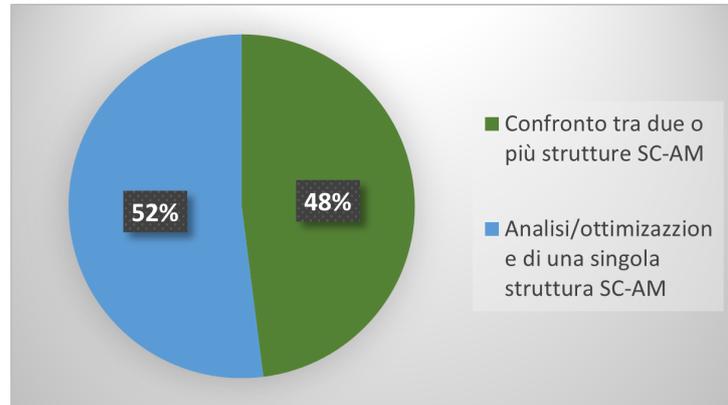


Figura 3.17: Principali argomenti del tema 1

3.6.1 Confronto tra strutture SC-AM

La figura sottostante mostra quali sono le combinazioni di strutture SC-AM più confrontate dagli autori degli articoli analizzati.

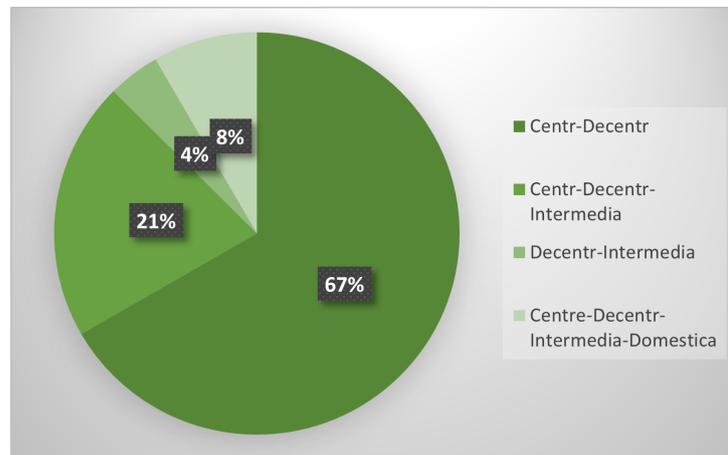


Figura 3.18: Strutture SC-AM confrontate in letteratura

Come si evince dal grafico in figura 3.18, circa il 96% della letteratura confronta una struttura centralizzata con una struttura decentralizzata.

Il 67% confronta esclusivamente queste due tipologie di struttura SC-AM, poi il 21% degli articoli aggiunge al confronto la struttura intermedia e l'8% aggiunge sia la configurazione intermedia che quella domestica.

Pertanto, quasi la totalità della letteratura appartenente a questo tema di ricerca si occupa del dilemma tra centralizzare o decentralizzare la produzione additiva dal punto di vista delle performance della supply chain. Ad esempio, alcuni autori hanno confrontato queste due configurazioni di supply chain con l'obiettivo di studiare l'adozione della produzione additiva e descrivere i potenziali benefici (Holmstrom et al., 2010).

Il motivo può essere riscontrato nel fatto che tra la struttura centralizzata e quella decentralizzata vi è tradizionalmente un trade-off tra efficienza e reattività che la letteratura cerca di risolvere ed equilibrare per ottimizzare la supply chain.

Una soluzione potrebbe risiedere in una struttura intermedia tra le due che combini i benefici della centralizzata e quelli della decentralizzata. Per questo motivo circa il 30% della letteratura si occupa del confronto con una struttura intermedia, spesso ponendola come configurazione migliore (ad esempio, Cantini et al., 2022).

Infine, solo l'8% della letteratura pone a confronto tutte e quattro le strutture, comprendendo anche quella domestica. Questo perché la struttura domestica è, in generale, ancora poco indagata dagli autori per via della sua estrema portata. Tuttavia, sempre per i suoi effetti radicali, può essere considerata una linea promettente di ricerca.

3.6.2 Aspettativa accademica sulla migliore configurazione SC-AM

Sia il 52% della letteratura che indaga su una singola tipologia di struttura SC-AM che gran parte degli articoli che studiano il confronto tra due o più strutture pone, come risultato finale della ricerca, l'indicazione di una sola configurazione, definendola come migliore in termini di performance della supply chain. Pertanto, analizzando gli articoli, si può determinare quale sia l'aspettativa scientifica sulla migliore configurazione SC-AM e il suo andamento negli anni. I risultati sono mostrati dai grafici in figura 3.19 e 3.20.

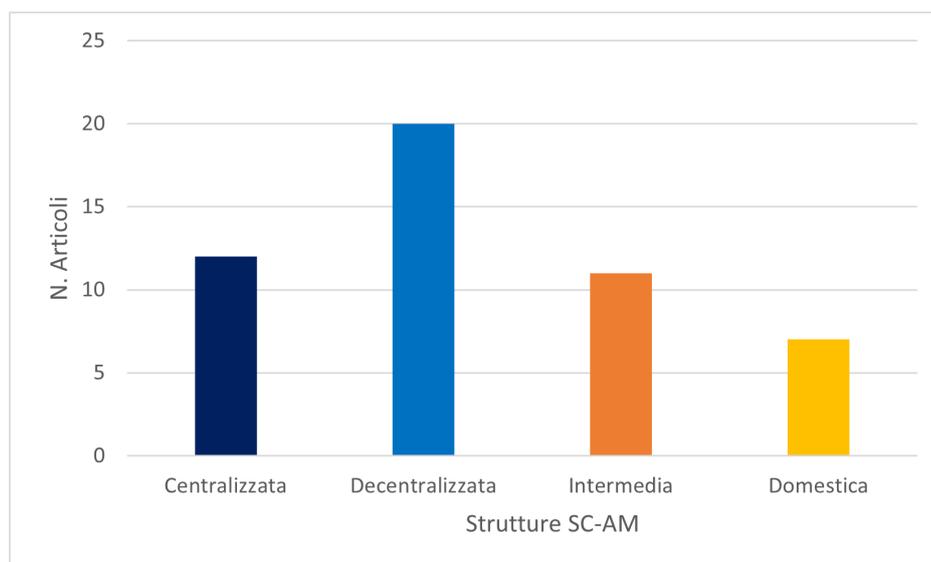


Figura 3.19: Aspettativa accademica sulla struttura SC-AM

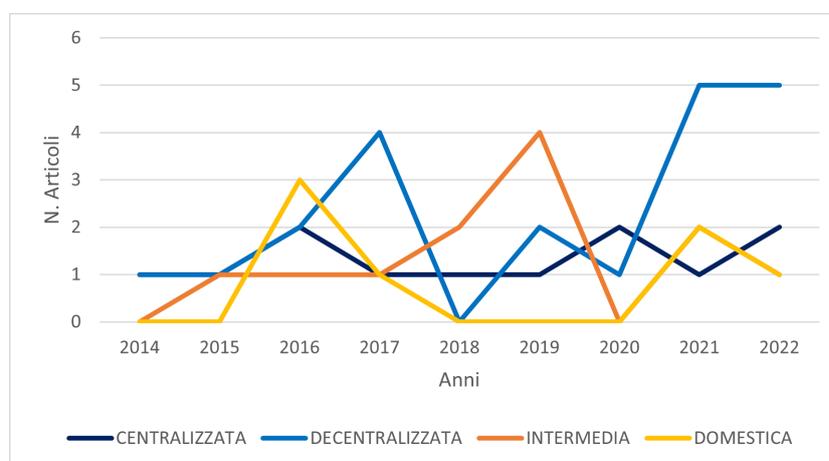


Figura 3.20: Aspettativa accademica sulla struttura SC-AM negli anni

Gran parte della letteratura, circa il 40%, si aspetta una configurazione SC-AM decentralizzata poiché considerata come quella dalle migliori prestazioni logistiche, soprattutto rispetto alla SC-AM centralizzata (Rinaldi et al., 2022). Questa aspettativa è una tendenza che è generalmente cresciuta negli anni, come mostrato dalla figura 3.20.

Per un certo periodo di tempo dal 2018 al 2020, l'attenzione si è spostata su configurazioni intermedie, probabilmente poiché alcuni limiti alla diffusione della tecnologia di produzione additiva ostacolavano, secondo gli autori, una piena decentralizzazione. Tuttavia, eventi "disruptions", come il Covid-19, hanno accelerato i tempi e le necessità del mondo logistico, riportando alla ribalta la decentralizzazione della supply chain oltre che porre l'attenzione su configurazioni sempre più estreme come la produzione domestica.

Nella seguente figura vengono mostrati quali sono i settori industriali più studiati in relazione alla struttura SC-AM.

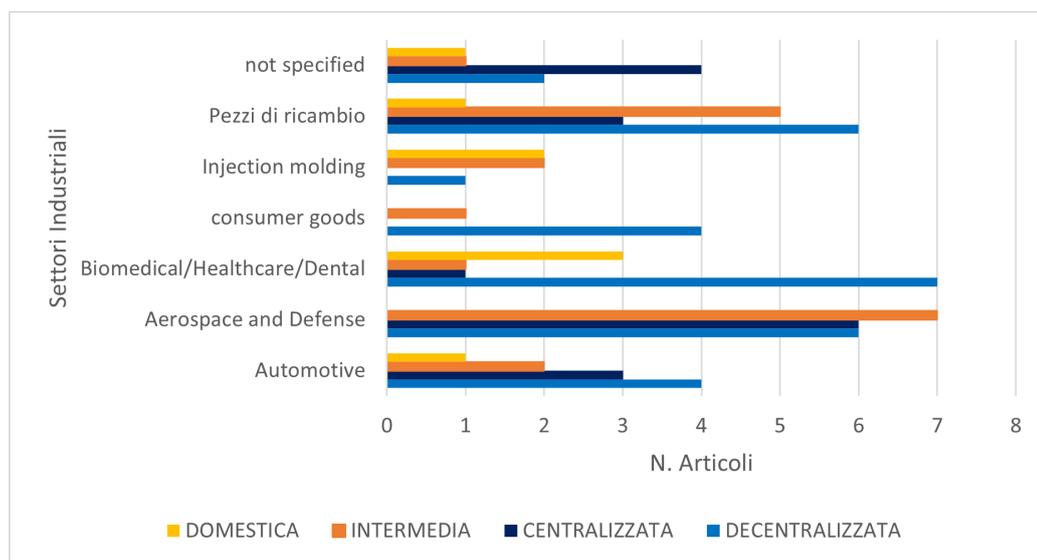


Figura 3.21: Strutture SC-AM e settori industriali

Dal grafico in figura 3.21 è possibile notare che, ad esempio, una struttura SC-AM decentralizzata o intermedia è spesso abbinata al settore aerospaziale/aviazione e dei pezzi di ricambio. Ad esempio, alcuni autori hanno studiato le prestazioni di una catena di fornitura di ricambi per aeromobili convenzionale rispetto a un sistema basato sulla tecnologia additiva con struttura centralizzata e decentralizzata (Liu et al., 2014). Una piena struttura decentralizzata viene soprattutto studiata nel settore biomedico. Infatti, la sua reattività è due volte superiore per le parti mediche (Verboeket et al., 2021) e durante l'emergenza Covid-19, il suo emergere ha spesso giocato un ruolo importante nel compensare la mancanza dei dispositivi di protezione individuali in molti territori (Lagorio et al., 2021).

3.6.3 Struttura SC-AM decentralizzata vs. centralizzata vs. intermedia

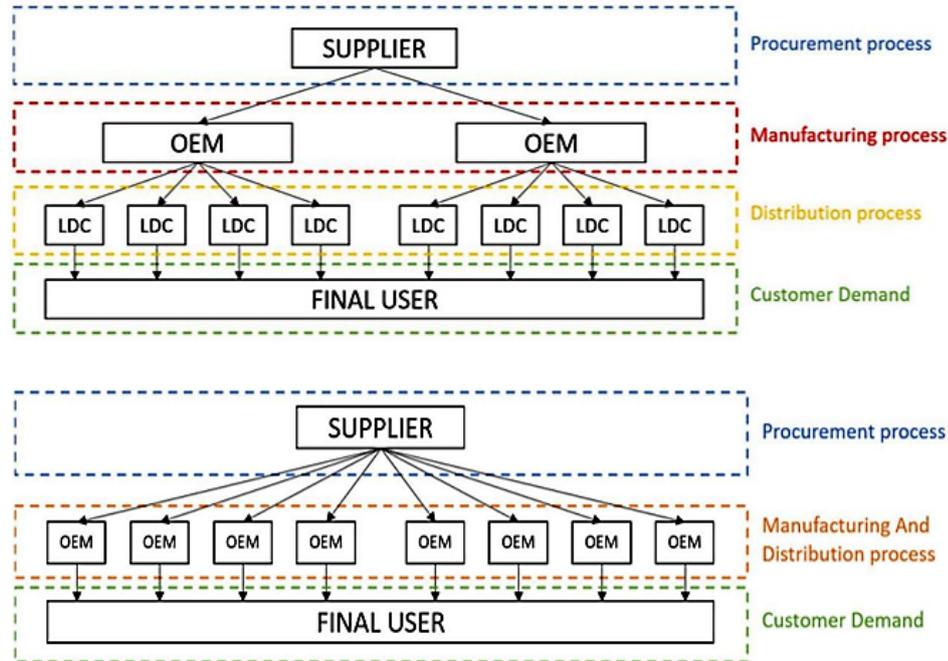


Figura 3.22: Confronto tra struttura SC-AM centralizzata e decentralizzata (Rinaldi et al., 2022)

La preferenza per una struttura SC-AM decentralizzata, rispetto a quella tradizionale centralizzata, sta nel fatto che, come è possibile vedere in figura 3.22 per una SC a quattro livelli, ogni OEM si occupa sia della fase di produzione che di quella di distribuzione, permettendo di progettare una supply chain più corta per ridurre la complessità dell'intera rete. La fase di distribuzione fisica, effettuata nella configurazione centralizzata dai centri di distribuzione locali (LDC), viene nella decentralizzata sostanzialmente scalcata e affiancata a quella di produzione (Rinaldi et al., 2022). In questo modo, si ottiene una supply chain più flessibile, adatta a livelli di servizio elevati e meno influenzata dalla variabilità della domanda, dai costi di trasporto e di mantenimento dell'inventario.

Essa genera una risposta migliore e più accurata in termini di lead time di consegna (Nuñez Rodriguez et al., 2022).

La figura sottostante mostra come, durante l'analisi delle metodologie di ricerca, emergono approcci prettamente matematici e quantitativi.

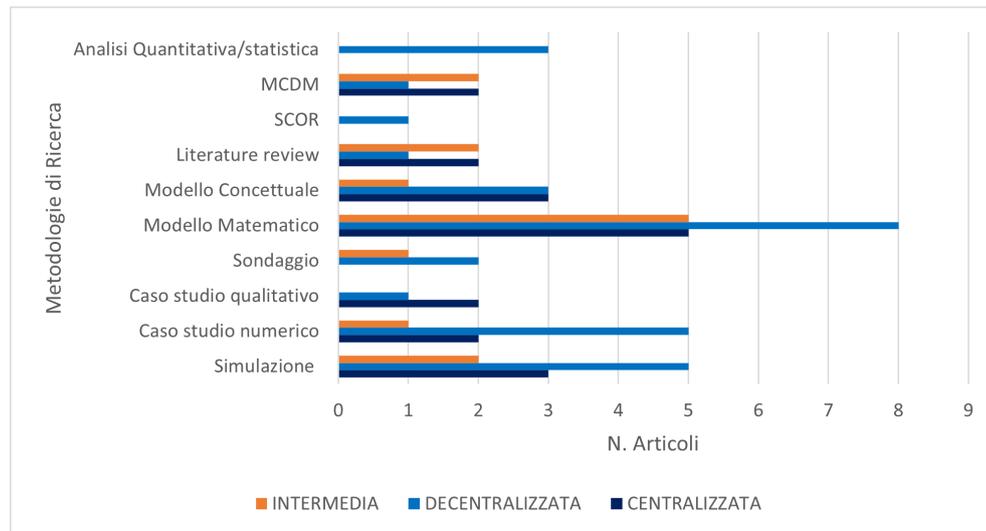


Figura 3.23: Strutture SC-AM e metodologie di ricerca

Ad esempio, è stato effettuato uno studio computazionale per analizzare l'impatto dell'Additive Manufacturing sulla struttura della supply chain proponendo tre diverse reti, confrontate calcolando i costi di trasporto e di impianto (Barz et al., 2016) oppure è stato proposto un modello di ottimizzazione per la progettazione e la gestione di una SC-AM unendo decisioni di investimento a lungo termine (ad esempio, selezione dell'ubicazione delle strutture) e decisioni operative a breve termine (ad esempio, decisioni sulla capacità di trasporto e stoccaggio) con l'obiettivo di determinare una struttura adeguata della rete (Chowdhury et al., 2019).

Sulla base di ciò, si ritiene necessario effettuare un'analisi dei KPI calcolati all'interno di questi studi quantitativi.

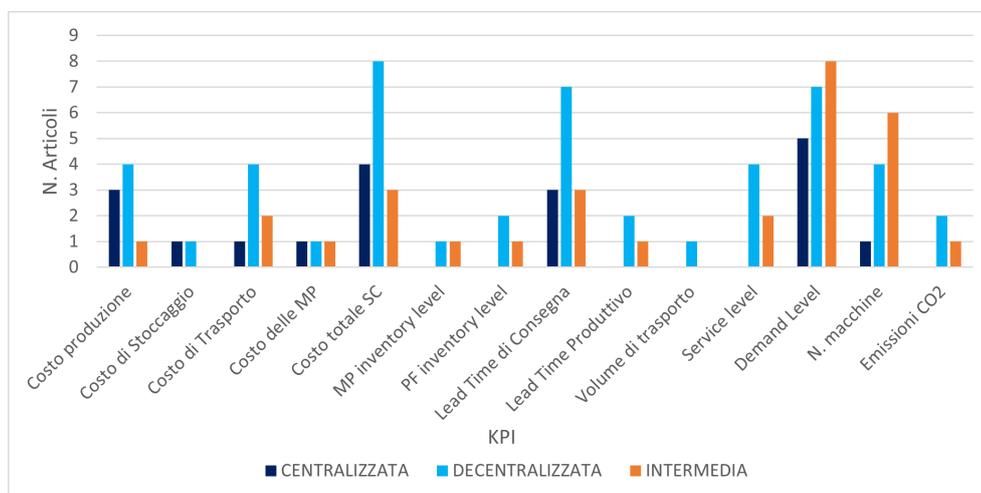


Figura 3.24: Strutture SC-AM e KPI

In base al tasso di distribuzione delle macchine produttive additive, una SC-AM decentralizzata può produrre risparmi potenziali dal 12% al 60% dei tempi di consegna, dal 70% all'80% dei tempi di inattività, dal 3% al 5% di energia primaria, dal 4% al 7% di emissioni di gas serra e dal 15% al 35% di costi (Strong et al., 2019; Li et al., 2017).

Per questo motivo, nuovi modelli di business tramite licenze e sussidi o i moderni metodi di finanziamento delle start-up possono agevolare l'adozione della produzione additiva "as a service" verso gli attori a valle della filiera e rendere la supply chain estremamente competitiva (Arbabian, 2022; Zhang et al., 2022), visto che uno dei limiti alla sua adozione sta nel costo dell'investimento nel distribuire le macchine produttive.

Dall'altra parte, il 24% della letteratura, pur riconoscendone i benefici, sostiene che l'attuale aspettativa accademica di SC-AM decentralizzata non si riflette sufficientemente nella pratica attuale del settore per via dei limiti e dei colli di bottiglia presenti all'attuale stato di avanzamento della tecnologia, limiti che spingono le aziende manifatturiere ancora verso una struttura centralizzata (Friedrich et al., 2022).

La produzione additiva sta, in una certa misura, seguendo il modello di diffusione della curva a S (Thomas, 2016). Perciò la configurazione centralizzata

rimarrà probabilmente la più conveniente grazie alle sue economie di scala fino a quando la crescente adozione della produzione additiva da parte delle aziende non porti a ridurre il costo delle materie e la necessità per la post-elaborazione, oltre che ad ottenere volumi di produzione elevati e livelli alti di domanda (Roca et al., 2019).

Rimanendo sull'analisi dei KPI, il 20% della letteratura sostiene che l'entità della domanda e la capacità produttiva sono i fattori più critici che influiscono direttamente sulla configurazione di rete preferita, e quindi sulla scelta di un'opzione da adottare (McDermott et al., 2021; Scott and Harrison, 2015). In generale, quando la domanda media è bassa, i vantaggi nell'adottare una configurazione decentralizzata sono molto limitati (Rinaldi et al., 2022).

Un modello matematico dimostra che, raddoppiando la domanda, aumenta di oltre il 59% il numero degli impianti di produzione additiva, rendendo la rete più distribuita, mentre il numero si riduce fino al 33% se si dimezza il livello di domanda, rendendo la rete meno distribuita (Emelogu et al., 2019). Di fronte a richieste più frequenti e una capacità di produzione relativamente scarsa, si verificherebbe una pesante congestione nella catena di approvvigionamento decentralizzata. In tali casi è consigliabile adottare la configurazione centralizzata. Ma accanto a un aumento del numero di stampanti, si consiglia una configurazione distribuita (Li et al., 2019).

Una soluzione al divario tra due strutture può essere fornita da una configurazione intermedia, la cosiddetta struttura ad hub. Infatti, il 22% della letteratura pone l'accento su questo particolare tipo di struttura. Ad esempio, è stata esplorata, tramite dei casi studio reali negli Stati Uniti, la promessa di maggiore efficienza della struttura intermedia sulla SC dei pezzi di ricambio rispetto alle altre due tipologie di configurazioni (Khajavi et al., 2018). La struttura intermedia proposta dagli autori, visibile in figura 3.25, riesce ad ottenere la stessa, se non migliore, efficienza economica della configurazione centralizzata a livello di costi logistici con quasi le stesse performance di SC a livello di reattività, diminuzione della lunghezza e sostenibilità ottenibili con una configurazione totalmente decentralizzata.

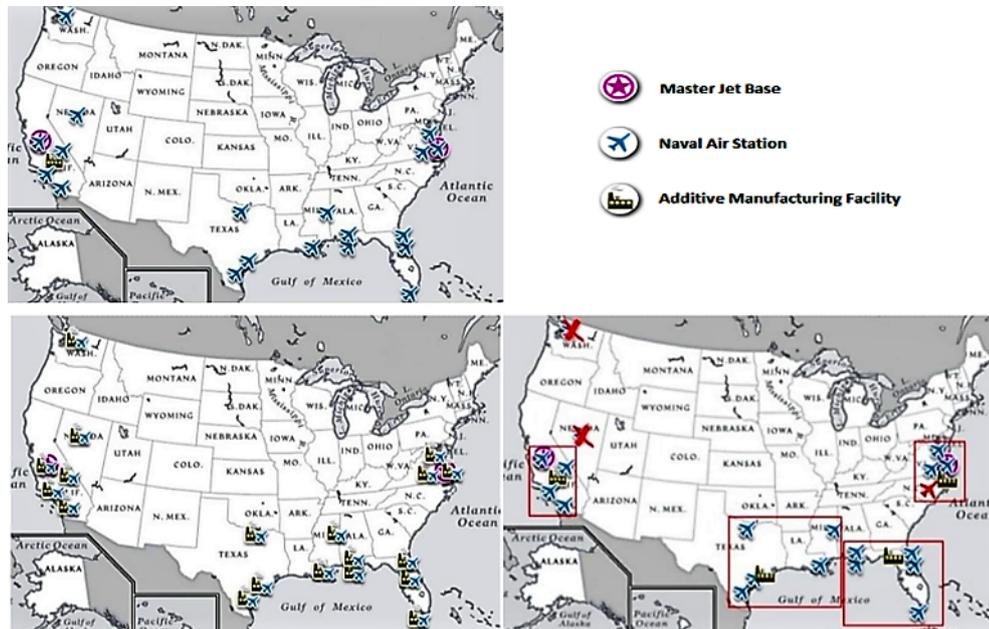


Figura 3.25: Confronto tra SC-AM centralizzata, decentralizzata e intermedia (Khajavi et al., 2014; Khajavi et al., 2018)

Un altro confronto tra strutture mostra come una configurazione intermedia potrebbe affrontare il problema dei requisiti di competenza per la pre e post-elaborazione e ricercare sia i vantaggi della localizzazione che della centralizzazione (Holmström and Gutowski 2017).

Si propone anche un'euristica per minimizzare i costi di una configurazione ad hub dimostrando come la maggior parte degli indici di sostenibilità, sia produttivi che logistici, migliorano quando si utilizzano gli hub di produzione additiva (Son et al., 2021).

Altri autori studiano la configurazione centralizzata, distribuita e ad hub degli impianti di produzione additiva tramite una simulazione ad eventi discreti i cui risultati dimostrano che, con lo stesso numero di risorse, la configurazione hub può ottenere una risposta più rapida alla domanda a un costo inferiore rispetto alle altre configurazioni (Kunovjanek et al., 2021).

3.6.4 Struttura SC-AM domestica

Infine, circa il 14% della letteratura appartenente al primo tema di ricerca ha un'aspettativa futura per quanto riguarda la struttura domestica, che essendo una configurazione estrema è ancora poco indagata, oltre che prevalentemente con una metodologia qualitativa (ad esempio, Beltrami and Orzes, 2021; Sun e Zhao, 2017).

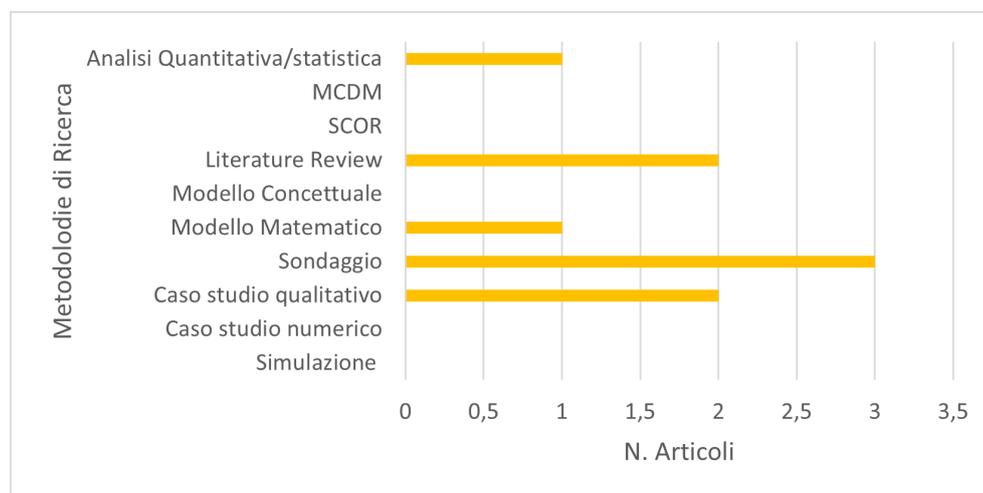


Figura 3.26: Struttura SC-AM domestica e metodologie di ricerca

Nelle prime fasi, la tecnologia è stata adottata prevalentemente dagli hobbisti. Alcuni autori sostengono che un aumento dell'interesse per la produzione domestica è avvenuta all'inizio della pandemia e non escludono che presto ci possa essere una nuova ondata di "cultura fai-da-te" di piccoli oggetti (Dartnell and Kish, 2021).

L'adozione di stampanti 3D di consumo è un fenomeno globale e sta vivendo una crescita elevata. Tuttavia, l'attuale tasso di adozione è veramente basso e le stampanti 3D di consumo sono tutt'altro che pronte per l'ampio mercato dei consumatori, ovvero non è ancora una tecnologia "push of the button" per via delle difficoltà tecniche. Ma se gli sviluppi e i modelli di adozione della tecnologia continueranno seguendo la curva ad S, le industrie manifatturiere tradizionali potrebbero essere minacciate in termini di riduzione della

domanda dei loro prodotti, così come i canali di distribuzione e il settore dei trasporti. Ad esempio, i canali di distribuzione potrebbero subire dei cambiamenti dovuti alla chiusura di sempre più negozi al dettaglio. Alcuni articoli potranno essere prodotti in casa e quindi non essere più richiesti dai negozi, riducendo così la necessità di posti di lavoro al dettaglio e riducendo i ricavi al dettaglio. Ciò colpisce anche il trasporto di tali articoli dai produttori tradizionali ai negozi al dettaglio (Steenhuis and Pretorius, 2016). Per tutti questi motivi, la struttura SC-AM domestica rappresenta un'area di ricerca da indagare maggiormente in futuro.

3.7 Risultati dell'analisi dei contenuti del tema 1

In conclusione, nella figura sottostante sono sintetizzati i risultati dell'analisi della letteratura appartenente al primo tema di ricerca, riguardante le implicazioni dell'implementazione dell'Additive Manufacturing sulla struttura della supply chain. In questo tema, gli autori pongono l'attenzione sulla scelta di localizzazione dell'Additive Manufacturing all'interno della supply chain per renderla più reattiva, sostenibile ed efficiente. Pertanto, in base alla localizzazione della produzione additiva, si possono abilitare quattro diverse strutture di supply chain, di cui una centralizzata tradizionale più tre nuove configurazioni: decentralizzata (o distribuita), intermedia (o ad hub) e domestica (o estrema).

Argomenti tema 1	Confronto tra strutture SC-AM	Analisi di una singola configurazione SC-AM
N. Articoli	24	26
Trend topics	Confronto tra SC-AM centralizzata, decentralizzata e intermedia: trade-off tra efficienza ed efficacia logistica	SC-AM decentralizzata come migliore configurazione in termini di KPI
Research gaps	Confronto con struttura SC-AM domestica per la produzione dei beni di consumo	SC-AM intermedia (ad hub) e domestica
Metodologie di ricerca	Prevalenza di studi quantitativi: modelli matematici, simulazioni, casi studio numerici	
Settori industriali	Prevalenza dei settori biomedico, pezzi di ricambio, aerospaziale.	
KPI quantitativi	Livello di domanda; Capacità produttiva	Costi totali SC; Tempo di consegna; Emissioni di CO ₂

Figura 3.27: Sintesi dei risultati per il tema 1

Quasi la totalità della letteratura appartenente a questo tema di ricerca si occupa del dilemma tra centralizzare o decentralizzare la produzione additiva dal punto di vista delle performance della supply chain ovvero analizza il trade-off tra l'efficienza data da una configurazione centralizzata e l'efficacia a livello di performance della supply chain data da una configurazione decentralizzata o distribuita, oppure se ricorrere ad una soluzione intermedia che includa i benefici di entrambe.

Vi è una tendenza della letteratura a sostenere che con la diffusione dell'Additive Manufacturing, in futuro la supply chain abbandonerà completamente la struttura tradizionale centralizzata e diventerà sempre più locale e distri-

buita, con un sostanziale spostamento della produzione a valle della supply chain, spesso unita alla fase di distribuzione.

I produttori capiranno che non sarà più fattibile o efficiente spedire prodotti in tutto il mondo perché l'Additive Manufacturing renderà possibile la produzione ovunque e allo stesso costo (Durão et al., 2017). Pertanto, localizzare la produzione nei centri di distribuzione diventa una soluzione realizzabile con l'Additive Manufacturing e porta a notevoli vantaggi di costi e tempi logistici oltre che ad una maggiore sostenibilità della supply chain. Per questo motivo la struttura SC-AM decentralizzata è quella maggiormente indagata dagli autori sia quando è posta a confronto con altre strutture, sia quando viene analizzata di per sé, tramite metodologie quantitative e, soprattutto, nel settore biomedico e dei pezzi di ricambio aerospaziali.

La configurazione intermedia è meno indagata perché eventi distruttivi, come il Covid-19, hanno portato gli autori ad essere meno moderati e sempre più estremisti nei loro studi sulla struttura della supply chain abilitata dalla produzione additiva. Pertanto, secondo gli autori un passo successivo potrebbe implicare che, in futuro, il consumatore rileverà le attività produttive del produttore, portando la supply chain ad assumere una configurazione estrema e domestica.

Tuttavia, gli attuali limiti alla piena diffusione dell'Additive Manufacturing, i quali ci si aspetta siano superati in futuro, pongono questo scenario di struttura SC-AM ancora lontano. Per questo motivo, la struttura domestica, e di conseguenza il settore dei beni di consumo, sono ancora poco indagati dagli autori e rappresentano una nuova area di ricerca.

3.8 Analisi dei contenuti del tema 2: Gestione dell'inventario

È stato affermato che l'adozione dell'additive manufacturing ha influenzato i processi interni di una catena di approvvigionamento come la gestione dell'inventario (Oettmeier and Hofmann, 2016).

L'analisi dei contenuti dei 43 articoli selezionati per questo tema di ricerca ha permesso di classificarli ulteriormente in cinque argomenti principali.

La figura sottostante mostra la distribuzione degli articoli appartenenti a questo tema di ricerca all'interno di questi argomenti al fine di individuare quali sono i più e i meno trattati.

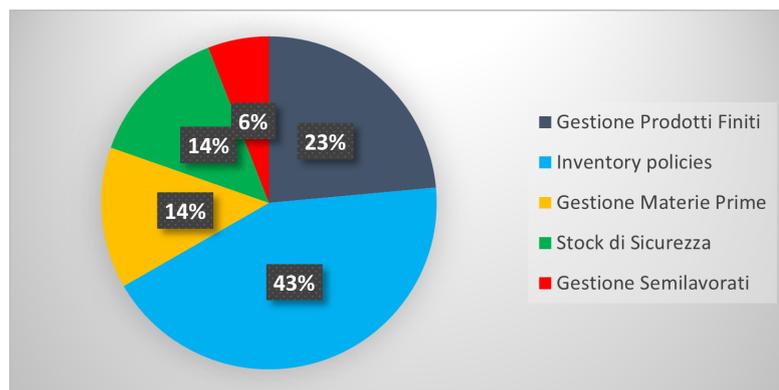


Figura 3.28: Argomenti principali del tema 2

3.8.1 Politiche di gestione dell'inventario

Gran parte della letteratura appartenente al secondo tema di ricerca, il 43%, si propone di indagare sulle politiche di gestione dell'inventario. Alcuni autori sostengono, infatti, che con la produzione additiva l'attenzione si sposta da lotti con singole parti e a kit personalizzati e ciò mette in discussione la necessità di una nuova gestione dell'inventario (Holmström et al., 2016).

La digitalizzazione dell'inventario tramite l'Additive Manufacturing aumenta ulteriormente la capacità di controllare i flussi di materiale, portando a una maggiore reattività ed efficienza della supply chain attraverso l'eliminazione

degli sprechi che ridurrà il movimento complessivo dei materiali e la tenuta delle scorte (Huang et al., 2013).

Analizzando le metodologie di ricerca usati dagli autori degli articoli appartenenti a questo filone, si scopre come essi affrontino questo argomento da un punto di vista prettamente quantitativo.

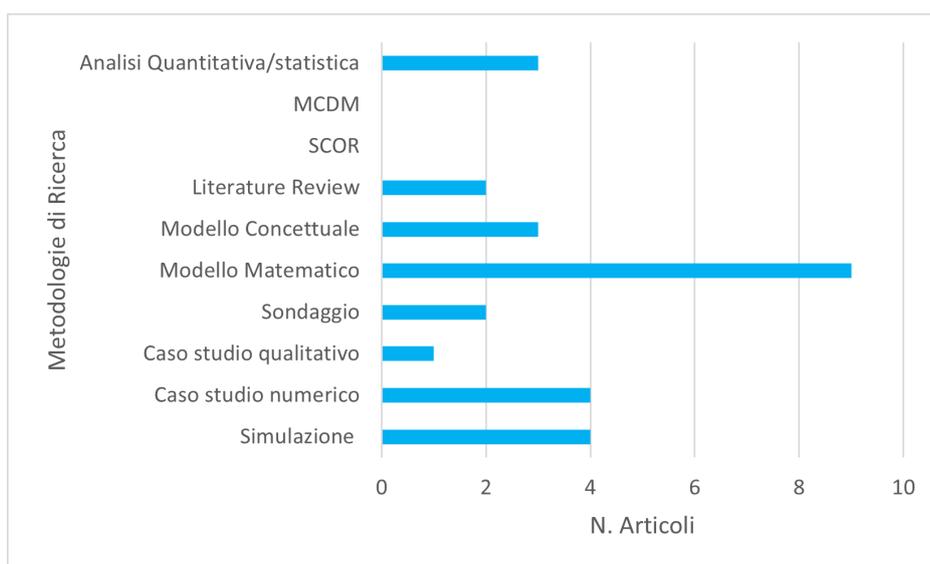


Figura 3.29: Politiche d’inventario e metodologie di ricerca

Dal grafico in figura 3.29 emerge, infatti, che circa il 32% degli autori sviluppa un modello matematico quando si occupa delle politiche di gestione dell’inventario. La restante parte, in genere, utilizza simulazioni, casi studio numerici e analisi quantitative o statistiche. Solo pochi autori affrontano il problema da un punto di vista concettuale. Ad esempio, viene sviluppato un modello matematico meta-euristico per indagare sulla politica di inventario ottima che soddisfi reattivamente la domanda, confermando il modello tramite una simulazione ad eventi discreti (Ekren et al., 2022).

Analizzando i settori industriali, risulta che il 53% della letteratura si occupa della gestione delle parti di ricambio, ed in particolare per il settore dell’aviazione. Sono, infatti, tanti gli autori che indagano su politiche di controllo e gestione dell’inventario dei pezzi di ricambio.

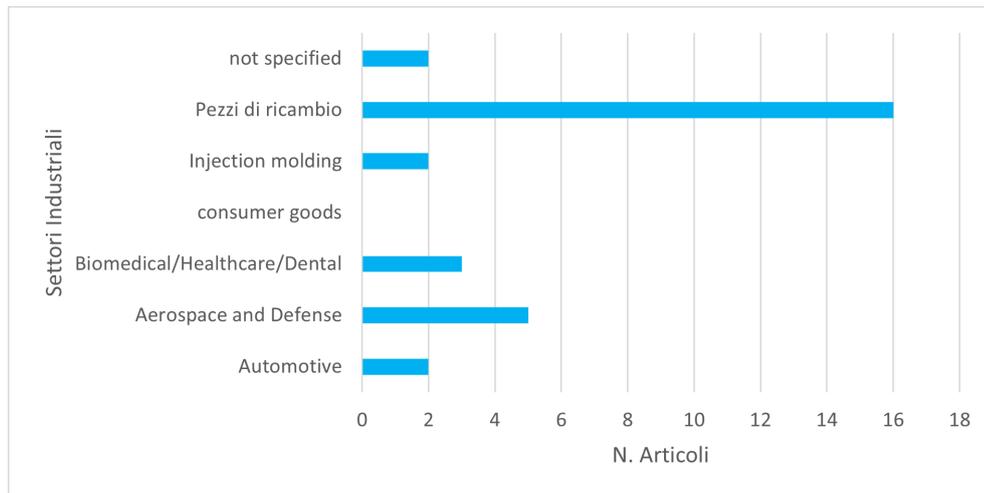


Figura 3.30: Politiche d’inventario e settori industriali

L’esercito degli Stati Uniti ha riferito di aver speso in totale 194 miliardi di dollari per le operazioni logistiche che riguardano la supply chain dei pezzi di ricambio. Questo perché i pezzi di ricambio, che aumentano i costi di inventario, possono essere utilizzati raramente e possono diventare obsoleti a causa dell’innovazione (Huang et al., 2013). L’esercito aeronautico statunitense stima il costo dell’obsolescenza dei pezzi di ricambio in 750 milioni di dollari l’anno (Khajavi et al., 2014).

Alcuni autori sostengono che la produzione additiva è vista come una strategia interessante per l’eliminazione del requisito del “minimo ordine minimo (MOQ)” e la costruzione di un inventario virtuale di disegni 3D delle parti. Tale inventario aiuterebbe a realizzare l’obiettivo di raggiungere la fornitura just-in-time (JIT) dei pezzi di ricambio oltre che il miglioramento del livello di inventario periodico ottimale (Bhattacharyya et al., 2022).

Tramite un modello di simulazione dell’inventario delle parti di ricambio, è indagata la politica “One-for-one replenishment” come la più appropriata in uno scenario di produzione additiva distribuita (Heinen e Hoberg, 2019).

Molti autori (ad esempio, Sgarbossa et al., 2021; Knofius et al., 2021; Tuzkaya and Şahin, 2021; Togwe et al., 2019) sostengono, tramite dei modelli matematici, che l’introduzione di fino al 35% di parti additive nell’inventario

delle parti di ricambio può migliorare il lead time di rifornimento del sistema fino al 33%, suggerendo quindi che l'Additive Manufacturing può essere utilizzato per mitigare le sfide relative alla gestione delle parti di ricambio. Ma la situazione è ancora più vantaggiosa quando l'Additive Manufacturing è usato in una situazione combinata con i metodi tradizionali. Il dual sourcing sembra superare di gran lunga il single sourcing tramite Additive Manufacturing, fornendo risparmi sui costi superiori al 48% anche se il lead time di rifornimento con l'Additive Manufacturing è più di venti volte inferiore al lead time di rifornimento tecniche di produzione tradizionali.

Pertanto, l'Additive Manufacturing sembra funzionare tipicamente come fonte di emergenza e, nella maggior parte dei casi, più dell'80% dello stock di base deve essere esaurito prima di ordinare la prima volta dalla fonte di produzione additiva. Per questo motivo, la stampante 3D viene utilizzata per soddisfare le scorte esaurite piuttosto che per ricostituire l'inventario, con una probabilità di non esaurimento scorte del 99,9% pur riducendo drasticamente lo spazio di stoccaggio richiesto (Westerweel et al., 2021).

L'analisi dei KPI derivanti dagli studi quantitativi mostra come gli autori siano più attenti ai costi di stoccaggio o di mantenimento dell'inventario, al tempo di rifornimento e al livello delle scorte dei prodotti finiti. In generale si pongono come obiettivo la riduzione di questi studiando e analizzando delle politiche ottime e indagando sull'influenza del livello di domanda sulla scelta di gestione dell'inventario.

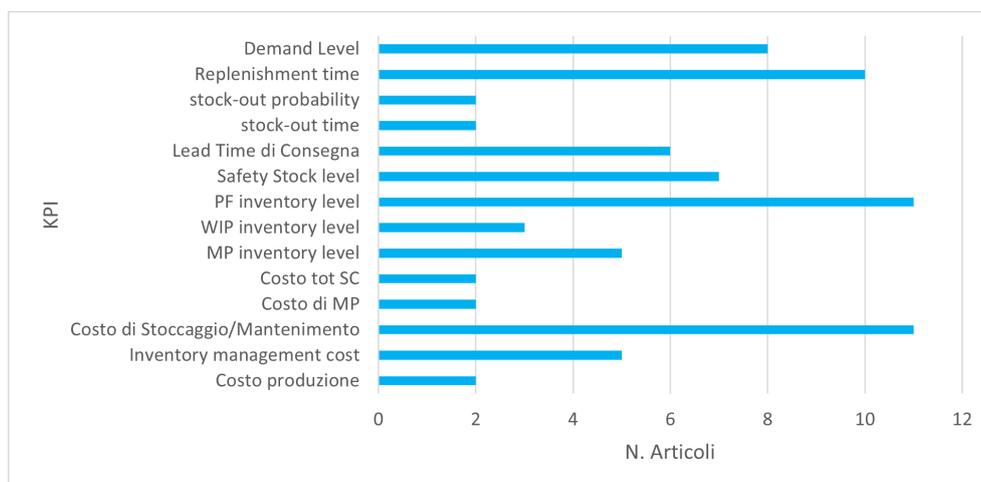


Figura 3.31: Politiche d'inventario e KPI

3.8.2 Gestione di materie prime, semilavorati, prodotti finiti

Un'altra gran parte della letteratura appartenente al secondo tema, circa il 43%, indaga sulla gestione dei materiali e dei loro magazzini. In particolare, il 23% della letteratura si occupa dello stock di prodotti finiti, il 14% delle materie prime e solo il 6% dei semilavorati.

Nella maggior parte dei casi, gli autori confrontano le modalità di gestione delle scorte dei diversi tipi di prodotto in quanto la tendenza a localizzare la produzione, ovvero quando la stampa 3D viene utilizzata in negozio e la domanda in negozio viene soddisfatta in modo build-to-order, porta ad operare con alte scorte di sicurezza in negozio per la materia prima eliminando lo spreco di inventario dei prodotti finiti. Ciò richiederà un nuovo rapporto fornitore-rivenditore in cui il rivenditore si occupa della gestione dei prodotti finiti e il fornitore (in genere l'OEM) controlla l'inventario delle materie prime (Chen et al., 2021).

Sostanzialmente i produttori, emergendo come centri di servizio di stampa 3D regionali, concentreranno la produzione a basso volume scambiando l'inventario dei prodotti finiti con l'inventario delle materie prime conformi alla

produzione additiva (Sasson and Johnson, 2016). Inoltre, nel ripensare alle tre categorie di inventario (materie prime, semilavorati e prodotti finiti), poiché la procedura di produzione della stampa 3D non comporta attività intermedie, una volta iniziata, gli oggetti stampati sono componenti integrati o prodotti finali. Pertanto, la categoria di semilavorati si riduce notevolmente. Tuttavia, i prodotti finiti sono la categoria che viene maggiormente eliminata. Per questo motivo la gestione dei prodotti finiti è quella maggiormente indagata dagli autori.

Le industrie archiverebbero solo file digitali e materie prime per la stampa (Mavri, 2015) e, in un futuro non tanto prossimo, si potrebbe pensare alla completa assenza di scorte, inventari e magazzini poiché sarebbe solamente necessario un computer o una chiavetta di memoria di grandi dimensioni in cui salvare un gran numero di file digitali. Quindi l'Additive Manufacturing avrebbe anche il potenziale per ridurre direttamente le scorte di materie prime di circa il 4% e la maggior parte di questa riduzione avverrà nei prossimi due decenni (Kunovjanek and Reiner, 2020).

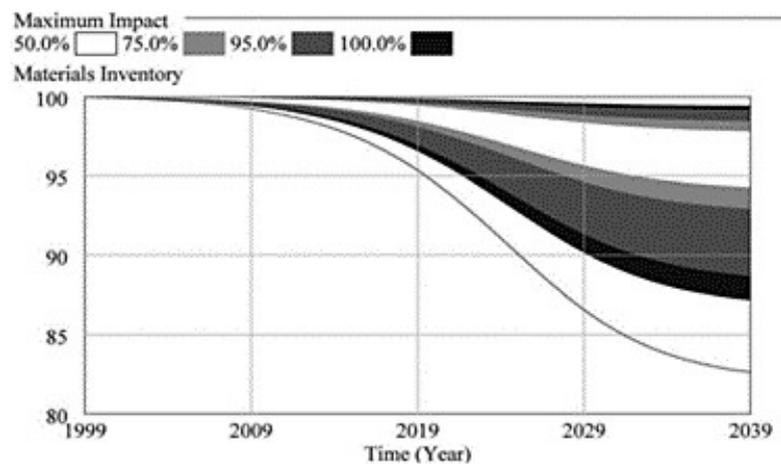


Figura 3.32: Impatto dell'Additive Manufacturing sull'inventario delle materie prime (Knofius et al., 2021)

Analizzando le metodologie di ricerca, si nota la rilevanza di approcci qualitativi quali sondaggi, revisioni della letteratura e modelli concettuali, mentre approcci matematici sono in numero minore, soprattutto per quanto riguarda i prodotti finiti. Pertanto, la letteratura in futuro potrebbe cercare di dimostrare le attuali teorie sulla gestione dei materiali tramite approcci più quantitativi.

Per i semilavorati, invece, nonostante vi siano più studi matematici e statistici che qualitativi, nel complesso vi sono pochi articoli che trattano sulla gestione di questo tipo di materiali.

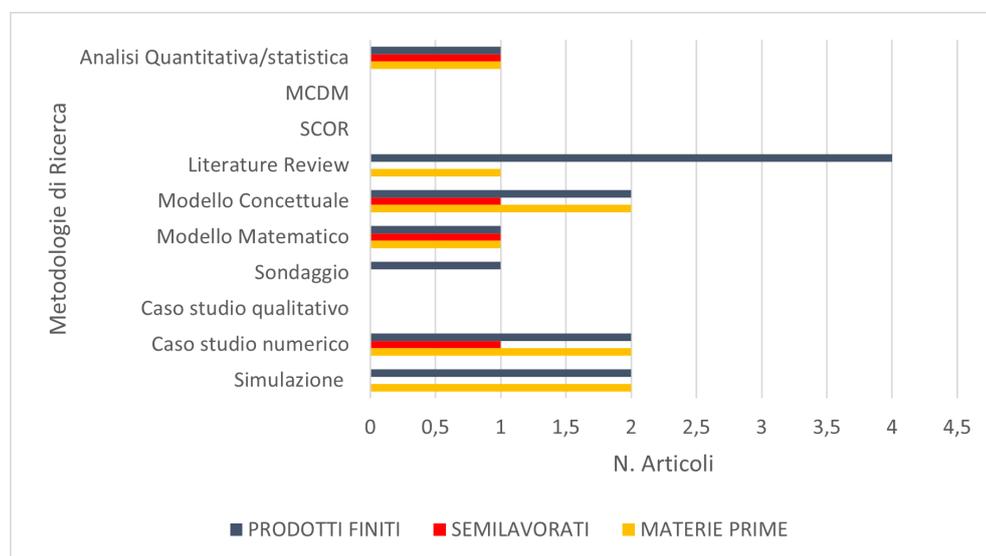


Figura 3.33: Gestione dei materiali e metodologie di ricerca

Inoltre, mentre nel caso della produzione tradizionale gli elementi che influenzano significativamente la riduzione del livello delle scorte sono la distribuzione della domanda e il livello di servizio desiderato, nel caso della produzione additiva viene dimostrato, tramite una simulazione, che la variazione dei volumi della domanda e un livello di servizio variabile non hanno un impatto significativo sul livello di inventario (Ghadge et al., 2018).

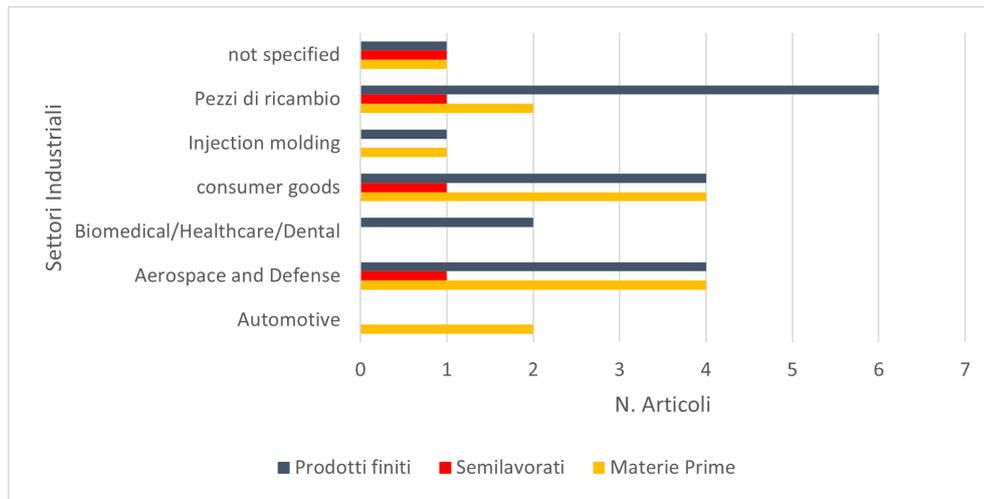


Figura 3.34: Gestione dei materiali e settori industriali

Infine, il grafico in figura 3.34, oltre a confermare la tendenza a trattare i settori dell'aviazione e dei pezzi di ricambio, mostra anche l'attenzione ai beni di consumo per quanto riguarda la gestione delle materie prime e dei prodotti finiti poiché l'aspettativa di sostituzione dei magazzini di prodotti finiti con magazzini di materie prime si prospetta ancora più forte per questo settore industriale.

3.8.3 Stock di sicurezza

Solamente il 14% della letteratura che si occupa della gestione dell'inventario, indaga sullo stock di sicurezza. Per stock di sicurezza si intende un magazzino "buffer" che si colloca all'interno della supply chain per fronteggiare l'imprevedibilità della domanda e l'eventuale assenza di attività produttiva per un qualsiasi motivo. Tuttavia, più aumenta del livello delle scorte di sicurezza e più aumenta il costo di stoccaggio. Ad esempio, un aumento del 45% del livello delle scorte di sicurezza delle materie prime può aumentare il costo complessivo della rete di circa il 13% (Chowdhury et al., 2019).

Perciò, nel contesto dell'integrazione della produzione additiva per una SC-AM sempre più decentralizzata, questo particolare tipo di stock viene studiato dagli autori poiché si riscontra che l'Additive Manufacturing potreb-

be migliorare le prestazioni dell'inventario aziendale attraverso una minore dipendenza dalle scorte cuscinetto (Liu et al., 2014).

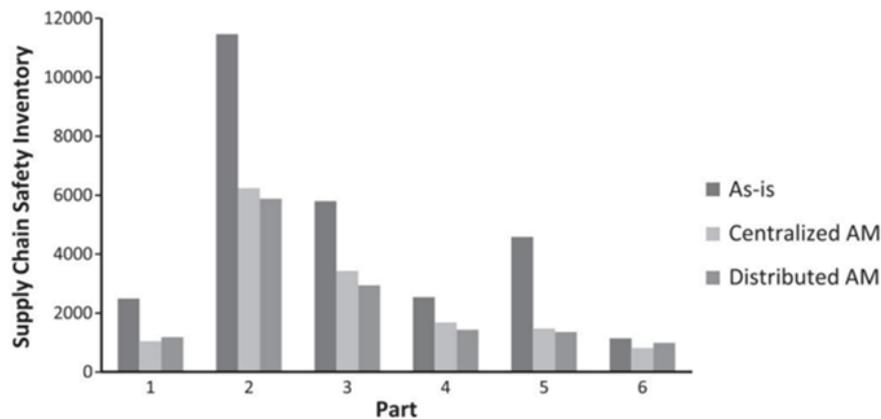


Figura 3.35: Stock di sicurezza in diversi scenari SC-AM (Liu et al., 2014)

I maggiori benefici si riscontrano nel settore dei pezzi di ricambio e dell'aviazione. L'Additive Manufacturing consente infatti la produzione di parti di ricambio su richiesta, consentendo così la configurazione di supply chain di parti di ricambio senza scorte di sicurezza, o almeno ridotte notevolmente (Holmström and Gutowski, 2017).

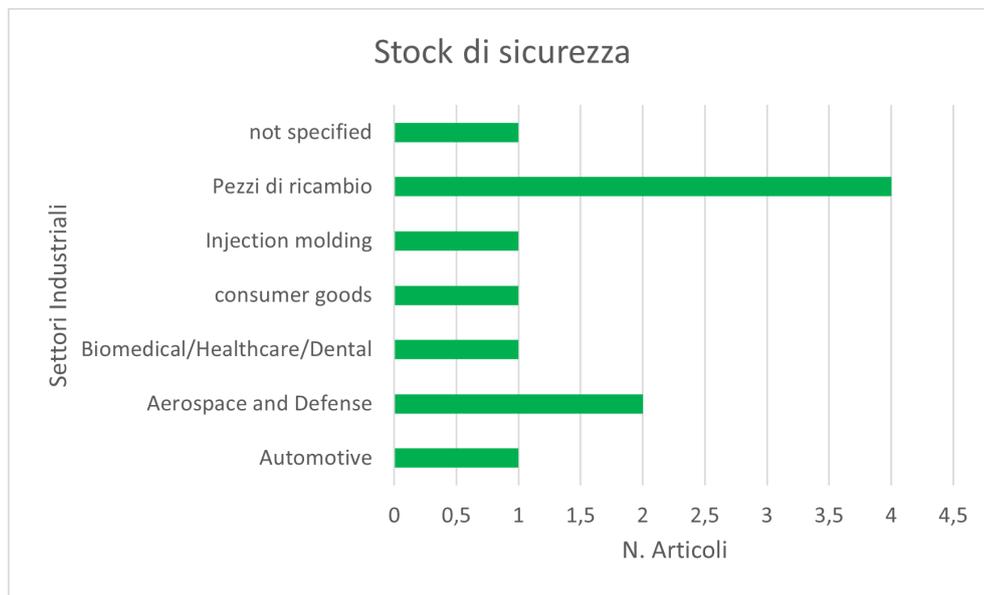


Figura 3.36: Stock di sicurezza e settori industriali

Per quanto riguarda le metodologie di ricerca, si preferisce un approccio tramite modelli concettuali accompagnati da esempi numerici piuttosto che metodologie prettamente quantitative.

Lo studio sembra essere ancora ad una fase piuttosto teorica ed iniziale.

3.9 Risultati dell'analisi dei contenuti del tema 2

In conclusione, nella figura sottostante sono sintetizzati i risultati dell'analisi della letteratura appartenente al secondo tema di ricerca, in merito alla gestione dell'inventario, dei materiali e dei loro magazzini (materie prime, semilavorati e prodotti finiti) nell'ambito dell'integrazione dell'Additive Manufacturing nella produzione tradizionale.

Argomenti tema 2	Politiche di gestione dell'inventario	Gestione di materie prime, semilavorati, prodotti finiti
N. Articoli	25	18
Trend topics	Eliminazione della quantità di ordine minimo; Politica d'inventario just-in-time; AM tipicamente come fonte di emergenza da stock-out.	Sostituzione dei magazzini di prodotti finiti con magazzini di materie prime; Eliminazione stock di prodotti finiti; In futuro, riduzione di esigenze di stock di materie prime.
Research gaps	Riduzione dello stock di sicurezza	Gestione dei semilavorati
Metodologie di ricerca	Prevalenza di studi quantitativi: modelli matematici	Quasi esclusivamente studi qualitativi: sondaggi, literature review, modelli concettuali
Settori industriali	Prevalenza dei settori pezzi di ricambio e aerospaziale	Prevalenza dei settori pezzi di ricambio, aerospaziale, beni di consumo
KPI quantitativi	Lead time di rifornimento; Costo di stoccaggio; Spazio di stoccaggio;	-

Figura 3.37: Sintesi dei risultati per il tema 2

La maggior parte della letteratura appartenente a questo tema di ricerca sviluppa un modello matematico per indagare sulle politiche di controllo e gestione dell'inventario dei pezzi di ricambio nel settore aerospaziale. Gli autori sostengono che l'Additive Manufacturing è vista come una strategia per l'eliminazione del requisito di ordine minimo e la costruzione di un inventario

virtuale che aiuterebbe a realizzare l'obiettivo di fornitura just-in-time. Inoltre l'Additive Manufacturing sembra funzionare tipicamente come fonte di emergenza per soddisfare le scorte esaurite e risolvere il rischio di stock-out, fornendo notevoli risparmi sui tempi di rifornimento, sui costi di stoccaggio e mantenimento dell'inventario.

Un'altra gran parte della letteratura si occupa della gestione dei prodotti finiti e delle materie prime sostenendo che la tendenza a localizzare la produzione a valle della supply chain porterebbe ad una sostanziale sostituzione di magazzini di prodotti finiti e semilavorati con magazzini di materie prime per la stampa 3D e file digitali. In questo modo, i prodotti finiti sono la categoria che viene maggiormente eliminata. Per questo motivo la gestione dei prodotti finiti è quella maggiormente indagata dagli autori. Inoltre, in un futuro non tanto prossimo, si potrebbe pensare alla completa assenza di scorte, inventari e magazzini poichè sarebbe necessaria solamente una memoria in cui salvare un gran numero di file digitali. Quindi l'Additive Manufacturing avrebbe anche il potenziale per ridurre direttamente anche le scorte di materie prime. Tuttavia, gli studi in merito sono prettamente qualitativi e questo rappresenta un gap di ricerca. Infine, pochi articoli trattano della gestione dei semilavorati e delle scorte di sicurezza, rendendo questi argomenti dei research gaps.

3.10 Analisi dei contenuti del tema 3: Trasporti e logistics service providers

L'analisi dei 39 articoli selezionati per questo tema di ricerca hanno permesso di individuare al suo interno quattro micro-filoni principalmente trattati dagli autori.

La figura sottostante mostra la distribuzione degli articoli appartenenti a questo tema di ricerca all'interno di questi argomenti principali al fine di individuare quali sono i più e i meno trattati.

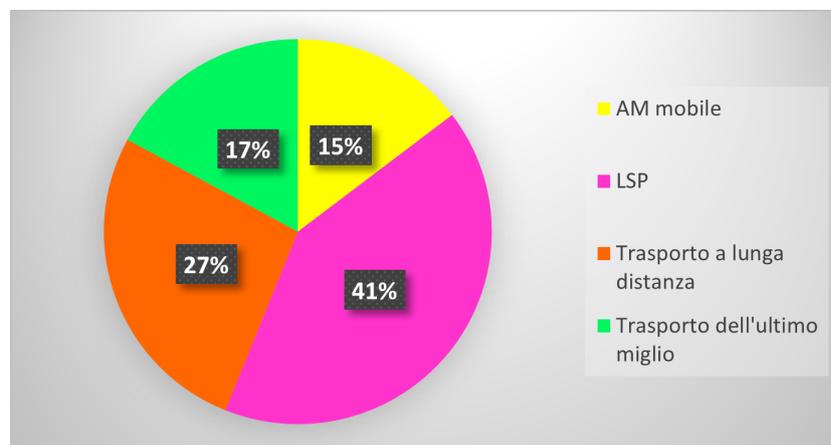


Figura 3.38: Argomenti principali del tema 3

3.10.1 Logistics service providers (LSP)

Il 41% della letteratura appartenente a questo tema di ricerca indaga sul ruolo degli LSP, ovvero dei fornitori di servizi logistici quali società di trasporto, cooperative di facchinaggio, distributori locali e così via. Il LSP è comunemente conosciuto anche come 3PL (Third Party Logistics), ma con la differenza che quest'ultimo in genere offre un insieme integrato di attività come ricezione, immagazzinamento, prelievo, imballaggio, trasporto e consegna finale [33].

La ricerca sembra focalizzarsi abbastanza su questo attore logistico poiché l'aspettativa futura di localizzare sempre di più la produzione additiva lungo

la supply chain, avrà un impatto sulla domanda dei servizi logistici tradizionali. Pertanto, l'Additive Manufacturing pone i fornitori di servizi logistici di fronte alla domanda su come dovrebbero adattare il loro modello di business alle minacce e alle opportunità che derivano da tale tecnologia, la quale influisce direttamente sui loro affari. Sostanzialmente, i file digitali viaggiano più facilmente dei prodotti fisici e, quindi, richiedono meno e diverse forme di gestione (Verboeket and Krikke, 2019).

L'aspettativa futura fa pensare che è molto probabile che la stampa 3D venga eseguita proprio dal fornitore di servizi logistici (Hecker, 2020) in un futuro prossimo, entro il 2027 (Durach et al, 2017). Questo perché, secondo gli autori, egli si trova nella posizione migliore per poter creare un'infrastruttura, dato che l'Additive Manufacturing è considerata una potenziale tecnologia infrastrutturale (Holmström and Partanen, 2014). Inoltre, le attuali sfide ed esigenze logistiche, spingerebbero gli LSP nel perseguire gli obiettivi di maggiore velocità di consegna, maggiore affidabilità, costi operativi inferiori e migliore efficienza (Tang and Veelenturf, 2019). Per questo motivo, essi hanno iniziato a migliorare i propri servizi, affidandosi a queste tecnologie ed importanti fornitori di servizi logistici quali, ad esempio, UPS e DHL, sono desiderosi di abbracciare la tecnologia additiva come tecnologia rivoluzionaria (Halassi et al., 2018).

È chiaro che il passaggio di ruolo da azienda di trasporto a "fab lab" o "3D service provider" causerebbe l'interruzione dei modelli di business odierni di molti fornitori di servizi logistici. Ma allo stesso tempo, emergerebbero nuovi modelli di business (Meier, 2020). Inoltre, alcuni autori sostengono l'importante ruolo che i fornitori di servizi possono svolgere nel superare le sfide e le barriere attuali alla diffusione su larga scala della tecnologia di produzione additiva (Rathore et al., 2022; Chaudhuri et al., 2019).

Nello specifico, uno studio fornisce un quadro di esempi reali di come gli LSP rispondono all'Additive Manufacturing identificando sei profili di diverse attività svolte da essi. Un profilo con atteggiamento reattivo e non proattivo, i Monitors, riguarda gli LSP che si preparano alle conseguenze dell'Additive

Manufacturing e attendono il momento giusto per entrare in questo nuovo mercato (Friedrich et al., 2022).

Due profili, Explorers e Co-Industrializers, indicano come gli LSP si avvicinano all'Additive Manufacturing come utenti per costruire l'accettazione interna e parallelizzare le loro tradizionali catene di fornitura di pezzi di ricambio. Inoltre, tre profili, ovvero Tradizionalisti, Complementari e Intermediari, dimostrano che gli LSP sono in procinto di istituire servizi di produzione additiva nella pratica. Questi intendono creare valore con servizi logistici specializzati in Additive Manufacturing basandosi sui loro servizi tradizionali o combinazioni di servizi. Inoltre, troviamo anche LSP che implementano servizi di Additive Manufacturing al di fuori della loro tradizionale zona di comfort.

In conclusione, la visione basata sulla letteratura degli LSP come produttori in Additive Manufacturing è meno pronunciata nella pratica e, attualmente, è fondamentale un forte cooperazione per il trasferimento delle conoscenze e la progettazione di nuovi servizi che vanno oltre quelli logistici tradizionali. Per questo motivo, secondo gli autori, non tutti gli LSP si posizionano rapidamente nel nascente mercato con un atteggiamento attivo, ma preferiscono attendere che i clienti richiedano loro i servizi di Additive Manufacturing (Friedrich et al., 2022).

Analizzando le metodologie con cui la letteratura si occupa del ruolo degli LSP, si nota come gli studi sono per la maggior parte sondaggi e interviste alle aziende di trasporto, di cui spesso dati vengono analizzati per fornire delle statistiche, oltre che modellazioni o casi studio puramente concettuali. Questo potrebbe rappresentare un limite a quanto sostenuto dagli autori.

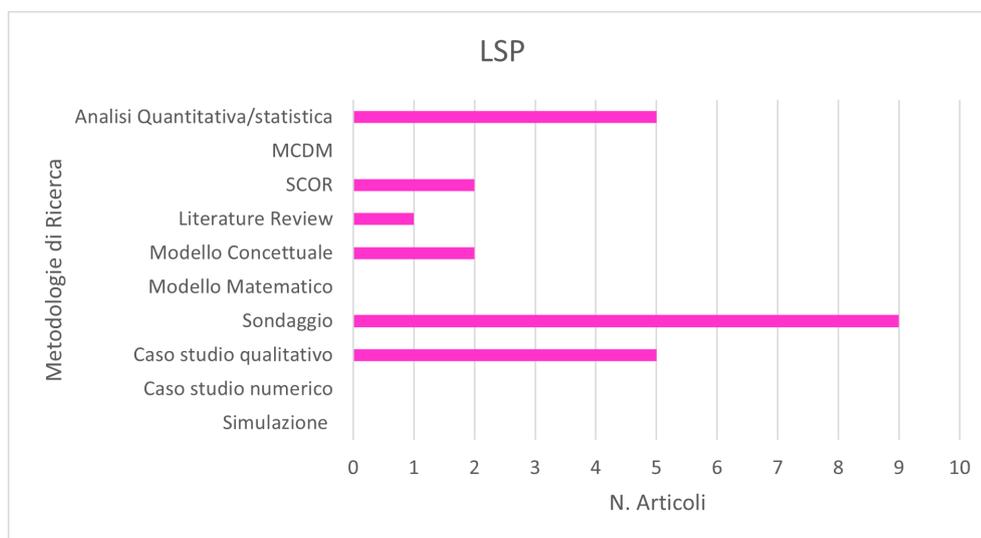


Figura 3.39: Logistics service providers e metodologie di ricerca

3.10.2 Trasporti a lunga distanza e dell'ultimo miglio

Una parte rilevante della letteratura appartenente a questo tema di ricerca, circa il 44%, indaga le tematiche sui trasporti e analizza il processo di consegna delle merci ponendo una suddivisione tra trasporto a lunga distanza (27%) e trasporto dell'ultimo miglio (17%). Il primo è il più indagato in quanto è quello che potrebbe maggiormente essere influenzato dall'introduzione della produzione additiva lungo la filiera e la sua conseguente localizzazione e accorciamento.

Andando ad analizzare le metodologie si rilevano sia studi qualitativi che quantitativi, anche se quest'ultimi in misura minore, soprattutto per quanto riguarda il trasporto dell'ultimo miglio, per il quale prevale la metodologia del sondaggio. Ad esempio, viene esplorato l'impatto della stampa 3D sui trasporti e sulle questioni relative ai trasporti proponendo e convalidando un modello concettuale (Boon and van Wee, 2018 oppure è proposto uno studio di simulazione per quantificare l'impatto della stampa 3D sul sistema di trasporto multimodale dei container (Chen, 2017).

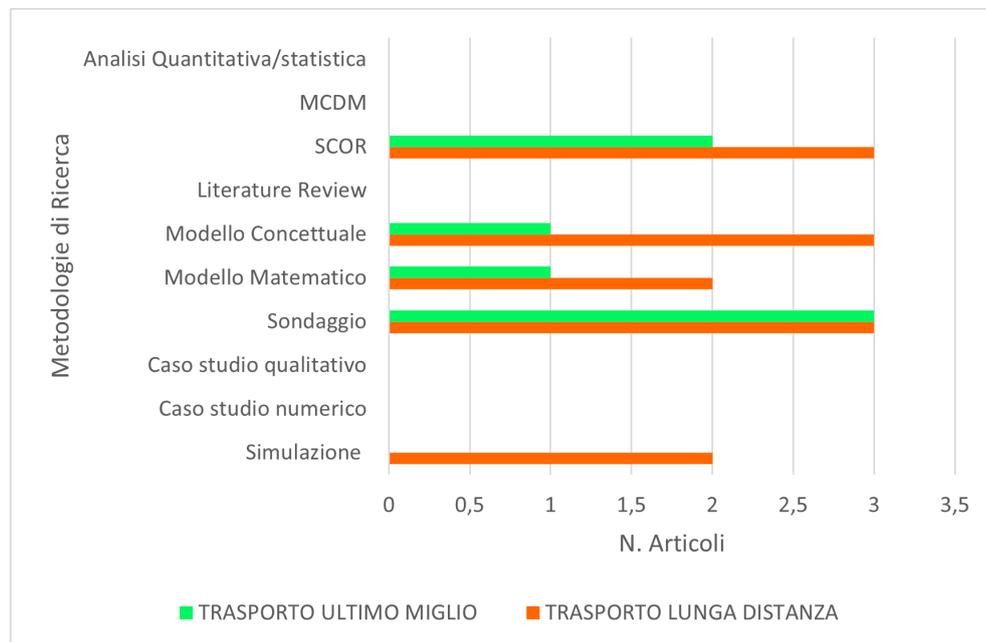


Figura 3.40: Trasporti e metodologie di ricerca

Inoltre, analizzando i KPI derivanti dagli studi quantitativi sui trasporti, gli autori dimostrano che negli scenari di adozione di Additive Manufacturing, la lunghezza della catena di approvvigionamento si accorcia con una conseguente riduzione dei costi logistici (Chen, 2016). Questo poiché vi saranno tre sostanziali cambiamenti nella direzione del flusso, velocità del flusso e volume del flusso delle merci (Chen, 2017).

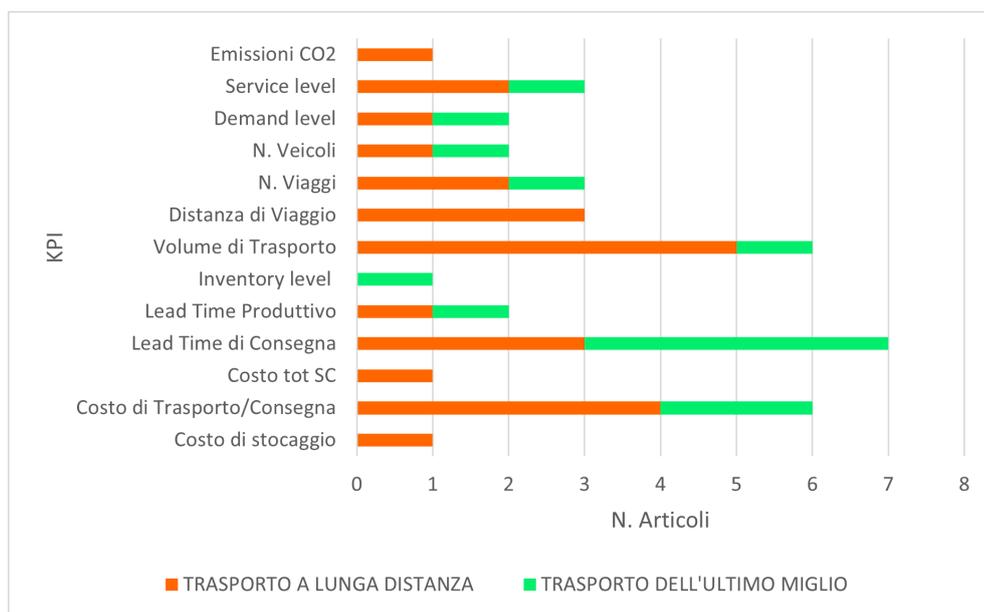


Figura 3.41: Trasporti e KPI

Le reti di distribuzione saranno organizzate in modo più efficiente con meno veicoli vuoti e meno viaggi aerei (Boon and van Wee, 2018).

Alcuni autori sostengono, tramite un modello matematico euristico, che vi potrebbe essere una riduzione del 26-39% del trasporto marittimo entro il 2040 oltre che un possibile spostamento del 29-45% nel volume delle spedizioni dai tipi di flotta di vettori automobilistici ai tipi di flotta di merci alla rinfusa (Teweldebrhan et al., 2022).

Quando i file digitali sostituiscono i prodotti tangibili, si registrano tempi e costi di consegna inferiori, oltre che minori emissioni per la rete di distribuzione (Chekurov et al., 2018). È probabile che i flussi di container cambino e che i piccoli camion vengano utilizzati più frequentemente e, con un'aspettativa di supply chain sempre più localizzata verso il consumatore finale, l'Additive Manufacturing potrà aiutare ad ottenere riduzioni dei costi, in quanto porterebbe a limitare la consegna dell'ultimo miglio al raro movimento di massa dei materiali necessari per il processo di stampa (Waller and Fawcett, 2014), riducendone i costi e ottenendo sempre più riduzioni dei trasporti a monte dei materiali di base e dei trasporti a valle dei prodotti finiti (Tatham et al.,

2015).

Tuttavia, vi sono autori che sostengono come la situazione sia ancora molto incerta quando si tratta di valutare a fondo il rapporto tra trasporto e distribuzione di prodotti e materiali (Pilz et al., 2020), concludendo come gli articoli che trattano l'impatto sul trasporto merci sono scarsi. Quando gli impatti vengono affrontati, vengono presentati come una conseguenza indiretta e non si affronta i problemi di trasporto in quanto tali (Dong et al., 2021).

La figura sottostante mostra l'andamento temporale degli argomenti principali del terzo tema di ricerca negli anni.

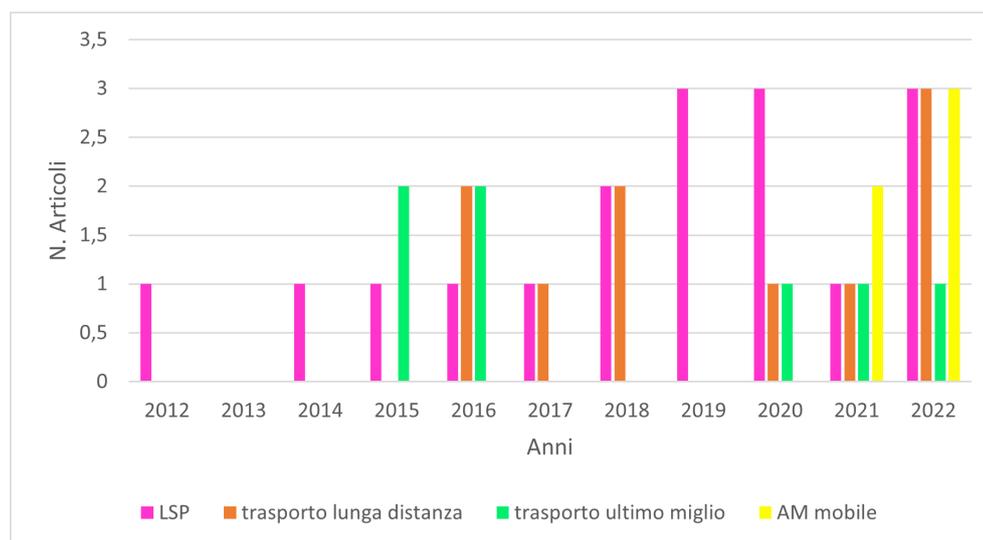


Figura 3.42: Argomenti del tema 3 negli anni

In primo luogo, dal grafico in figura 3.42 si nota che la letteratura in merito agli LSP ha un andamento generalmente crescente negli anni, quella in merito ai trasporti a lunga distanza presenta un andamento piuttosto altalenante, mentre gli articoli sui trasporti dell'ultimo miglio sembrano essere in calo per poi stabilizzarsi dal 2020 in poi. In secondo luogo, dal 2021 sembra emergere una nuova e promettente area di ricerca, la quale verrà discussa nel seguente paragrafo.

3.10.3 AM mobile

Durante l'analisi degli argomenti trattati all'interno del terzo tema di ricerca, è risultato un 15% di articoli, i quali si occupano di una nuova struttura, denominata PIT poiché integra produzione additiva, inventario e trasporto all'interno di uno stesso veicolo. Per questo motivo la struttura viene anche chiamata dagli autori come "AM mobile".

Questo micro-filone sembra essere un trend in crescita, anche se probabilmente la ricerca in merito è ad uno stato troppo acerbo per stabilirlo.

L'idea che le stampanti 3D possano essere mobili e situate nello stesso veicolo che consegnerà l'ordine direttamente a casa del cliente è stata inizialmente avanzata da *Amazon*, la quale ne ha registrato il brevetto nel 2015. Il deposito di questo brevetto è stato inizialmente accolto con un certo scetticismo, a causa della somiglianza del servizio con i servizi di stampa 3D online preesistenti. Tuttavia, l'azienda lo ha percepito come un modo innovativo per risparmiare tempo e denaro, con una riduzione dello spazio di magazzino, e dei costi di manodopera [34]. Pertanto, il tema dell'AM mobile ha iniziato a guadagnare maggiore attenzione in questo senso emergendo come una nuova potenziale area di ricerca.

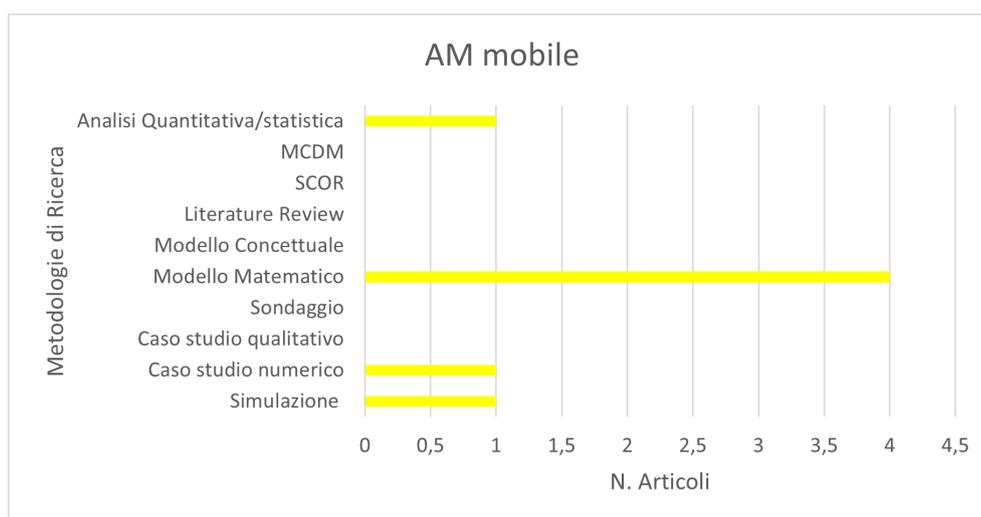


Figura 3.43: AM mobile e metodologie di ricerca

I primi passi della letteratura in merito allo studio dell'AM mobile vede utilizzare un approccio esclusivamente quantitativo. La maggior parte degli autori utilizza infatti dei modelli matematici per, ad esempio, ottimizzare il percorso di consegna (Cui et al., 2022) o per dimostrarne i benefici sulla supply chain (Kenger et al., 2021).

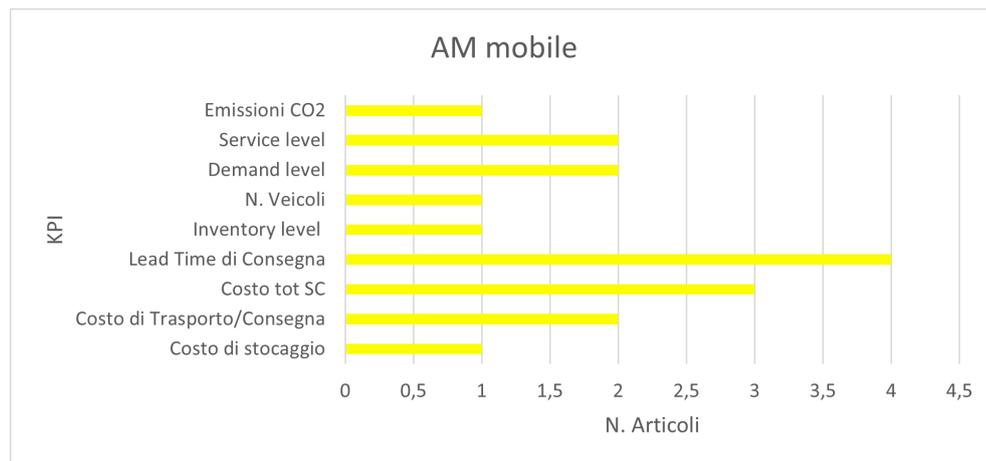


Figura 3.44: AM mobile e KPI

Analizzando, infatti, i KPI calcolati dagli autori, si nota come essi dimostrino che la struttura integrata produzione-inventario-trasporto è unica quando è richiesto un tempo di risposta più breve e si deve soddisfare una domanda urgente. Essa potrebbe comportare un risparmio medio sui costi e sui lead time di consegna dal 16% al 30% rispetto alla loro gestione separata (He et al., 2022; Cui et al., 2022). Inoltre, è possibile ottenere una potenziale riduzione del 26,43% delle emissioni di gas serra (Di and Yang, 2022).

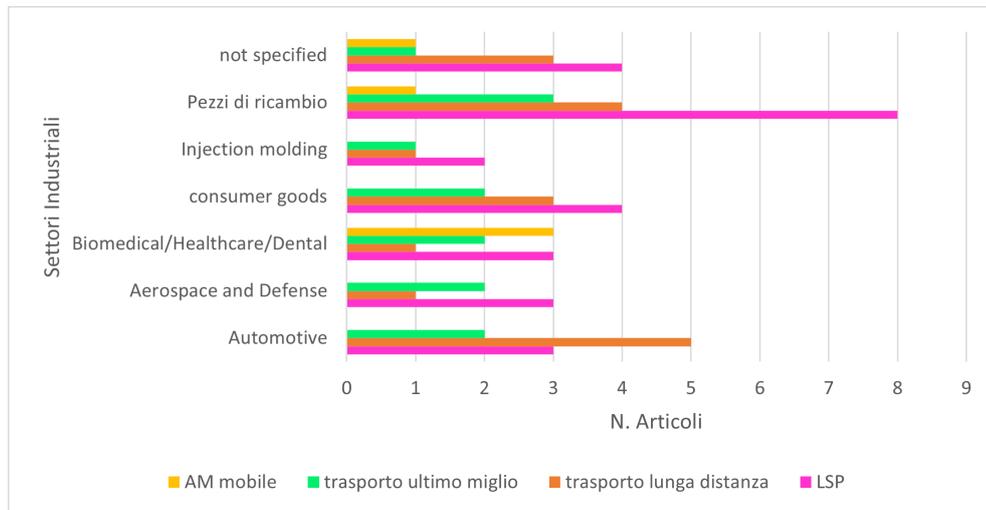


Figura 3.45: Argomenti principali del tema 3 e settori industriali

Infine, analizzando i settori industriali indagati per ogni micro-filone, emerge come gli articoli che si occupano del trasporto a lunga distanza si distaccano dalla tendenza dei pezzi di ricambio seguita dalla letteratura sui LSP poiché si focalizzano anche sul settore dell'automotive. Invece, le prime ricerche sull'AM mobile partono prevalentemente dal settore biomedico, studiandone la fattibilità e i benefici nel minimizzare il tempo totale di trasporto e il tempo di consegna dei prodotti biomedici personalizzati ai clienti (He et al., 2022).

3.11 Risultati dell'analisi dei contenuti del tema 3

In conclusione, nella figura sottostante sono sintetizzati i risultati dell'analisi della letteratura appartenente al terzo tema di ricerca, in merito al processo di trasporto e consegna di parti additive su richiesta e il ruolo dei fornitori di servizi logistici

Argomenti tema 3	Ruolo dei logistics service providers	Trasporti
N. Articoli	17	22
Trend topics	Adozione dell'Additive Manufacturing da parte delle aziende di trasporto, Passaggio di ruolo da azienda di trasporto a "fab lab" o "3D service provider".	Meno veicoli vuoti e meno viaggi aerei, passaggio da tipi di flotta di vettori automobilistici a tipi di flotta di merci alla rinfusa; Forte riduzione del trasporto a lunga distanza e media riduzione del trasporto dell'ultimo miglio.
Research gaps	Mancanza di studi quantitativi che dimostrino le teorie	Integrazione di produzione-transporto-inventario come metodo innovativo per risparmiare tempo e denaro, spazio di magazzino, e costi di manodopera
Metodologie di ricerca	Esclusivamente di studi qualitativi: sondaggi, interviste, modelli concettuali.	Prevalenza di studi qualitativi ma anche (sondaggi e modelli concettuali) e studi quantitativi (simulazioni)
Settori industriali	Prevalenza del settore dei pezzi di ricambio	Prevalenza del settore automotive
KPI quantitativi	-	Volume di trasporto; Lead time di consegna; Costo di trasporto.

Figura 3.46: Sintesi dei risultati per il tema 3

Una gran parte della letteratura indaga sul ruolo dei logistics service providers a seguito della diffusione della tecnologia dell'Additive Manufacturing, la quale li spingerebbe sempre di più a voler cambiare il loro modello di business. Infatti, gli autori sostengono che è molto probabile che la stampa 3D verrà eseguita proprio dal fornitore di servizi logistici entro il prossimo decennio, sia perchè è l'unico a possedere l'infrastruttura necessaria e sia come necessità dello stesso attore per superare le attuali e future sfide logistiche. Pertanto, il ruolo dei logistics service providers passerebbe da semplice azienda di trasporto a "fab lab" o "3D service provider", nonostante nella pratica questi attori logistici preferiscono ancora non posizionarsi rapidamente nel nascente mercato dell'Additive Manufacturing con un atteggiamento attivo, ma tendono ad assumere un atteggiamento reattivo. Tuttavia l'argomento è indagato esclusivamente tramite studi qualitativi. Questo potrebbe rappresentare un gap rispetto a quanto sostenuto dagli autori.

Un'altra gran parte della letteratura indaga le tematiche sui trasporti sia di lunga distanza che dell'ultimo miglio. Infatti, il settore dei trasporti è quello che potrebbe maggiormente essere influenzato dall'introduzione della produzione additiva lungo la filiera e la conseguente decentralizzazione della supply chain. In particolare, è il trasporto a lunga distanza ad essere quello maggiormente influenzato in quanto si prevedono riduzioni dei volumi, delle distanze di viaggio e delle dimensioni dei veicoli sempre più nella direzione del trasporto dell'ultimo miglio.

Inoltre, emerge una nuova area di ricerca data da una struttura, brevettata da *Amazon*, che integra produzione, inventario e trasporto su un unico veicolo, ovvero la cosiddetta "struttura PIT" o, più comunemente, "AM mobile". Questa è percepita dalla letteratura come una potenziale innovazione per risparmiare tempo e denaro, con una riduzione dello spazio di magazzino, e dei costi di manodopera [32]. Pertanto, il tema dell'AM mobile ha iniziato a guadagnare maggiore attenzione in questo senso emergendo come una nuova potenziale area di ricerca.

3.12 Riepilogo dei principali risultati dell'analisi

L'estrazione dei dati dal campione di articoli selezionato e l'analisi critica degli stessi, per ognuno dei tre temi di ricerca, ha chiuso la fase di analisi della letteratura. Pertanto, in questo breve paragrafo, saranno sintetizzati e riepilogati in maniera chiara i principali risultati ottenuti.

L'obiettivo iniziale di questo lavoro di analisi consisteva, in primo luogo, nell'indagare lo stato dell'arte in merito agli argomenti "Additive Manufacturing e Supply Chain". Al contempo, ci si era proposti di rispondere alle seguenti domande di ricerca:

1. Quali sono le implicazioni dell'implementazione dell'Additive Manufacturing sulla struttura della supply chain e sui network distributivi corrispondenti?
2. Nell'ambito dell'integrazione dell'Additive Manufacturing nella produzione tradizionale, come impatta sulla gestione dei materiali e sulle politiche di gestione dell'inventario?
3. Come si sviluppa il processo di trasporto e consegna di parti additive su richiesta? E che ruolo avranno i fornitori di servizi logistici?

Tali domande hanno permesso di suddividere la letteratura selezionata in tre temi di ricerca:

1. Struttura del Network;
2. Gestione dell'inventario;
3. Trasporti e logistics service providers.

Le pubblicazioni sono state censite attraverso il database *Scopus* ed è stato sviluppato e completato un preciso protocollo di indagine, anche utilizzando la procedura di *Snowballing*.

Al termine del processo di selezione e compilazione del campione, sono stati individuati 132 articoli. Questi sono stati suddivisi in tre temi di ricerca identificati e sistematicamente analizzati.

Sono state svolte le seguenti analisi:

- Andamento degli articoli negli anni;
- Analisi degli autori e delle riviste più frequenti;
- Analisi della qualità delle riviste;
- Analisi delle metodologie di ricerca;
- Analisi dei processi/tecnologie di produzione additiva;
- Analisi dei settori industriali;
- Analisi dei KPI derivanti dagli studi quantitativi;
- Analisi degli argomenti principali per ogni tema di ricerca;
- Analisi incrociate per ogni argomento principale.

In un primo momento, sono state svolte delle analisi a livello generale seguendo la suddivisione degli articoli nei tre temi di ricerca. In un secondo momento, si è scesi nel dettaglio, passando all'analisi degli argomenti principali individuati per ognuno dei tre filoni confermando o smentendo quanto risultato dall'analisi generale.

Nella seguente figura, sono riportati, in sintesi, i principali risultati ottenuti dall'analisi.

Tema di ricerca	STRUTTURA DEL NETWORK	GESTIONE DELL'INVENTARIO	TRASPORTI E LSP
N. Articoli	50	43	39
Distribuzione temporale degli articoli	In grande crescita rispetto al 2010, nonostante si registrino alcuni picchi negativi tra il 2017 e il 2020, dovuti probabilmente all'uso di un'unica banca dati. La prima sostanziale crescita avviene nel 2016. Infatti, circa l'88% degli articoli è stato pubblicato dal 2016 in poi. Inoltre, quasi il 50% degli articoli è stato pubblicato dal 2020 in poi.		
Autori più frequenti	Kay-Wakefield-Strong-Manogharan e Holmstrom.	Holmstrom-Khajavi-Partanen.	Yang e Di.
Riviste più frequenti	<i>International Journal of Production Research;</i> <i>Additive Manufacturing.</i>	<i>International Journal of Production Research;</i> <i>Journal of Manufacturing Technology Management;</i> <i>International Journal of Production Economics.</i>	<i>International Journal of Production Economics;</i> <i>International Journal of Logistics Management;</i> <i>International Journal of Physical Distribution & Logistics Management.</i>
Qualità delle riviste	Prevale la letteratura di alta qualità, ma è presente una piccola quota di articoli in riviste inferiori.	Quasi esclusivamente riviste di alta qualità.	Prevale la letteratura di alta qualità, ma è presente una piccola quota di articoli in riviste inferiori,
Trend topics	Confronto tra SC-AM centralizzata, decentralizzata e intermedia; SC-AM decentralizzata come migliore configurazione in termini di KPI.	Politiche d'inventario: AM tipicamente come fonte di emergenza da stock-out; Gestione di prodotti finiti e materie prime: sostituzione dei magazzini di prodotti finiti con quelli di materie prime.	Ruolo degli LSP: Passaggio di ruolo da azienda di trasporto a "fab lab" o "3D service provider"; Forte riduzione dei volumi di trasporto a lunga distanza.
Research gaps	SC-AM intermedia e domestica, soprattutto settore dei beni di consumo.	Gestione dello stock di sicurezza e dei semilavorati.	AM mobile
Tecnologie AM	In genere la tecnologia non è specificata. Altrimenti si tratta di <i>Power Bed Fusion</i> , ed in particolare della <i>Selective Laser Sintering</i> , oppure di <i>Material Extrusion</i> .		
Metodologie di ricerca	Prevalgono studi quantitativi		Prevalgono studi qualitativi
KPI quantitativi	Livello di domanda; Capacità produttiva; Costi totali SC; Tempo di consegna.	Lead time di rifornimento; Costo di stoccaggio; Spazio di stoccaggio; Livello stock prodotti finiti e materie prime.	Volume di trasporto; Lead time di consegna; Costo di trasporto.
Settori industriali	Prevalenza settori biomedico, pezzi di ricambio, aerospaziale.	Prevalenza settori pezzi di ricambio, aerospaziale, beni di consumo.	Prevalenza settori pezzi di ricambio e automotive.

Figura 3.47: Riepilogo dei risultati

In generale, i temi riguardanti la gestione dell'inventario e i trasporti non sono ampiamente trattati, considerando che l'opportuna letteratura da analizzare non arriva nemmeno a 50 articoli. Il tema 1 è il più trattato dei tre poiché i cambiamenti strutturali spesso rappresentano il punto di partenza nella trattazione della supply chain abilitata dall'Additive Manufacturing, mentre i temi sulla gestione dell'inventario e sul settore dei trasporti sono molto spesso indagati come conseguenza diretta o indiretta del primo.

Per quanto riguarda la struttura del network, solamente 7 articoli su 50 trattano della configurazione SC-AM più estrema, ovvero quella nella quale direttamente il consumatore prende in carico la produzione additiva. Ciò indica la mancanza di ricerca disponibile su tale argomento, rendendolo un'area di ricerca promettente soprattutto se si considerano le potenzialità e le conseguenze per le industrie manifatturiere, i canali di distribuzione e il settore dei trasporti a carico di questa struttura. Un altro gap di ricerca, strettamente collegato, riguarda la trattazione del settore della produzione additiva dei beni di consumo. Inoltre, all'interno di questo tema si tende ad indagare in generale sulla configurazione della SC-AM, non indagando nel dettaglio sulla struttura del network distributivo corrispondente.

Per quanto riguarda i settori industriali, pochissimi articoli trattano della produzione additiva indiretta tramite, ad esempio, stampaggio ad iniezione. La maggior parte della letteratura tratta del settore dei pezzi di ricambio, soprattutto quelli automotive e aerospaziali, per la loro criticità di gestione e per i numerosi costi a loro connessi.

Invece, per quanto riguarda le tecnologie di Additive Manufacturing, vi è una mancanza di letteratura in merito a particolari tecnologie meno popolari, quali *Binder Jetting* o *Sheet Lamination*.

All'interno del tema riguardante la gestione dell'inventario, solamente 3 articoli su 43 trattano della gestione dei semilavorati. Inoltre, vi è poca ricerca sulla gestione delle materie prime e sullo stock di sicurezza quando viene integrata la produzione additiva all'interno del network logistico. Questo perché la letteratura tende a concentrarsi sui prodotti finiti in quanto rappresenta-

no la categoria maggiormente influenzata dall'introduzione della produzione additiva nelle politiche di gestione dell'inventario.

All'interno del tema che tratta sul settore dei trasporti, pochi articoli trattano del trasporto dell'ultimo miglio poichè la maggior parte della letteratura si concentra su quello a lunga distanza ed, in particolare, sulla riduzione dei suoi volumi e distanze di viaggio. Inoltre, dal 2021 è emersa una nuova e promettente area di ricerca, ovvero quella che indaga su una struttura, brevettata da *Amazon*, la quale integra produzione, inventario e trasporto su un unico veicolo, lo stesso atto a consegnare gli articoli direttamente a casa del consumatore. Questa struttura rivoluzionerebbe ulteriormente la supply chain e la sua gestione. Pertanto, la ricerca futura potrebbe indagare in merito a questa tematica molto promettente.

Mancano, inoltre, degli studi quantitativi e statistici che confermino le teorie in merito al nuovo ruolo dei *logistics service providers* in quanto questo argomento è indagato prettamente tramite studi qualitativi.

Capitolo 4

Discussioni e conclusioni

In questo ultimo capitolo sono presentate le considerazioni finali sul lavoro di analisi e revisione della letteratura in merito agli argomenti di Additive Manufacturing e Supply Chain. In primo luogo, verranno discussi i benefici che questo lavoro di analisi porterebbe allo stato dell'arte in materia. In secondo luogo, si esporranno i limiti emersi durante l'analisi e le lacune di ricerca, i quali potrebbero rappresentare degli spunti per i futuri ricercatori.

4.1 Benefici del lavoro di tesi

Al termine della presente analisi e revisione della letteratura, riguardante molteplici sfaccettature logistiche delle supply chain abilitate dall'Additive Manufacturing, si può affermare di aver presentato il problema in modo esaustivo e ordinato, rispettando le regole della revisione sistematica e il suo approccio rigoroso.

L'analisi del contenuto dei 132 articoli individuati e selezionati, ha permesso di individuare gli argomenti già ampiamente trattati e quelli ancora poco esplorati all'interno dei temi riguardante la struttura del network logistico, la gestione dei materiali e dell'inventario, i trasporti e il ruolo dei fornitori logistici quando si decide di adottare una delle tecnologie abilitanti dell'industria 4.0, ovvero l'additive manufacturing, in grado rendere la supply chain

digitale, reattiva e flessibile.

I risultati ottenuti possono facilitare la conoscenza in merito a questi argomenti piuttosto innovativi e definiti dalle precedenti literature review come uno “spazio bianco” su cui dover indagare ulteriormente.

La presente Systematic Literature Review offre anche il beneficio di rendere chiare le aspettative che la ricerca scientifica ha su queste tematiche. Il mondo accademico è, infatti, molto attento alla digitalizzazione e all’industria 4.0 per via del loro potenziale innovativo. Pertanto, focalizzare degli studi in merito a tutto ciò può contribuire a guidare i ricercatori verso nuove aree di ricerca oltre che ad individuare quelle di tendenza.

In conclusione, questo lavoro di tesi potrebbe essere anche utilizzato come biblioteca di riferimento per identificare degli studi specifici in merito a “Additive Manufacturing e Supply Chain” suddivisi per diverse aree logistiche, particolari tecniche produttive e settori industriali.

4.2 Research gaps e sviluppi futuri

In questo paragrafo sono riportate le principali lacune e i limiti riscontrati durante l’analisi del dataset di articoli, i quali potrebbero rappresentare degli spunti per la ricerca futura.

Per quanto riguarda i limiti dell’analisi, essi possono derivare dalla decisione di condurre lo studio utilizzando il database *Scopus* come unica banca dati per la ricerca e la selezione delle pubblicazioni. Sono stati, infatti, esclusi gli articoli non presenti in questo database. Pertanto, alcuni studi pertinenti potrebbero non essere stati presi in considerazione. Inoltre, alcuni criteri di inclusione, come la scelta di utilizzare delle parole chiave piuttosto che altre oppure solo articoli piuttosto che capitoli di libri e papers relativi a conferenze, potrebbero essere stati troppo stringenti.

In aggiunta, durante il processo di selezione del campione, tra uno step e l’altro sono stati scartati numerosi articoli considerati non inerenti ai fini di questo studio. È chiaro che la scelta di includere piuttosto che escludere un

determinato articolo dal campione è basata su un giudizio soggettivo. Pertanto, articoli che altri avrebbero ritenuto legittimi potrebbero essere stati respinti e viceversa.

Tutti questi limiti potrebbero giustificare la mancanza di un numero rilevante di articoli dal 2017 al 2020 in merito agli oggetti di studio, ovvero quei picchi negativi visibili nell'analisi della distribuzione temporale del dataset. Le ricerche future potrebbero ampliare questa Systematic Literature Review cercando di superare questi limiti descritti oppure potrebbero concentrare lo studio sui research gaps individuati e riscontrati nel dataset di articoli analizzati. Infatti, i trend topics e i research gaps, menzionati come risultati nel capitolo precedente, forniscono importanti input per gli studi futuri.

Sebbene, a livello di ricerca scientifica, sia già stato fatto molto su ciò che l'Additive Manufacturing porterà in termini di innovazione di prodotto, di processo e nel settore manifatturiero, la situazione è ancora incerta quando si ha a che fare con la logistica. Infatti, manca ancora un opportuno corpus di studi esplorativi sul settore dei trasporti e sulla gestione dell'inventario nell'ambito dell'integrazione dell'Additive Manufacturing nella produzione tradizionale.

I gap di ricerca individuati durante la presente analisi della letteratura, indicati al paragrafo 3.12 e riportati nella figura sottostante, mostrano che esistono delle aree che non sono state esplorate a fondo in letteratura e che, quindi, devono essere analizzate per comprendere appieno l'applicazione dell'Additive Manufacturing alla supply chain e le sue conseguenze nel settore logistico.



Figura 4.1: Research gaps

4.3 Conclusioni

In conclusione, si può affermare che la letteratura in merito all'applicazione dell'Additive Manufacturing alla supply chain, ed in particolare per quanto riguarda la struttura della supply chain, la gestione dell'inventario e il settore dei trasporti, è di grande interesse da parte della comunità scientifica, soprattutto dal 2016 in poi. Ciò è dimostrato dal fatto che la maggior parte degli articoli in merito sono pubblicati in riviste di ottima qualità.

Sostanzialmente, la comunità scientifica si aspetta che, con la diffusione della tecnologia di Additive Manufacturing, in futuro il network logistico abbandonerà completamente la struttura tradizionale centralizzata e diventerà sempre più locale e distribuito. I produttori capiranno che non sarà più fattibile o efficiente spedire prodotti in tutto il mondo perché l'Additive Manufacturing renderà possibile la produzione ovunque e allo stesso costo (Durão et al., 2017).

Pertanto, la tendenza è quella di spostare la produzione sempre più verso i centri distributivi regionali o nazionali, i quali sono più vicini alla domanda del cliente, allontanando la produzione dallo stabilimento centrale. Di

conseguenza, vi sarà una rivoluzione nelle politiche di gestione dell'inventario, dovuta principalmente al fatto che vi sarà una rilevante sostituzione di stock di prodotti finiti con stock di materie prime per l'Additive Manufacturing oltre che una minore necessità di avere delle scorte in generale, spazi di stoccaggio, grandi volumi di trasporto e grandi distanze di viaggio. Inoltre, l'Additive Manufacturing sembra funzionare tipicamente come fonte di emergenza per la gestione delle scorte e, nella maggior parte dei casi, la stampante 3D viene utilizzata per soddisfare le scorte esaurite piuttosto che per ricostituire l'inventario.

Si avranno dei cambiamenti anche per quanto riguarda i trasporti, soprattutto nella direzione del flusso, velocità del flusso e volume del flusso delle merci (Chen, 2017).

Inoltre, sono le aziende che forniscono servizi logistici ad avere il maggiore potenziale per assumersi la produzione additiva e quindi a compiere questa trasformazione, cambiando il loro ruolo da semplici aziende di trasporto a produttori o fornitori di servizi di stampa 3D, anche con metodi innovativi quali localizzare la produzione direttamente sul veicolo di trasporto.

Si parlerà sempre più di "glocalizzazione", un termine che combina globalizzazione e localizzazione per creare un ibrido che fornirà il meglio di entrambi i mondi (Bogers et al., 2016).

Con una maggiore diffusione della tecnologia, gli autori prevedono degli scenari più estremi con l'adozione della produzione direttamente a carico del consumatore finale, il quale cambierebbe il suo ruolo in "prosumer" (Bogers et al., 2016). Ciò porterebbe a conseguenze ancora più estreme per i trasporti e l'inventario. Tuttavia, sono presenti ancora forti barriere e limiti alla produzione additiva come totale sostituta di quella tradizionale. Pertanto, si tende a frenare quest'ultimo scenario dirompente per la supply chain andando verso soluzioni più intermedie.

Bibliografia

Achillas, C., Aidonis, D., Iakovou, E., Thymianidis, M., Tzetzis, D. (2015), “A methodological framework for the inclusion of modern additive manufacturing into the production portfolio of a focused factory”, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 37 No. 1, pp. 328-339.

Arbabian, M.E. (2022), “Supply Chain Coordination via Additive Manufacturing”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 243, 108318

Attaran, M. (2017), “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing”, *Business Horizons*, Vol. 60 No. 5, pp. 677-688.

Barz, A., Buer, T., Haasis, H.D. (2016), “Quantifying the effects of additive manufacturing on supply networks by means of a facility location-allocation model”, *Logistics Research*, Vol. 9 No. 1, pp. 1–14.

Beltrami, M. and Orzes, G. (2021), “Additive Manufacturing: Application Perspectives in Small and Medium Enterprises”, *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, Vol. 20 No. 2, pp. 1-11.

Berman, B. (2012), “3-D printing: The new industrial revolution”, *Business Horizons*, Vol. 55 No.2, pp. 155-162.

Bhattacharyya, S.S., Kulkarni, O., Mishra, A. (2022), “Study of emerging avenues in supply chain resilience; the case of integration of additive manufacturing with spare parts procurement”, *Benchmarking: An International Journal*, 1463-5771 (Article in press).

Bogers, M., Hadar, R., Bilbergm, A. (2016), “Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing”, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 102, pp. 225-239.

Boon, W. and van Wee, B. (2018), “Influence of 3D printing on transport: a theory and experts judgment based conceptual model”, *Transport Reviews*, Vol. 38 No. 5, pp. 556-575.

Braziotis, C., Rogers, H., Jimo, A. (2019), “3D printing strategic deployment: the supply chain perspective”, *Supply Chain Management*, Vol. Supply Chain Management 24 No. 3, pp. 397-404.

Cantini, A., Peron, M., De Carlo, F., Sgarbossa, F. (2022), “A decision support system for configuring spare parts supply chains considering different manufacturing technologies”, *International Journal of Production Research*, Vol. 61 No. 8.

Chaudhuri, A., Rogers, H., Soberg, P., Pawar, K.S. (2019), “The role of service providers in 3D printing adoption”, *Industrial Management and Data System*, Vol. 119 No. 6, pp. 1189-1205.

Chekurov, S., Metsä-Kortelainen, S., Salmi, M., Roda, I., Jussila, A. (2018), “The perceived value of additively manufactured digital spare parts in industry: An empirical investigation”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 205, pp. 87-97.

Chen, L., Cui, Y., Lee, H.L. (2021), “Retailing with 3D Printing”, *Production and Operations Management*, Vol. 30 No. 7, pp. 1986-2007.

Chen, Z. (2016), “Research on the Impact of 3D Printing on the International Supply Chain”, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2016, 4173873.

Chen, Z. (2017), “The Influence of 3D Printing on Global Container Multimodal Transport System”, *Complexity*, Vol. 2017, 7849670.

Chowdhury, S., Shahvari, O., Marufuzzaman, M., Francis, J., Bian, L. (2019), “Sustainable design of on-demand supply chain network for additive manufacturing”, *IISE Transactions*, Vol. 51 No. 7, pp. 744-765.

Cui, W., Yang, Y., Di, L. (2022), “Modeling and optimization for static-dynamic routing of a vehicle with additive manufacturing equipment”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 257, 108756.

Dartnell, L.R. and Kish, K. (2021), “Do responses to the COVID-19 pandemic anticipate a long-lasting shift towards peer-to-peer production or degrowth?”, *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 27, pp. 2165-2177.

Dewey, A. and Drahota, A. (2016), “Introduction to systematic reviews: online learning module Cochrane Training”, available at:
<https://training.cochrane.org/interactivelearning/module-1-introduction-conducting-systematic-reviews> (accessed 9 February 2023).

Di, L. and Yang, Y. (2022), “Greenhouse Gas Emission Analysis of Integrated Production-Inventory- Transportation Supply Chain Enabled by Additive Manufacturing”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 144 No.3, 031006.

Durach, C.F., Kurpjuweit, S., Wagner, S.M. (2017), “The impact of additive manufacturing on supply chains”, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol. 47 No. 10, pp. 954-971.

Durão, L.F.C.S., Christ, A., Zancul, E., Anderl, R., Schützer, K. (2017), “Additive manufacturing scenarios for distributed production of spare parts”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 93 No. 1-4, pp. 869-880.

Ekren, B.Y., Stylos, N., Zwiendelaar, J., Turhanlar, E.E., Kumar, V. (2022), “Additive manufacturing integration in E-commerce supply chain network to improve resilience and competitiveness”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 122, 102676.

Emelogu, A., Chowdhury, S., Marufuzzaman, M., Bian, L. (2019), “Distributed or centralized? A novel supply chain configuration of additively manufactured biomedical implants for southeastern US States”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 24, pp. 17-34.

Emelogu, A., Marufuzzaman, M., Thompson, S.M., Shamsaei, N., Bian, L. (2016), “Additive manufacturing of biomedical implants: A feasibility assessment via supply-chain cost analysis”, *Additive Manufacturing*, Vol. 11, pp. 97-113.

Friedrich, A., Lange, A., Elbert, R. (2022), "Supply chain design for industrial additive manufacturing", *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 42 No. 11, pp. 1678-1710.

Gallinaro, S. (2021), "Catene di fornitura basate sulla produzione additiva", *Electronic Journal of Management*, 1824-3576 (Article in press).

Ghadge, A., Karantoni, G., Chaudhuri, A., Srinivasan, A. (2018), "Impact of additive manufacturing on aircraft supply chain performance: A system dynamics approach", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 29 No. 5, pp. 846-865.

Halassi, S., Semeijn, J., Kiratli, N. (2018), "From consumer to prosumer: a supply chain revolution in 3D printing", *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol. 49 No. 2, pp. 200-216.

He, P., Li, K., Kumar, P.N.R. (2022), "An enhanced branch-and-price algorithm for the integrated production and transportation scheduling problem", *International Journal of Production Research*, Vol. 60 No. 6, pp. 1874-1889.

Hecker, S. (2020), "Implementation of 3D printing and the effect on decision making in logistics management", *International Journal of Logistics Management*, Vol. 32 No. 2, pp. 434-453.

Heinen, J.J. and Hoberg, K. (2019), "Assessing the potential of additive manufacturing for the provision of spare parts", *Journal of Operations Management*, Vol. 65 No. 8, pp. 810-826.

[2017] Holmström, J. and Gutowski, T. (2017), "Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study", *International Journal of Production Research*, Vol. 55 No. 5, pp. 1498-1515.

Holmström, J., Holweg, M., Khajavi, S.H., Partanen, J. (2016), “The direct digital manufacturing (r)evolution: definition of a research agenda”, *Operations Management Research*, Vol. 9 No. 1-2, pp. 1-10.

Holmström, J. and Partanen, J. (2014), “Digital manufacturing-driven transformations of service supply chains for complex products”, *Supply Chain Management*, Vol. 19 No. 4, pp. 421-430.

Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., Walter, M. (2010), “Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 21 No. 6, pp. 687-697.

Huang, S.H., Liu, P., Mokasdar, A., Hou, L. (2013), “Additive Manufacturing and Its Societal Impact: A Literature Review”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67 No. 5-8, pp. 1191-1203.

Jermittiparsert, K. and Boonratanakittiphumi, C. (2019), “The role of additive manufacturing and supply chain management in improving the supply chain performance: A case of industry 4.0 in dksh Thailand”, *International Journal of Innovation, Creativity and Change*, Vol. 8 No. 8, pp. 103-121.

Kenger, Z., Koç, Ç., Özceylan, E. (2021), “Integrated disassembly line balancing and routing problem with mobile additive manufacturing”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 235, 108088.

Khajavi, S., Holmström, J., Partanen, J. (2018), “Additive manufacturing in the spare parts supply chain: hub configuration and technology maturity”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24 No. 7, pp. 1178-1192.

Khajavi, S., Partanen, J., Holmström, J. (2014), “Additive manufacturing in the spare parts supply chain”, *Computers in Industry*, Vol. 65 No. 1, pp. 50-63.

Knofius, N., van der Heijden, M.C., Sleptchenko, A., Zijm, W.H.M. (2021), “Improving effectiveness of spare parts supply by additive manufacturing as dual sourcing option”, *OR Spectrum*, Vol. 43 No. 1, pp. 189-221.

Kunovjanek, M., Knofius, N., Reiner, G. (2021), “Hybrid Simulation Models for Spare Parts Supply Chain Considering 3D Printing Capabilities”, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 59, pp. 272-282.

Kunovjanek, M. and Reiner, G. (2020), “How will the diffusion of additive manufacturing impact the raw material supply chain process?”, *International Journal of Production Research*, Vol. 58 No. 5, pp. 1540-1554.

Lagorio, A., Cimini, C., Pinto, R., Paris, V. (2021), “Emergent virtual networks amid emergency: insights from a case study”, *International Journal of Logistics Research and Applications*, 13675567 (Article in press).

Li, Y., Cheng, Y., Hu, Q., Ma, L., Lim, M.K. (2019), “The influence of additive manufacturing on the configuration of make-to-order spare parts supply chain under heterogeneous demand”, *International Journal of Production Research*, Vol. 57 No. 11, pp. 3622-3641.

Li, Y., Jia, G., Cheng, Y., Hu, Y. (2017), “Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study”, *International Journal of Production Research*, Vol. 55 No. 5, pp. 1498-1515.

Liu, P., Huang, S., Mokedar, A., Liang, H. (2014), “The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: Supply chain operation reference (Scor) model based analysis”, *Production Planning and Control*, Vol. 25, pp. 1169-1181.

Mavri, M. (2015), “Redesigning a Production Chain Based on 3D Printing Technology”, *Knowledge and Process Management*, Vol. 22 No. 3, pp. 141-147.

McDermott, K.C., Winz, R.D., Hodgson, T.J., King, R.E., McConnell, B.M. (2021), “Performance tradeoffs for spare parts supply chains with additive manufacturing capability servicing intermittent demand”, *Journal of Defense Analytics and Logistics*, Vol. 5 No. 2, pp. 179-213.

Mckinnon, A.C. (2016), “The possible impact of 3D printing and drones on last-mile logistics: An exploratory study”, *Built Environment*, Vol. 42 No. 4, pp. 617-629.

Mecheter, A., Pokharel, S., Tarlochan, F. (2022), “Additive Manufacturing Technology for Spare Parts Application: A Systematic Review on Supply Chain Management”, *Applied Sciences (Switzerland)*, Vol. 12 No.9, 4160.

Meier, K.J. (2020), “Additive manufacturing – driving massive disruptive change in supply chain management”, *Journal of Work-Applied Management*, Vol. 12 No. 2, pp. 221-231.

Naghshineh, B. and Carvalho, H. (2022), “The implications of additive manufacturing technology adoption for supply chain resilience: A systematic search and review”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 247, 108387.

Nuñez Rodriguez, J., Andrade Sosa, H.H., Villarreal-Archila, S.M., Ortiz, A. (2022), “The Impact of Additive Manufacturing on Supply Chain Management from a System Dynamics Model—Scenario: Traditional, Centralized, and Distributed Supply Chain”, *Processes*, Vol. 10, No. 12, 2489.

Oettmeier, K., Hofmann, E. (2016), “Impact of additive manufacturing technology adoption on supply chain management processes and components”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 27 No. 7, pp. 944-968.

Pilz, T.L., Nunes, B., Corrêa Maceno, M.M., Cleto, M.G., Seleme, R. (2020), “Systematic analysis of comparative studies between additive and conventional manufacturing focusing on the environmental performance of logistics operations”, *Gestao e Producao*, Vol. 27 No. 3, e5289.

Pittway, L. (2008), *Systematic literature reviews*, Thorpe, R. & Holt, R., London, LDN.

Rathore, B., Gupta, R., Biswas, B., Srivastava, A., Gupta, S. (2022), “Identification and analysis of adoption barriers of disruptive technologies in the logistics industry”, *International Journal of Logistics Management*, Vol. 33 No.5, pp. 136-169.

Rinaldi, M., Caterino, M., Macchiaroli, R. (2022), “Additive Manufacturing and Supply Chain Configuration: Modelling and Performance Evaluation”, *Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol. 15 No. 1, pp. 103-123.

Roca, J.B, Vaishnav, P., Laureijs, R.E., Mendonça, J., Fuchs, E.R.H. (2019), “Technology cost drivers for a potential transition to decentralized manufacturing”, *Additive Manufacturing*, Vol. 28, pp. 136-151.

Royal Academy of Engineering (2013), *Additive manufacturing: opportunities and constraints*, Royal Academy of Engineering Publishers, London, LDN.

Ryan, M.J., Eyers, D.R., Potter, A.T., Purvis, L., Gosling, J. (2017), “3D printing the future: scenarios for supply chains reviewed”, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 47 No. 10, pp. 992-1014.

Sasson, A. and Johnson, J.C. (2016), “The 3D printing order: variability, supercenters and supply chain reconfigurations”, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol. 46 No. 1, pp. 82-94.

Scott, A. and Harrison, T.P. (2015), “Additive Manufacturing in an End-to-End Supply Chain Setting”, *3D Printing and Additive Manufacturing*, Vol. 2 No. 2, pp. 65-77.

Sgarbossa, F., Peron, M., Lolli, F., Balugani, E. (2021), “Conventional or additive manufacturing for spare parts management: An extensive comparison for Poisson demand”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 233, 107993.

Son, D., Kim, S., Jeong, B. (2021), “Sustainable part consolidation model for customized products in closed-loop supply chain with additive manufacturing hub”, *Additive Manufacturing*, Vol. 37, 101643.

Sonar, H., Khanzode, V., Akarte, M. (2022), “Additive Manufacturing Enabled Supply Chain Management: A Review and Research Directions”, *Vision*, Vol. 26 No. 2, pp. 147-162.

Steenhuis, H.J. and Pretorius, L. (2016), “Consumer additive manufacturing or 3D printing adoption: An exploratory study”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 27 No. 7, pp. 990-1012.

Strong, D., Kay, M., Wakefield, T., Conner, B., Manogharan, G. (2019), “Rethinking reverse logistics: role of additive manufacturing technology in metal remanufacturing”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 31 No. 1, pp. 124-144.

Subramani, R., Kaliappan, S., Kumar, P.V.A., Patil, P.P., Raj, E.S.E. (2022), “A Recent Trend on Additive Manufacturing Sustainability with Supply Chain Management Concept, Multicriteria Decision Making Techniques”, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2022, 9151839.

Sun, L. and Zhao, L. (2017), “Envisioning the era of 3D printing: a conceptual model for the fashion industry”, *Fashion and Textiles*, Vol. 4 No. 1, 25

Tang, C.S. and Veelenturf, L.P. (2019), “The strategic role of logistics in the industry 4.0 era”, *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*, Vol. 129, pp. 1-11.

Tatham, P., Loy, J., Peretti, U. (2015), “Three dimensional printing – a key tool for the humanitarian logistician?”, *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, Vol. 5 No. 2, pp. 188-208.

Teweldebrhan, B.T., Maghelal, P., Galadari, A (2022), “Impact of 3D printing on car shipping supply chain logistics in the Middle East”, *Asian Journal of Shipping and Logistics*, Vol. 38 No. 3, pp. 181-196.

Thiesse, F., Wirth, M., Kemper, H.-G., Ford, S., Minshall, T. (2015), "Economic Implications of Additive Manufacturing and the Contribution of MIS", *Business and Information Systems Engineering*, Vol. 57 No. 2, pp. 139-148.

Thomas, D. (2016), "Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85 No. 5-8, pp. 1857-1876.

Togwe, T., Eveleigh, T.J., Tanju, B. (2019), "An Additive Manufacturing Spare Parts Inventory Model for an Aviation Use Case", *EMJ - Engineering Management Journal*, Vol. 31 No. 1, pp. 69-80.

Tuzkaya, U.R. and Şahin S. (2021), "A single side priority based ga approach for 3d printing center integration to spare part supply chain in automotive industry", *Tehnicki Vjesnik*, Vol. 28 No. 3, pp. 836-844.

Verboeket, V., Khajavi, S.H., Krikke, H., Salmi, M., Holmstrom, J. (2021), "Additive Manufacturing for Localized Medical Parts Production: A Case Study", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 25818-25834.

Verboeket, V. and Krikke, H. (2019), "The disruptive impact of additive manufacturing on supply chains: A literature study, conceptual framework and research agenda", *Computers in Industry*, Vol. 111, pp. 91-107.

Waller, M.A. and Fawcett, S.E. (2014), "Click here to print a maker movement supply chain: How invention and entrepreneurship will disrupt supply chain design", *Journal of Business Logistics*, Vol. 35 No. 2, pp. 99-102.

Westerweel, B., Basten, R., den Boer, J., van Houtum, G.J. (2021), “Printing Spare Parts at Remote Locations: Fulfilling the Promise of Additive Manufacturing”, *Production and Operations Management*, Vol. 30 No. 6, pp. 1615-1632.

Wohlin (2014), “Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering”, in *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering, (EASE 2014)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, pp. 1–10.

Wu, H., Mehrabi, H., Naveed, N., Karagiannidis, P. (2022), “Impact of strategic control and supply chain management on recycled plastic additive manufacturing”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 364, 132511.

Yadav, A.C. and Kumar B. (2022), “Impact on inventory management of 3D printing of stents used in heart angioplasty”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 63, pp. 302-308.

Zanardini, M. and Bacchetti, A. (2015), “Se la stampa 3D rivoluziona anche la supply chain”, working paper, laboratorio sul Supply Chain and Service Management (SCSM), Università di Brescia, 6 May.

Zhang, Y., Westerweel, B., Basten, R., Song, J.S. (2022), “Distributed 3D Printing of Spare Parts via IP Licensing”, *Manufacturing and Service Operations Management*, Vol. 24 No. 5, pp. 2685-2702.

Sitografia

[1] <https://am.pictet/it/blog/articoli/tecnologia-e-innovazione/digital-supply-chain-un-nuovo-approccio-alla-gestione-della-filiera>

[2] <https://www.smactory.com/industria4-0-definizione-e-benefici/>

[3] https://automazione-plus.it/ladditive-manufacturing-per-la-trasformazione-digitale-la-produzione-on-demand-la-manifattura-sostenibile_127339/

[4] <https://www.mbaknol.com/logistics-management/definition-of-logistics/>

[5] <https://www.smet.it/blog/logistica/# :~text=%C2%ABLa%20logistica%20%C3%A8%20il%20processo,soddisfare%20le%20esigenze%20dei%20clienti%C2%BB>

[6] https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2020-09/Rapporto_fabbisogni_logistica_impagniato_def_14072020.pdf

[7] <https://scaffalaturaonline.it/2019/09/27/facciamo-chiarezza-qual-e-la-differenza-tra-la-supply-chain-e-logistica/>

[8] <https://www.blumeglobal.com/learning/supply-chain-explained/# : ~text=A%20supply%20chain%20is%20a,supplier%20to%20an%20end%20customer>

[9] <https://www.insidemarketing.it/glossario/definizione/supply-chain/>

-
- [10] https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx#:~:text=CSCMP's%20Definition%20of%20Supply%20Chain,and%20all%20logistics%20management%20activities
- [11] <https://www.bucap.it/news/approfondimenti-tematici/gestione-del-magazzino/supply-chain-cos-e.htm>
- [12] <https://www.logisticaefficiente.it/supply-chain-gestione-catena-distribuzione>
- [13] <https://www.industry4business.it/industria-4-0/supply-chain-manager/>
- [14] <https://www.ilprogettistaindustriale.it/hp-3d-printing-trend-e-previsioni-del-settore-per-il-2022/>
- [15] <https://www.digital4.biz/executive/industria-4-0-storia-significato-ed-evoluzioni-tecnologiche-a-vantaggio-del-business/>
- [16] <https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/manufacturing-industry/digital-supply-chain-supply-chain-visibility/>
- [17] <https://www.teamsystem.com/magazine/novita-digitali/digital-supply-chain/>
- [18] <https://www.focusindustria40.com/tecnologie-abilitanti-impresa-4-0/>
- [19] <https://www.innovationpost.it/tecnologie/additive-manufacturing/tutto-quello-che-ce-da-sapere->

[20] <https://www.internet4things.it/iot-library/che-cose-il-3d-printing-e-come-si-colloca-nellambito-industry-4-0-e-iot/sulladditive-manufacturing-guida/>

[21] <https://www.ridix.it/blog/approfondimenti/additive-manufacturing-cosa-e/>

[22] <https://www.yndetech.com/storia-ed-evoluzione-della-stampa-3d/>

[23] <https://www.3dnatives.com/>

[24] https://issuu.com/quinebusinesspublisher/docs/m_a_gen_feb/s/14696660

[25] <https://www.prnewswire.com/news-releases/for-3d-printing-day-idtech-ex-discuss-3d-printing-in-2021-micro-trends-in-major-materials-301435191.html>

[26] <https://www.statista.com/>

[27] <https://www.digital4.biz/supply-chain/la-stampa-3d-rivoluziona-la-logistica-dai-ricambi-giornata-alla-produzione-domicilio/>

[28] libguides.csu.edu.au

[29] <https://incites.help.clarivate.com/Content/Indicators-Handbook/ih-5-year-jif.htm>

[30] <https://blog.iese.edu/newsletter-library/83-resources-tip/#:~:text=Quartiles%20indicate%20where%20a%20journal's,%2C%20Q2%2C%20Q3%20and%20Q4>

[31] https://support.clarivate.com/ScientificandAcademicResearch/s/article/Journal-Citation-Reports-Quartile-rankings-and-other-metrics?language=en_US

[32] <https://www.scimagojr.com/>

[33] <http://www.dizionariologica.com/dirdizion/3pl.html>

[34] <https://www.3ders.org/articles/20180103-amazon-awarded-patent-for-innovative-new-on-demand-3d-printing-retail-service.html>

Ringraziamenti

A conclusione di questo elaborato, desidero dimostrare la mia gratitudine verso chi mi ha supportata durante il mio percorso universitario ed accompagnata fino alla fine di esso. Nella stesura di questa tesi è stato fondamentale il sostegno di tante persone, senza le quali il mio lavoro e il mio cammino al Politecnico di Torino sarebbe stato sicuramente più difficile.

In primo luogo, voglio ringraziare sentitamente la mia relattrice, la Professoressa Anna Corinna Cagliano e i correlatori, i Professori Giovanni Zenezini ed Eleonora Atzeni per avermi seguita con estrema disponibilità durante questo step conclusivo del mio percorso di studi.

Non posso non ringraziare i miei genitori, a cui è dedicata questa tesi, poichè tra i primi ad aiutarmi a raggiungere questo traguardo, insegnandomi da sempre il valore e l'importanza dello studio per crescere.

Non è scontato che un genitore debba sempre assecondare ed appoggiare le scelte del proprio figlio, come non è scontato che lo sostenga nel continuare a studiare senza fare altro, sacrificando la voglia di averlo vicino a sè per garantirgli la massima istruzione e un roseo futuro, oltre che fare dei sacrifici economici. Per tutti questi motivi, riconoscendo l'enorme valore di ciò, sarò per sempre grata ai miei genitori, e li amerò immensamente. Senza di loro, fonte inesauribile di sostegno, non avrei avuto la possibilità di studiare ed arrivare a ciò che sono oggi, fino a scrivere questo elaborato di tesi di laurea magistrale ed ottenere delle soddisfazioni che spero possano ripagare tutto ciò che mi hanno dato con amore incondizionato.

Voglio ringraziare con tutto il cuore Giacomo, un ragazzo speciale a mio fianco da 10 anni. Per me un porto sicuro, capace di capirmi e sostenermi nei momenti difficili, ascoltando tutti i miei sfoghi, dandomi supporto emotivo e un amore grande che mi hanno permesso di arrivare fin qui e a portare a termine questa tesi. Grazie per tutto il tempo che mi hai dedicato. Grazie perché ci sei sempre stato, perchè hai condiviso con me il bello e il brutto di questi anni universitari. Grazie per avermi incoraggiata a non mollare mai e a tenere la testa alta per arrivare a questo punto. Questa tesi di laurea magistrale è anche in qualche modo tua e le parole non possono esprimere quanto ti amo e quanto ti sono grata.

Ringrazio tutta la mia famiglia: la nonna Marianna, la madrina Francesca e tutti gli zii, cugini e amici di famiglia per il sostegno e l'incoraggiamento a perseguire i miei obiettivi, per la gioia e l'emozione di festeggiare ogni mio traguardo e soddisfazione che ho avuto il piacere di condividere. Inoltre, un grazie anche ai miei due nonni che da lassù sono sicura che mi sostengano e siano felici per me.

Voglio ringraziare tutti i miei amici, da quelli che ho portato nel cuore fin dall'infanzia (Giulia, Alessia Cascio, Alessia Ditto, Miriam, Sara, Elisa) a quelli che ho incontrato lungo la strada e che hanno deciso di camminare accanto a me e portarmi fin qui: Alessia (amica da una vita ritrovata a Torino), Giulia (una coinquilina unica), Marta ed Eleonora (ragazze speciali che porterò nel cuore).

Infine, un grazie a tutti coloro che hanno incrociato la mia strada in questi anni al Politecnico di Torino e mi hanno lasciato qualcosa di buono, ognuno a modo suo: al gruppo "Viva FR" (Giovanna, Martina, Federica, Rita, Giulio, Mattia) e a tutto il gruppo speciale di SCM (Francesca, Katia, Serena, Marco, Stefano). Grazie a tutti voi per aver reso speciale il mio traguardo!