

Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale



**ANALISI DEI CAMBIAMENTI NELLA SUPPLY CHAIN
CON L'INTRODUZIONE DELL'ADDITIVE MANUFACTURING**

Candidato:

Simone Monfreda

Relatrice:

Arianna Alfieri

Co-relatori:

Erica Pastore

Claudio Castiglione

Anno Accademico 2022/23

INDICE

Indice	2
Ringraziamenti	4
Abstract	6
1. Introduzione	7
1.1 influenza della pandemia da COVID 19	7
1.2 Additive Manufacturing	9
2. Revisione della letteratura	11
2.1 Studio delle applicazioni	11
2.2 Classificazione della letteratura analizzata	13
3. Tecnologie dell'Industria 4.0	15
3.1 Caso 1: BC ed ECAM: analisi delle miglorie	18
4. Vantaggi e svantaggi dell'adozione dell'AM nella SC	21
4.1 Vantaggi	21
4.2 Svantaggi	26
4.3 Ostacoli	29
4.4 Risultati del confronto	31
5. Analisi dei costi	32
5.1 Benefici di costo nella SC	35
5.2 Economie di scala	37
6. Il ruolo del governo	39

7. Strutture della produzione	43
7.1 Caso 2: il ruolo dell'AM nelle HSC	48
8. Sostenibilità ambientale e prestazioni della SC	58
8.1 Caso 3: applicazioni ed emissioni con l'uso delle leghe di Ti	62
9. Ricambistica	65
9.1 Settore aerospaziale	65
9.2 Settore automotive	68
9.3 Caso 4: produzione mobile tramite veicoli industriali	73
10. Applicazione degli studi a un caso reale	77
11. Conclusioni	84
12. Bibliografia	87
13. Sitografia	93

Ringraziamenti

Questa sarà sicuramente la sezione più letta dalle persone che avranno in mano questo manoscritto, oltre a essere una delle poche occasioni per essere ascoltato con piena attenzione, quindi tenterò di scriverla con la massima sincerità e impegno.

Quello che va a chiudersi con questo lavoro è un percorso travagliato e oltremodo lungo, che ha presentato molti più ostacoli del previsto già dal suo inizio, durante il lockdown del 2020: la pandemia è stata infatti uno dei principali motivi dei ritardi accumulati in questi anni, poiché ho dovuto affrontare un nuovo percorso di studi in totale solitudine per un anno e mezzo e completamente diverso da quello terminato in precedenza. Con questo, intendo la scelta di studiare e approfondire campi che fino a quel momento risultavano avversi e complessi, per i quali non avevo particolare predisposizione ma che ho ritenuto di poter affrontare in breve tempo e con successo. Per questo, proprio il tempo e il successo sono stati i più grandi avversari che ho dovuto fronteggiare in questo periodo: infatti, non vi è stato un solo giorno dove essi, per richiamo o per fallimento, non abbiano gravato sul mio corpo e sulla mia mente e considero oggi, al termine di questo periodo di purgatorio, il successo come il macigno a me destinato e il tempo speso come necessario per espiare questo piccolo seppur incisivo peccato di superbia.

Il periodo trascorso in solitudine ha dimostrato come il concetto di lavorare più duramente non sia garanzia di successo, nonostante le migliori intenzioni, ed è risultato poi evidente una volta terminata l'emergenza sanitaria come la presenza degli amici, dei compagni di studio, delle persone importanti fosse fondamentale per il rendimento accademico che fino a quel momento risultava carente; dunque, colgo l'occasione per ringraziare tutte le persone che hanno contribuito al raggiungimento di questo traguardo. Scrivendo queste parole ho deciso di non citare i nomi delle suddette persone, l'elenco che verrebbe a formarsi sarebbe troppo vasto e correrei il rischio di dimenticare qualcuno, ma chiunque legga queste parole sa, in cuor suo, quanto sia stato importante per me, per il mio percorso e quanto abbia contribuito.

Io credo fermamente che una laurea sia il frutto di un lavoro lungo e personale, ma sarebbe ipocrita non dire che questa sia anche un gioco di squadra, poiché è con il lavoro dei molti che il singolo raggiunge il traguardo, e nel mio caso non avrei potuto avere squadra migliore.

Dopo aver descritto in breve quella che è stata una strenua resistenza, di cui conservo con piacere i ricordi e che con questo lavoro si conclude in una vittoria, vorrei esprimere al lettore un pensiero: io ho varcato le soglie di questa università con lo spirito intraprendente di un giovane pronto a giocarsi tutto pur di raggiungere l'obiettivo che si era prefissato, che al tempo si basava esclusivamente sulla prospettiva di un futuro economicamente prospero svolgendo un mestiere piacevole e adatto a pochi, ma ora che varco questi cancelli per l'ultima volta sento di chiedere di ragionare sulle mie parole considerando che oggi io mi accorgo di aver commesso un errore, perché la vera ricchezza che ho trovato alla fine del mio percorso è la conoscenza, e la gratitudine e il piacere che deriva dall'amore che si può trovare nel perseguirla.

Per questo motivo considero il mio errore un fallimento di grande successo, e chiudendo vorrei dedicare questa laurea citando, da grande appassionato delle corse, una frase del compianto Niki Lauda:

“Vedo molte persone qui, vincitori e sconfitti, quindi vorrei dedicare questo premio agli sconfitti, perché vi dico dalla mia personale esperienza che vincere è una cosa ma dalla sconfitta ho sempre imparato di più per il futuro e in essa sono diventato più forte.”

Cordialmente,

Abstract

Durante e dopo la pandemia da COVID-19 è stata evidenziata la già nota necessità di adattarsi a interruzioni e bisogni del cliente dovuti a eventi così improvvisi e di così grande impatto, spingendo le aziende a cercare un nuovo e più alto livello di resilienza e di flessibilità. Per tale alzamento del livello di competitività le tecnologie dell'industria 4.0 hanno trovato terreno fertile per la loro diffusione nonostante gli ingenti investimenti iniziali necessari: tra queste, l'additive manufacturing è forse la più famosa, che oggi sta trovando spazio in diversi settori sia per la produzione di prototipi che di piccoli lotti. Inevitabilmente, questa tecnologia avrà influenza sulla catena di approvvigionamento o supply chain, sia lato fornitore che lato cliente.

Il lavoro che qui è introdotto si pone l'obiettivo di descrivere il panorama bibliografico attuale sull'introduzione dell'additive manufacturing nell'industria, e in particolare come e quanto questa tecnologia abbia influito e cambiato la supply chain delle aziende che hanno deciso di adottarla.

Verrà svolta un'introduzione sull'influenza esercitata dalla pandemia da COVID-19 sull'industria e sull'additive manufacturing, seguita dalla revisione e riclassificazione della letteratura. Successivamente verranno descritti i vantaggi e i limiti che l'additive manufacturing presenta, per poi analizzare come questa tecnologia sia stata d'impatto per la supply chain dei principali campi di applicazione. Lungo tutto il lavoro verranno sviluppati particolari casi di studio della letteratura ritenuti utili, interessanti e inerenti ai maggiori campi di applicazione. Infine, verrà esposto un caso reale dove si applicheranno le conoscenze acquisite durante lo svolgimento del lavoro, anche tramite i suddetti casi.

1. Introduzione

1.1 Influenza della pandemia da COVID-19

L'analisi della Supply Chain (SC) e i tipi, i benefici e la diffusione delle tecnologie dell'industria 4.0, che verranno approfonditi in seguito, erano già oggetto di studio precedentemente al quadriennio 2019-2022 ma, con l'avvento della pandemia da COVID-19, il numero di pubblicazioni sull'argomento è cresciuto siccome le fragilità delle catene di approvvigionamento sono state messa a nudo: è particolare notare come le catene di settori molto diversi tra loro, come per esempio il settore automobilistico e quello alimentare, si sono trovate accomunate nel mostrare le stesse fragilità, a causa di milioni di voli cancellati durante questo periodo, i quali hanno interrotto la consegna di vari rifornimenti, compresi i dispositivi di protezione per prevenire la trasmissione del virus [36].

In effetti, la pandemia ha dimostrato come anche una piccola interruzione di un collegamento avrà ripercussioni sull'intera catena delle operazioni, in particolare nel settore medico dove queste hanno causato la perdita di molte vite umane a livello globale [16]. Infatti, il settore medico, sia a causa della rapida diffusione della malattia sia per le scelte politiche, che nel caso dell'Italia hanno portato a drastici tagli dei fondi alla sanità lungo tre decenni, non è stato esente da fragilità e carenze in questo drammatico periodo. La carenza di dispositivi di protezione personale, dispositivi medici e accessori per i test di positività ha colpito regioni di tutto il mondo: in questo periodo il ruolo dell'istituzione accademica è risultato fondamentale, in quanto sono state richieste indicazioni su quali tipi di strumenti medici, come ad esempio le mascherine, potessero essere prodotti con metodi non convenzionali per sopperire alla suddetta carenza [36].

In particolare, si fa riferimento alle richieste sottoposte dal governo statunitense: in Kentucky, ad esempio, è stato chiesto alle università di utilizzare le loro risorse per progettare e implementare processi di produzione per visiere facciali, mascherine, camici, ventilatori, componenti per ventilatori e persino tamponi per i test [36].

Molte università del territorio, tra cui quella di Louisville, hanno accettato la sfida di sviluppare modelli di produzione che potessero essere utilizzati da piccole imprese in tali condizioni e questi studi hanno evidenziato il potenziale della fabbricazione su richiesta come soluzione temporanea per le carenze globali nelle catene di approvvigionamento [36].

Nello specifico, si è lavorato per perseguire i seguenti obiettivi:

- Identificare parti mediche e di consumo di emergenza e dispositivi di emergenza per varie situazioni di risposta a pandemie o disastri.
- Lavorare con agenzie governative per ottenere l'approvazione preventiva dei progetti di emergenza.
- Sviluppare una rete regionale e strategie per coinvolgere piccole risorse di produzione per integrare la catena di approvvigionamento.
- Sviluppare un portfolio di materiali per soddisfare le esigenze di produzione su richiesta in situazioni di emergenza [36].

In questo periodo le capacità e la reattività di ogni tipo di tecnologia sono state messe alla prova, ma è emerso come l'Additive Manufacturing (AM) sia stata una delle poche adatte a fronteggiare il contesto particolarmente ostile [36] e che si sia dimostrata all'altezza delle criticità delle catene di approvvigionamento come efficienza e resilienza [9].

Il COVID-19 ha avuto un forte impatto sulle industrie e sui professionisti e sui ricercatori, che hanno subito un cambiamento drastico del modo di pensare l'intera struttura per cercare modi per prepararsi meglio a eventi inaspettati [18], oltre ad evidenziare la potenziale transizione verso la sostenibilità: in definitiva, durante questo periodo l'analisi della resilienza ha ricevuto maggiore attenzione ed è stata eseguita da diverse prospettive considerando vari casi di studio, ricerche empiriche e formulazioni matematiche [35].

1.2 Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing (AM), comunemente nota come Stampa 3D, è generalmente definita come una tecnologia innovativa basata su un modello CAD (Computer Aided Design) ad aggiunta di strati di materiale successivi. Gli articoli analizzati danno diverse definizioni di tale metodo di produzione, ma tutte concordanti al nocciolo della questione. A titolo d'esempio, si riporta la definizione data da Gebhardt: “un processo automatizzato di fabbricazione a base di strati per la produzione di oggetti fisici tridimensionali su scala direttamente dai dati CAD 3D senza l'uso di strumenti specifici per le singole parti” [1].

Dunque, AM è il termine generale che viene usato per definire i tipi di produzione che costruiscono il prodotto finito strato per strato, a differenza della TM che è basata sulla sottrazione di materiale tramite lavorazioni meccaniche [11].

Di conseguenza, l'AM consente di integrare funzionalmente parti separate in una parte più complessa e quindi di stampare il prodotto finale in un solo passaggio produttivo riducendo le fasi di assemblaggio, salvo poi effettuare passaggi di post-produzione [2] legati al metodo di produzione stesso.

La tecnologia sta guadagnando popolarità, con un tasso di crescita annuale medio del settore del 23,3% (2016-2019), che ha generato un valore di 11,9 miliardi di dollari di ricavi nel 2019, con la previsione di quadruplicare a 47,7 miliardi di dollari entro il 2025 [10], in linea con un altro studio che stima si raggiungeranno 35,6 miliardi di dollari entro il 2024 rispetto ai 7,34 miliardi di dollari del 2017 [12]. Uno studio più prudentiale stima invece che il mercato globale AM crescerà da 8,44 miliardi di dollari nel 2018 a 36,61 miliardi di dollari entro il 2027 [5].

L'AM non è un metodo di stampaggio in 3D unico, ma presenta diverse tecniche di produzione che ISO/ASTM suddivide in sette sottocategorie, tra cui la fusione di materiale in polvere (PBF), il deposito di energia diretta (DED), l'estrusione di materiale (MEX), il getto di legante (BJT), il getto di materiale (MJT), la laminazione di fogli (SHL) e la fotopolimerizzazione in vasca (VPP) [13], che a loro volta si suddividono in diverse tecniche che non vengono approfondite in questo lavoro.

A titolo d'esempio, nell'articolo [15] è presente uno schema molto chiaro ed esplicativo, indipendente dal metodo produttivo utilizzato, di un processo di AM, che qui è riportato in *Figura 1*.

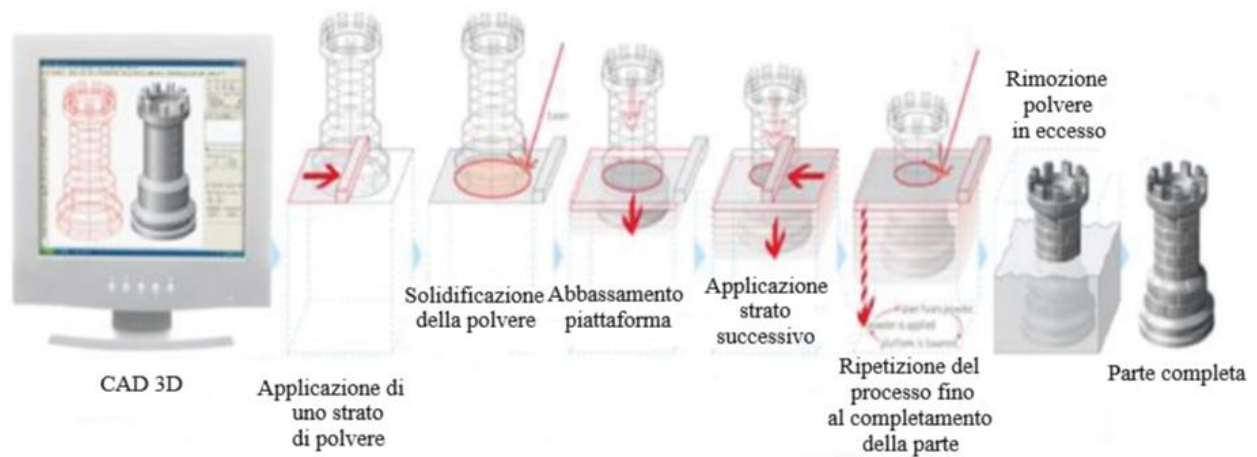


Figura 1: Processo di AM (fonte: [15]).

2. Revisione della letteratura

2.1 Studio delle applicazioni

L'AM risulta di particolare interesse per diversi settori industriali nonostante essa si trovi ancora agli albori: infatti, si trovano diversi articoli che approfondiscono la tematica dell'implementazione di questa tecnologia nella SC. È stata effettuata un'analisi bibliografica usando le parole chiave "Additive Manufacturing", "Supply Chain" e aggiungendo volta per volta un diverso campo di applicazione per confrontare il numero di articoli pubblicati sull'argomento. La stringa utilizzata è la seguente:

("additive manufacturing") AND ("supply chain") AND ("<campo di applicazione>*")*

Così facendo, si può evincere come in alcuni settori vi sia un numero di applicazioni maggiore rispetto ad altri. Nella *Tabella 1* sono riportati i risultati di questa analisi:

Aerospaziale	49
Medico	62
Militare	9
Automotive	41
Architettura	11
Alimentare	14
Chimico	9
Farmaceutico	8
Ricambistica	100
Mobilità	34
Robotica	16
Edile	26
Marketing	9
Sostenibilità	119
Biomedico	19
Elettronica	6
Gestionale	322

Tabella 1: Numero di articoli trovati per campo di applicazione.

Sono stati trovati 854 articoli, con la suddivisione percentuale descritta nella *Figura 2*:

■ Aerospaziale ■ Medico ■ Militare ■ Automotive ■ Architettura ■ Alimentare ■ Chimico ■ Farmaceutico ■ Ricambistica
 ■ Mobilità ■ Robotica ■ Edile ■ Marketing ■ Sostenibilità ■ Biomedico ■ Elettronica ■ Gestionale

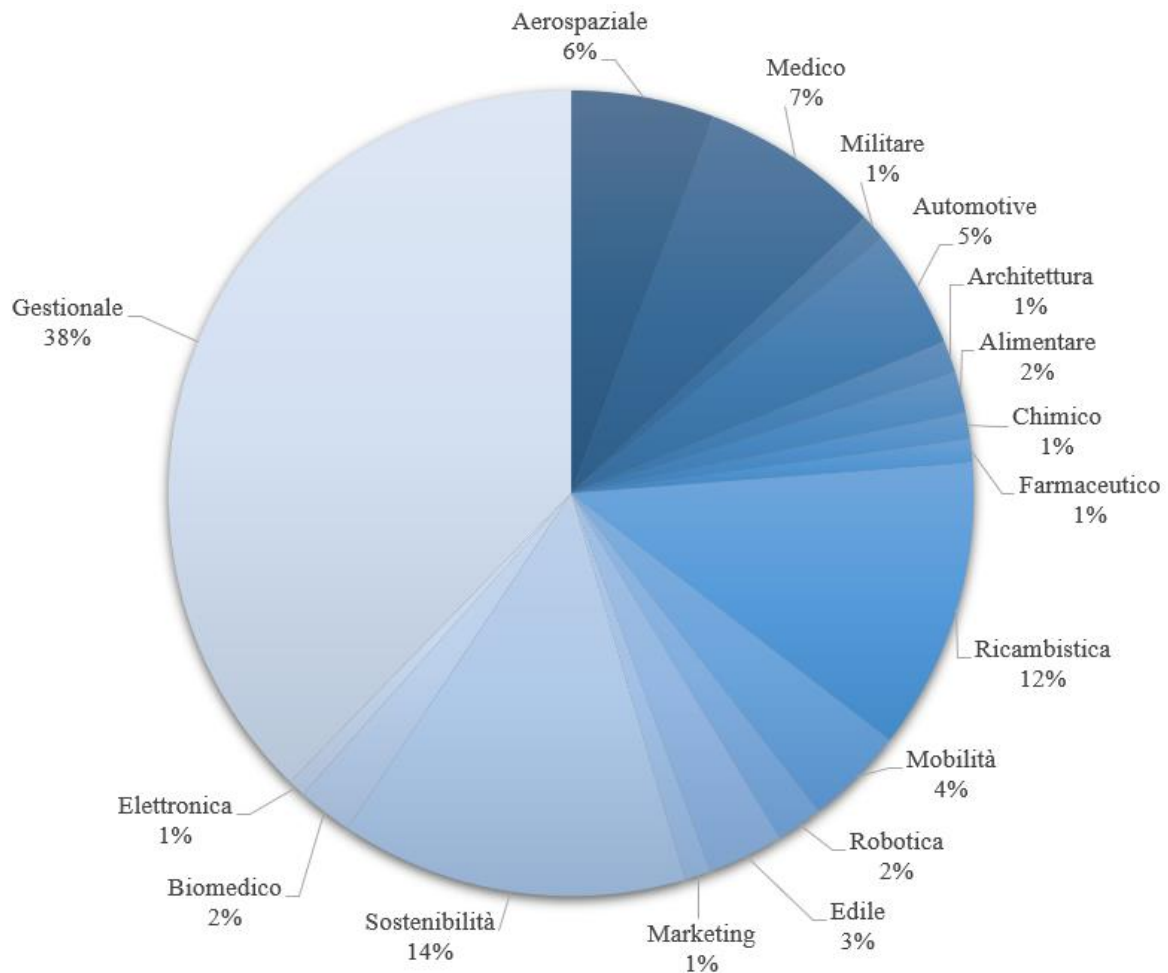


Figura 2: Numero di articoli pubblicati per campo di applicazione.

Questo grafico rispecchia dunque i campi di interesse in letteratura nell'implementazione di questa tecnologia: il gestionale con ben il 38% degli articoli trovati risulta essere il campo di studio più approfondito, seguito dalla sostenibilità (14%) e la ricambistica (12%). Questi risultati rispecchiano le attese in quanto questi tre campi di studio trovano applicazione nei settori più disparati. Tra i settori industriali troviamo applicazioni più diffuse nel campo medico, aerospaziale e automotive con rispettivamente 7%, 6% e 5%.

2.2 Classificazione della letteratura analizzata

Per rendere chiara e comprensibile l'analisi svolta in questo capitolo si descrive la classificazione della letteratura analizzata, mettendo in risalto i criteri utilizzati per strutturare il lavoro.

Gli articoli sono stati scelti e analizzati in quanto presentano diverse somiglianze e punti in comune, a partire da un'analisi dell'influenza del periodo pandemico sulla diffusione di questa tecnologia, che indicano la strada intrapresa dalla ricerca a livello teorico e dalle aziende a livello applicativo.

Molti degli articoli se non tutti, per i quali sono riportate solo alcune citazioni a titolo d'esempio, descrivono in generale la tecnologia AM elencandone vantaggi [7][10][18], limiti [7][20] e barriere all'adozione [6][8] per integrarli successivamente nella gestione della SC [14][15][28][30], mentre un limitato numero di elaborati approfondiscono il confronto tra le tecnologie AM e le tecnologie di Traditional Manufacturing (TM), cioè quelle tecniche di produzione già ampiamente diffuse nell'industria [2][5][6][7][9][15][17][18][21][24][25][27][29]. Questo confronto risulta essere particolarmente utile in quanto mette in evidenza, a seconda delle necessità, i fattori d'interesse per la produzione tramite diversi metodi come modelli matematici, revisioni letterarie, interviste o questionari.

È svolta anche una serie di approfondimenti su tematiche che si sono ritenute rilevanti come i costi di questa tecnologia [2][3][5][7][9][12][14][15][23][29][39], che rimane comunque un argomento comune alla maggioranza degli articoli analizzati in particolare nel confronto AM-TM, le economie di scala che essa può creare [38] e il ruolo del governo [23][30][33].

Come è emerso dalla *Figura 1* i campi di studio di maggior interesse risultano essere il gestionale, la sostenibilità e la ricambistica; dunque, nell'analisi svolta in questo lavoro si approfondiscono e si evidenziano in particolare questi tre aspetti:

- Dal punto di vista gestionale la maggior parte delle fonti analizzate fornisce elementi di analisi sotto diversi aspetti come la struttura logistica della SC [1][2][3][7][22][24] e la centralizzazione o decentralizzazione della produzione [4][7][12][16][24][26]. Viene svolto inoltre un approfondimento sull'influenza che l'AM ha sulle Humanitarian Supply Chain (HSC), campo dove l'AM si presenta come metodo di produzione rivoluzionario [37].
- Dal punto di vista della sostenibilità vi sono fonti che analizzano l'influenza dell'AM nella SC restando su un piano più generale [2][7] o mettendola in relazione con elementi che risultano di forte impatto come la fabbricazione di ricambi [12], i materiali [13] e il tipo di struttura della produzione (centralizzata, decentralizzata, distribuita, mobile) [4][7][12][27][29]. Inoltre, vi sono fonti che analizzano scenari [29] e che definiscono KPI spiegando come l'introduzione di questa tecnologia possa ridurre drasticamente le emissioni [4]. Viene svolto inoltre un approfondimento sull'uso del titanio come materiale di produzione per componenti e ricambi per ridurre il peso e, di conseguenza, le emissioni [13].
- Dal punto di vista della ricambistica le fonti analizzate offrono un panorama sullo sviluppo che sta subendo tramite questa tecnologia, in particolare per il settore aerospaziale [7][12] e automotive [16][23][34], e come questo si rifletta anche nella riduzione delle emissioni tramite riduzione del peso [13]. Inoltre, in alcune fonti è riscontrata l'analisi dei metodi di produzione e di gestione come il Just In Time (JIT) [16] e la relazione che vi è tra la struttura della produzione e della SC e fabbricazione delle parti di ricambio [24]. Viene svolto inoltre un approfondimento su un interessante metodo di produzione mobile, che al momento resta ipotetico [16].

3. Tecnologie dell'Industria 4.0

Come introdotto, nel periodo pandemico, a causa delle restrizioni, un particolare gruppo di tecnologie di cui l'AM fa parte ha cominciato a diffondersi largamente con effetto rivoluzionario e innovativo rispetto al passato, le quali stanno diventando un'importante forza trainante per la trasformazione della SC negli anni post-pandemici: oggi vengono definite tecnologie dell'industria 4.0. Di questo gruppo sono parte l'Analisi dei Big Data (BDA), Internet of Things (IoT), l'Intelligenza Artificiale (AI), Cloud Manufacturing, simulazioni computerizzate e le Blockchain (BC):

- L'Analisi dei Big Data (BDA) è una tecnologia che fornisce preziose informazioni per il processo decisionale aziendale attraverso la raccolta, la pulizia e l'analisi di dati strutturati, semi-strutturati e non strutturati, e può identificare non solo possibili minacce e rischi di interruzione, ma anche prevedere con precisione la futura domanda di mercato, che sviluppa la resilienza, e migliorare l'efficienza delle risorse [31].
- L'Internet of Things (IoT) è una tecnologia che raggruppa in una rete oggetti fisici, macchine e persone, attraverso sensori, software e altre tecnologie integrate allo scopo di scambiare dati con altri dispositivi e sistemi su Internet. Si prevede che il numero di dispositivi IoT attivi supererà i 25,4 miliardi entro il 2030 [31].
- L'Intelligenza Artificiale (AI) è una tecnologia definibile come l'abilità di una macchina di mostrare capacità umane quali il ragionamento, l'apprendimento, la pianificazione e la creatività. Essa permette ai sistemi di capire il proprio ambiente, mettersi in relazione con quello che percepisce e risolvere problemi, e agire verso un obiettivo specifico. Il computer riceve i dati (già preparati o raccolti tramite sensori, come una videocamera), li processa e risponde e ad oggi, è forse la tecnologia 4.0 più comunemente conosciuta e diffusa [32].

- Il Cloud Manufacturing (CM) è un modello di produzione intelligente in rete che abbraccia il cloud computing, con l'obiettivo di soddisfare le crescenti richieste di una maggiore personalizzazione del prodotto, di una più ampia cooperazione globale, di innovazione ad alta intensità di conoscenza e di una maggiore agilità di risposta del mercato. Nella produzione cloud, i clienti possono ottenere comodamente servizi on-demand che supportano l'intero ciclo di vita di un prodotto attraverso l'accesso di rete a un pool condiviso in cui le risorse di produzione distribuite sono virtualizzate e sotto gestione unificata in modo configurabile e ottimizzato [40].
- Le Blockchain (BC) sono definite come registri e database condivisi e distribuiti decentralizzati, immutabili, rintracciabili e trasparenti, che garantiscono un notevole miglioramento della sicurezza, della trasparenza e della visibilità della catena di approvvigionamento [31].

Le simulazioni computerizzate rappresentano una categoria molto ampia che consiste nel simulare eventi in particolari condizioni tramite un calcolatore, ma esse variano a seconda del settore di progettazione dunque non verranno approfondite.

L'applicazione di queste tecnologie permette un netto miglioramento della resilienza e dell'efficacia della SC [31], oltre ad essere la base per la costruzione delle fabbriche intelligenti, ovvero quel tipo di fabbriche di nuova generazione che integrano le suddette ed altre tecnologie nella struttura stessa dell'azienda per garantire migliore qualità, migliori prestazioni e trasparenza nei processi [12].

Nella *Figura 3* è raffigurato a titolo d'esempio come le tecnologie dell'industria 4.0 possano influenzare la digitalizzazione della supply chain, in questo caso per la produzione di parti di ricambio per aeromobili:

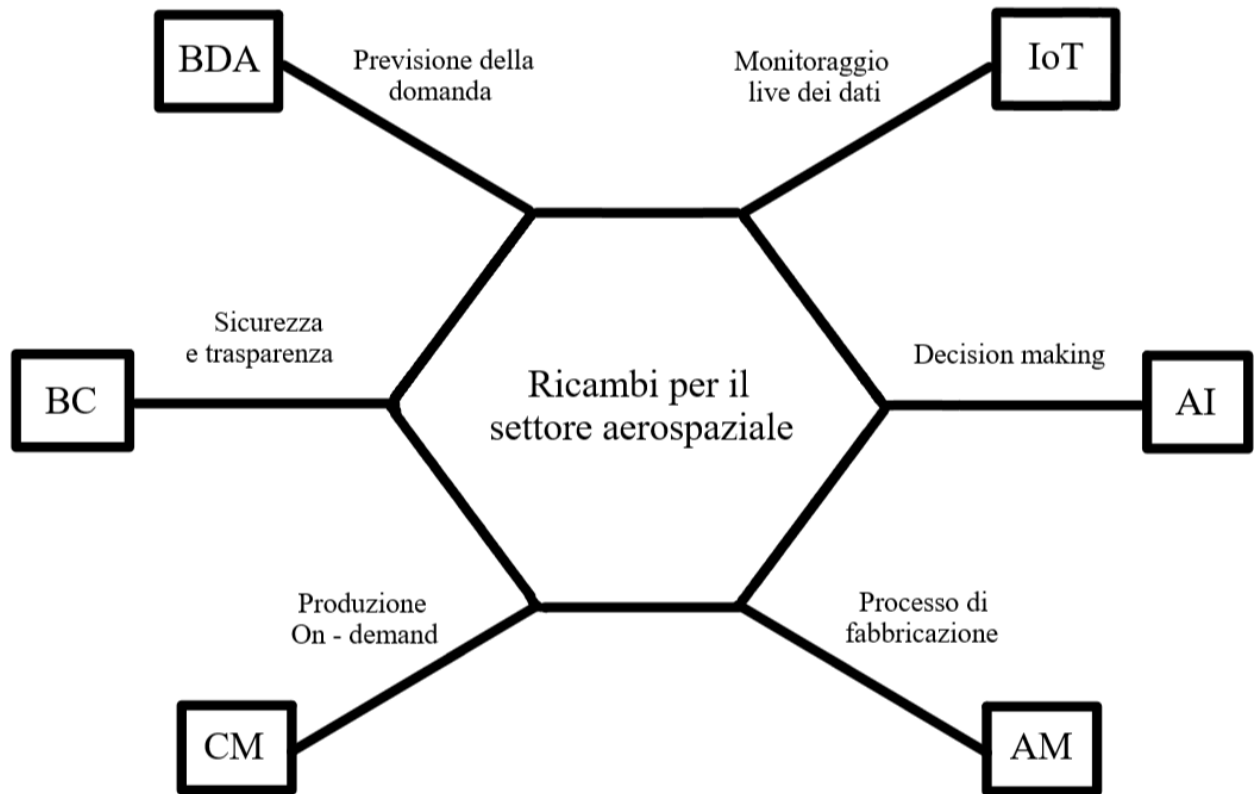


Figura 3: Vantaggi introdotti dalle tecnologie dell'industria 4.0 nella produzione di pezzi di ricambio per il settore aerospaziale (fonte: [12]).

3.1 Caso 1: BC ed ECAM: analisi delle miglorie

Con la diffusione delle tecnologie dell'industria 4.0 e lo sviluppo dell'e-commerce oggi stiamo assistendo alla nascita di un nuovo canale di produzione e distribuzione ibrido definito come ECAM (E-commerce Channels for Additive Manufacturing): per approfondire questo e come l'interazione tra queste nuove tecnologie risulti vantaggiosa e innovativa è stato ritenuto necessario entrare nel merito dello studio [19], ritenendo gli argomenti trattati un importante approfondimento per il futuro sviluppo dell'AM a livello di distribuzione. Il successo di questo nuovo tipo di commercializzazione è dovuto a una produzione flessibile e personalizzata su larga scala, garantita dall'evoluzione delle reti, dalle suddette nuove tecnologie, dalla governance e dalle norme sociali e sviluppando di conseguenza una SC robusta. Questo nuovo tipo di commercializzazione è stato analizzato in questo studio e diviso in quattro categorie differenti in base all'organizzazione dei canali e ai modelli di SC:

- Tele-manufacturing: l'utente crea il proprio design che viene digitalmente trasferito al luogo di produzione e, una volta fabbricato, da lì viene mandato ai centri di distribuzione. Ciò offre una grande opportunità per i progettisti di caricare i design in formato elettronico e accelerare il processo di progettazione del prodotto.
- Collaborative manufacturing: molti centri di produzione si uniscono per soddisfare la domanda del cliente. Ad ogni fase dell'AM e della distribuzione il processo può essere affidato a qualsiasi azienda mediante il subappalto per soddisfare la domanda.
- Localized manufacturing: i centri di produzione sono situati vicino ai clienti dove la domanda è elevata, dunque con struttura decentralizzata. I file CAD 3D scelti dal cliente possono essere caricati sul sito web dell'azienda e la produzione avviene a livello locale per l'utente finale.
- User manufacturing: rappresenta la forma più decentralizzata del canale di e-commerce per l'AM. Si prevede che questo tipo di produzione aiuterà individui eterogenei a servire sé stessi collegandoli tra loro digitalmente, condividendo i propri design in formato digitale e creano e fabbricano i propri prodotti.

Questi nuovi canali di distribuzione necessitano di nuovi supporti per quanto riguarda le operazioni ausiliarie e la produzione stessa e la tecnologia delle BC garantisce un netto miglioramento della sostenibilità e delle prestazioni della SC, oltre al supporto richiesto. Le BC sono nate come un sistema di criptovaluta peer-to-peer chiamato Bitcoin, e sono principalmente un sistema di registro distribuito peer-to-peer con una sicurezza avanzata che utilizza la crittografia a chiave pubblica e l'hashing per qualsiasi transazione o interazione che avviene tra i suoi membri. La nozione basata sulla nomenclatura di "Block" implica la capacità di archiviazione dei dati e la nozione di "Chain" implica un collegamento digitale che lega questi blocchi di dati tra loro. Inoltre, le BC sono considerate un sistema estremamente sicuro in quanto le transazioni vengono attuate attraverso la crittografia a chiave pubblica, conferendo gli aspetti di non ripudiabilità e tracciabilità, anche se tuttavia esse siano ancora in fase di evoluzione e devono maturare in termini di interoperabilità, scalabilità, consapevolezza e problemi infrastrutturali.

Per analizzare analiticamente come le BC abbiano influito sulla SC dell'ECAM e sulla sua resilienza sono state utilizzate tecniche di analisi decisionali e successivamente è stato creato un insieme di mappe cognitive, così che si possa avere una visione chiara dell'influenza di questa tecnologia sulla distribuzione via internet dei prodotti dell'AM. I suddetti metodi verranno ora brevemente descritti:

- Cognitive Analytics Management (CAM): è un framework di nicchia che facilita la generazione di valore analitico attraverso l'interfaccia umana. Si basa su tre processi fondamentali, che sono cognitivo, analitico e di gestione e ha lo scopo di facilitare la trasformazione digitale attraverso la tecnologia e, cosa ancora più importante, creare valore condiviso ottimale per tutte le parti interessate.
- Value-Focused Thinking (VFT): è uno strumento proattivo e creativo per la strutturazione dei problemi che aiuta a identificare i valori e tradurli in obiettivi chiave che vengono ulteriormente strutturati in modo sistematico come obiettivi fondamentali e strategici allineati con l'obiettivo strategico della premessa del problema.

Il framework CAM e il VFT offrono un approccio strutturato per comprendere le esigenze degli stakeholder, generare obiettivi strategici e analizzarne l'impatto nel contesto dell'adozione tecnologica, che in questo caso riguarda l'AM. Nella ricerca si esegue una valutazione esplorativa ed euristica per sfruttare con successo la tecnologia BC in un sistema ECAM sostenibile e resiliente utilizzando le Mappe Cognitive Fuzzy (FCM): esse sono definite come un'analisi basata su scenari utilizzata per indagare l'interazione tra diversi attributi della tecnologia BC che contribuiscono al raggiungimento dell'obiettivo finale. Questa valutazione è svolta variando i parametri degli scenari e dette variazioni sono:

- Massimizzazione della produzione flessibile e sostenibile.
- Massimizzazione della collaborazione tra organizzazioni.
- Investimenti CSR ottimali.
- Massimizzazione del rendimento degli investimenti.
- Massimizzazione della R&S per pratiche sostenibili.
- Massimizzazione della trasparenza delle informazioni.
- Massimizzazione della produzione e delle operazioni ecologiche.
- Allineamento ottimale con le norme e i valori sociali e culturali.
- Massimizzazione delle verifiche di sostenibilità.
- Massimizzazione della governance della piattaforma per la condivisione affidabile delle informazioni.

La variazione dei parametri negli scenari aiuta a massimizzare l'utilità e la creazione di valore condiviso per tutte le parti interessate. In sintesi, questo studio descrive e dimostra come l'ECAM possa essere notevolmente influenzato dalle BC, migliorandone, tra gli altri aspetti, anche la sostenibilità [19].

4. Vantaggi e svantaggi dell'adozione dell'AM nella SC

4.1 Vantaggi

L'AM presenta diversi vantaggi e questi si estendono alla SC e ora verranno descritti. Dal 2013 al 2022 vi è stato un aumento esponenziale della scrittura di articoli su come l'AM abbia influenzato la SC, in particolare nell'ultimo quadriennio durante la pandemia da COVID-19, come esplicito nella *Figura 4*:

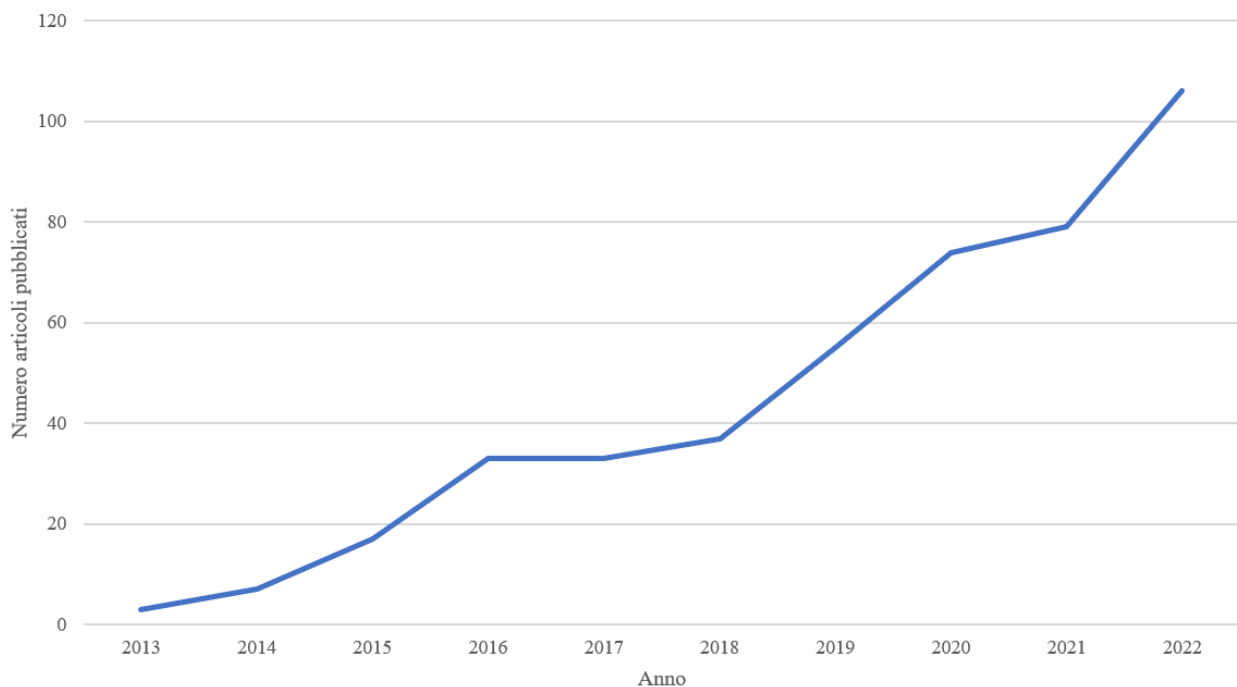


Figura 4: Articoli pubblicati per anno (2013-2022).

I risultati di questa analisi rispecchiano quelli dell'articolo [30], dove USA, Finlandia e Regno Unito risultano essere i tre maggiori produttori di articoli. Gli Stati Uniti inoltre risultano essere i maggiori investitori in questa tecnologia, in quanto sono il paese che presenta più casi di interruzioni lungo la SC a livello di approvvigionamento, produzione e distribuzione e dunque sono i più vulnerabili [30].

La produzione mediante tecniche di AM, a seconda del contesto, può portare diversi vantaggi alle aziende che adottano questa nuova tecnologia. La letteratura scientifica sull'argomento è piuttosto specifica, convergente e concordante sui diversi vantaggi che può portare questa tecnologia, in particolare dal punto di vista economico e ambientale, sostenendo la tesi che essa porti più opportunità che ostacoli.

Grazie all'AM vi è la possibilità di integrare le parti per stampare un prodotto finito in un unico passaggio [1] e con design piuttosto complessi, richiesto in settori specifici come l'aerospaziale [3]. È possibile riprogettare il prodotto anche in funzione del risparmio di materiale: questo può portare una riduzione del peso nel prodotto finito, e dunque questo comporta certamente una riduzione dei costi in termini di materia prima [2].

Come si evince dalla *Figura 5* vi è un significativo guadagno in complessità di prodotto a parità di costo: infatti, l'AM permette di produrre componenti che non hanno bisogno di lavorazioni di complessità pressoché illimitata, cosa che non sarebbe possibile con le tecniche tradizionali, e ciò potrebbe attrarre nuovi clienti con necessità diverse [7]:

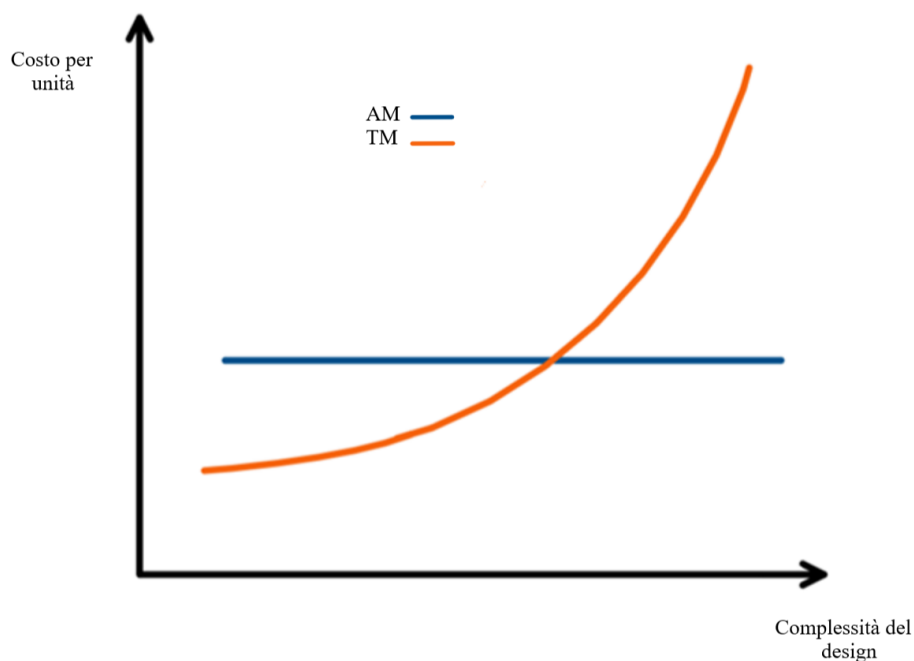


Figura 5: Confronto AM-TM costo della complessità per unità da produrre (fonte: [7]).

Al momento i vantaggi dell'adozione dell'AM nella SC descritti nella letteratura sono molteplici:

- L'AM risulta essere competitiva e conveniente per bassi volumi di produzione, ma con il miglioramento tecnologico previsto sarà sempre più vantaggioso adottare questa tecnologia anche per volumi più consistenti [2].
- Possibilità di produzione in hub o distribuita sul territorio che, a seconda della stabilità della domanda, risultano convenienti per quanto riguarda costi e tempi di consegna [4][23][26].
- Con l'introduzione dell'AM si ha un aumento della flessibilità [9][25], della resistenza e della resilienza della SC [9][27].
- Con l'introduzione dell'AM si ha un aumento della sostenibilità lungo l'intera SC [12][13], anche tramite il minor consumo di energia [24][29].
- Miglioramento della gestione dell'approvvigionamento e dell'inventario, dove è necessario instaurare salde relazioni con gli attori lungo la SC [23] e il magazzino è drasticamente ridotto [15].

L'AM ha inoltre cambiato radicalmente il metodo di progettazione, fabbricazione e distribuzione dei prodotti [29]: essa rende possibile l'aggregazione delle parti in un unico step di produzione riducendo i costi [7] ed eliminando l'assemblaggio, e dunque i componenti non necessitano di diverse lavorazioni in sequenza e la pianificazione è resa più semplice [1].

Vi è un considerevole risparmio di materiale poiché per la produzione con AM viene utilizzato unicamente il materiale strettamente necessario alla produzione e per questo motivo è bene definire il rapporto acquisto-utilizzo (Buy-To-Fly ratio) [4], che è il rapporto di peso tra il materiale grezzo acquistato per un prodotto e il peso del prodotto finale stesso:

$$\mathbf{BTF} = \mathbf{M}_{\text{tot}} / \mathbf{M}_{\text{pezzo}}$$

Il BTF per l'AM è migliore, dunque risulta un ridotto volume di trasporto delle risorse nel primo stadio della rete di approvvigionamento che unito alla riallocazione dei siti produttivi porta a un minore costo di trasporto [1].

Inoltre, con una produzione delocalizzata, l'AM oltre a consentire la riduzione di consumo di materie prime e del tempo di trasporto permette di ridurre i costi di inventario e di imballaggio rispetto alle produzioni convenzionali [2], portando altresì a catene più snelle e brevi in modo parziale o completo [3] portando maggiore efficienza e reattività [7] o, opinione meno diffusa, a catene più ampie a monte con nuovi fornitori integrati [6].

Vi è la necessità crescente di avere personale più che qualificato per la produzione, che di conseguenza migliora la qualità e la formazione dei dipendenti [14], e per questo è importante fare una considerazione sui costi di manodopera: essi hanno un maggior peso nella TM rispetto ai materiali, mentre con l'uso dell'AM questo ragionamento è ribaltato [5].

Oltre a garantire una più rapida evasione degli ordini e una alta personalizzazione del prodotto, l'AM si mostra innovativa all'interno della SC per la particolare integrazione che offre al cliente: esso, a differenza della maggior parte delle SC basate sulla TM, diventa parte integrante della progettazione del prodotto richiesto [9].

Dunque, ora risulta chiaro come l'AM abbia effetto rivoluzionario portando diversi vantaggi nella SC, che possiamo riassumere tramite le cinque dimensioni principali della SC definite nell'articolo [15]:

- Trasporti e inventario.
 - Il trasporto fisico è sostituito da file CAD 3D (riscontrato anche in [16] [20]).
 - L'inventario fisico è sostituito da un inventario digitale (riscontrato anche in [2]).
 - Tempi di trasporto ridotti con struttura decentralizzata (riscontrato anche in [7]).
- Approvvigionamento.
 - Rafforzamento delle relazioni con i fornitori per evitare periodi di improduttività (riscontrato anche in [1] e [15]).
- Relazione produttore/cliente.
 - L'integrazione del cliente nella progettazione garantisce una SC più efficace ed efficiente migliorando le relazioni con il cliente stesso (riscontrato anche in [8]).
- Produzione.
 - La SC diventa più agile introducendo il cliente nella progettazione (riscontrato anche in [2] e [9]).
 - Al crescere della complessità del prodotto crescerà il divario tra i vantaggi offerti da AM e TM (riscontrato anche in [7]).
 - L'esternalizzazione riduce il time-to-market (riscontrato anche in [8] e [29]).
 - L'AM aumenta l'efficienza delle risorse (riscontrato anche in [7] e [4]).
- Manutenzione.
 - Produrre ricambi con l'AM riduce al minimo inventario, processi logistici e tempi di consegna (riscontrato anche in [12]).

4.2 Svantaggi

La tecnologia in questione presenta tuttavia anche alcuni svantaggi e sfide che vanno tenuti in considerazione: in base ai risultati di un particolare studio svolto tramite interviste nel settore la mancanza di una standardizzazione accurata sia sulle materie prime (lato fornitore) sia sui prodotti finiti (lato cliente) può essere un ostacolo all'adozione dell'AM per determinati prodotti. Inoltre, l'AM presenta costi di manutenzione dei macchinari elevati e necessita di personale altamente qualificato per ottenere le caratteristiche desiderate dal cliente [17]. Nonostante la mancanza di conoscenza e formazione sull'argomento sia uno dei più grandi ostacoli all'adozione da superare è previsto un aumento considerevole di resilienza e robustezza della SC con l'AM [30].

Molti metodi di produzione AM necessitano anche di gas inerti da usare nella camera preriscaldata per evitare ossidazioni durante lo stampaggio di polveri metalliche: detti gas sono spesso costosi e, soprattutto, pericolosi, e quindi necessitano di trattamenti e trasporti particolari che innalzano tempi di approvvigionamento, costi e livelli di sicurezza necessari.

Per quanto riguarda il prodotto finito, l'AM non raggiunge i livelli di finitura superficiale che vengono raggiunti dai componenti lavorati con metodologie tradizionali [14].

Un ulteriore ostacolo è rappresentato anche dalla mancanza di un ventaglio di fornitori, che spinge da un lato a creare stretti rapporti con essi, ma dall'altro espone al rischio di interruzioni di fornitura e scarsa qualità o non conformità della materia prima [15].

Nonostante si riscontra una riduzione di costi per bassi volumi di produzione, la riduzione dei costi per unità è ancora il tallone d'Achille di questa tecnologia: dalla

Figura 6, infatti, si evince come all'aumentare delle unità da produrre i costi si stabilizzano ad un livello superiore alla TM nello stesso punto [7]:

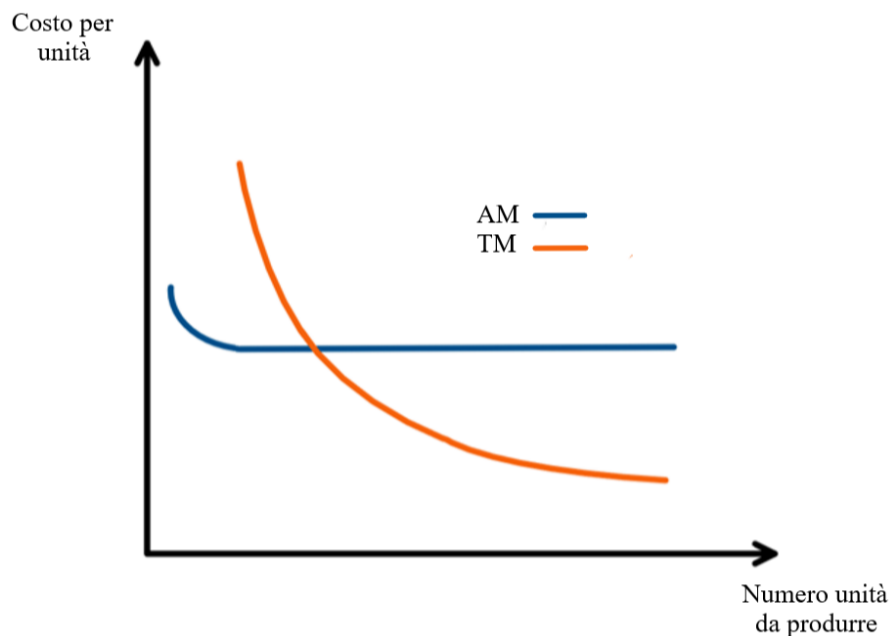


Figura 6: Confronto TM-AM dei costi per unità/unità da produrre (fonte: [7]).

Un driver fondamentale per l'adozione dell'AM è il livello tecnologico: attualmente, il costo e il tempo di produzione dell'AM sono in genere superiori alla TM per la produzione di un prodotto simile, motivo per il quale si parla di piccole produzioni per questa tecnologia, e questa debolezza spesso rende questi processi non economici; tuttavia, le potenziali riduzioni dei costi e dei tempi di AM dovute ai continui miglioramenti tecnologici potrebbero aumentare le preferenze rispetto a TM [29]. Inoltre, il costo dell'energia risulta un parametro fondamentale: infatti, l'elevato o il basso costo dell'energia possono influenzare significativamente un'azienda a perseguire una strategia produttiva piuttosto che un'altra [29].

Nello studio [29] vengono analizzate quattro regioni con differenti condizioni di costo dell'energia e quota di mercato in Europa e nel mondo per confrontare la produzione tramite AM o TM. In totale, sono stati analizzati 64 scenari tramite i diversi approcci produttivi:

1. Regione A (bassa quota di mercato e basso costo dell'energia):
“L’impatto della soddisfazione” risulta l’unico driver che spinge a optare per l’AM rispetto alla TM; pertanto, la soddisfazione del cliente è il motore del successo dell’AM nella SC.
Di 16 scenari analizzati 11 risultano redditizi, in particolare l’AM risulta una scelta di successo se vengono combinati diversi driver.
2. Regione B (elevata quota di mercato e basso costo dell'energia):
Dai risultati riscontrati in 12 scenari dei 16 analizzati i driver rilevanti per l’adozione dell’AM sono “impatto della soddisfazione” e “livello della tecnologia”. Rispetto alla Regione A, con l'aumentare della quota di mercato, l'obiettivo di soddisfare la domanda dei clienti distinguerebbe AM come una strategia migliore rispetto a TM.
3. Regione C (bassa quota di mercato ed elevato costo dell'energia):
Non è stato riscontrato alcun singolo driver che abbia un impatto sulla Regione C. Solo la combinazione di "livello di tecnologia" e "impatto della soddisfazione" potrebbe influenzare la redditività dell’AM rispetto alla TM. Pertanto, la regione C è più resiliente rispetto ad A e B, poiché è stata influenzata in 4 scenari su 16.
4. Regione D (elevata quota di mercato ed elevato costo dell'energia):
Risultati pressoché analoghi alla Regione C.

Un'analisi comparativa delle regioni A e B con C e D evidenzia il "prezzo dell'energia" come uno dei principali driver macroeconomici che incoraggiano l'AM come strategia di produzione nelle SC. Si evince inoltre come essa possa essere una soluzione equilibrata tra la fattibilità economica e il rispetto dell’ambiente, poiché prezzi troppo bassi dell’energia spingerebbero le aziende verso un largo consumo tramite tecniche di TM già consolidate e meno costose rispetto all’AM a parità di prodotto da produrre [29].

4.3 Ostacoli

Non è dunque da sottovalutare la difficoltà che oggi l'industria si trova a fronteggiare nell'integrazione funzionale dell'AM nella SC: per questo, prendendo spunto dall'articolo [8], si raggruppano i principali tipi di ostacoli indagati che è necessario tenere in conto. È stata utilizzata lo stesso metodo di classificazione della fonte [8] poiché si è ritenuto che fosse una suddivisione coerente e funzionale, e questo è confermato dai riscontri ottenuti dagli altri articoli. Molti degli ostacoli analizzati inoltre risultano coerenti con lo status di tecnologia agli albori, che sul percorso di crescita e diffusione è impossibile evitare e che andranno scemando con l'efficienza tecnologica:

- Fattori tecnologici

Sono fattori già riscontrati in altri articoli di analisi e sono intrinseci nella tecnologia stessa, come per esempio la mancanza di infrastrutture adatte e la loro complessità, la mancanza di standardizzazione [8] e la ancora scarsa competenza della manodopera [15][17] al riguardo di questa tecnologia, oltre alla limitata dimensione delle camere [3][6][27] e alla lentezza di produzione [2][6].

- Fattori organizzativi

Sono fattori relativi all'organizzazione dell'azienda, in particolare riferimento al fattore umano al suo interno: mancanza di supporto del top management, riluttanza al cambiamento da parte dei dipendenti o vincoli finanziari possono essere una barriera anche dopo la decisione di voler adottare questa tecnologia [8], anche considerando le difficoltà per la manutenzione [17].

- Fattori istituzionali

Sono fattori esterni e quasi totalmente indipendenti dall'azienda, come per esempio la mancanza di supporto governativo, che influisce fortemente sull'acquisto della macchina dati i costi di investimento attualmente in molti casi proibitivi [23], il basso potenziale di crescita del mercato o l'assenza di pressione competitiva: questi fattori influenzano a livello macroscopico il comportamento dell'azienda e di ciò che le sta attorno [8].

- Fattori economici

Per le grandi produzioni la tecnologia risulta troppo costosa per essere sostenibile e profittevole [7][17], anche dal punto di vista della materia prima [2], oltre a dover considerare il ridotto numero di fornitori e la mancanza di standardizzazione nella produzione della materia prima che, per questi motivi, potrebbe non soddisfare le aspettative e creare perdite [17].

4.4 Risultati del confronto

Come dimostrato, in letteratura si riscontrano molti più benefici che sfide da affrontare nell'adozione di questa tecnologia e questo si evince anche nell'articolo [2] da cui è tratta la *Figura 7*, costruita tramite un query software NVivo:

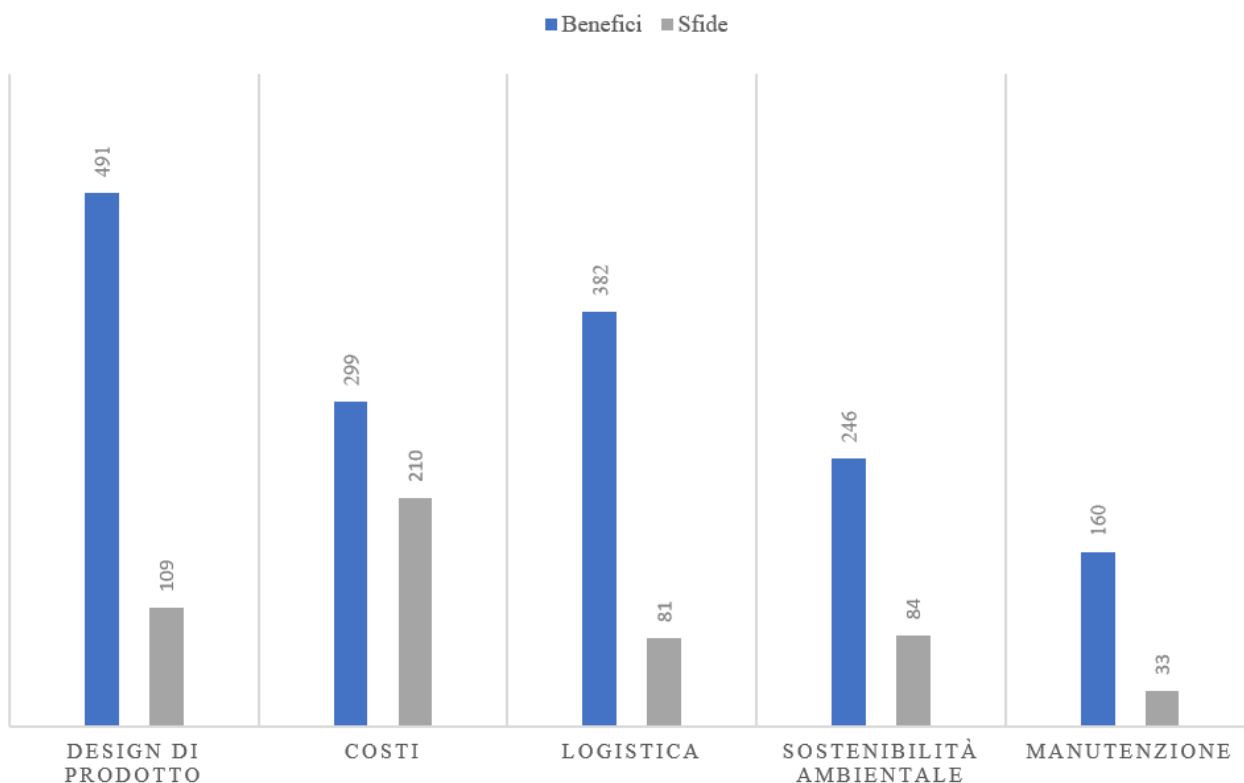


Figura 7: Confronto numero benefici – sfide nell'adozione dell'AM nella SC (fonte: [2]).

Da notare in particolare come la colonna delle sfide sia significativamente più bassa di quella dei benefici sul design di prodotto e sulla logistica: questo denota come la letteratura concordi su quanto detto sulla complessità del design nell'AM e come questa tecnologia possa influire positivamente sulla logistica della SC.

In conclusione, visti i più recenti studi, si può sostenere che l'AM può essere considerata una tecnologia chiave per il futuro, grazie anche all'impatto economico-ambientale studiato [4], che può portare più vantaggi che problemi da questo punto di vista.

5. Analisi dei costi

Un parametro fondamentale tenuto in considerazione dai top management per prendere decisioni strategiche per le aziende è sicuramente quello dei costi: infatti, uno dei maggiori ostacoli che le nuove tecnologie incontrano sulla strada per la diffusione è proprio l'elevato livello di investimenti richiesto e per questo l'adozione dell'AM è da analizzare dal punto di vista dei costi rispetto alla TM e delle potenziali economie di scala. Come si evince dalla *Figura 8* [39], in generale gli investimenti iniziali in termini di prezzo delle attrezzature sono man mano diminuiti nel tempo, e nonostante questo si fermi al 2013 esprime la tendenza che ancora oggi i prezzi delle stampanti 3D stanno seguendo con l'evolversi della tecnologia:

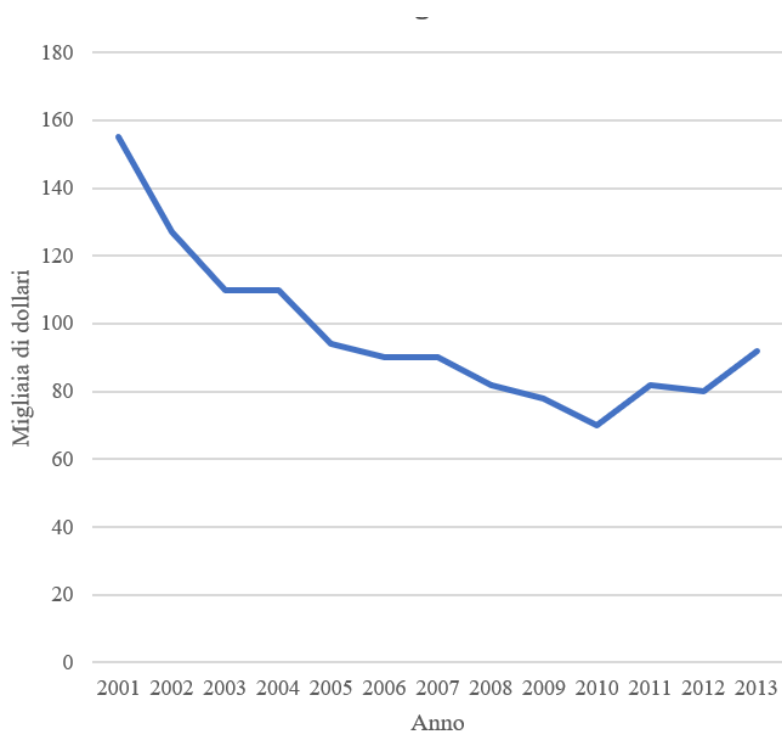


Figura 8: Trend dei prezzi di vendita delle macchine AM 2001-2013 (fonte: [39]).

In questo particolare studio [39] vengono messi a confronto i due principali modelli di costo:

- Modello di Hopkinson e Dickens, che stima il costo per parte come la somma del costo di deprezzamento annuale e il costo di manutenzione della macchina all'anno diviso il volume di produzione, con un risultato costante nel tempo.
- Modello di Ruffo, Tuck e Hague, basato sui costi associati a una particolare attività. Il costo totale di una costruzione è la somma dei costi dei materiali grezzi e dei costi indiretti. I costi dei materiali grezzi sono il prezzo del materiale, misurato in euro per chilogrammo, moltiplicato per la massa in chilogrammi. I costi indiretti vengono calcolati come il tempo totale di costruzione moltiplicato per un tasso di costo. In definitiva però gli autori indicano il tempo e il materiale utilizzati come le principali variabili nel modello.

Nella *Figura 9* [39] si può evincere la struttura dei costi di diversi metodi produttivi dell'AM.

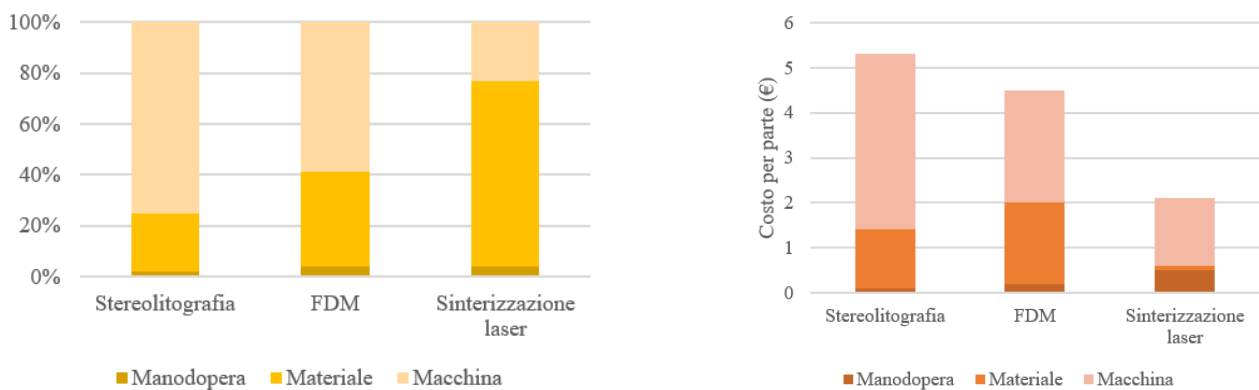


Figura 9: Struttura dei prezzi con metodi AM (fonte: [39]).

In generale, molti degli studi sui costi assumono uno scenario in cui una parte viene riprodotta ripetutamente; tuttavia, uno dei vantaggi dell'AM è la capacità di produrre contemporaneamente componenti diversi; pertanto, un "mix intelligente" di componenti nello stesso run di costruzione potrebbe ridurre i costi. In una produzione di una singola

parte, il costo per parte per una costruzione è il costo totale diviso per il numero di parti; dunque, con la presenza di diverse parti costruite contemporaneamente, calcolare il costo per parte è più complicato. Il confronto tra i due studi è evidente dalla *Figura 10* [39]:

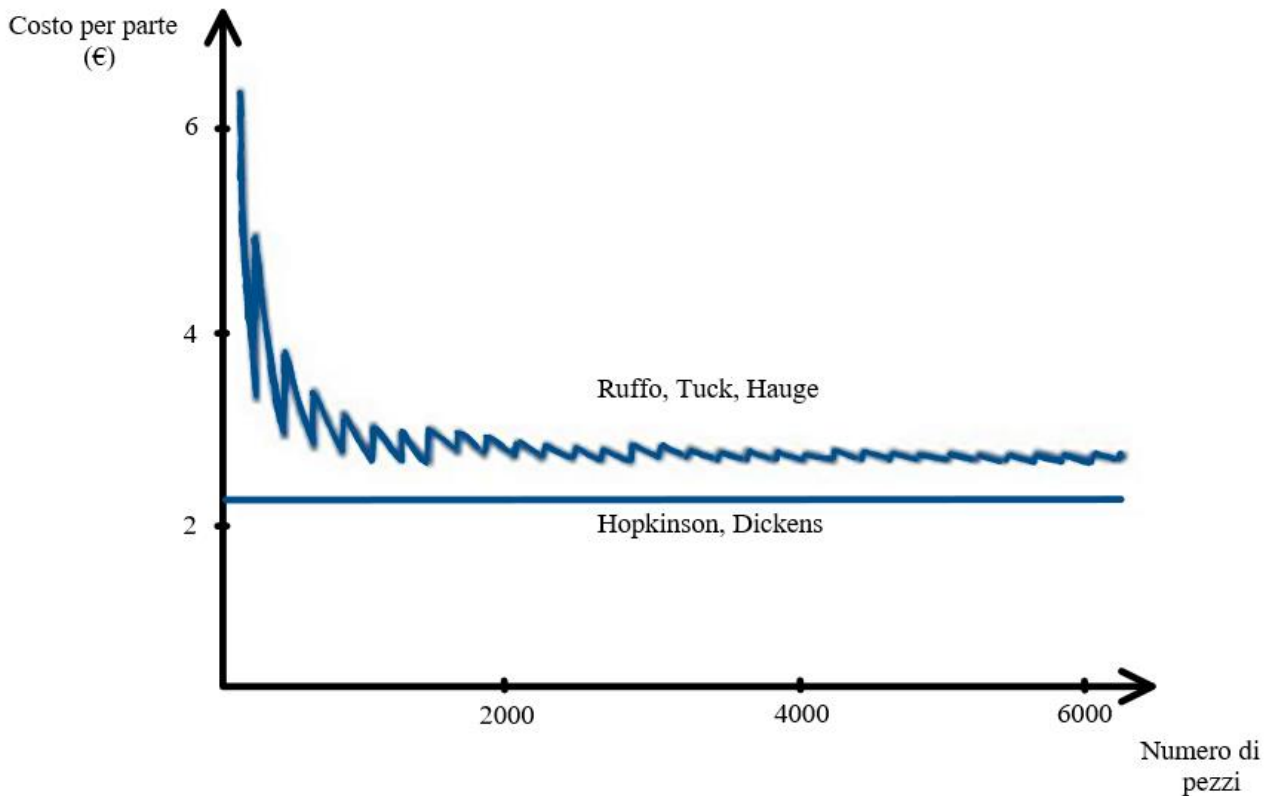


Figura 10: Trend dei costi nei due studi (fonte: [39]).

5.1 Benefici di costo nella SC

Nell'analisi descritta finora viene anche spiegato come tanti vantaggi economici derivino non solo dalla produzione vera e propria ma da tutti gli elementi presenti nella SC: per la

prima è importante notare come la riprogettazione dei componenti al fine di utilizzare meno materiale e produrre più parti insieme senza necessità di sottocomponenti, che altrimenti necessiterebbero di lavorazioni personalizzate, può diminuire il costo unitario [2][17]. Dato che l'AM offre vantaggi a livello di progettazione e personalizzazione, gli autori dell'articolo [23] definiscono il fattore di complessità modificato FCM, che combina complessità, personalizzazione e volume di produzione, specificando come se esso risultasse alto l'AM avrebbe un costo minore della TM [23].

È bene notare inoltre come:

- Grazie al riciclo della polvere a fine lavorazione è possibile ridurre i costi di fornitura anche del 50% [9].
- Grazie alla produzione in un solo step di più componenti, vi sono anche notevoli risparmi sui costi di assemblaggio [17].
- Grazie alle strutture di SC decentralizzate possono esserci risparmi sui costi di trasporto [15].
- Grazie agli inventari virtuali è possibile avere risparmi sui costi di inventario [5].

Nello studio [39] viene messo in luce l'esempio di un assemblaggio di un'automobile: un dollaro investito nell'assemblaggio impiega 10,9 giorni per tornare in revenue. Infatti, trascorre 7,9 giorni in scorte di materiali, in attesa di essere utilizzato, 19,8 ore in produzione e altre 20,6 ore in inattività quando lo stabilimento è chiuso. Successivamente altri 1,3 giorni sono trascorsi in scorte di prodotti finiti: si nota che del tempo totale utilizzato solo l'8% è dedicato alla produzione effettiva. Secondo i concetti del lean manufacturing, le scorte e l'attesa, che costituiscono il 92% del tempo dell'assemblaggio automobilistico in questione, sono due delle sette categorie di sprechi [39].

Questo riguarda solo l'assemblaggio di un'automobile, poiché la produzione dei di motore, sterzo, sospensioni, trasmissione, carrozzeria e altri componenti spesso avviene separatamente e ha anche inventari propri e tutte queste parti vengono trasportate tra diverse posizioni: le risorse spese per produrre e immagazzinare questi prodotti potrebbero essere state utilizzate altrove se il bisogno di inventario fosse ridotto [39].

Un motore è uno degli esempi portati dagli autori per mettere in risalto i vantaggi economici e logistici dell'AM: se venisse stampato tramite questa tecnologia garantirebbe meno uso di materiale, funzionamento più efficiente e maggiore vita poiché il design non sarebbe limitato ai metodi utilizzati nella TM, oltre a non richiedere viti, bulloni o assemblaggi dei semilavorati e ridurre alcuni dei costi intermedi delle parti. Per questo, poiché l'AM può potenzialmente costruire un intero assemblaggio in un'unica produzione, riduce la necessità di alcuni costi di trasporto e di inventario, con conseguenti impatti lungo tutta la SC [39].

Un altro esempio di risparmio sui costi di produzione è portato dagli autori dell'articolo [12], dove viene spiegato come sostituendo la fresatura con l'AM per la produzione di un ricambio per un elicottero si passi dallo spendere in totale 2000 dollari a 412 dollari [12].

5.2 Economie di scala

È importante anche indagare come l'AM possa creare economie di scala, che non sono state propriamente studiate in quanto essa è al momento diffusa in gran parte per la prototipazione rapida o per bassi volumi [9] [15]. L'economia di scala si ottiene nel

momento in cui è possibile ottenere un risparmio sui costi aumentando il livello di produzione e costituisce un fattore chiave del concetto di rendimento di scala, spesso definito utilizzando la funzione di produzione di Cobb-Douglas [38].

In effetti, risulta più difficile ottenere economie di scala nella produzione di parti personalizzate poiché i costi di produzione vengono allocati a un numero inferiore di unità, dunque questo tende ad essere una sfida [14].

Lo studio [38], che è stato approfondito in quanto risulta interessante il tentativo di offrire una soluzione al problema delle economie di scala nell'AM, divide le economie di scala della TM in due gruppi:

- Statiche: esse riflettono l'effetto dell'utilizzo della capacità, basandosi quindi sulla relazione tra dimensione della macchina, costo unitario e l'effetto della produzione di un determinato volume, ovvero i costi indiretti derivanti dall'uso delle macchine, come il costo di cambio utensile.
- Dinamiche: esse portano essenzialmente a riduzioni dei costi con il progredire dell'attività manifatturiera, basato sull'accumulo di conoscenza. La ripetizione di un processo standard costruisce uno stock di asset che risiede all'interno di un'azienda manifatturiera conferendo efficienza. Inoltre, consente l'identificazione e l'eliminazione di passaggi di processo non necessari e la riduzione di variazioni indesiderate, e tramite la definizione di potenziali problemi, misurazione del processo, ideazione di miglioramenti e verifica della loro efficacia garantisce una riduzione dei costi nel tempo.

Nella TM i costi indiretti della produzione, come la sostituzione degli utensili di lavorazione, sono compensati dall'alto volume di produzione: questo non avviene nell'AM, dato che non esistono utensili per le lavorazioni, ma vi sono costi indiretti di altro tipo da dover considerare, compensati dalla saturazione del volume della macchina o affittando la capacità inutilizzata, come manodopera, utilizzo dei materiali e consumo di energia per analizzare eventuali economie di scala statiche [38].

Come risultati di questa supervisione, senza contare i rischi legati al fallimento della produzione, si è notata una significativa riduzione del costo unitario saturando il volume di produzione (79%) e aumentando la produttività della macchina (52,2%): questi risultati suggeriscono che le economie di scala statiche derivanti dall'aumento della produttività e dall'utilizzo efficiente della capacità hanno effetto più o meno analogo a quelli riscontrati nella TM nonostante l'assenza di attrezzature fisiche dedicate [38].

Per quanto riguarda le economie di scala dinamiche è stato studiato inoltre se l'apprendimento dell'operatore nel tempo si tradurrebbe in una diminuzione del costo unitario, confrontando i risultati raggiunti da un operatore esperto rispetto a quelli raggiunti da un operatore inesperto, con risultati contrastanti: in media, non è stata trovata una discrepanza significativa in termini di tempo (solo il 7,2%), tuttavia l'operaio inesperto presenta un consumo di polvere vergine quasi doppio rispetto ad un operatore esperto. Dunque, la riduzione del consumo di materie prime indica un reale effetto di apprendimento, che è il principale fattore responsabile della differenza di costo unitario osservata al massimo utilizzo della capacità tra gli operatori principianti ed esperti, risultando di 33,42 dollari e 21,23 dollari rispettivamente [38].

Sempre riguardo alla polvere vergine ma indipendentemente dall'operatore, potrebbero anche esserci economie di scala nei costi delle materie prime se determinati materiali diventassero più comuni piuttosto che una molteplicità di materiali diversi [39].

6. Il ruolo del governo

Dato il ruolo rivoluzionario che l'AM sta svolgendo nella SC e più in generale in gran parte delle industrie è inevitabile non tenere conto nello studio del ruolo che l'ente governativo ricopre, in particolare come soggetto che potrebbe essere arbitro della diffusione che questa tecnologia potenzialmente potrebbe avere. Dati i vantaggi portati da questa nuova tecnologia discussi in precedenza, ad oggi molti governi stanno effettuando ingenti investimenti per aggiornare le SC esistenti e ottenere un vantaggio competitivo: in particolare, l'adozione dell'AM può favorire il fenomeno del reshoring e dunque lo sviluppo dell'industria interna del paese e delle esportazioni. Come già descritto in precedenza, oltre ad essere il paese più attivo nella pubblicazione di articoli sull'influenza dell'AM sulla SC, gli Stati Uniti risultano essere i maggiori investitori in questa tecnologia, in quanto sono i più vulnerabili alle interruzioni lungo la SC [30]. Oltre ad essi, come descritto dalla fonte [23], diversi altri paesi sembrano intenzionati a creare un cospicuo pacchetto di investimenti al riguardo:

- Cina: nel 2015, il Ministero cinese della Scienza e della Tecnologia ha annunciato un progetto con un investimento di 2 miliardi di RMB (circa 313 milioni di dollari) nella tecnologia di additive manufacturing in tre anni.
- India: il governo indiano sostiene la produzione locale attraverso un programma Make-in-India, in cui la produzione locale di beni è facilitata attraverso l'AM.
- Francia: il governo francese, attraverso il progetto collaborativo FAIR (acronimo francese per Additive Manufacturing for the Intensification of Reactors), distribuirà 10,5 milioni di euro alle aziende francesi per lo sviluppo dell'AM.
- Europa: Brightlands Chemelot Campus (Olanda) e Centexbel (Belgio) hanno sviluppato un progetto di hub per l'AM e 1,3 milioni di euro del suo fondo di 3 milioni di euro è fornito da una sovvenzione del programma Interreg dell'UE.
- Corea del Sud: Il Ministero della scienza, delle TIC e della pianificazione futura ha speso 41,2 miliardi di won (circa 37 milioni di dollari) per incoraggiare lo sviluppo dell'AM in tutta la nazione.

Per quanto riguarda l'Italia nel periodo post pandemico tramite i fondi del PNRR sono stati stanziati 13,381 miliardi di euro (a cui si aggiungono 5,08 miliardi del Fondo complementare) con l'obiettivo di promuovere la trasformazione digitale delle imprese incentivando, attraverso il riconoscimento di crediti d'imposta, gli investimenti privati in beni e attività a sostegno della digitalizzazione dei processi e l'implementazione delle tecnologie dell'industria 4.0 [41].

A prescindere dal paese d'origine, diversi grandi produttori e aziende che storicamente hanno usato tecnologie di TM ad oggi stanno investendo e adottando l'AM [23]:

- General Electric ha investito 3,5 miliardi di dollari nell'AM nel 2013, utilizzando questa tecnologia per produrre in serie parti per i suoi motori LEAP e GE9X.
- Disney ha investito nell'AM e nel 2016 ha depositato tre nuovi brevetti correlati, oltre ad acquistare MakieLab, una startup che con core business lo stampaggio di action figure in 3D.
- Per il settore medico in un report del 2019 SmarTech Analysis sostiene che la ragione dell'aumento della diffusione dell'AM è che lo sviluppo di impianti ortopedici e corone dentali sono ora facilmente stampabili in 3D.
- Per il settore delle energie rinnovabili Gagiet in un articolo del 2018 afferma che l'AM manufacturing porta a pannelli solari più economici e convenienti.

Lo studio [23] che prendiamo in considerazione ora viene approfondito poiché descrive con sufficiente precisione la SC come un gioco di Stackelberg leader-follower ripetuto con un produttore che vende un singolo prodotto all'ingrosso ad un rivenditore, dove il produttore è considerato il leader in quanto è il soggetto che inizialmente stabilisce la struttura dei prezzi, e risulta particolarmente versatile in termini di applicazione. Questa analisi fornisce uno scenario innovativo: il rivenditore può decidere di acquistare, allo stesso prezzo del produttore, una stampante 3D.

Se questo accadesse, si renderebbe perdente il fornitore stesso dal punto di vista produttivo, poiché il rivenditore si renderebbe capace di produrre da solo, tramite l'acquisto di disegni CAD 3D o reverse engineering: risulta evidente come il mercato si sposterebbe dall'acquisto di prodotti finiti tramite AM dal produttore all'acquisto di disegni CAD 3D che andrebbe analizzato diversamente.

Dopo un'attenta analisi della struttura della SC, dei prezzi, del minimo profitto per entrare nel gioco e dei vari scenari possibili, i risultati mostrano che il rivenditore nella SC centralizzata non opterebbe per l'AM, mentre nella decentralizzata opterebbe per l'acquisto: se ciò accadesse, una soluzione per incentivare il rivenditore a non discostarsi da una SC centralizzata sarebbe un sussidio governativo.

Dunque, si rende necessario introdurre in questo gioco di Stackelberg il governo come terza parte e come nuovo leader, che ha interesse nell'introdurre l'AM nella SC tramite un sussidio a costo minimo.

Il sussidio riguarda il costo dell'investimento, quindi il suddetto sovvenzionamento non riguarda il cliente finale ma le aziende presenti nel gioco (produttore e rivenditore), considerato come indipendente dalla quantità e inteso a compensare il costo fisso di acquisizione di una stampante 3D.

Analizzando la questione dal punto di vista del produttore si nota come il costo K della macchina sia il nodo fondamentale del problema. Infatti, i costi proibitivi della tecnologia rendono ancora difficile l'adozione dell'AM, considerando che si può raggiungere lo stesso risultato tramite la TM con maggior profitto, per la quale risulta necessario l'intervento del governo. Lo studio quindi conclude che:

- Se il costo K della macchina è sufficientemente alto il sussidio governativo integra il profitto del produttore rendendolo altrettanto vantaggioso rispetto alla produzione tradizionale dal punto di vista del profitto.
- Se il costo K della macchina è sufficientemente basso il sussidio governativo non risulta necessario poiché il produttore acquisterà da sé la macchina, in quanto l'AM, secondo il modello matematico di questo studio, porta a profitti maggiori.

Al momento è dunque necessario che il governo istituisca un programma di sussidi, in quanto il costo delle stampanti 3D risulta ancora molto elevato, ma, con la tendenza dei suddetti costi a diminuire man mano in futuro, il programma di sussidi non risulterà più necessario.

Tale discorso è valido anche per il rivenditore, considerando inoltre che il produttore può decidere di porre una tariffa ai rivenditori stessi che andrà a sua volta compensata per tenere i suddetti su una SC che non includa l'acquisto in proprio: questo sistema, però, non risulta immune alla doppia marginalizzazione che si viene a creare da monte a valle.

Per riassumere quindi, lo studio sostiene che se solo il produttore adottasse la tecnologia AM entrambi gli attori ne trarrebbero vantaggio, pur non evitando il fenomeno della doppia marginalizzazione, mentre se solo il rivenditore adottasse l'AM, il produttore trarrebbe vantaggio, ma il rivenditore no: questo risultato è dovuto al vantaggio di cui il primo può godere tramite le vendite e le licenze d'uso dei CAD 3D. Risulta interessante, però, che l'effetto della doppia marginalizzazione viene eliminato e il rivenditore assumerebbe abbastanza potere da coordinare la SC [23].

In conclusione e più in generale, il governo risulta essere un elemento chiave, poiché esso può essere l'asse di trazione del cambiamento necessario nell'industria, come ad esempio dimostrato dalle dichiarazioni del governo statunitense nel 2022, le quali invitavano, tramite incentivi, all'adozione dell'AM nella SC anche per piccole imprese [33]. Le conseguenze delle scelte geopolitiche nazionali e internazionali hanno una posizione preminente e una influenza determinante sull'industria e sull'economia stessa, e dunque il governo, tramite investimenti e leggi dedicate, può accelerare o meno l'adozione di questa nuova tecnologia e i cambiamenti che da essa derivano. Inoltre, il governo riveste un ruolo chiave dal punto di vista ambientale: infatti, una politica che incentivi una riduzione delle emissioni potrebbe essere un fattore trainante della diffusione dell'AM [29].

7. Strutture della produzione

Introducendo una tecnologia così dirompente nella SC è inevitabile che non vi siano dei cambiamenti, sia sulla produzione che sulla distribuzione, a livello strutturale e questo è l'aspetto che ora verrà indagato. Considerando quelle aziende che ad oggi hanno già deciso di implementare la loro struttura adottando l'AM, la letteratura è concorde nei diversi casi di analisi sull'argomento che struttura della produzione è stata ed è influenzata consistentemente [1][2][3][4][7][12][15][24][26][27][29]: in particolare, si è notato come adottando l'AM vi sia stata una tendenza in diversi casi a decentralizzare la produzione. La *Figura 11* mostra la struttura di una SC per una produzione con metodi tradizionali (TM):

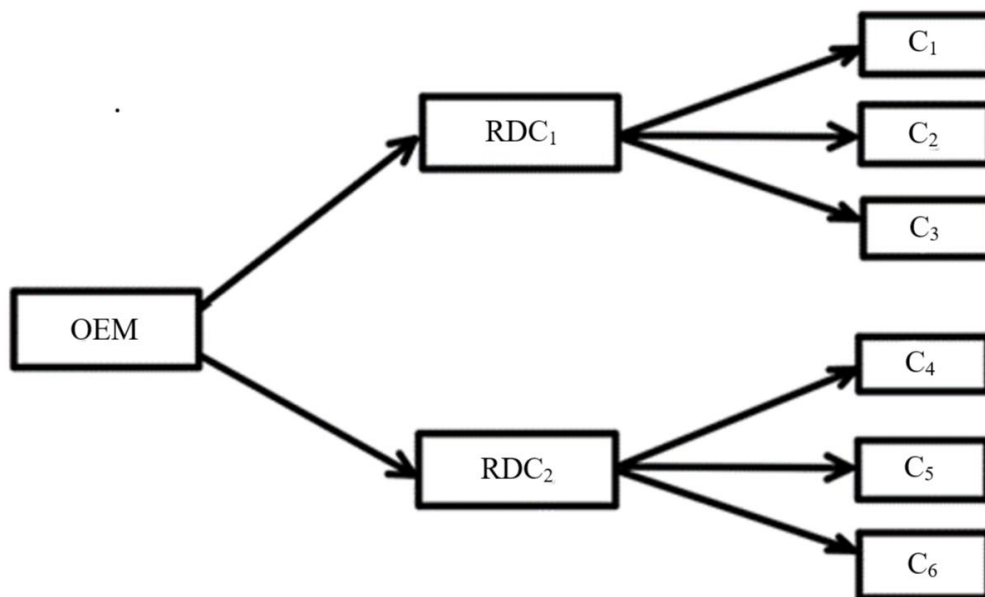


Figura 11: Struttura di una supply chain in TM, con un produttore (OEM), due centri di distribuzione (RDC_i) e i clienti finali (C_i) (fonte: [24]).

Dunque, si può definire la struttura della nuova SC in tre modi:

- Centralizzata (*Figura 12*), le materie prime vengono fornite alla fabbrica, che attua la produzione concentrata in un luogo solo, per poi distribuire i prodotti finiti ai clienti.

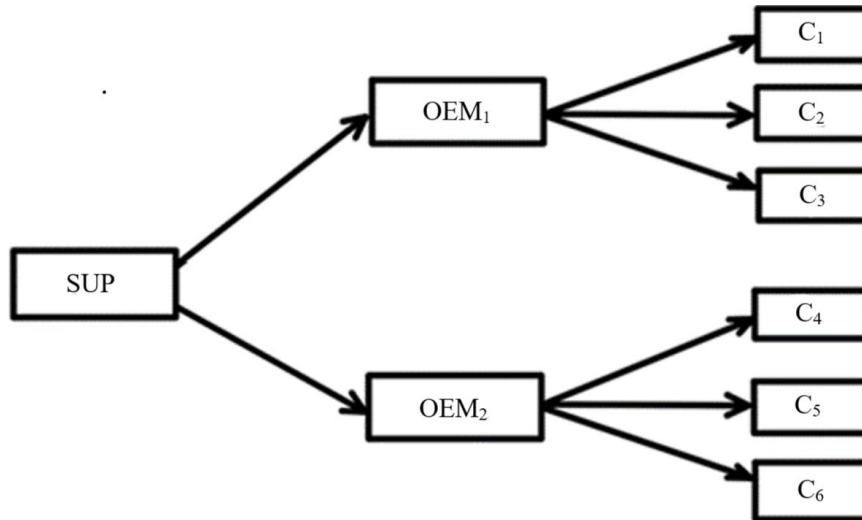


Figura 12: Schema della supply chain centralizzata con fornitori (SUP), produttori (OEM) e clienti finali (C) (fonte: [24]).

- Decentralizzata (*Figura 13*), che coinvolge diversi impianti ma più vicini ai clienti finali con conseguenti risparmi sui costi [2] e sui tempi di trasporto [3].

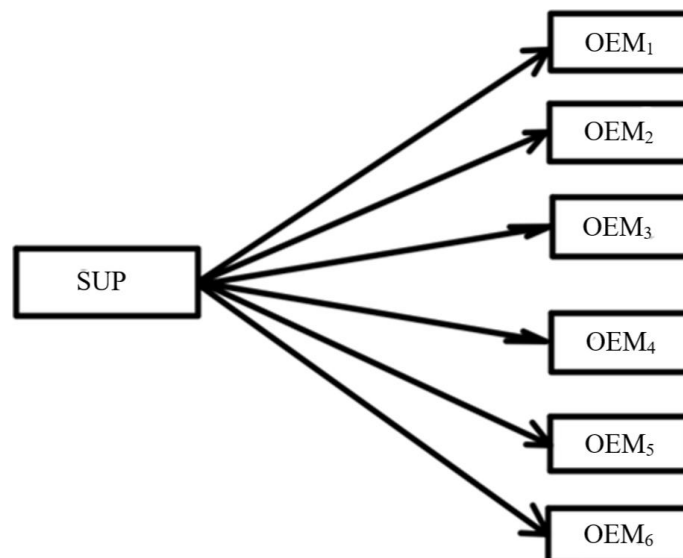


Figura 13: Struttura di una supply chain decentralizzata, con un fornitore (SUP) che rifornisce gli hub dislocati sul territorio, che possono essere dei produttori o addirittura i clienti stessi con produzione in reshoring (OEM_i) (fonte: [24]).

- Ibrida.

In generale, l'AM ha sicuramente un impatto positivo sui parametri prestazionali della SC, in particolare sulla flessibilità [25], sulla reattività [22] e sull'efficienza [16], ma i risultati dei diversi studi citati offrono opinioni discordanti sulla struttura da adottare, sebbene concordino sui suddetti benefici sull'adozione di questa tecnologia. Lo studio [24] descritto nell'elenco puntato giunge alla conclusione che S2 e S3 presentano costi del ciclo minori rispetto a S1, tra cui costi di trasporto e costi fissi e variabili minori, i primi dovuti alla delocalizzazione, i secondi dovuti a strategie di affitto delle macchine.

Lo studio [7] sottolinea come le strutture decentralizzate siano state particolarmente utili durante la pandemia da COVID-19, in quanto la distribuzione sul territorio ha permesso di mitigare la mancanza di approvvigionamento per le produzioni.

Altri autori confrontando le tre configurazioni sottolineano i diversi vantaggi che presentano: la produzione centralizzata consente l'aggregazione della domanda e l'uso efficiente delle macchine, considerando un flusso a cascata monte-valle che inizia dai fornitori e termina al cliente finale, mentre, tramite un cambio d'organizzazione interno che consiste nel ridisegnare il flusso di produzione, la decentralizzata permette di avere reti di approvvigionamento e distribuzione più corte, costi di capitale minori e possibilità di fare outsourcing [4].

Con la diffusione dell'AM, tuttavia, si sta assistendo al fenomeno di reshoring, vale a dire l'operazione inversa e successiva all'outsourcing: quest'ultimo consiste nel delocalizzare determinati tipi di lavoro esternamente alla fabbrica, anche all'estero e a oggi si comincia ad assistere al rientro di queste produzioni nell'azienda e, più in grande, nel paese d'origine [7].

I parametri della SC analizzati tramite KPI in un secondo studio sostengono che lo scenario decentralizzato offra in conclusione le migliori prestazioni nonostante la produzione centralizzata utilizzi meno macchinari, ma non è stata considerata una struttura della SC ibrida [26].

Inoltre, vi è anche un ulteriore studio di simulazione che analizza i trasporti a due stadi (fornitore-produttore-cliente), che dimostra che gli scenari con l'adozione dell'AM i produttori hanno la tendenza ad avvicinarsi ai clienti rispetto a quelli senza adozione: grazie a questa tecnologia, la proporzione dei chilometri nel primo stadio diminuisce e la proporzione dei chilometri nel secondo stadio aumenta, con una diminuzione della distanza totale, della distanza richiesta al cliente e dei i costi di trasporto complessivi [1].

Questi fattori sono subordinati e quindi influenzati dal concetto di configurazione definito in precedenza: dalla letteratura risulta che per una SC più efficace e flessibile è preferibile una struttura decentralizzata, più vicina al cliente sia in termini di progettazione di prodotto che di tempi di consegna anche per un mercato volatile, dove è comunque difficile ottenere efficienza con una domanda in cambiamento continuo. La struttura decentralizzata è risultata estremamente utile nel triennio 2020-2022 per il settore medico, poiché con l'avvento della pandemia da COVID-19 si è riuscito a creare i kit medici necessari eliminando i nodi intermedi nella SC, che durante il periodo pandemico globale sono risultati un fattore critico, e i tempi di trasporto [7], dando vita a quella che è definita come SC antifragile [18].

La *Figura 14* è esplicativa sulla classificazione dei sistemi di produzione nella SC in base alla tecnologia esistente [29]:

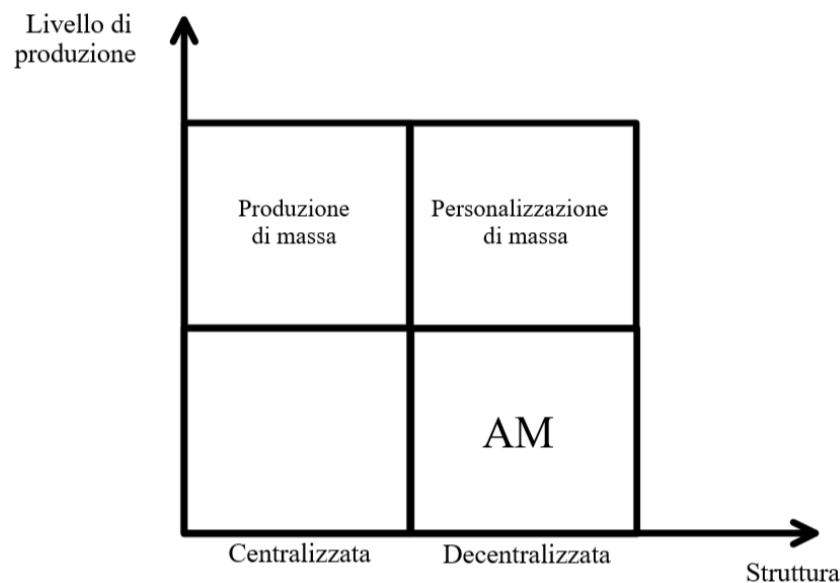


Figura 14: Adozione della struttura centralizzata o decentralizzata in base al livello di produzione (fonte: [29]).

Ad oggi, la struttura ibrida è ancora in fase sperimentale.

Al momento il confronto tra le altre due strutture indagate dimostra che la produzione centralizzata tramite AM è generalmente più economica rispetto alla produzione decentralizzata, specie per bassi volumi [24], ma con l'aumento dell'automazione si prevede che la quest'ultima diventerà predominante, considerando l'abbassamento futuro del costo della tecnologia: con la riduzione del lead time, dei costi di trasporto e mantenimento [12], la struttura decentralizzata risulterà essere la migliore nel caso in cui si decidesse di implementare l'AM [29].

In generale i parametri della SC presi in considerazione (tempi, costi, approvvigionamento, stoccaggio, trasporti...) tendono a consigliare l'adozione dell'AM, quale che sia la struttura scelta, per bassi volumi [24].

7.1 Caso 2: il ruolo dell'AM nelle HSC

L'AM ha avuto notevole impatto sulla SC in tutti i settori dove essa è stata introdotta: uno di questi settori è quello umanitario, il quale è stato scarsamente trattato in letteratura, ma uno studio del 2020 ha raggruppato e implementato la conoscenza in materia, che ora verrà esposta in quanto si ritiene che esso non abbia ancora ricevuto l'attenzione che merita nel panorama della ricerca e che l'AM possa rivoluzionare le odierne concezioni di SC in questo particolare ambito, pensando all'utilità che potrebbe avere di fronte alle recenti catastrofi naturali accadute, come l'alluvione in Libia o il terremoto in Marocco. Esistono diversi punti di somiglianza tra le SC tradizionali e quelle umanitarie (HSC), tuttavia queste ultime si differenziano per essere notoriamente imprevedibile, con risorse limitate, soggetta a ritardi e picchi improvvisi della domanda, ma l'ubicazione di una stampante 3D lungo la SC potrebbe avere implicazioni diffuse per quanto riguarda la logistica, il rinvio e la formazione [37]. Questo lavoro indaga il ruolo dell'AM in caso di calamità: per esempio, per lo stampaggio di prototipi di robot e UAV, produzione di rifugi, insediamenti e beni non alimentari tutti in situazione emergenziale [37]. Nello studio [37] preso in considerazione sono state contattate undici organizzazioni umanitarie presenti su territori di paesi con reddito medio-basso, in genere dell'emisfero Sud del pianeta, che sono state intervistate in quattordici mesi analizzando le principali iniziative del settore che ad oggi risulta ancora molto piccolo. Il tipo di interviste utilizzato è semi-strutturato, con tre parti principali:

- In primo luogo, gli intervistati sono stati invitati a descrivere il (o un tipico) prodotto stampato in 3D che l'organizzazione ha sviluppato.
- In secondo luogo, sono state poste loro domande sulla SC del prodotto, al fine di evidenziare le principali differenze tra la SC.
- Terzo, è stato chiesto loro di riflettere sugli impatti dell'AM sulle Critical Supply Sources (CSS), spiegando in che modo l'AM ha contribuito ad affrontare le sfide della SC.

Sono state inoltre poste domande più ampie sui vantaggi e le sfide dell'utilizzo dell'AM nel settore umanitario.

In totale, nell'articolo [37] sono state condotte quarantuno interviste, comprendendo sia casi simili tra loro che casi molto diversi. Nell'analisi dei dati dello studio in questione sono emerse le stesse strutture della SC analizzate in precedenza; dunque, si coglie questa occasione per mostrare degli schemi delle SC analizzate, per portare dare al lettore una concreta visione di come sia fatta una SC reale una volta implementata l'AM. Le strutture di cui si parla corrispondono a:

- Centralizzata, mostrata in *Figura 15*.

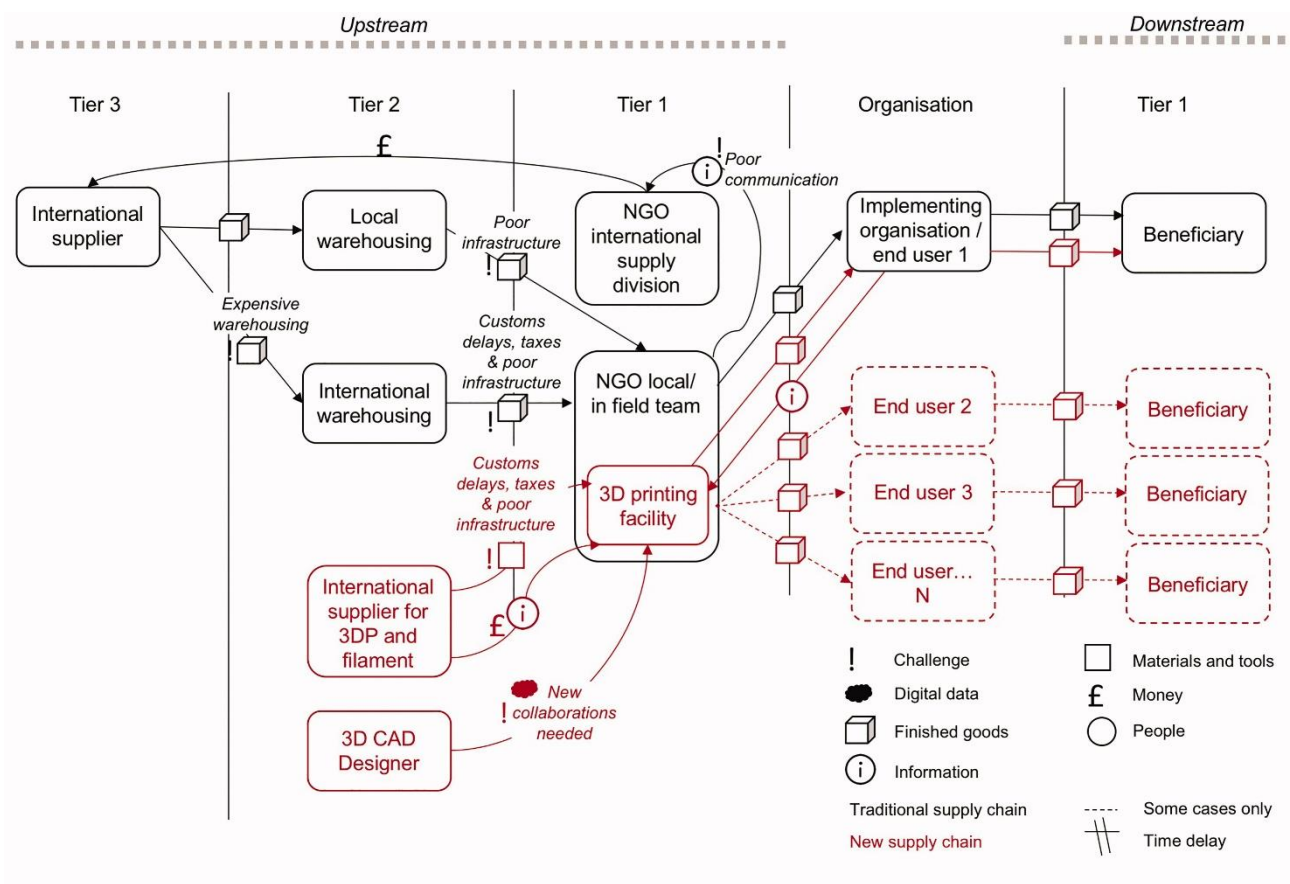


Figura 15: Produzione centralizzata presso un polo di produzione locale (fonte: [37]).

La prima tipologia trattata descrive uno scenario in cui la produzione avviene in un centro locale. In questo modello, i designer si trovano tipicamente nel Nord del mondo e condividono i progetti digitali con l'impianto di produzione nel Sud del mondo: per questo,

la suddetta struttura richiede forti relazioni collaborative tra i gruppi di progettazione e quelli di produzione dislocati geograficamente, poiché la condivisione delle informazioni lungo la SC è un aspetto fondamentale della questione, facilitata dalla digitalizzazione dei processi e avviene in reti aperte o chiuse.

In particolare, viene proposto di istituire un impianto di produzione presso la sede di una ONG nel paese in questione così che i prodotti possano essere stampati e quindi distribuiti alle organizzazioni esecutive. Si ritiene che questo approccio superi i problemi di importazione di prodotti finiti ed è adatto alla produzione di articoli semplici che possono essere facilmente fabbricabili riducendo la necessità di stock, che è una pratica comune tra le organizzazioni umanitarie.

La sicurezza e l'infrastruttura disponibile sono fattori chiave per la scelta del luogo di produzione: la creazione di un reparto per l'AM presso una struttura già esistente di una ONG disponibile è economicamente e logisticamente preferibile rispetto una allocazione più a valle, anche se ciò ridurrebbe le sfide della distribuzione dei prodotti finiti.

Va notato che la fornitura di stampanti 3D, materia prima e pezzi di ricambio richiede ancora una SC internazionale e non è ancora in grado di sostenere l'intera domanda, tenendo in conto che l'AM è limitata a una piccola gamma di prodotti: quindi, piuttosto che sostituire totalmente la SC tradizionale, si dovrebbe introdurre un'ulteriore SC di supporto nel settore.

- Decentralizzata, mostrata in *Figura 16*.

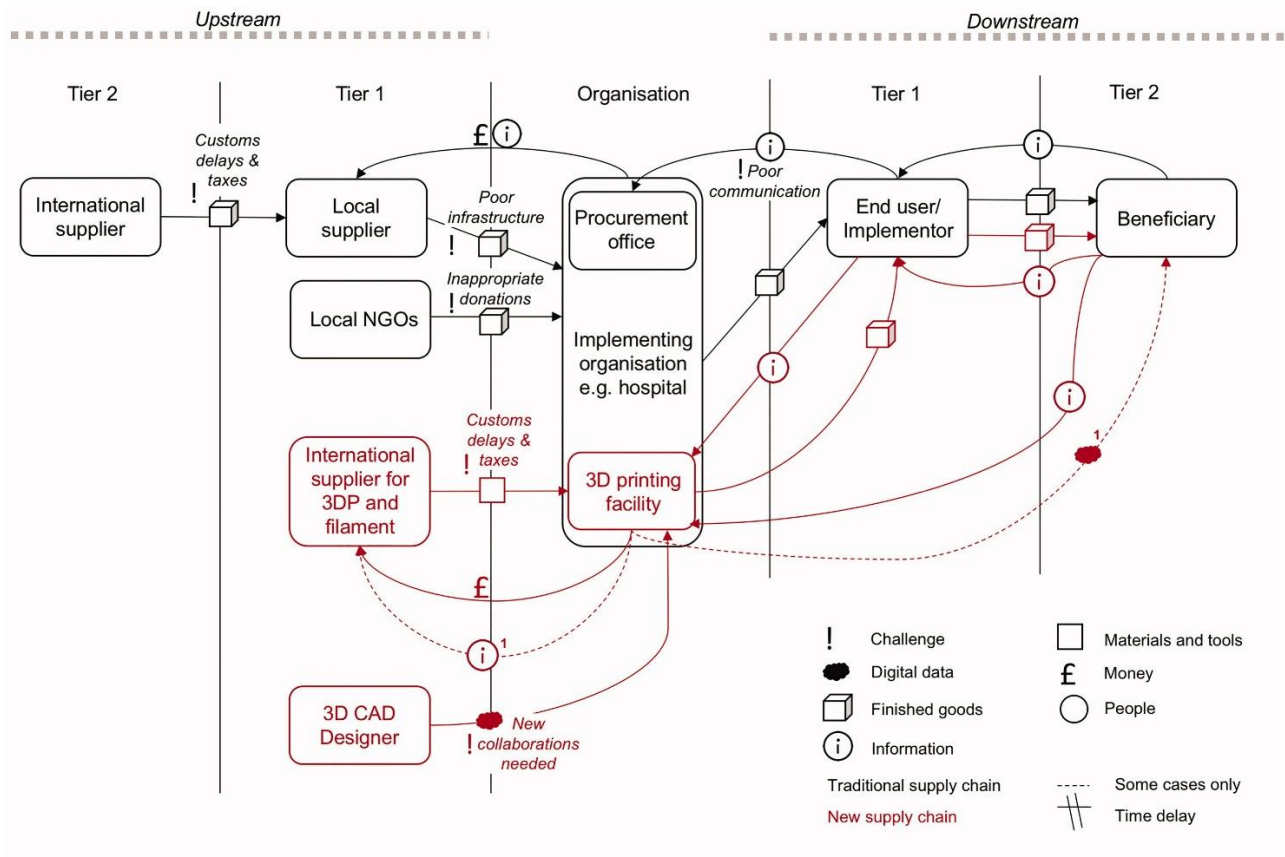


Figura 16: Produzione in loco presso l'organizzazione esecutiva (fonte: [37]).

La seconda tipologia trattata descrive una produzione in loco: questa avviene presso l'organizzazione esecutiva, consentendo la distribuzione diretta dei prodotti finiti agli utenti finali, con una riduzione degli step a monte.

Gli intervistati hanno sottolineato l'importanza di essere vicini agli utenti finali per produrre progetti personalizzati, oltre a creare fiducia e trasparenza lungo la SC: complessivamente, l'AM riduce la complessità del processo di produzione, riducendo il numero di fasi del processo e migliorando i tempi di consegna dei prodotti agli utenti finali.

Lo studio sottolinea però che spostando man mano a valle la stampante 3D si guadagna in vicinanza al cliente e in tempi di consegna ma si aumenta la fragilità e il rischio di interruzioni nella SC, oltre alle difficoltà che si riscontrerebbero nella ricerca di personale qualificato, anche nell'eventualità di guasti. Per mitigare questo rischio diventa ancora più importante la solida comunicazione lungo la SC, in particolare tra i progettisti e gli specialisti nel Nord del mondo e il personale dislocato sul campo, anche se si ritiene che non sia una soluzione a lungo termine. In altre parole, le relazioni a monte tra la produzione in loco e progettisti e produttori di materie prime acquistano un peso rilevante e riflettono il potenziale dell'AM di promuovere nuove collaborazioni e aggiungere valore attraverso la SC.

- Distribuita, mostrata in *Figura 17*. In questo studio viene distinta da quella decentralizzata (produzione in un impianto locale seguito dalla distribuzione) e definita come produzione in hub locali. In precedenza, nell'analisi delle strutture della SC entrambi i tipi erano raggruppati sotto la voce 'Decentralizzata'.

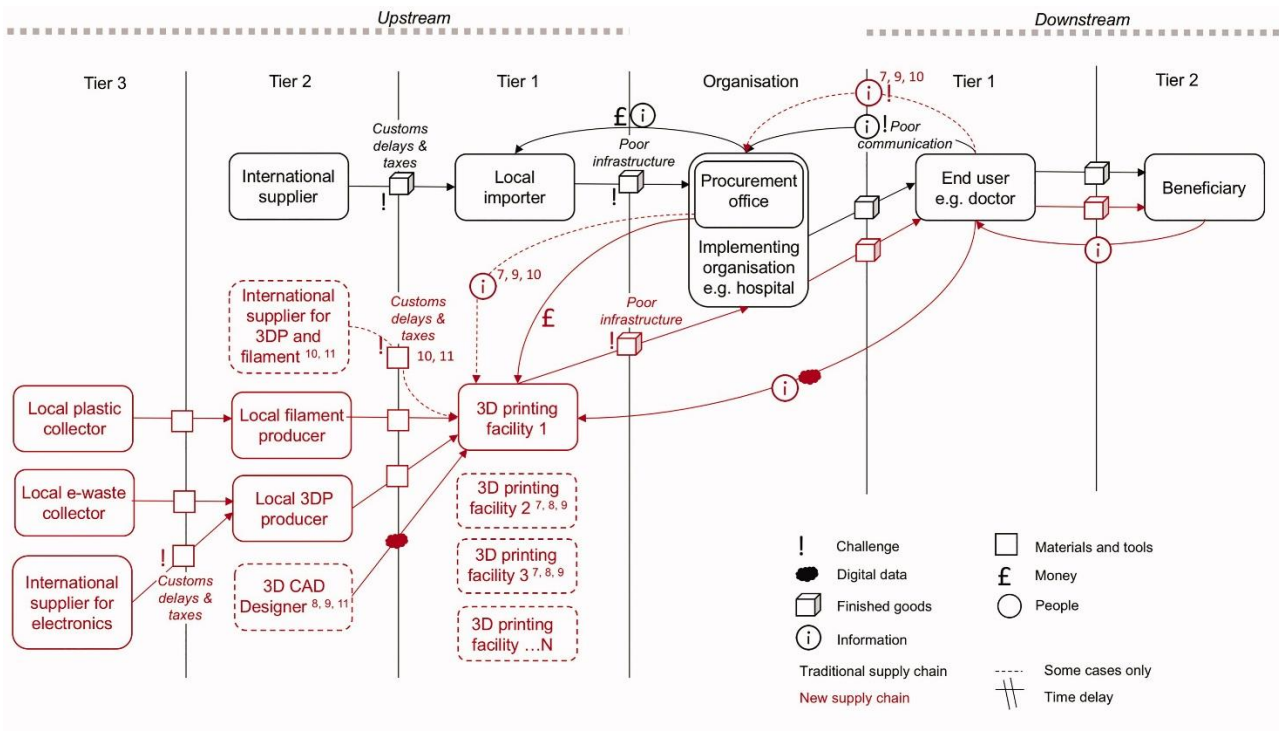


Figura 17: Produzione distribuita nei centri di produzione locali (hub) (fonte: [37]).

La terza tipologia trattata descrive una produzione distribuita presso i centri di produzione locali detti hub o makerspace. Questo approccio si basa sui vantaggi e i benefici sociali ed economici che una produzione vicina al cliente può portare, tra cui lo sviluppo e il potenziamento delle risorse locali, inclusa la manodopera, che specializzandosi mitigherebbe il rischio di fermi delle stampanti.

In questa tipologia di produzione il design si svolge all'interno del paese ed è condiviso con altri makerspace tramite comunicazioni digitali e i prodotti finiti vengono quindi trasportati alle organizzazioni esecutive. Rispetto alle altre configurazioni questa è la più adatta per sviluppare prodotti più complessi e fornisce una struttura sicura e stabile per lo sviluppo a lungo termine di prodotti che rispondono ai bisogni umanitari associati alla povertà.

Un aspetto da non sottovalutare nei paesi in via di sviluppo è l'approvvigionamento di materiale, che nella quasi totalità dei casi necessita di una SC di livello internazionale. Con lo sviluppo degli hub e dell'industria locale l'importanza vitale di questa viene meno, in quanto si sviluppa di pari passo il riciclo della plastica e dei componenti non conformi, che va a mitigare eventuali interruzioni e ad aumentare la circolarità della filiera.

In definitiva, è stato analizzato che gli hub nei paesi in via di sviluppo del Sud del mondo sono in crescita esponenziale, ma principalmente nelle grandi città.

- Mobile, mostrata in *Figura 18*.

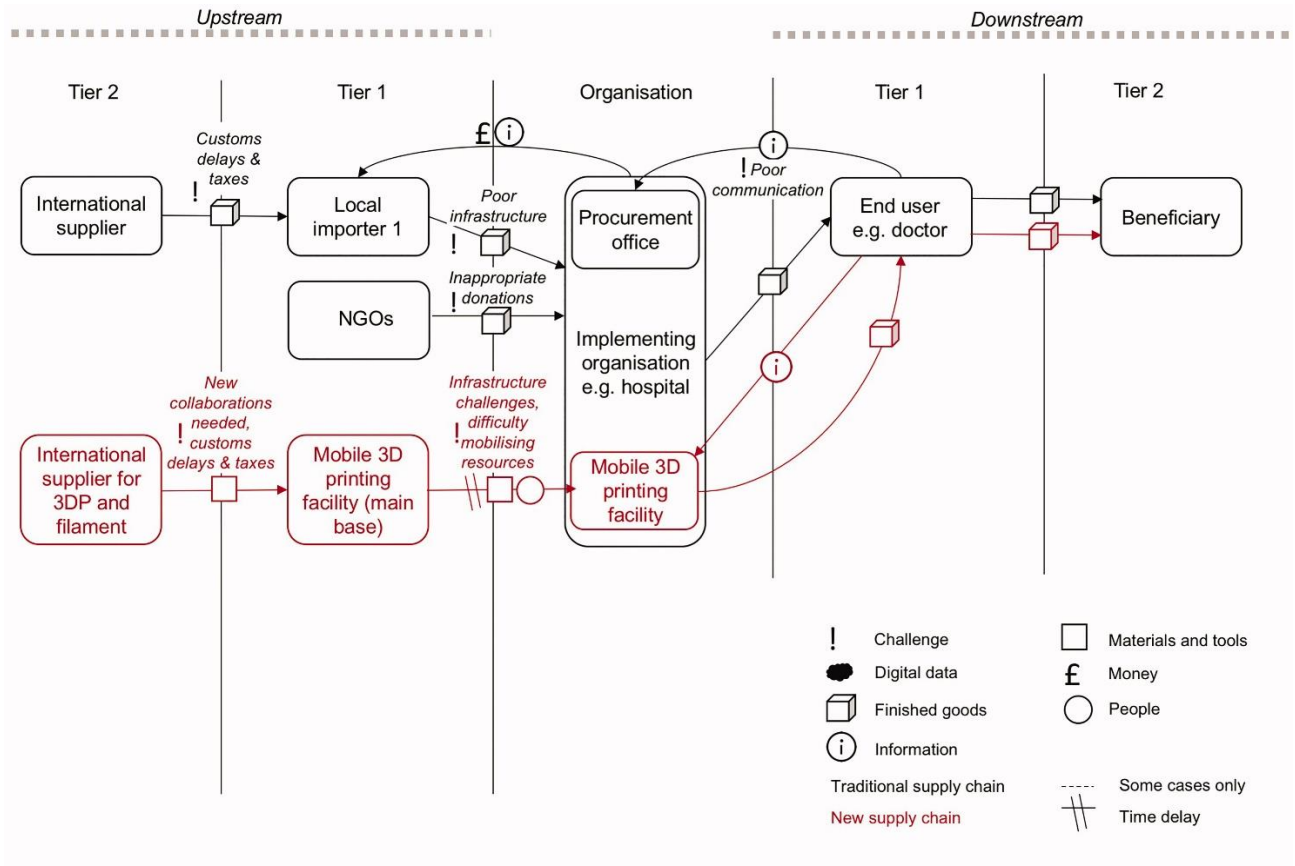


Figura 18: Impianto di produzione mobile presso l'organizzazione di attuazione (fonte: [37]).

L'ultima tipologia trattata descrive un impianto di produzione mobile per fornire articoli stampati tramite AM: le risorse umane, i materiali e gli strumenti vengono tutti trasportati all'organizzazione esecutiva, consentendo così la produzione in luoghi remoti con scarse infrastrutture. Questo approccio è adatto quando la domanda è imprevedibile o frammentata in diverse località geografiche, e poiché la progettazione e la produzione devono essere completate in modo tempestivo data la natura stessa della struttura di questa tipologia di produzione è più adatta alla produzione di articoli semplici e unici come ricambi.

A differenza delle strutture precedentemente descritte, la progettazione e la produzione avvengono in loco, consentendo la supervisione diretta del consumatore finale e garantendo quindi una migliore corrispondenza tra le esigenze contestuali e il risultato, riducendo così la complessità della SC. Nonostante l'eliminazione della necessità di importare prodotti finiti, questo modello si basa ancora sull'importazione di strumenti e materie prime per la produzione: questo e il trasporto della struttura mobile alle organizzazioni locali può essere fonte di interruzioni nella SC. È dunque noto ora che questa struttura può garantire diversi vantaggi, ma è bene tenere in conto che sebbene gli intenti siano i migliori questa richiede una lunga trasformazione della filiera e il trasferimento di risorse umane e non, e dunque la questione non è relegata al semplice stampaggio sul territorio e necessita di uno studio più che approfondito.

Influenza e previsioni

È doveroso notare che vi è una discrepanza globale tra la domanda umanitaria e l'offerta di aiuti, dovuta al fatto che la rivoluzione industriale ha creato una vasta ricchezza per alcuni paesi, in genere dell'emisfero Nord del pianeta, ma ha escluso la maggior parte della popolazione mondiale. Dato il fallimento delle SC tradizionali nel soddisfare efficacemente le esigenze delle persone, le organizzazioni umanitarie hanno iniziato a guardare alle nuove tecnologie, tra cui l'AM, per nuove soluzioni. Questo studio, che tratta uno specifico settore, in ogni caso converge alle conclusioni precedentemente descritte in materia di vantaggi portati dall'AM nella SC: infatti, nell'ultimo decennio, le SC convenzionali sono diventate più centralizzate ed è generalmente previsto che sviluppando questa nuova tecnologia si ridurranno promuovendo una produzione più localizzata.

L'analisi ha riportato i vari scenari che analizzano la produzione locale, che può essere esogena o endogena, e variano a seconda della posizione della stampante lungo la SC: risulta che più la stampante è posta a valle verso il cliente e più si massimizzano i vantaggi logistici e il rapporto col cliente, ma rischiando interruzioni nella fornitura di materie prime a monte. Non esiste in definitiva una struttura 'esatta' per questi territori, ma a seconda del tipo di prodotto richiesto e dell'esatta natura del contesto le organizzazioni possono selezionare diverse configurazioni di rete.

Quale che sia la struttura prescelta la SC integrata con l'AM non è destinata al momento a sostituire quelle esistenti, ma ad introdurre una SC aggiuntiva e ausiliaria per le organizzazioni umanitarie. Inoltre, è noto che i prodotti umanitari, in particolare i prodotti salvavita, sono richiesti con urgenza, spesso con poco preavviso, e l'infrastruttura è notoriamente povera o interrotta; dunque, per le HSC l'AM risulta anche più vantaggiosa rispetto ai vantaggi portati alle SC convenzionali.

8. Sostenibilità ambientale e prestazioni della SC

È importante sottolineare che con l'avvento della pandemia da COVID-19, la conseguente drastica riduzione delle emissioni di gas serra durante i vari lockdown e la concomitante diffusione delle tecnologie dell'industria 4.0 sia stato evidenziato come una SC flessibile e resiliente e l'attenzione all'ambiente siano diventati fattori predominanti nelle scelte tecnologiche e logistiche da adottare. L'AM ha un notevole impatto sull'ambiente, aumentando la sostenibilità nella catena di produzione rispetto ai processi di produzione tradizionali [12].

Dunque, si è cominciato a sviluppare il concetto di Green Supply Chain (GSC), definita come integrazione delle dimensioni economica, ambientale e sociale nella gestione dei flussi organizzativi al fine di promuovere il valore sostenibile [24].

Considerando, come precedentemente descritto, come l'AM favorisca la riprogettazione, necessiti di meno quantitativo di materiale e di meno fasi di produzione appare evidente che si riducono le dimensioni dei flussi produttivi e, di conseguenza, le emissioni. Inoltre, nei prodotti polimerici AM si riscontrano in termini di prestazioni una riduzione del peso e una migliore efficienza termica, che hanno effetti indiretti sulle emissioni [2].

Nello studio già analizzato sul confronto tra le strutture centralizzata (S1), decentralizzata (S2) e mista (S3) dal punto di vista ecologico è stato sviluppato un KPI definito come Green Performance Index (GPI), che contiene tutte le informazioni riguardanti la posizione della SC e le prestazioni nello scenario analizzato in termini di impatto economico ed ambientale [4]. I risultati di questo studio dal punto di vista economico-ambientale promuovono la struttura decentralizzata:

$$\mathbf{GPI_{S2} > GPI_{S3} > GPI_{S1}}$$

I costi del ciclo di vita del prodotto in S2 e S3 sono minori rispetto a S1 perché:

- Presentano minori costi di trasporto.
- Presentano costi fissi e variabili minori grazie a strategie di affitto dei macchinari.

Gli scenari S2 e S3 presentano costi e tempi di trasporto minori; dunque, si può dedurre che essi abbiano un peso rilevante anche dal punto di vista ambientale: per bassi volumi di domanda l'impatto per prodotto risulta più alto [4].

In questo studio si sono definiti dei fattori economici (WECO) e dei fattori ambientali (WENV), che sono stati fatti variare per studiare diverse condizioni dell'ambiente industriale e in ogni caso lo scenario S1 risulta il peggiore, dimostrando come il trasporto abbia un peso rilevante dal punto di vista economico-ambientale [4].

Un'analisi di confronto delle strutture della SC per la fabbricazione di parti di ricambio per aeromobili ha dimostrato che la produzione con AM integrata decentralizzata presenta emissioni pari al 68,31% per produrre le materie prime, al 22,41% per la produzione e al 7,27% per il trasporto, che risultano leggermente inferiori rispetto alla produzione centralizzata (63,7% materie prime, 22,75% produzione, 13,55% trasporto). Sotto è riportato il *Figura 19*, esplicitivo delle emissioni di carbonio delle due strutture della SC analizzate [12].

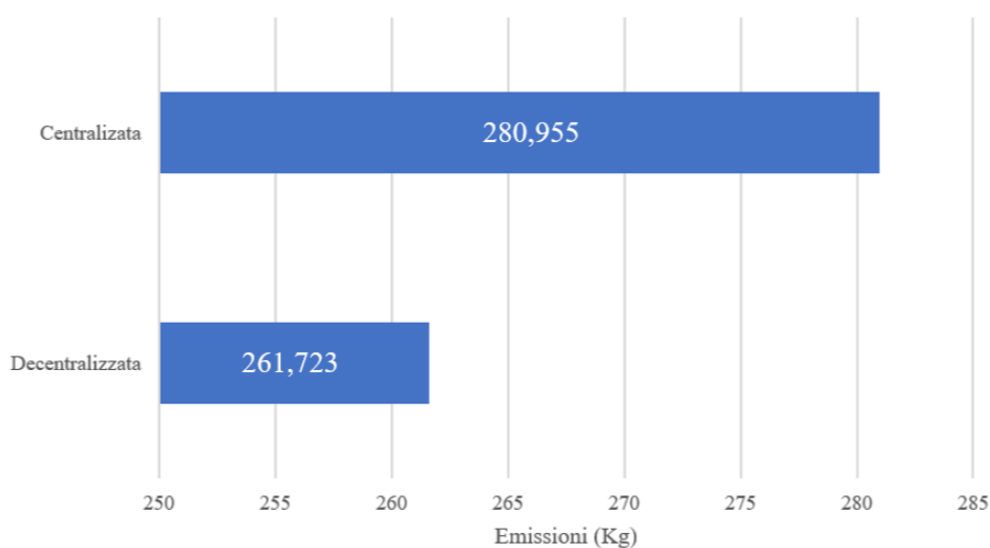


Figura 19: Confronto delle emissioni di carbonio tra struttura centralizzata e decentralizzata per la produzione di parti di ricambio per aeromobili (fonte: [12]).

L'eliminazione del post-processing è economicamente rilevante, ma in termini ambientali ha impatto limitato. In generale, i fattori economico-ambientali influenzano notevolmente il risultato e dipendono fortemente dalla politica aziendale [4].

Come precedentemente spiegato, l'AM permette di risparmiare peso, che si stima tra il 35% e il 65%, oltre alla alta percentuale di riciclaggio e recupero di materiale e questo porta un miglioramento non solo a livello di impatto ambientale diretto ma sull'intera SC [7].

Per quanto riguarda la fase di assemblaggio, nella produzione integrata ad un'unica fase dove essa è assente risulta chiaro come l'energia che sarebbe stata necessaria sia risparmiata, e dunque una lavorazione di AM risulta più sostenibile di una lavorazione TM.

Inoltre, l'avvento delle altre tecnologie dell'industria 4.0 come BC, IoT e AI garantiscono che tutta la SC sia rinvigorita dal punto di vista della sostenibilità.

Una delle limitazioni dell'AM è la scarsa disponibilità di fornitori [6], ma d'altra parte essa permette di lavorare diversi tipi di materia prima, anche se non contemporaneamente [27], dai polimeri ai metalli, anche con materiali innovativi [12]; dunque, è doveroso soffermarsi anche sul corretto utilizzo dei materiali in ottica sostenibile.

Nell'analisi [28] la questione è stata discussa da un punto di vista macroscopico, che non tiene soltanto in conto la sostenibilità nella produzione in senso stretto dei componenti, ma delle scelte da effettuare lungo tutto il ciclo di vita considerando la SC concentrata sull'AM: la SC in questione prende il nome di CLSCAM (CLosed Supply Chin with Additive Manufacturing) e la valutazione della sostenibilità di quest'ultima tiene conto dei tempi, dell'impatto ambientale e dei costi.

Per convalidare il suddetto modello è stato applicato ad un caso reale: infatti si è mostrato che tutte le metriche di sostenibilità migliorano quando sono disponibili opzioni di consolidamento dei componenti e concentratori di AM, oltre alla possibilità di aumentare i ricavi, risparmiare costi e ridurre l'impatto della produzione sulla stabilità dell'ambiente naturale [28].

Per giungere al miglior risultato possibile i modelli di analisi hanno la necessità di tenere in conto dell'ambiente in cui si muovono e dei vincoli ad esso associati, come prezzi dell'energia, competitor, livello tecnologico. Per questo, lo studio [29] che è stato analizzato precedentemente ha tenuto in considerazione la presenza di diversi driver per l'eco-innovazione tramite l'AM nella SC per lo sviluppo di un modello matematico: In particolare, il suddetto modello confronta costi e impatto ambientale delle SC in base al tipo di tecnologia adottata (AM o TM).

Uno dei risultati di questo studio riguarda l'energia: le aziende, per motivi di costi e quindi di profitto, risultano sensibili al costo dell'energia e tendono a non adottare le tecnologie energivore: nelle regioni con basso costo dell'energia tra quelle analizzate infatti le aziende continuano a produrre tramite la TM poiché sono spinte a consumare di più, e di conseguenza a inquinare di più [29].

8.1 Caso 3: applicazioni ed emissioni con l'uso delle leghe di Ti

L'AM permette l'uso di diversi tipi di materiali innovativi, come i polimeri, o più tradizionali, come metalli e ceramici [34] [12]. Tra gli articoli analizzati si è ritenuto di approfondire lo studio [13] in particolare che si sofferma sull'uso del titanio (Ti), che ad oggi ha trovato una diffusione limitata a causa di diversi fattori, e di come esso, tramite l'AM, si ritiene influenzi notevolmente la SC e più in generale l'industria: viene fatta un'analisi sull'uso del Ti al fine di risparmiare massa e quindi ridurre le emissioni, migliorare le prestazioni e l'efficienza delle risorse. Ad esempio, la riduzione delle quantità dei componenti del 20% in massa si prevede che potrebbe comportare una riduzione delle emissioni di biossido di carbonio (CO₂) di circa il 12%-16%.

Prendendo un esempio pratico viene analizzato un caso di produzione di un disco freno e di una sospensione, che rappresentano due dei componenti più pesanti presenti in un'automobile: la riduzione del peso di questi componenti utilizzando leghe di Ti può garantire un significativo aumento dell'efficienza del carburante e, di conseguenza, una riduzione delle emissioni, con un miglioramento del consumo dell'ordine del 6%-8% per ogni riduzione di peso di 10 kg: più nello specifico, una riduzione del peso dell'1,0% o del 10% nell'industria automobilistica migliora rispettivamente il consumo di carburante dell'0,7% o dell'8,0%, una riduzione del 5,0% del peso di una berlina media da 1500 kg (75 kg) può migliorare l'efficienza del carburante del 1,5% e le prestazioni del motore del 4,5%.

Con l'uso di leghe di Ti si possono ottenere i seguenti risultati:

- Riduzione della massa (52,5%).
- Recupero del materiale (96%).
- Minor numero di fasi di lavorazione e tempi più brevi (54,3%).

L'uso dell'AM con le leghe di Ti inoltre garantisce un BTF pari a circa 1,5:1.

Le leghe di Ti nel settore automotive e aerospaziale comporta notevoli risparmi di materie prime ed energia, con conseguente riduzione dei rifiuti e delle emissioni:

- Per il settore automotive i risparmi sulle materie prime se si sostituisse la TM con l'AM, con le ipotesi dello studio in questione, risulterebbero pari a 333,2 kt.
- Per il settore aerospaziale è stato stimato che circa 10,7 kt di peso a vuoto operativo degli aeromobili possono potenzialmente essere sostituite con il Ti. Lo studio stima inoltre che la sostituzione della TM con l'AM per le componenti in titanio può potenzialmente ridurre il peso degli aeromobili, in un range che va da 380 a 820 kg.

Per quanto riguarda le tendenze globali all'uso delle leghe di Ti è stimato, confrontando AM e TM, che:

- TM: passaggio da 40 kt (2010) a 68 kt (2050) con riciclo di 53 kt (2050).
- AM: passaggio da 29 kt (2010) a 48 kt (2050) con riciclo di 38 kt (2050).

Le emissioni dell'AM sono in senso stretto superiori a quelle della TM, ma se si estende il campo visivo a tutta la SC il risultato è opposto.

L'energia consumata dal processo AM viene compensata in termini di costi dal risparmio di materie prime utilizzando solo lo stretto necessario per produrre; dal punto di vista energetico vengono ipotizzati due scenari di adozione di questo tipo di leghe, così che si possa avere un quadro chiaro della tendenza dei consumi e, di conseguenza, delle emissioni legati alla produzione:

- Scenario A: 6% di Ti prodotto con AM con un rapporto BTF di 1.5:1 per i componenti, mentre il restante 94% di titanio è prodotto con TM con un rapporto BTF di 8:1.
- Scenario B: 50% dei componenti in titanio prodotti con AM e 50% prodotti con TM.

Lo studio indica che è possibile risparmiare 0,2 GJ semplicemente adottando lo scenario A rispetto al B, ma esso non tiene conto del consumo di energia lungo tutta la SC, che andrebbe di conseguenza approfondito [13].

Approfondendo questo punto di vista, dallo studio [15] emerge infatti come l'adozione dell'AM, a prescindere dall'uso del Ti, abbia un effetto rilevante sulla SC. Il suddetto studio prende in analisi cinque dimensioni principali, in particolare su trasporto e inventario: la sostituzione dei trasporti e dell'inventario con strutture digitali permette di risparmiare sulle emissioni dovute ai veicoli di trasporto, specie in scenario di produzione decentralizzata. Le altre dimensioni hanno un impatto indiretto sulla questione: infatti, come già ampiamente descritto in precedenza, la sola introduzione dell'AM nella struttura della SC garantisce una riduzione delle emissioni [15].

Dunque, approfondimenti futuri potrebbero sviluppare i concetti positivi espressi dai due studi descritti per combinali e rendere il modello della SC ancor più efficiente dal punto di vista delle emissioni.

9. Ricambistica

È importante sottolineare come una buona parte di produttori utilizzi l'AM per produrre parti di ricambio e come questa tecnologia si stia rapidamente diffondendo a tale scopo: l'approvvigionamento di parti di ricambio basato sull'AM è stato ampiamente adottato in diversi settori industriali [22].

9.1 Settore aerospaziale

Come già è stato reso noto precedentemente nella sezione dei campi di applicazione, l'aerospaziale è un'industria nella quale l'AM sta avendo particolare influenza e questo si estende anche alla produzione di parti di ricambio: infatti, la velocità nelle riparazioni risulta essere un fattore cruciale per la creazione del valore per i consumatori. Affinché vi sia un servizio di riparazione e manutenzione rapido, è necessaria una buona disponibilità di parti di ricambio e quindi un'efficiente SC, ma risulta quasi impossibile per una compagnia aerea avere tutte le parti necessarie in stock date le dimensioni degli aeromobili, come quelli prodotti da Boeing e Airbus, che risultano in media essere composti da circa quattro milioni di pezzi [7].

Produrre pezzi di ricambio tramite l'AM presenta indubbiamente molti vantaggi:

- È possibile stampare su richiesta.
- Il livello periodico degli inventari risulta ottimale.
- La domanda di pezzi di ricambio è prevedibile in base alle proprietà meccaniche dell'AM.
- La riduzione del costo unitario nel tempo.

E degli svantaggi:

- Tempi di approvvigionamento lunghi.
- Forte dipendenza dai fornitori.
- Costi di fermo macchina elevati.

Le tecniche tradizionali comportano inevitabilmente un alto livello di inefficienza per i ritardi dovuti all'assenza di stock, che oltre a essere estremamente difficile in termini di spazio e logistica, risulta dispendioso in quanto molte delle parti dei suddetti aeromobili sono definite parti a lento movimento, cioè parti che generalmente non sono molto richieste: queste parti risultano essere un costo elevato per le aziende sia in termini di obsolescenza che di capitale investito, oltre che avere costi di magazzino e logistica sproporzionati rispetto ai costi di produzione [7]. Per questo, la creazione di un inventario virtuale di file CAD è un'ottima strategia che aiuterebbe ad integrare l'approccio JIT, che renderebbe la SC meno vulnerabile ai cambiamenti e più resiliente [22].

L'imprevedibilità della domanda e gli elevati costi sopracitati hanno spinto le aziende a considerare l'AM come soluzione al problema dell'inefficienza: l'implementazione di questa tecnologia in configurazione centralizzata ridurrebbe la necessità di mantenere scorte di sicurezza e i costi legati al magazzino [7].

Per necessità logistica, è necessario suddividere le parti di ricambio in tre sottogruppi:

- A. Parti standard ad alta rotazione che rappresentano circa l'80% delle vendite e una piccola parte dei costi di gestione del magazzino.
- B. Parti che rappresentano il 50% dei pezzi e contribuiscono al 15% delle vendite.
- C. Parti che costituiscono il 30% degli articoli in magazzino ma contribuiscono solo al 5% delle vendite.

Per ridurre i costi sopra descritti è sufficiente che i produttori continuino a produrre le parti standard utilizzando tecniche di produzione tradizionali, trasportandole in un magazzino centralizzato e, contemporaneamente, produrre, tramite l'AM centralizzata, le parti meno richieste [7].

Questo tipo di produzione può essere definito come metodo ibrido, dove entrambi i metodi e le tecnologie vengono usati nelle migliori condizioni, consentendo sia di ridurre i livelli di stock che di sfruttare appieno la capacità produttiva delle macchine AM [7].

Questo scenario è sostenuto anche da una ulteriore analisi, che propone tramite un modello matematico, basato su diversi algoritmi, la struttura centralizzata per le parti di ricambio nel settore aeronautico come la migliore tra gli scenari analizzati [11]. L'AM si rende necessaria nella SC delle parti di ricambio in quanto ad oggi essa risulta essere estremamente vulnerabile alle interruzioni: ad oggi, le strutture AM centralizzate sono più adatte per la gestione dei pezzi di ricambio con modelli di guasto imprevedibili [22].

Un esempio pratico della produzione di un pezzo di ricambio per il settore aeronautico è già stato citato nel capitolo sulla sostenibilità in un articolo analizzato precedentemente: infatti, è stato descritto come usando questa nuova tecnologia al posto della fresatura per la riparazione di una parte di un elicottero il tempo e il costo della riparazione si siano ridotti partendo rispettivamente da 45 giorni e 2000 dollari a 2 giorni e 412 dollari [12].

In generale, la produzione dei pezzi di ricambio tramite AM evita il problema dell'obsolescenza, garantisce una drastica riduzione del magazzino e dei costi ad esso associati, oltre a fornire parti che garantiscano una minore usura [12]. Inoltre, nello stesso articolo si sostiene che, con struttura della SC con produzione decentralizzata, l'inventario di sicurezza tramite AM è il più basso, con una deviazione standard fino al 30%, valore sopra il quale l'inventario di una struttura centralizzata diventa inferiore.

Come già descritto in precedenza, si sta perseguendo uno sviluppo di macchine AM più economiche, più piccole e con maggiore automazione che garantirà una riduzione dei costi, favorendo una struttura decentralizzata della SC per la produzione delle parti di ricambio [12], considerando che l'approvvigionamento dei pezzi di ricambio tramite hub decentralizzati di AM può migliorare la reattività della SC [22].

9.2 Settore automotive

L'AM nel settore automotive è principalmente utilizzata per tre scopi:

- Prototipazione: i prototipi stampati tramite AM vengono utilizzati per testare le prestazioni dei componenti, come la rottura a fatica o l'aerodinamica in galleria del vento.
- Produzione di parti originali: alcune parti possono essere riprogettate e prodotte in un unico passaggio di produzione, come descritto in precedenza.
- Produzione di parti di ricambio: è sempre più diffusa la tendenza a produrre parti di ricambio in loco partendo dai disegni CAD 3D evitando i costi di trasporto e di produzione esterni.

In questa sezione verrà approfondito come l'AM è utilizzata per produrre componenti di ricambio per automobili, che tipi di componenti vengono prodotti e degli esempi esplicativi.

Se di detti ricambi non si possiedono i disegni CAD 3D, la produzione è spesso preceduta da processi di reverse engineering ad alta precisione per creare un modello digitale da utilizzare: questo processo consiste nell'uso di un laser che passa sulle superfici del pezzo in questione, il quale viene posizionato e/o fatto ruotare su una piattaforma con dei riferimenti, in modo che il computer possa costruire il modello nella maniera più accurata possibile.

L'influenza dell'AM sulla produzione delle parti di ricambio è notevole poiché essa permette una produzione più rapida e in diversi casi più performante della TM, con una riduzione dei costi e dell'impatto ambientale [13][34].

Componenti del veicolo

Prendendo in analisi un modello di auto possiamo distinguere in sottogruppi i tipi di elementi che è possibile produrre, i materiali utilizzabili e i processi in uso come segue in *Figura 20*:

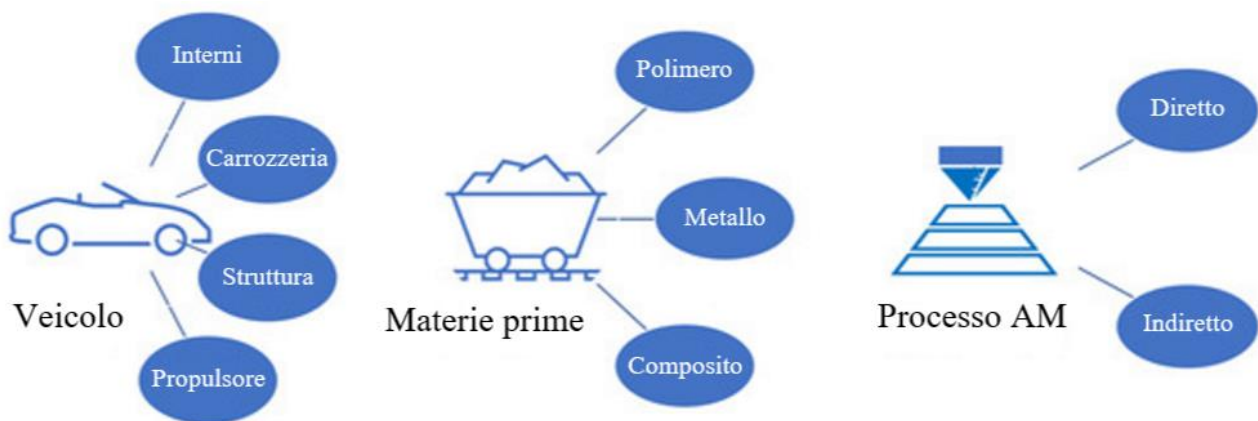


Figura 20: Tipi di elementi che è possibile produrre, i materiali utilizzabili e i processi in uso (fonte: [34]).

In particolare, gli elementi del veicolo che è possibile produrre tramite AM sono [34]:

- Interni: cruscotto, console, prese d'aria, specchietti, leve di comando, maniglie, interruttori, finiture.
- Carrozzeria: pannelli della carrozzeria, parafranghi, paraurti, specchietti, fari/indicatori, griglie, maniglie, finiture.
- Parti strutturali: sospensioni, ruote, componenti del sottocassa, staffe.
- Gruppo propulsore: componenti cambio, motore e differenziale, carburatori, pompe.

Processi

Lo studio [34] differenzia e prende in analisi i processi AM diretti e indiretti per cui vengono citati diversi tipi di lavorazioni, come la Selective Laser Sintering (SLS) o la Selective Laser Melting (SLM), diversi materiali utilizzati e diversi esempi di applicazioni pratiche, che non verranno approfonditi in quanto non compresi nella ragione di questo approfondimento bibliografico:

- I processi diretti vengono utilizzati per la produzione di parti di ricambio finite e dunque ad uso diretto.
- I processi indiretti vengono utilizzati per la produzione e lo sviluppo di utensili atti alla produzione di ricambi.

Materiali

Ricambi in materiale polimerico

- Per i processi diretti sono citati alcuni tipi di polimeri utilizzabili, come l'Acrilonitrile Butadiene Stirene (ABS) o l'Acrilonitrile Stirene Acrilato (ASA) e molti esempi di componenti prodotti come la maniglia del cofano di una Ferrari 328 o diverse parti di modelli di Porsche.
- Per i processi indiretti l'AM è stata impiegata per realizzare stampi polimerici ad iniezione in polistirene (PS) o master polimerici per creare stampi in silicone per lo stampaggio a bassa pressione.

Ricambi in materiale metallico

- I processi diretti vengono utilizzati per creare parti in metallo per uso finale, che spesso sono trattati con successiva post-elaborazione termica e finitura per ottenere, rispettivamente, le proprietà di materiale e precisione attese, per cui esistono diversi esempi di carrozzeria, trasmissioni e motori.
- Per i processi indiretti viene spesso utilizzato per lo sviluppo di anime e inserti metallici a raffreddamento conforme nelle produzioni in serie, oltre che per pezzi metallici di geometria molto più complessa rispetto ai prodotti di TM, anche se la finitura superficiale e l'accuratezza dimensionale però sono ancora due dei principali limiti di questi processi. Un esempio di questo tipo di produzione è lo sviluppo del blocco motore dell'ultima Delage Type-S del 1914.

Ricambi in materiale composito

- I processi diretti includono le applicazioni automobilistiche più comuni dei compositi polimerici comprendono pannelli e rivestimenti esterni, interni e sedili, ma anche sensori elettrici, sospensioni e componenti del motore.
- I processi indiretti includono principalmente la costruzione di stampi e anime, infatti l'uso dell'AM per grandi stampi e matrici è molto diffuso per fornire attrezzature per basse produzioni o prototipi unici.

L'analisi svolta in questo studio mette in luce le potenzialità e le applicazioni diffuse delle tecnologie AM nel campo della ricambistica automobilistica, con particolare attenzione al restauro di veicoli classici o storici [34].

È stata riscontrata anche l'opportunità di implementare l'AM per pezzi di ricambio di modelli a fine vita: infatti, lo studio [42] analizza a fondo la struttura dei costi della SC di alcune parti di ricambio di un'automobile, considerando produzione, trasporto in entrata, magazzino, trasporto in uscita e costi di servizio. Esso dimostra come in alcuni casi l'AM può essere una soluzione economicamente sostenibile ai vincoli sullo stoccaggio UE di parti di ricambio per modelli vecchi [42].

Quelli esposti finora non sono gli unici lavori in cui si è riscontrata l'ampia opportunità che L'AM offre nella produzione dei pezzi di ricambio per automobili. Infatti, in un ulteriore scritto si spiega come l'AM garantisca una produzione di parti di ricambio per modelli di auto d'epoca più efficiente, come per i casi di BMW e Mercedes Benz già citati nell'articolo precedente: queste aziende sovvenzionano alcuni dei loro concessionari più grandi per adottare la tecnologia di AM per produrre i suddetti pezzi di ricambio, consentendo di chiudere le linee di produzione dedicate [23].

Come già descritto precedentemente, è importante sottolineare come lo studio dell'uso di materiali innovativi possa apportare notevoli migliorie: con l'AM è possibile riprogettare alcuni componenti nel settore automotive per ridurre il peso usando materiali più resistenti e leggeri, garantendo così un risparmio considerevole di materiale e migliori prestazioni [13].

In definitiva, si riscontra che l'AM sta avendo rapida diffusione nel campo della ricambistica: essa può avere un effetto dirompente sull'industria, garantendo produzioni più efficienti e a minor costo nel settore aerospaziale e con ampio ventaglio di componenti stampabili e di materiali disponibili per il settore automotive.

9.3 Caso 4: produzione mobile tramite veicoli industriali

Questo approfondimento è dedicato ad una particolare conformazione della SC basata sullo studio [16], che introduce il concetto di veicoli attrezzati con macchine AM pronti a produrre per garantire una riduzione del lead time accorciando la distanza dal cliente. È stato deciso di approfondire il suddetto articolo in quanto offre una valida alternativa alle strutture centralizzata e decentralizzata per i ricambi nel settore automotive, ottimizza al massimo i tempi e pone in sinergia diverse tecnologie dell'industria 4.0. Inoltre, si ritiene che questo modello possa essere di grande valore innovativo nella prospettiva di un futuro a medio-lungo termine.

La pandemia da COVID-19 ha messo a nudo le debolezze della struttura delle attuali SC e di conseguenza l'industria si sta evolvendo per mitigare tali fragilità, per renderla più resiliente e sostenibile: in particolare, è analizzato il settore di costruzione di parti di ricambio per automobili.

Dal punto di vista dei clienti la disponibilità e l'accesso alle parti di ricambio presso il centro assistenza più vicino, in particolare in paesi con grande estensione geografica come Stati Uniti e Cina, sono fattori molto influenti nella loro decisione di acquisto e dunque in questi termini resilienza e reattività diventano fattori fondamentali per il mantenimento del marchio aziendale. Inoltre, a causa del volume e della varietà, è letteralmente impossibile per un manutentore tenere in magazzino tutte le parti di ricambio per tutti i modelli di una determinata marca in ogni centro assistenza, considerando anche il numero di parti presenti in ogni automobile, la frequenza nel presentare nuovi modelli e il numero di modelli delle generazioni precedenti.

Date le suddette premesse, secondo il modello proposto i ricambi originali che possono essere prodotti mediante tecnologia AM saranno resi disponibili su piattaforme online come Amazon per poter essere ordinati: ciò consentirebbe a ogni produttore di automobili e ai rispettivi clienti di utilizzare la piattaforma.

I clienti potranno effettuare ordini attraverso questa piattaforma online con un server cloud che consentirà l'accesso all'ordine e ai dati correlati da parte dei produttori di automobili. Con l'aiuto delle capacità dell'AI, il camion abilitato all'AM potrà essere reso disponibile presso la posizione del cliente finale per l'elaborazione e la consegna dell'ordine in tempo reale.

Le informazioni sull'ordine verranno comunicate al camion che inizierà a produrre il componente ordinato mediante la tecnologia AM mentre si sposta verso la posizione del cliente per la consegna del componente richiesto.

Gli ordini online potranno provenire direttamente dai clienti o da altri attori della SC come centri di assistenza, rivenditori di ricambi o meccanici auto. Inoltre, tramite questo modello sarebbe possibile gestire un'installazione di produzione di ricambi multi-brand e multi-modello, in quanto l'AM dipende esclusivamente dal file CAD, dunque senza restrizioni di ciclo di lavorazione o forma, tolti i limiti strutturale della macchina.

Ovviamente tutta la descrizione fatta sopra è ad oggi teorica, per lo sviluppo fisico sarebbe necessario innanzitutto creare l'infrastruttura necessaria a soddisfare il mercato, e ciò comprende i camion descritti sopra, collegati con GPS e server cloud, il tutto in modo da creare una rete di collegamento tra tutti gli attori coinvolti. Questo garantirebbe una considerevole riduzione dello stoccaggio e un sistema ausiliario capace di assorbire tutto il carico della domanda in caso di interruzioni nella SC principale, come è già successo a causa della pandemia da COVID-19.

Operativamente, viene proposto un algoritmo per il calcolo della produzione per soddisfare un certo numero di clienti, ai quali è assegnata una durata del tempo di lavorazione e una durata del trasporto, per fare valutazioni su diversi scenari:

- Nella prima simulazione viene impostato un numero di clienti pari a cinque, con il risultato totale di 423 minuti.
- Nella seconda simulazione viene impostato un numero di clienti pari a sette, con il risultato totale di 512 minuti.
- Nella terza simulazione viene impostato un numero di clienti pari a dieci, con il risultato totale di 681 minuti.
- Nella quarta simulazione viene impostato un numero di clienti pari a dodici, con il risultato totale di 713 minuti.
- Nella prima simulazione viene impostato un numero di clienti pari a quindici, con il risultato totale di 821 minuti.

Quest'ultimo corrisponde a circa 14 ore di operatività della struttura mobile, oltre la quale risulta difficile fare analisi: dunque, lo si considera come valore limite.

Nella *Figura 21* è ben visibile come l'andamento temporale necessario per l'estinzione degli ordini all'aumentare del numero dei clienti sia pressocché lineare:

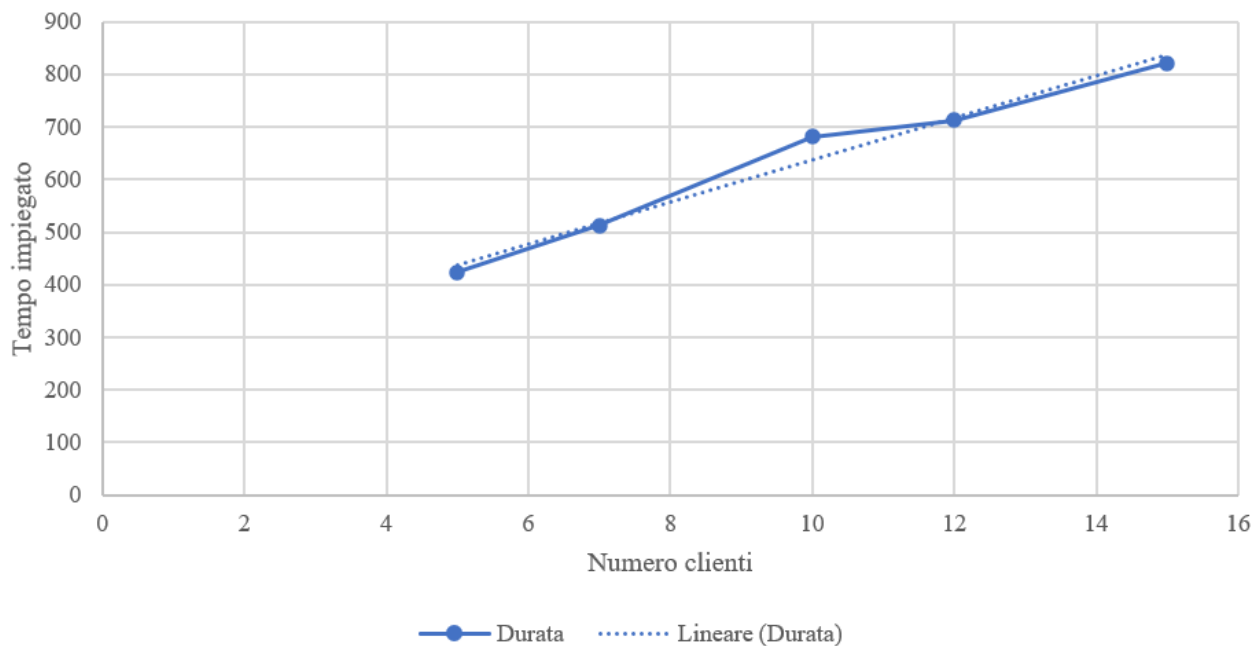


Figura 21: Durata estinzione ordini all'aumentare del numero dei clienti (fonte: [16]).

Con questi dati si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Il tempo di consegna dipende dal tempo totale di produzione delle parti e dal tempo di viaggio per raggiungere il cliente.
- Le prestazioni del camion abilitato AM dipendono da:
 - La disponibilità e la velocità della connettività Internet e sistemi di guida GPS accurati.
 - I file dati completi di tutte le parti e i componenti.
- La versatilità del modello proposto (camion abilitato AM) dipende da file dati altamente integrati e condivisi dettagliati da termini e condizioni commerciali ben progettati.

Lo studio ha dimostrato come l'aggiunta di una rete di camion abilitati AM alla rete convenzionale esistente possa aiutare la SC ad aggiungere agilità, reattività, resilienza e sostenibilità e svilupparsi come un modello alternativo e valido. Resta, tuttavia, un modello concettuale, con una serie di presupposti che possono limitarne la praticità nel mondo reale [16]: uno di questi fattori critici per la produzione potrebbe essere, ad esempio, la presenza di un'adeguata scorta di materie prime appropriate per le stampanti metalliche e non metalliche nei centri di distribuzione [34].

10. Applicazione degli studi a un caso reale

Dopo le analisi teoriche svolte finora è doveroso tentare di applicare i concetti appresi ad un'impresa esistente sul territorio. Per questo caso applicativo, data la presenza di micro, piccole e medie imprese sul territorio italiano in larghissima maggioranza, si è deciso di prendere in considerazione un'azienda di piccole dimensioni in modo tale che l'esempio possa essere il più rappresentativo possibile: in particolare, si fa riferimento ad un'officina di riparazione di veicoli industriali nella provincia di Torino.

Questa azienda, a conduzione familiare, tratta principalmente due marchi di mezzi pesanti tramite affiliazioni con le case madri e, a seconda delle necessità, è disponibile a riparazioni anche su mezzi di altre case di produzione. Inoltre, l'officina è presente nel settore come intermediario tra le case madri e i clienti nella vendita di ricambi originali al banco sul territorio e, sotto richiesta diretta dei marchi, offre un servizio su chiamata h 24 su strada con furgoni dotati di tutta l'attrezzatura necessaria alle riparazioni ricoprendo il nord-ovest del paese e parte del territorio francese, in particolare la zona al confine della Valle d'Aosta. Essa presenta, tra impiegati d'ufficio, addetti al magazzino e alle riparazioni, dieci dipendenti, tutti a tempo pieno in sede, ed è strategicamente situata in una zona industriale vicino a uno svincolo autostradale.

L'azienda è stata direttamente monitorata più volte in un lungo arco di tempo per apprendere il più possibile sulle metodologie di lavoro utilizzate: questa analisi è stata necessaria per rendere noti i punti dove è possibile introdurre migliorie tramite l'AM nella SC dell'azienda. Per questo motivo, verranno ora descritti i principali processi necessari alla riparazione del veicolo, dall'arrivo del cliente a lavoro ultimato, sia in caso di riparazione in sede che di riparazione su strada.

Metodologie di lavoro

Accettazione e diagnosi

All'arrivo di un cliente, la segreteria dell'azienda provvede all'accettazione tramite nome dell'azienda di appartenenza, telaio del veicolo e chilometri percorsi dal veicolo: il mezzo viene registrato a sistema in caso di prima riparazione presso l'officina o viene aperto direttamente un ordine di lavoro con i dati già presenti nel database. Successivamente, un operatore viene chiamato per una prima ispezione del veicolo dove, tramite le indicazioni dell'autista e successivamente l'attrezzatura di diagnosi, si circoscrive il problema da risolvere, si annota il tutto nella sezione di diagnosi dell'ordine di lavoro e viene fatta una prima stima dei tempi necessari alla riparazione.

Smontaggio e richiesta pezzi di ricambio

Una volta identificato il problema, la parte o le parti del veicolo identificate vengono smontate e ispezionate per capire se i componenti possono essere riparati tramite tecniche di officina o se vi è la necessità di sostituzione: ovviamente, il tempo di smontaggio delle parti varia a seconda dei componenti. Dopo aver annotato nella sezione di competenza dell'ordine di lavoro cartaceo i componenti per la sostituzione l'operatore fa richiesta al magazzino per avere i ricambi necessari tramite dispositivi connessi tramite WiFi. Il magazzino provvede ad assegnare i pezzi richiesti all'ordine di lavoro virtuale, a prelevarli se presenti a magazzino o a ordinarli se non presenti in casa. Può spesso capitare che già dalla fase di diagnosi l'operatore possa capire che alcuni pezzi vadano sostituiti; in questo caso, l'ordine al magazziniere può essere svolto prima e i ricambi possono essere ordinati o prelevati da magazzino già durante la fase di smontaggio e per questo motivo la fase di approvvigionamento dei ricambi può risultare velocizzata.

Montaggio, collaudo e consegna

Una volta ricevuti i ricambi dal magazzino, l'operatore può procedere con le sostituzioni dei componenti, che richiederà un certo tempo a seconda delle parti interessate, che vengono descritte nella sezione apposita dell'ordine di lavoro. Se possibile, vengono svolti dei collaudi intermedi prima del montaggio finale per evitare che, all'accensione di prova del veicolo, si crei un danno. Una volta effettuato il collaudo finale senza riscontrare problemi viene fatta una prova su strada per verificare la funzionalità dei sistemi e, successivamente, il veicolo è pronto per essere consegnato al cliente. La segreteria viene avvisata della fine dei lavori e viene chiuso l'ordine di lavoro con firma del cliente.

Intervento su strada

In caso di intervento su strada l'officina riceve una chiamata direttamente dall'autista con il veicolo in avaria che descrive le problematiche riscontrate. L'operatore in reperibilità si reca in sede, richiede le autorizzazioni necessarie per l'intervento alle autorità competenti, carica il furgone con i ricambi necessari e si reca nel punto di S.O.S. indicato. Una volta sul posto, l'operatore effettua la sostituzione dei componenti: in caso di imprevisti, come l'impossibilità di portare a termine il lavoro sul luogo a causa di problematiche non risolvibili in tempi brevi, viene organizzato un trasporto presso l'officina dove gli operatori disporranno dei mezzi necessari per le riparazioni.

Possibili migliorie

Descritte le principali dinamiche dell'azienda per la riparazione o sostituzione dei componenti si ha un quadro completo dei processi, per i quali ora si possono analizzare possibili migliorie con l'introduzione dell'AM nella SC a livello strutturale, di sostenibilità e di ricambistica tramite l'analisi della letteratura svolta. Dato lo status attuale di sviluppo e diffusione di questa tecnologia l'implementazione richiederebbe ingenti capitali d'investimento sia a livello di infrastrutture che a livello di formazione del personale che un'azienda a conduzione familiare difficilmente sarebbe disposta a rischiare: per questo motivo, l'analisi è rivolta ad un futuro a medio-lungo termine con ipotesi di prospettive ottimistiche sull'abbassamento dei costi e sulla diffusione della tecnologia stessa.

Struttura

L'officina analizzata presenta due magazzini di ricambi originali di piccole dimensioni, distinti secondo i due marchi con cui è affiliata: i componenti stoccati in questi magazzini possono essere visti come un investimento che non verrà capitalizzato fino al momento in cui non verranno richiesti per essere montati o venduti e dunque, a seconda della richiesta, corrono il rischio di cadere in obsolescenza. Con l'apertura di un reparto dedicato l'adozione dell'AM all'interno dell'azienda permetterebbe all'officina di produrre in parte da sola i ricambi necessari ai lavori di sostituzione: questo comporterebbe un cambiamento radicale a livello di fornitori di ricambi, i quali in parte verrebbero sostituiti da fornitori di materie prime per lo stampaggio, di competenza del personale, di gestione logistica e delle tempistiche e di gestione del magazzino di pezzi, che verrebbe ridotto per essere sostituito dallo stoccaggio di polveri. Si prevede che la struttura sarà di tipo ibrido come descritto dalla fonte [7], vale a dire che una catena basata sull'AM è affiancata a quella tradizionale per la produzione di parti a lenta movimentazione.

In questo contesto l'AM può essere introdotto a livello strutturale in tre modi:

- **Struttura centralizzata:** questo tipo di struttura nel caso di analisi presenterebbe grossi limiti, poiché il core business dell'impresa è la riparazione di mezzi e dunque la progettazione o riprogettazione di un pezzo sul software CAD 3D richiederebbe tempistiche troppo lunghe per un lavoro di manutenzione di un veicolo e sarebbe particolarmente soggetto a errori.
- **Struttura decentralizzata:** per questo tipo di struttura sarebbe necessaria un cambiamento radicale a livello industriale. Infatti, oltre a presupporre l'implementazione della tecnologia da parte dell'azienda anche tramite sussidi governativi, la casa madre dovrebbe standardizzare i componenti dei suoi veicoli e agire da fornitore di file CAD 3D per le officine, da considerare come hub dislocati sul territorio [24]. Così facendo, l'officina potrebbe creare un inventario digitale per i ricambi di diversi modelli della stessa marca, stamparli seguendo la logica JIT [22] e dunque tagliare drasticamente la dimensione del magazzino di pezzi. In questo modo, se dalla diagnosi risultassero chiari i componenti da sostituire, sarebbe possibile cominciare a produrre i ricambi prima dell'inizio della fase di smontaggio, riducendo notevolmente il tempo di attesa per l'approvvigionamento.
- **Produzione mobile:** data l'eventualità di intervenire su chiamata in un qualsiasi momento del giorno l'implementazione dell'AM in sede non sarebbe utile al fine di riparare tempestivamente un veicolo su strada. In questo caso risulterebbe utile, la produzione mobile teorizzata nell'articolo [16], che consiste nell'abilitare un camion con la tecnologia AM. Infatti, in caso i ricambi non fossero disponibili in magazzino e l'operatore in sede conoscesse già la natura del guasto e i componenti da sostituire, potrebbe abilitare il servizio di produzione mobile inviando i file CAD 3D prima della partenza, così da arrivare sul posto per l'intervento in concomitanza al camion abilitato, in modo tale che i pezzi possano essere prodotti durante il tragitto e la fase di smontaggio risparmiando tempo.

Sostenibilità ambientale

È interessante analizzare anche dal punto di vista della sostenibilità ambientale le possibili migliorie che l'implementazione dell'AM nell'azienda potrebbe portare.

In questa azienda l'approvvigionamento di pezzi di ricambio è giornaliero e la SC si estende anche oltre i confini nazionali, e ciò comporta una fitta rete di trasporti. Per meglio comprendere la mole di emissioni che la produzione e il trasporto dei ricambi comporta viene preso come esempio un kit formato da pistone e biella: innanzitutto, devono essere considerate le emissioni per l'approvvigionamento della materia prima e per produrre l'energia necessaria alla produzione, che presumibilmente comprende processi di stampaggio e di lavorazioni meccaniche di post-produzione, e successivamente quelle per il trasporto, che in genere avviene verso uno o più centri di distribuzione via nave o su gomma e, infine, con trasporto gommato all'azienda.

Ragionando sul modello di struttura decentralizzata, che si presume presenti maggiori vantaggi a livello logistico e le minori emissioni da quanto emerso in letteratura [1][4], con la standardizzazione e la fornitura da parte della casa madre dei file CAD 3D verrebbero evitate le emissioni dovute al trasporto di prodotti finiti descritto in precedenza, poiché la produzione avverrebbe internamente all'officina. Ovviamente, non tutti i ricambi sono riproducibili tramite AM, dunque non si prevede che la SC tradizionale dell'approvvigionamento di pezzi scompaia ma che, almeno inizialmente, affianchi quella dell'AM con una struttura ibrida [7]; dunque, è necessario approfondire il confronto delle emissioni dei due modelli di SC e il livello delle emissioni della produzione e del trasporto della materia prima per lo stampaggio per fare un confronto AM-TM sull'approvvigionamento.

Non è da sottovalutare però il riciclo di polvere che l'AM garantisce successivamente al trattamento post-produzione: a differenza della TM, che lavora tramite asportazione di materiale che non viene riciclato, l'AM utilizza ad ogni nuovo ciclo un limitato quantitativo di polvere vergine, e questo permette di ridurre l'approvvigionamento di materia prima e delle emissioni conseguenti alla sua produzione.

Oltre a ciò, l'introduzione dell'AM nella SC permetterebbe l'introduzione di materiali innovativi nella produzione che garantirebbero migliori prestazioni e una riduzione del peso,

producendo di conseguenza minori emissioni: è il caso dei materiali compositi [34] e del Ti [13], che è stato analizzato per applicazioni nel settore aerospaziale e automotive e che andrebbe approfondito anche nel campo dei mezzi industriali. Considerando che gran parte del trasporto di merci via terra avviene tramite mezzi pesanti studiare l'applicazione di materiali innovativi per questo settore risulterebbe particolarmente vantaggioso dal punto di vista della sostenibilità.

Condivisione dei dati

Per ottenere un sistema più efficiente a livello di struttura decentralizzata le case madri potrebbero adottare una strategia di condivisione delle informazioni basata sulle BC: infatti, considerando le numerose aziende di limitate dimensioni nel ruolo di hub, questa tecnologia potrebbe incoraggiare la tele-manufacturing e la localized manufacturing [19] oltre alla standardizzazione dei componenti. Inoltre, essa può risultare utile per la condivisione dei dati sui guasti e sulle sostituzioni di componenti, che potrebbero essere raggruppati in totale sicurezza: questa struttura di condivisione può tornare utile sia alla casa madre, per il miglioramento della progettazione dei componenti stessi, sia agli hub, per avere una visione più chiara, veloce ed efficace durante la fase di diagnosi dei problemi di un mezzo in riparazione e un minor tempo di attesa per i ricambi, in quanto, basandosi sui dati condivisi da diversi centri di riparazione, le aziende potrebbero preventivamente stampare e tenere a magazzino i componenti più soggetti a sostituzione. Così facendo, entrambi gli attori della SC trarrebbero vantaggio da una condivisione di dati aggiornata e sicura.

11. Conclusioni

Nel lavoro di revisione della letteratura svolto si è analizzata l'influenza e i cambiamenti che le tecnologie dell'industria 4.0 hanno apportato attualmente nell'industria: in particolare, si è indagato come l'introduzione dell'AM abbia apportato profondi cambiamenti riguardo le dinamiche della SC. Dopo una breve introduzione riguardante l'influenza che il COVID-19 ha avuto sull'industria, è stata svolta un'analisi bibliografica per capire quali fossero i campi di maggior interesse in cui l'AM ha comportato cambiamenti significativi nella SC, che sono risultati essere il campo gestionale, della sostenibilità e della ricambistica: su questi è stata svolta la classificazione delle fonti tratte dalla letteratura. Successivamente, è stata svolta una breve introduzione sulle tecnologie dell'industria 4.0, con particolare enfasi sull'AM, e su come l'interazione tra BC e AM possa influenzare la l'ECAM [19]. Per comprendere a pieno i motivi per cui si tende ad adottare l'AM è stato svolto un confronto tra vantaggi [2][7][30] e svantaggi [14][15][29] che l'implementazione di questa tecnologia può portare nella SC, da cui si evince come, per bassi volumi di produzione, i primi superino nettamente i secondi, fatto dimostrato anche dall'aumento esponenziale delle pubblicazioni al riguardo nell'ultimo quadriennio dovuto al crescente interesse. Oltre a questo, si evince come questa tecnologia porti a un aumento della resistenza [9][27], della resilienza [9][27], della reattività [22], della flessibilità [25] e della sostenibilità [12][13][19] della SC, oltre a un miglioramento della gestione dell'approvvigionamento e dell'inventario [15]. È stato ritenuto doveroso anche effettuare un approfondimento sui costi di questa tecnologia e sulle economie di scala, che al momento risultano essere uno dei maggiori ostacoli all'implementazione di questa tecnologia da parte delle aziende: la previsione dopo l'analisi è che con l'evoluzione della tecnologia questa diventi meno onerosa a livello di investimenti, adatta a produzioni più ampie e che si possano formare delle economie di scala [38], che su piccoli volumi di produzione risultano di difficile creazione.

Inoltre, è stato ritenuto necessario indagare in che modo l'influenza della politica ostacoli o incoraggi la diffusione dell'AM, poiché con i dovuti incentivi e investimenti effettuati da parte di vari governi si prevede che possa notevolmente accelerare [23][29][33].

Successivamente si è analizzato il cambiamento a livello strutturale della SC conseguentemente all'introduzione di questa tecnologia: in particolare, si sono descritte le strutture centralizzata, decentralizzata e ibrida, descrivendone vantaggi e limiti: in particolare, dall'analisi si nota che la struttura decentralizzata diventerà preminente con l'efficienza tecnologica [26]. Al riguardo è stato deciso di svolgere un approfondimento sul ruolo fondamentale che questa tecnologia sta svolgendo nel settore degli aiuti umanitari e su come le SC possano essere positivamente influenzate [37], in quanto si è ritenuto di mettere in luce questo settore che in letteratura è stato poco trattato.

La sostenibilità è un altro aspetto analizzato a fondo, risultando uno degli argomenti di maggiore interesse in letteratura. Dall'analisi svolta risulta che adottando l'AM le emissioni della SC risultano minori rispetto a quelle che adottano la TM, sia per il consumo dell'energia riguardo la produzione vera e propria [28][29] sia lungo tutta la SC [7]: più specificamente le strutture decentralizzate presentano emissioni minori rispetto alle strutture centralizzate [12]. È stato svolto un interessante approfondimento sul titanio e sulle sue applicazioni nell'AM, dal quale si deduce che possa avere un discreto successo nello sviluppo di componenti per ridurre il peso del veicolo e le emissioni dovute al carburante ad esso associate, con particolari riferimenti ai settori aerospaziale e automotive [13].

L'ultimo campo analizzato nel dettaglio è quello della ricambistica, dove si conclude che l'AM esercita una notevole influenza, poiché essa permette una produzione più rapida [12], con una riduzione dei costi e dell'impatto ambientale, in particolar modo per il settore aerospaziale [7]. È stato approfondito inoltre un modello teorico di produzione mobile tramite camion abilitati con questa tecnologia [16]: oltre a ridurre il lead time, questo modello è un esempio di integrazione di diverse tecnologie dell'industria 4.0 e garantisce una versatilità di livello superiore in quanto dipendente unicamente dal file CAD 3D, per il quale dunque si ritiene che uno sviluppo in futuro sia plausibile.

Infine, è stata effettuata un'analisi di un caso reale per tentare di introdurre questa nuova tecnologia all'interno di una piccola azienda, in rappresentanza della maggior parte delle imprese presenti in Italia.

Il ragionamento ha tentato di integrare la conoscenza appresa dall'analisi della letteratura e i casi approfonditi in un'impresa presente sul territorio: in questa analisi si evince come le aziende, specie quelle di limitate dimensioni, potranno adottare la tecnologia gradualmente in una struttura decentralizzata che si affiancherebbe alla SC tradizionale con notevoli vantaggi in termini di tempi di approvvigionamento, costi ed emissioni. Al momento però il costo e le prestazioni dell'AM non sono ad un livello tale da poter essere efficaci in realtà di questo tipo: per questo l'analisi è volta ad un futuro di medio-lungo termine, ma da questo esempio si può concludere che l'implementazione di questa tecnologia è possibile anche in realtà così piccole, purché appartenenti a settori adatti.

Il lavoro si è incentrato in particolare sui settori e gli attori principali della questione, in modo da fornire al lettore un quadro il più possibile completo di come la tecnologia AM abbia influenzato la SC, comprendendo anche tecnologie ausiliarie necessarie a questo scopo: in definitiva, si può affermare che l'implementazione questa tecnologia porti numerosi cambiamenti nella SC, soprattutto miglorie, ed essa potrebbe garantire un vantaggio competitivo nel medio termine alle imprese che ad oggi decidano di adottarla tra le tecniche di produzione.

12. Bibliografia

- [1]: Barz, A., Buer, T., & Haasis, H.-D. (2016). A Study on the Effects of Additive Manufacturing on the Structure of Supply Networks. In *IFAC-PapersOnLine* (Vol. 49, Issue 2, pp. 72–77). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.03.013>.
- [2]: Maximilian Kunovjanek, Nils Knofius & Gerald Reiner (2022) Additive manufacturing and supply chains – a systematic review, *Production Planning & Control*, 33:13, 1231-1251, DOI: 10.1080/09537287.2020.1857874.
- [3]: Pour, M. A., Zanardini, M., Bacchetti, A., & Zanoni, S. (2016). Additive Manufacturing Impacts on Productions and Logistics Systems. In *IFAC-PapersOnLine* (Vol. 49, Issue 12, pp. 1679–1684). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.822>.
- [4]: Manco, P., Caterino, M., Rinaldi, M., & Fera, M. (2023). Additive manufacturing in green supply chains: A parametric model for life cycle assessment and cost. In *Sustainable Production and Consumption* (Vol. 36, pp. 463–478). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.01.015>.
- [5]: Cui, W., Yang, Y., Di, L., & Dababneh, F. (2021). Additive manufacturing-enabled supply chain: Modeling and case studies on local, integrated production-inventory-transportation structure. In *Additive Manufacturing* (Vol. 48, p. 102471). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102471>.
- [6]: Ronchini, A., Moretto, A. M., & Caniato, F. (2023). Adoption of additive manufacturing technology: drivers, barriers and impacts on upstream supply chain design. In *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* (Vol. 53, Issue 4, pp. 532–554). Emerald. <https://doi.org/10.1108/ijpdlm-12-2021-0541>.
- [7]: Calignano, F., & Mercurio, V. (2023). An overview of the impact of additive manufacturing on supply chain, reshoring, and sustainability. In *Cleaner Logistics and Supply Chain* (Vol. 7, p. 100103). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100103>.
- [8]: Orji, I. J., & Ojadi, F. (2023). Assessing the effect of supply chain collaboration on the critical barriers to additive manufacturing implementation in supply chains. In *Journal of*

Engineering and Technology Management (Vol. 68, p. 101749). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2023.101749>.

[9]: Belhadi, A., Kamble, S. S., Venkatesh, M., Chiappetta Jabbour, C. J., & Benkhati, I. (2022). Building supply chain resilience and efficiency through additive manufacturing: An ambidextrous perspective on the dynamic capability view. In *International Journal of Production Economics* (Vol. 249, p. 108516). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108516>.

[10]: Cox, J. R., Kipling, I., & Gibbons, G. J. (2023). Ensuring supply chain integrity for material extrusion 3D printed polymer parts. In *Additive Manufacturing* (Vol. 62, p. 103403). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103403>.

[11]: Yılmaz, Ö. F. (2020). Examining additive manufacturing in supply chain context through an optimization model. In *Computers & Industrial Engineering* (Vol. 142, p. 106335). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106335>.

[12]: Debnath, B., Shakur, M. S., Tanjum, F., Rahman, M. A., & Adnan, Z. H. (2022). Impact of Additive Manufacturing on the Supply Chain of Aerospace Spare Parts Industry—A Review. In *Logistics* (Vol. 6, Issue 2, p. 28). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/logistics6020028>.

[13]: Nyamekye, P., Rahimpour Golroudbary, S., Piili, H., Luukka, P., & Kraslawski, A. (2023). Impact of additive manufacturing on titanium supply chain: Case of titanium alloys in automotive and aerospace industries. In *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* (Vol. 6, p. 100112). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2023.100112>.

[14]: Oettmeier, K., & Hofmann, E. (2016). Impact of additive manufacturing technology adoption on supply chain management processes and components. In *Journal of Manufacturing Technology Management* (Vol. 27, Issue 7, pp. 944–968). Emerald. <https://doi.org/10.1108/jmtm-12-2015-0113>.

[15]: Noorwali, A., Babai, M. Z., & Ducq, Y. (2022). Impacts of additive manufacturing on supply chains: an empirical investigation. In *Supply Chain Forum: An International Journal*

(Vol. 24, Issue 2, pp. 182–193). Informa UK Limited.
<https://doi.org/10.1080/16258312.2022.2142480>.

[16]: Basu R, J., Abdulrahman, M. D., & Yuvaraj, M. (2023). Improving agility and resilience of automotive spares supply chain: The additive manufacturing enabled truck model. In *Socio-Economic Planning Sciences* (Vol. 85, p. 101401). Elsevier BV.
<https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101401>.

[17]: Patil, H., Niranjana, S., Narayanamurthy, G., & Narayanan, A. (2022). Investigating contingent adoption of additive manufacturing in supply chains. In *International Journal of Operations & Production Management* (Vol. 43, Issue 3, pp. 489–519). Emerald.
<https://doi.org/10.1108/ijopm-05-2022-0286>.

[18]: Priyadarshini, J., Singh, R. K., Mishra, R., & Bag, S. (2022). Investigating the interaction of factors for implementing additive manufacturing to build an antifragile supply chain: TISM-MICMAC approach. In *Operations Management Research* (Vol. 15, Issues 1–2, pp. 567–588). Springer Science and Business Media LLC.
<https://doi.org/10.1007/s12063-022-00259-7>.

[19]: Shukla, S., & KC, S. (2023). Leveraging Blockchain for sustainability and supply chain resilience in e-commerce channels for additive manufacturing: A cognitive analytics management framework-based assessment. In *Computers & Industrial Engineering* (Vol. 176, p. 108995). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.108995>.

[20]: Lotfi, Z., Mostafapur, A., & Barari, A. (2021). Properties of Metal Extrusion Additive Manufacturing and Its Application in Digital Supply Chain Management. In *IFAC-PapersOnLine* (Vol. 54, Issue 1, pp. 199–204). Elsevier BV.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.024>.

[21]: Tuck, C., Hague, R., & Burns, N. (2007). Rapid manufacturing: impact on supply chain methodologies and practice. In *International Journal of Services and Operations Management* (Vol. 3, Issue 1, p. 1). Inderscience Publishers.
<https://doi.org/10.1504/ijksom.2007.011459>.

[22]: 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. In *Benchmarking: An International Journal*. Emerald. <https://doi.org/10.1108/bij-03-2022-0163>.

[23]: Arbabian, M. E. (2022). Supply Chain Coordination via Additive Manufacturing. In *International Journal of Production Economics* (Vol. 243, p. 108318). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108318>.

[24]: Rinaldi, M., Caterino, M., Fera, M., Manco, P., & Macchiaroli, R. (2021). Technology selection in green supply chains - the effects of additive and traditional manufacturing. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 282, p. 124554). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124554>.

[25]: Delic, M., & Eyers, D. R. (2020). The effect of additive manufacturing adoption on supply chain flexibility and performance: An empirical analysis from the automotive industry. In *International Journal of Production Economics* (Vol. 228, p. 107689). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107689>.

[26]: Rinaldi, M., Caterino, M., Manco, P., Fera, M., & Macchiaroli, R. (2021). The impact of Additive Manufacturing on Supply Chain design: a simulation study. In *Procedia Computer Science* (Vol. 180, pp. 446–455). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.261>.

[27]: Naghshineh, B., & Carvalho, H. (2022). The implications of additive manufacturing technology adoption for supply chain resilience: A systematic search and review. In *International Journal of Production Economics* (Vol. 247, p. 108387). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108387>.

[28]: The Role of Additive Manufacturing in Supply Chain Management. (2023). In *Management and Production Engineering Review*. Polish Academy of Sciences Chancellery. <https://doi.org/10.24425/mper.2023.145363>.

[29]: Afshari, H., Searcy, C., & Jaber, M. Y. (2020). The role of eco-innovation drivers in promoting additive manufacturing in supply chains. In *International Journal of Production Economics* (Vol. 223, p. 107538). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107538>.

- [30]: Bouchenine, A., & Abdel-Aal, M. A. M. (2023). Towards supply chain resilience with additive manufacturing: A bibliometric survey. In *Supply Chain Analytics* (Vol. 2, p. 100014). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100014>.
- [31]: Xue, J., & Li, G. (2023). Balancing resilience and efficiency in supply chains: Roles of disruptive technologies under Industry 4.0. In *Frontiers of Engineering Management* (Vol. 10, Issue 1, pp. 171–176). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s42524-022-0247-8>.
- [34]: Dalpadulo, E., Petruccioli, A., Gherardini, F., & Leali, F. (2022). A Review of Automotive Spare-Part Reconstruction Based on Additive Manufacturing. In *Journal of Manufacturing and Materials Processing* (Vol. 6, Issue 6, p. 133). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jmmp6060133>.
- [35]: Saravanan, N., Olivares-Aguila, J., & Vital-Soto, A. (2022). Bibliometric and Text Analytics Approaches to Review COVID-19 Impacts on Supply Chains. In *Sustainability* (Vol. 14, Issue 23, p. 15943). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su142315943>.
- [37]: Corsini, L., Aranda-Jan, C. B., & Moultrie, J. (2020). The impact of 3D printing on the humanitarian supply chain. In *Production Planning & Control* (Vol. 33, Issues 6–7, pp. 692–704). Informa UK Limited. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1834130>.
- [38]: Baumers, M., & Holweg, M. (2019). On the economics of additive manufacturing: Experimental findings. In *Journal of Operations Management* (Vol. 65, Issue 8, pp. 794–809). Wiley. <https://doi.org/10.1002/joom.1053>.
- [39]: Thomas, D. (2015). Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective. In *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Vol. 85, Issues 5–8, pp. 1857–1876). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7973-6>.
- [40] Ren, L., Zhang, L., Wang, L., Tao, F., & Chai, X. (2014). Cloud manufacturing: key characteristics and applications. In *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* (Vol. 30, Issue 6, pp. 501–515). Informa UK Limited. <https://doi.org/10.1080/0951192x.2014.902105>.

[42]: Ahlsell, L., Jalal, D., Khajavi, S. H., Jonsson, P., & Holmström, J. (2022). Additive Manufacturing of Slow-Moving Automotive Spare Parts: A Supply Chain Cost Assessment. In *Journal of Manufacturing and Materials Processing* (Vol. 7, Issue 1, p. 8). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jmmp7010008>.

13. Sitografia

[32]:

[https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20200827STO85804/che-cos-e-l-intelligenza-artificiale-e-come-viene-usata#:~:text=L'intelligenza%20artificiale%20\(IA\),la%20pianificazione%20e%20la%20creativit%C3%A0](https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20200827STO85804/che-cos-e-l-intelligenza-artificiale-e-come-viene-usata#:~:text=L'intelligenza%20artificiale%20(IA),la%20pianificazione%20e%20la%20creativit%C3%A0)

[33]:

<https://www.whitehouse.gov/cea/written-materials/2022/05/09/using-additive-manufacturing-to-improve-supply-chain-resilience-and-bolster-small-and-mid-size-firms/>

[36]:

<https://www.ansys.com/blog/additive-manufacturing-fills-supply-chain-gap>

[41]:

<https://www.mimit.gov.it/index.php/it/pnrr/progetti-pnrr/pnrr-transizione-4-0>