

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

Additive manufacturing e supply chain: confronto tra produzione centralizzata AM e distribuita AM di un prodotto customizzato



Relatore
Prof. Arianna Alfieri

Candidato
Carmelo Lobello

Correlatore
Ing. Erica Pastore

Anno accademico 2020/2021

Abstract

Nella tesi è stata analizzata una catena logistica per lo stampaggio additivo di un prodotto d'arredamento realizzato su richiesta del cliente, cioè un prodotto customizzato e stampato su domanda mediante tecnologia additive manufacturing.

È stato effettuato un confronto tra la produzione additive manufacturing centralizzata e la produzione additive distribuita. Entrambi gli scenari sono stati analizzati sia con delle logiche di gestione delle materie prime differenti sia con dei diversi livelli di variabilità della domanda. Sono stati realizzati quattro scenari che sono stati simulati mediante un software di simulazione, ottenendo in output delle statistiche utili al calcolo dei tempi del sistema e dei costi logistici (il costo di riordino delle materie prime, il costo del trasporto dei prodotti finiti e il costo del mantenimento a magazzino delle materie prime). L'obiettivo della tesi è quello di effettuare un confronto tra l'economicità delle filiere logistiche e la tempestività nel servire il cliente negli scenari analizzati.

I risultati della tesi confermano molti articoli presenti in letteratura, infatti, la produzione distribuita permette di abbattere i tempi lungo la filiera, nonché di abbassare i costi di natura logistica grazie all'assenza di alcune voci di costo, quali il costo di trasporto dei prodotti finiti.

Sommario

Abstract	1
1. Introduzione	4
1.1. Review della letteratura	6
1.1.1. Introduzione all'additive manufacturing.....	6
1.1.2. Tecnologie di produzione	9
1.1.3. Settori di applicazione della tecnologia additive manufacturing.....	12
1.1.4. Impatto dell'additive manufacturing sulle filiera logistiche	14
1.1.5. Produzione additive manufacturing centralizzata e distribuita	18
1.2. Gap della letteratura	21
2. Descrizione delle filiere logistiche, dei tempi e dei costi logistici.....	22
2.1. Descrizione della filiera logistica	22
2.1.1. Produzione centralizzata con logica PULL.....	25
2.1.2. Produzione distribuita con logica PULL.....	26
2.1.3. Produzione centralizzata con inventory.....	28
2.1.4. Produzione distribuita con inventory.....	30
2.1.5. Step produttivi.....	31
2.2. Dati di input di domanda e produzione	32
2.3. Dati di input sui tempi.....	34
2.4. Obiettivi della tesi e misure di performance.....	36
2.5. Costi della rete	37
2.5.1. Costo di riordino delle materie prime.....	38
2.5.2. Costo di mantenimento a magazzino delle materie prime	38
2.5.3. Costo di spedizione prodotto finito	39
2.6. Modellizzazione delle filiere logistiche in Arena Simulation.....	40
2.7. Setup della simulazione.....	42
2.7.1. Definizione del transitorio.....	42
2.7.2. Numero di repliche.....	45
3. Analisi dei risultati	47
3.1. Media variabilità della domanda.....	47
3.1.1. Tempo di consegna prodotti finiti.....	47
3.1.2. Tempo di attesa in coda e utilizzo delle stampanti.....	51
3.1.3. Costi logistici.....	53

3.1.4. Confronto tempi di consegna e costi logistici	59
3.2. Alta e bassa variabilità della domanda.....	61
3.2.1. Tempo di consegna dei prodotti finiti	61
3.2.2. Costi logistici.....	64
3.2.3. Produzione	67
4. Analisi di sensibilità	70
4.1. Variazione numero macchinari additive nella produzione centralizzata	70
4.2. Ritardo nella consegna delle materie prime	74
5. Conclusione	78
6. Bibliografia	80

1. Introduzione

L'additive manufacturing (AM) è un insieme di tecnologie produttive additive, cioè la produzione di un prototipo o di un prodotto finito mediante un processo di introduzione del materiale durante la fase di realizzazione del prodotto stesso. Tali tecnologie si oppongono alla produzione tradizionale, anche detta sottrattiva, che partendo da una materia prima, mediante operazioni di rimozione del materiale, permettono di realizzare il prodotto finito. Esistono molteplici tecnologie di natura additiva che stanno affiancando o sostituendo la produzione sottrattiva. Esse differiscono in base alle materie prime utilizzate o al processo produttivo ma presentano la medesima caratteristica di effettuare un processo additivo del materiale. La versatilità delle materie prime della tecnologia AM e i molteplici vantaggi che essa possiede, hanno permesso un grande sviluppo di tale tecnologia in diversi settori.

La tesi ha posto il focus sulla realizzazione, mediante tecnologia additive, di un prodotto d'arredamento customizzato realizzato su domanda specifica del cliente, confrontandone la produzione centralizzata AM e la produzione distribuita AM. L'obiettivo è fornire delle indicazioni su quale delle due metodologie di produzione sia la più veloce nel servire il cliente e la più economica. Inoltre, confrontando metodologie di gestione delle materie prime differenti, la tesi ha come obiettivo quello di specificare quale metodologia sia la più conveniente.

Nel primo capitolo, è stata realizzata una review della letteratura, analizzando la tecnologia additive in generale e gli step necessari per la realizzazione di un prodotto mediante AM. Sono stati inoltre, brevemente presentati le diverse tecnologie di produzione additive e i settori in cui essa è presente ormai stabilmente e quelli in cui si sta inserendo. Successivamente, è stata effettuata una discussione sulle differenze tra la produzione definita convenzionale e la produzione additive mostrando i vantaggi dell'una e dell'altra metodologia sia sull'atto produttivo in sé ma soprattutto lungo la filiera logistica. Infine, sono state confrontate le due principali catene logistiche aventi tecnologia AM, cioè la produzione centralizzata e la produzione distribuita mettendo in evidenza i vantaggi e gli svantaggi di ciascuna di esse.

Nel secondo capitolo, è stata presentata la filiera logistica in esame, le metodologie di gestione delle materie prime ipotizzate e i dati di input utilizzati in Arena Simulation Software per realizzare la simulazione. Le filiere logistiche ipotizzate sono quattro, le quali presentano metodologie di gestione delle materie prime differenti e posizionamento delle stampanti differenti, con lo scopo di trovare lo scenario più economicamente conveniente e con il minor tempo di consegna del prodotto finito. Per ciascun modello sono descritte le fasi cruciali e differenzianti della filiera con i rispettivi tempi espressi sotto forma di distribuzione statistica. I dati di input utilizzati sono stati presi dall'articolo [15] e dall'articolo [17]. Oltre ai tempi, in questo capitolo, sono descritte le metodologie usate per il calcolo dei costi della rete nei vari modelli.

Nel terzo capitolo, sono stati presentati i valori delle principali misure di performance nei vari scenari, con un focus maggiore al tempo di consegna del prodotto finito e ai costi logistici (il costo di riordino delle materie prime, il costo del trasporto dei prodotti finiti e il costo del mantenimento a magazzino delle materie prime). Successivamente, sono stati confrontati i vari scenari tra loro, esaltando i vantaggi e gli svantaggi di ciascuno di essi. Tale analisi, inoltre, è stata effettuata al variare del livello di variabilità della domanda. Dunque, oltre al verificare mediante l'ausilio della simulazione se fosse presente un sistema migliore degli altri, è stato analizzato se la variabilità della domanda generasse delle variazioni sulle misure di performance dei sistemi a produzione centralizzata AM e produzione distribuita AM.

Nel quarto capitolo, i modelli di simulazione sono stati alterati introducendo due modifiche, che hanno rimosso delle assunzioni precedentemente effettuate. La prima assunzione rimossa è legata al numero dei macchinari additive presenti negli scenari a produzione centralizzata, il quale era inferiore rispetto al numero dei macchinari AM nella distribuita. L'obiettivo di tale modifica è capire se, oltre al posizionamento delle stampanti lungo la filiera, anche il numero di esse potesse alterare i tempi ed i costi dei sistemi. La seconda assunzione rimossa è l'assenza di ritardo nella consegna delle materie prime nei sistemi aventi riordini giornalieri. L'obiettivo è quello di verificare se e quanto i produttori siano dipendenti dai fornitori di materie prime e quindi se un eventuale ritardo nella consegna alterasse le misure di performance del sistema.

1.1. Review della letteratura

1.1.1. Introduzione all'additive manufacturing

L'additive manufacturing, anche detta "direct manufacturing" o "stampaggio tridimensionale", è una tecnologia digitale per la produzione di oggetti fisici "layer by layer" mediante design tridimensionali (3D CAD) [3]. La produzione additive, diversamente dalle tecnologie di produzione sottrattiva, si sviluppa mediante un processo di introduzione del materiale durante la fase di realizzazione del prodotto. La produzione è avviata dalla realizzazione di un file 3D CAD, nel quale, le parti del modello sono memorizzate [2] sotto forma di modello virtuale che è tipicamente sviluppato mediante dei software di modellizzazione (Autocad, Solidworks ecc.) che facilitano tale fase di design. In alternativa, per ottenere il modello virtuale di un prodotto è possibile utilizzare delle "scanning machine", cioè macchine che utilizzano la luce ultravioletta per effettuare la scansione dell'oggetto [1]. Una volta ottenuto il file 3D CAD è necessario realizzare un file STL (Standard Triangle Language) che consiste nel convertire il file CAD in superfici "triangolizzate" usando le coordinate cartesiane tridimensionali [1]. Il file STL può essere direttamente processato dalle stampanti 3D [3] e rappresenta l'oggetto come un insieme di sezioni bidimensionali, detti layer. I layer 2D sono inviati alla stampante uno alla volta [4] per essere dunque stampati, così da realizzare il prodotto.

Gli inizi della tecnologia AM risalgono al 1982, quando Chuck Hull inventò la stereolitografia ponendo le basi per la prototipizzazione rapida. Difatti, inizialmente, la tecnologia AM era usata prettamente per la prototipizzazione, cioè la realizzazione di un modello matematico, fisico funzionale e infine di un modello fisico reale del prodotto. Il prototipo permette di comprendere eventuali errori durante la fase di progettazione o di realizzazione e correggerli prima di attivare la produzione.

Negli anni, gli studi sulla tecnologia additive manufacturing hanno permesso di ottenere macchinari per la stampa 3D che consentano di realizzare dei prodotti finiti di diversa natura e tipologia, utilizzando molteplici tipologie di materie prime e mediante differenti tecnologie produttive. Le materie prime utilizzate possono essere di natura plastica, metallica, ceramica, vetro e anche cellule vive. È possibile utilizzare sotto forma di resina, di polveri, di filamenti, di fogli o liquida [5].

La tecnologia AM nata inizialmente come supporto alla fase di prototipizzazione sta diventando sempre più importante nel contesto produttivo grazie alle caratteristiche di velocità, precisione e diversità di materiali utilizzabile, tanto da essere definita “la nuova rivoluzione industriale” [6]. Infatti, la principale capacità di tale tecnologia è di produrre, senza un eccessivo aumento dei costi, parti geometricamente molto complesse, con design richiesti dal cliente e unici nel suo genere [8]. L’obiettivo è quello di rendere molto più economicamente sostenibile la produzione di piccoli lotti e di prodotti customizzati.

Gli step principali per la realizzazione di un prodotto o di un prototipo mediante tecnologia additive (*figura 1.1* articolo [22]) sono i seguenti [7]:

1. Realizzazione del modello 3D CAD
2. Realizzazione del file STL partendo dal modello 3D CAD
3. Setup del modello e della stampante 3D
4. Produzione mediante stampante 3D
5. Prelievo del prodotto stampato
6. Pulizia del prodotto stampato
7. Operazioni di post-processing

La fase successiva alla realizzazione del modello virtuale è il setup di esso, cioè introdurre delle strutture addizionali, dette strutture di supporto, avente l’obiettivo di attutire gli stress termici e meccanici presenti durante la produzione del pezzo [7]. Successivamente, è effettuato il setup della macchina, che consiste nel caricamento dei materiali e nell’inizializzazione della macchina sia server che hardware [7]. I tempi legati a tali attività dipendono dalla complessità del prodotto e dalla tecnologia produttiva utilizzata.

La realizzazione del prototipo o del prodotto finito avviene autonomamente, in quanto la stampante 3D, una volta settata, realizza il prodotto secondo le specifiche del file STL, senza l'ausilio di manodopera, "riducendo il verificarsi di errori umani" [2]. Il tempo di stampaggio dipende sia dal tasso di produzione della macchina, che è una caratteristica tecnica della stampante, sia dalla geometria del prodotto e in particolare dal volume del pezzo più le eventuali strutture di supporto [7].

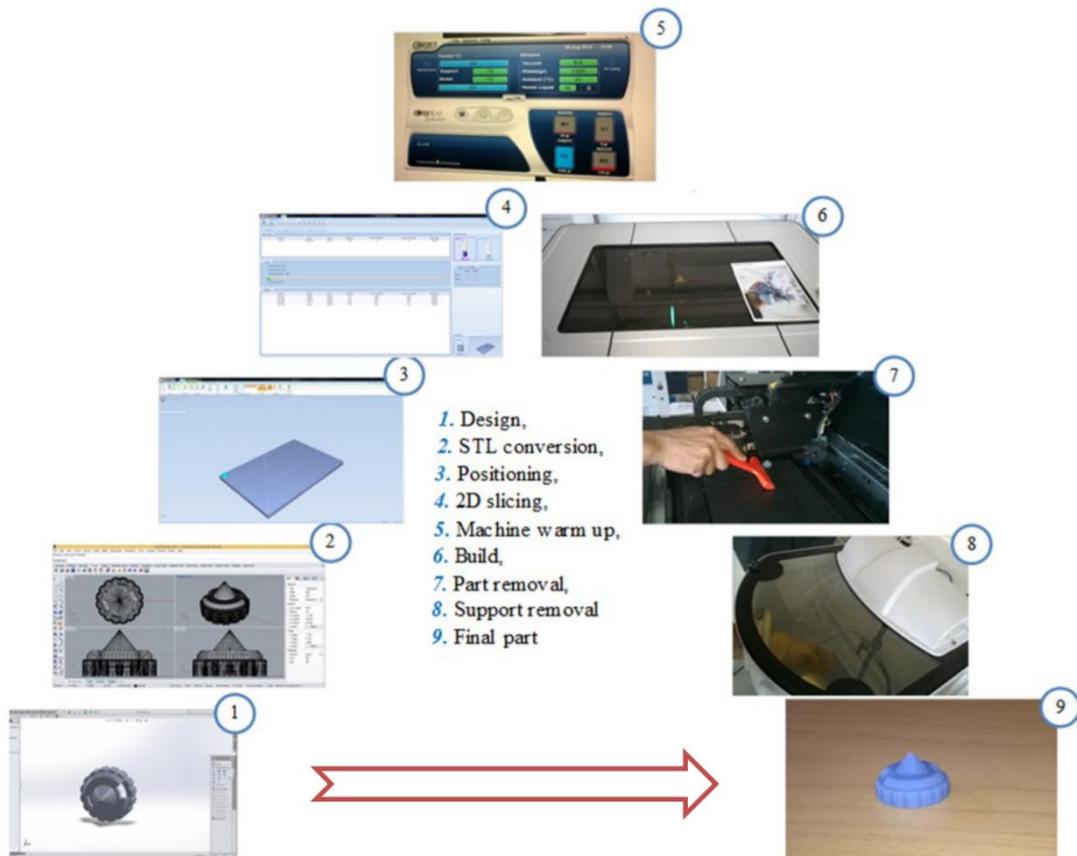


Figura 1.1 Fasi per la realizzazione di un prodotto mediante tecnologia additive manufacturing. Fonte: articolo [22]

La tecnologia additive manufacturing racchiude diverse tipologie di produzione differenti, le principali riportate in letteratura [1, 2] sono:

- Stereolithography (SLA)
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Digital Light processing (DLP)
- Fused Deposition Modeling (FDM)

Al termine della produzione, sono presenti le fasi di prelievo del pezzo, di rimozione delle polveri in eccesso nel caso di produzione powder bed-based e di post-produzione, detta anche post-processing. Quest'ultima fase rappresenta le attività fatte sul prodotto stampato per portarlo alla condizione di prodotto finito. Tra le attività di post-processing più comuni sono presenti i trattamenti termici, la lucidatura, la smerigliatura, le verniciature, la bavatura ed eventuali saldature o assemblaggi [2].

1.1.2. Tecnologie di produzione

In questo paragrafo sono descritte brevemente le principali tecnologie di produzione con l'obiettivo di presentarne il funzionamento.

La prima tecnologia di produzione additive manufacturing ad essere stata brevettata è la Stereolithography (*figura 1.2* articolo [23]), detta anche SLA. Essa sfrutta il processo di fotopolimerizzazione, "cioè la reazione di polimerizzazione di un composto che avviene sotto influenza della luce" [27]. La macchina a stereolitografia realizza il prodotto tracciando i layer punto per punto sulla resina mediante un fascio di luce. Sono utilizzabili differenti tipologie di resina, tipicamente di natura polimerica, ottenendo dei prodotti finiti aventi ottima resistenza termica e buone qualità superficiali [2]. Questa tecnologia è tipicamente usata per la produzione di piccole parti [1] o prototipi.

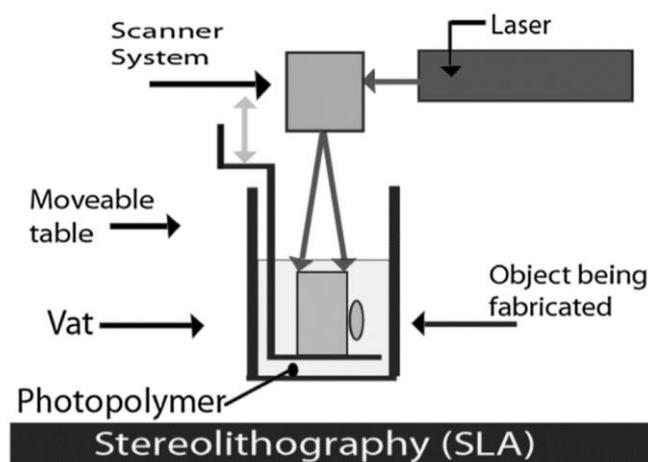


Figura 1.2 Schema di produzione con tecnologia Stereolithography. Fonte: articolo [23]

Una tecnologia molto simile alla Stereolithography è la Digital Light Processing (*figura 1.3* articolo [24]), detta DLP, nella quale la resina fotosensibile è esposta a contatto con un laser ultravioletto. La produzione è molto simile alla precedente con la differenza che il prodotto non è realizzato punto per punto ma bensì nel complesso. La tecnologia DLP permette di stampare prodotti aventi complesse geometrie, riuscendo ad avere dei dettagli precisi sul prodotto con eccellenti superfici [2].

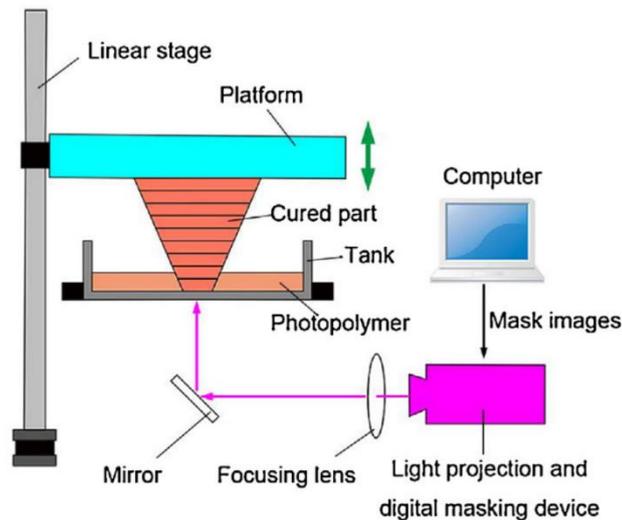


Figura 1.3 Schema di produzione con tecnologia Digital Light Processing. Fonte: articolo [24]

La selective laser sintering (*figura 1.4* articolo [23]), detta comunemente SLS, utilizza un fascio laser per unire la materia prima sotto forma di polveri poliammidiche, a volte rinforzate con fibre di vetro o alluminio. È usata per la realizzazione di prototipi, modelli e prodotti finiti. La possibilità di usare resine rinforzate con delle fibre permette di avere dei prodotti con ottima resistenza ad alte temperature e ottime performance strutturali [2]. La produzione è simile alla Stereolithography, con la differenza che utilizzando delle polveri è presente una struttura di raccolta polveri detta powder bed fusion.

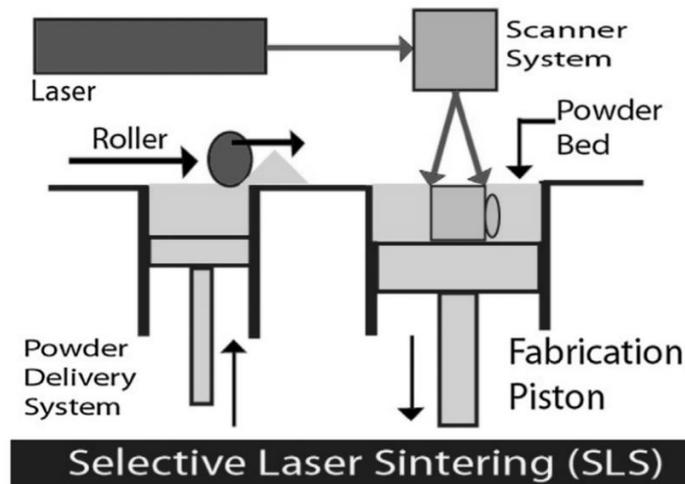


Figura 1.4 Schema di produzione con tecnologia Selective Laser Sintering. Fonte articolo [23]

Una tecnologia di produzione additive manufacturing più economica ma meno precisa dimensionalmente parlando, è la fused deposition modeling (*figura 1.5* articolo [25]), espressa mediante la sigla FDM. Consiste nella deposizione di materiale fuso plastico sotto forma di filamenti [2]. Tale materiale è tipicamente raccolto in bobine il quale fuoriesce da un ugello ed è deposto un layer sopra l'altro.

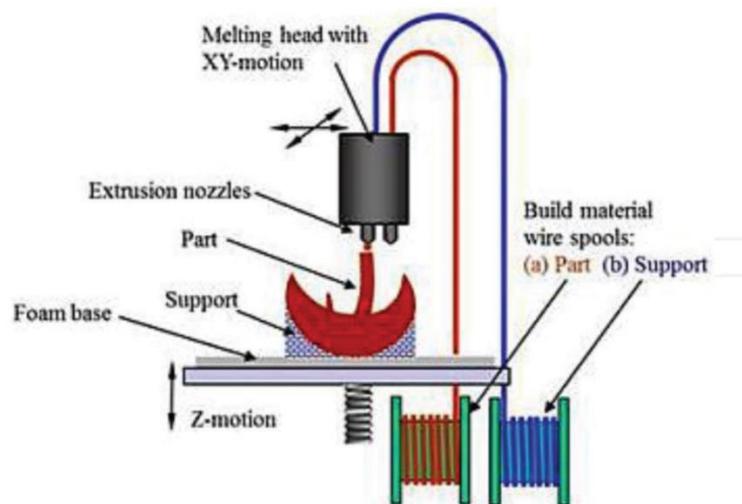


Figura 1.5 Schema di produzione con tecnologia Fused Deposition Modeling. Fonte: articolo [25]

La fused deposition modeling è la tecnologia più comune in quanto è la più economica, perché utilizza materie prime meno costose rispetto alle resine. Tra le principali materie prime sono presenti: il policarbonato, l'ABS, alcuni polimeri e dei materiali a base di nylon.

La FDM è la tecnologia utilizzata per la realizzazione del prodotto customizzato discusso nell'elaborato, tipicamente usata per stampare prodotti di piccole dimensioni o prototipi, negli ultimi anni sta riscontrando un utilizzo sempre maggiore per la produzione di prodotti finiti che non necessitano di eccessive caratteristiche tecniche. Nel caso in esame, è utilizzata una stampante che utilizza la tecnologia fused deposition modeling, in quanto il prodotto è realizzato in ABS. La stampante scelta è la Stratasys F900 [28], perché utilizza la tecnologia FDM nonché presenta un "build envelope" [28] con dimensioni approssimabili al prodotto analizzato.

1.1.3. Settori di applicazione della tecnologia additive manufacturing

La tecnologia additive manufacturing è utilizzata in molteplici settori per la realizzazione di prodotti finiti. Attualmente trova la principale applicazione nel settore aeronautico, aerospaziale, automobilistico e medico. Nei tre settori prettamente meccanici, detti prima, la tecnologia AM è usata nel mercato della ricambistica. Infatti, le imprese che lavorano in questi settori spesso devono fronteggiare il problema dell'imprevedibilità della domanda e quindi per soddisfare la richiesta di pezzi di ricambio sono costrette ad avere alti livelli di inventory in diversi nodi della filiera [12]. Come dimostrato in molti studi [9, 10, 11, 12, 13, 14], l'applicazione della tecnologia additive in tali settori permette di realizzare i pezzi di ricambio solo quando sono richiesti dai clienti riuscendo ad abbassare il livello del magazzino prodotti finiti e con esso il rischio di obsolescenza. Inoltre, la tecnologia additive, permette di produrre dei pezzi aventi delle strutture interne a reticolo, che rendono i prodotti più leggeri rispetto a quelli prodotti tradizionalmente [2] e quindi di ridurre il peso del veicolo o dell'aereo (*figura 1.6* articolo [24]).

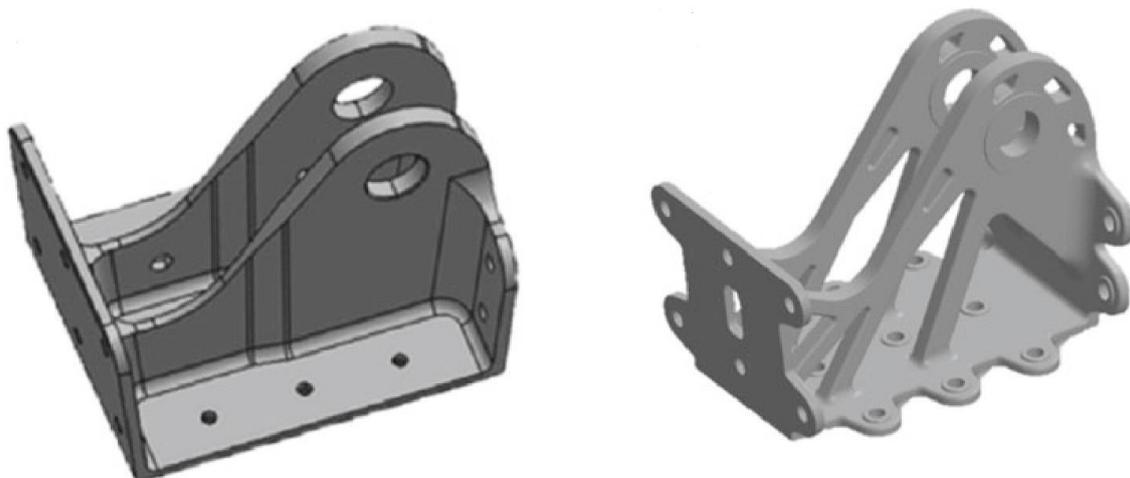


Figura 1.6 A sinistra una staffa di un aeromobile prodotta mediante tecnologie tradizionali, a destra lo stesso prodotto realizzato con AM. Fonte: articolo [26]

Nel settore biomedico, l'additive manufacturing permette di produrre forme complesse e personalizzate che si adattano meglio alle forme del corpo umano. Un esempio sono gli impianti dentistici [2] o le solette ortopediche [15].

In altri settori industriali, quali ad esempio quello della moda, dello sport, bellico e dell'oggettistica, le caratteristiche dell'additive manufacturing di realizzare prodotti altamente customizzati, su bassa scala e spesso in prossimità del cliente, possono agevolare alcuni step logistici e migliorare l'efficienza produttiva, permettendo un miglioramento di questi mercati. L'introduzione della tecnologia AM in questi mercati è in fase di sviluppo, in quanto i costi di acquisto dei macchinari e delle materie prime sono abbastanza elevati nonché le tecnologie utilizzabili per realizzare i prodotti finiti per questi mercati non sono ancora alla stadio finale. In letteratura sono presenti ancora pochi articoli che analizzano nel dettaglio queste tematiche. Qualche esempio proviene dall'articolo [16] che analizza l'impatto delle stampanti 3D nel settore militare oppure dall'articolo [17] che mette in risalto il miglioramento della produzione di portalampada customizzati. Attualmente, sono in aumento le imprese appartenenti a diversi settori che stanno utilizzando questa tecnologia per realizzare dei prodotti finiti di natura customizzata. Un esempio è mostrato in figura 1.7 (articolo [26]), raffigurante un telaio di una bicicletta da corsa realizzato su richiesta specifica del cliente mediante AM.



Figura 1.7 Telaio di una bicicletta da corsa prodotto con AM. Fonte: articolo [26]

1.1.4. Impatto dell'additive manufacturing sulle filiera logistiche

La tecnologia additive manufacturing, come detto precedentemente, è considerata una rivoluzione industriale [6], non solo per la produzione ma anche per le filiere logistiche. Infatti, l'introduzione di tale tecnologia altera la catena di fornitura sotto diversi aspetti. Nell'articolo [8] sono messi in risalto le principali differenze tra la produzione convenzionale e la produzione additive sia per quanto riguarda la produzione sia nelle filiere logistiche. La prima differenza risiede nei lotti di produzione in quanto la tecnologia AM non necessita di grandi lotti per raggiungere le economie di scala, infatti, l'obiettivo finale è quello della "economy of one" [18]. Inoltre, la velocità di produzione non dipende dalla sequenza produttiva ma soltanto dalle caratteristiche tecniche della stampante 3D e dalle dimensioni del pezzo. Inoltre, la produzione mediante additive manufacturing permette di avvicinare il luogo produttivo al cliente, dunque riuscendo a ridurre i tempi di trasporto.

L'introduzione dell'AM, come descritto principalmente negli articoli [9, 19], altera la struttura della filiera produttiva. L'articolo [19] descrive come possono diventare le filiere logistiche con la tecnologia AM sia in una fase di transizione sia nella fase finale mediante il modello SCOR. La due fasi dipendono dal livello di maturità della tecnologia, cioè la fase di transizione rappresenta le caratteristiche tecniche delle stampanti 3D nel periodo in cui è stato scritto l'articolo, invece, la fase finale rappresenta le caratteristiche tecniche dei

macchinari additive quando la fase di sviluppo delle tecnologie sarà conclusa. Partendo da una filiera convenzionale avente n fornitori, nel caso dell'articolo [19] n=3, un produttore e un retailer. L'autore definisce due filiere transitorie e due finali. La prima filiera transitoria (figura 1.8 ¹ articolo [19]) porta il numero dei fornitori pari a uno, in quanto producendo con la tecnologia additive è necessario l'utilizzo di materie prime meno diversificate per produrre un pezzo. La seconda filiera di transizione (figura 1.9 ¹ articolo [19]) ha sempre un unico fornitore ma la produzione additive è affidata a delle società esterne, definite 'printer shop' nell'articolo [19].

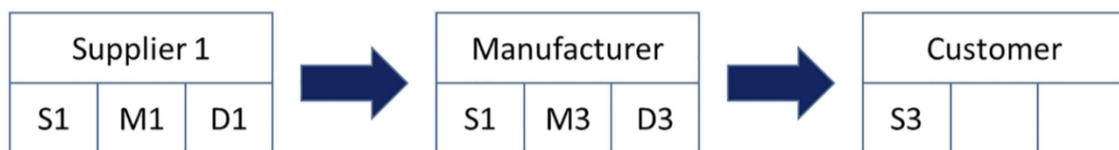


Figura 1.8 Rappresentazione grafica della produzione AM con tecnologia non matura senza printer shop. Fonte: articolo [19]

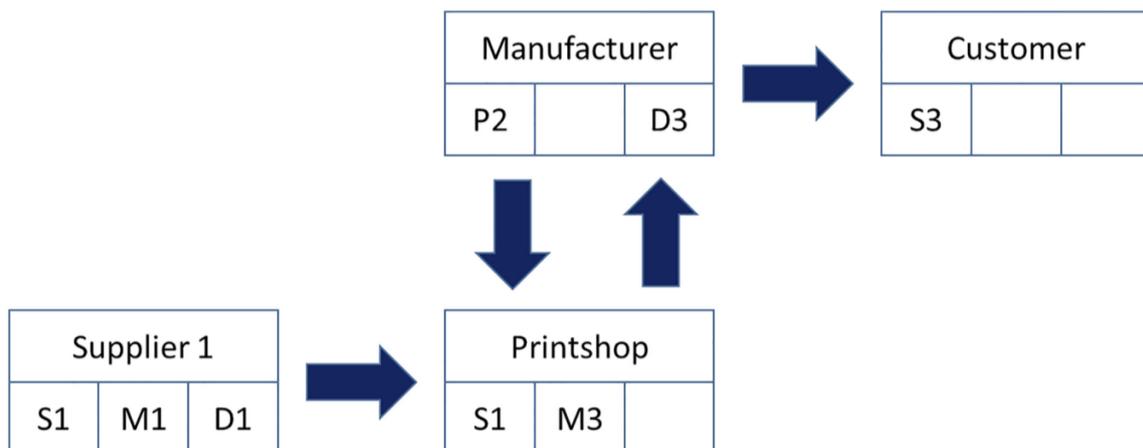


Figura 1.9 Rappresentazione grafica della produzione AM con tecnologia non matura con printer shop. Fonte: articolo [19]

Anche nel caso di tecnologia matura, l'autore dell'articolo [19] prospetta due ipotesi di filiera, la prima (figura 1.10 a ¹ articolo [19]) in cui i macchinari additive sono posizionati nei retailer e non più nel produttore, il quale occupa esclusivamente la mansione di fornire i file STL ai retailer stessi, che stampano i prodotti direttamente in loco. Lo stesso retailer si

interfaccia con fornitore di materie prime per l'approvvigionamento di esse. La seconda tipologia di filiera (figura 1.10b¹ articolo [19]) presenta, anche in questo caso, la figura della società esterna che ha il compito di produrre. Quest'ultima si interfaccia sia con il retailer, il quale fornisce i file STL generati dal produttore, sia con il fornitore di materie prime.

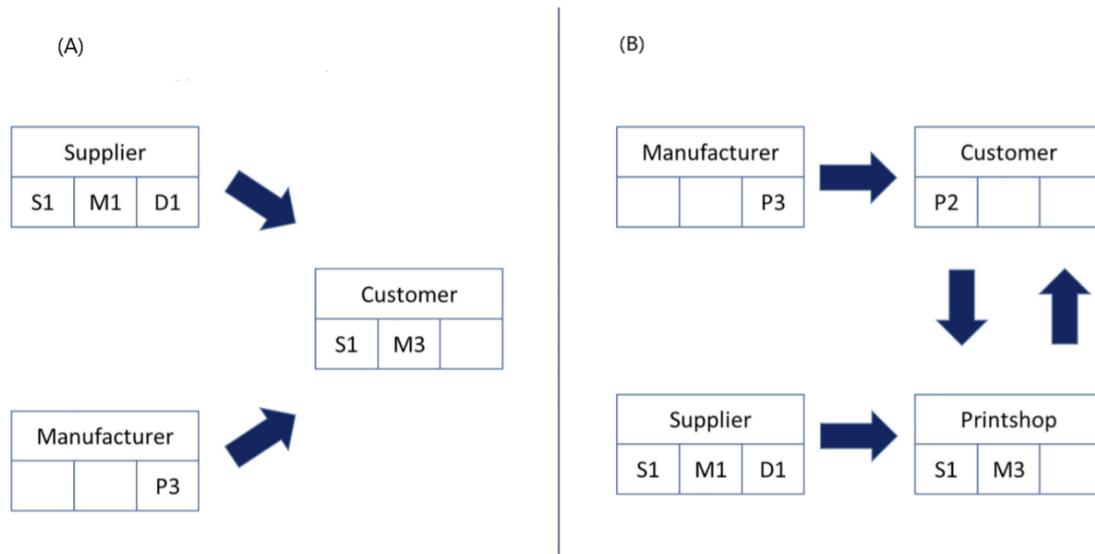


Figura 1.10a e 1.10b Rappresentazione grafica delle filiere con AM matura. Fonte: articolo [19]

Attualmente le filiere, aventi produzione additive, che si sono maggiormente affermate sono prive di 'printer shop' [19] e sono state definite: produzione centralizzata AM e produzione distribuita AM.

L'articolo [9] analizza la diminuzione dei livelli della filiera passando da una produzione convenzionale ad una produzione centralizzata AM e distribuita AM. Partendo dalla produzione tradizionale, nel caso dell'articolo [9], la filiera logistica presenta quattro livelli (fornitore, produttore, distributore e service location) introducendo l'AM, il numero degli attori, nel caso di filiera logistica con produzione additive distribuita, diminuisce a due (fornitore e service location). Invece, nella produzione additive centralizzata, rispetto alla produzione tradizionale, viene meno soltanto il distributore, con un totale di tre attori.

¹ I simboli presenti nelle figure 1.8, 1.9, 1.10a e 1.10b appartengono alla nomenclatura usata nel metodo SCOR. S=source, D=deliver, M=make, P=plan e R=return

Un'altra importante peculiarità della produzione additive è il minor spreco di materie prime rispetto alla tradizionale, infatti, quasi la totalità del materiale in input è utilizzato durante lo stampaggio. In particolare, l'utilizzo di materie prime per tale tecnologia può giungere fino al 98% del totale acquistato, cosa ben diversa per la produzione convenzionale con valori prossimi al 10% [29]. Inoltre, l'articolo [20] analizza il minor quantitativo di emissioni e il minor consumo di materie prime e di energia della tecnologia AM rispetto alla tradizionale, mediante il GHG (Green House Gas) cioè l'indice di effetto serra.

Un fattore da considerare per quanto riguarda le materie prime è il costo di esse, infatti, le resine o le polveri o i filamenti utilizzati nell'additive manufacturing hanno un prezzo più elevato rispetto alle materie prime usate durante la produzione convenzionale. Un esempio è riportato nell'articolo [4], in cui il costo delle materie prime per unità di prodotto è quasi dieci volte più grande nello scenario con produzione con tecnologia AM. Tale differenza di prezzo spesso è dovuta alle tecniche produttive necessarie per realizzare queste materie prime, le quali presentano degli step spesso più complessi e più costosi. Quindi, è importante analizzare anche il quantitativo di materie prime necessarie e il relativo costo di esse quando si effettua una scelta tra la produzione tradizionale e la produzione additive.

Sono presenti diversi articoli in letteratura che mettono in risalto le differenze tra queste due metodologie di produzione mediante l'ausilio della simulazione. Un esempio è l'articolo [15] che discute gli effetti della tecnologia additive lungo una filiera di solette ortopediche. È un prodotto realizzato, tipicamente su misura per il cliente, quindi avente un alto livello di customizzazione. Gli autori vogliono analizzare la differenza del lead time tra le due tipologie di produzione, per farlo utilizzano la simulazione mediante l'ausilio di Arena Simulation Software. Analizzando la filiera logistica avente produzione additive manufacturing emerge una minore complessità nello sviluppo della soletta e un minor numero di attori. Infatti, l'introduzione della tecnologia AM riduce il numero di fornitori, rende il flusso dei prodotti lungo la filiera molto più semplice da gestire ma soprattutto riduce il tempo necessario a servire il cliente.

1.1.5. Produzione additive manufacturing centralizzata e distribuita

Nell'articolo [21] l'autore descrive due differenti approcci per inserire la tecnologia additive manufacturing all'interno di una filiera logistica. I due differenti approcci, già descritti nei paragrafi precedenti sono: la produzione additive centralizzata e la produzione additive distribuita.

La produzione centralizzata consiste nel posizionare tutte le stampanti 3D e annessi strumenti di supporto nello stesso punto, tipicamente definito produttore o distributore centralizzato, il quale ha i compiti di realizzare i file CAD 3D e STL, di produrre tutta la domanda e di spedire i prodotti ai retailer, definiti tipicamente service location. Questo approccio è consigliato per i prodotti che non possiedono un tempo di risposta critico oppure appartengono alla categoria slow-moving qualora il prodotto fosse un pezzo di ricambio [21].

Il secondo approccio, secondo Holmström [21], è la produzione distribuita, cioè distribuire le stampanti 3D nei vari service location. Dunque, la produzione è effettuata nei vari retailer (o service location) e tipicamente il distributore centralizzato ha esclusivamente il compito di gestire i file CAD 3D e STL. Questa metodologia è consigliata se la domanda fosse sufficientemente alta da giustificare l'investimento in capitale [21]. Infatti, l'acquisto di una stampante 3D per ogni 'service location' aumenta notevolmente l'esborso economico dato l'alto costo di tale tecnologia. Opposto all'aumento dei costi di investimento è però presente tipicamente sia una diminuzione dei costi operativi, legati alla riduzione principalmente dei costi di magazzino e del trasporto, sia un miglior tempo di risposta ai clienti, dovuto alla diminuzione dei tempi di fornitura.

In letteratura sono presenti alcuni articoli che analizzano i due approcci produttivi cercando di mettere in risalto i vantaggi e gli svantaggi di ciascuna scelta. L'articolo [11] confronta tali alternative all'interno di una filiera logistica di pezzi di ricambio nel settore aeromobile. L'articolo [11] dimostra che, oltre ai costi di investimento legati all'acquisto delle stampanti 3D, sono presenti i costi di acquisto dei macchinari utilizzati nella fase di post-processing. Infatti, un elevato numero di attività di post-processing può rendere più conveniente il centralizzato, in quanto le imprese dovrebbero ripetere i costi di investimento per i

macchinari utili alle attività di post-processing nei vari service location. Oltre all'aspetto economico, sulle attività di post-processing qualora fossero importanti per la realizzazione del prodotto, effettuandole nel medesimo luogo potrebbero attivare delle economie di scala ed economie di apprendimento non trascurabili. Sempre nel paper [11], è effettuata un'opportuna analisi legata ai lead time delle due alternative, soffermando l'attenzione sul "sojourn time" [11] (la somma del tempo in coda, del tempo di produzione e del tempo di trasporto). Infatti, il giusto numero di stampanti 3D rende indifferente la scelta tra le due alternative lato tempi. Dunque, il preconcetto che i tempi di attesa dei clienti finali siano minori nel decentralizzato non è sempre verificato. Inoltre, è effettuato un confronto tra l'efficienza produttiva delle due metodologie con il risultato che, la produzione centralizzata ha una maggiore efficienza produttiva ma perde efficienza logistica. Viceversa, la produzione distribuita rende quasi nulli i tempi logistici ma sfrutta meno efficientemente le stampanti 3D.

L'articolo [12] è uno dei principali trattati che analizzano le differenze tra la produzione centralizzata e la produzione decentralizzata all'interno di una catena logistica. Anche in questo articolo [12] è analizzata la filiera di pezzi di ricambio. Sono definiti quattro scenari di filiera logistica che sono differenziati in base alla locazione della produzione e alle caratteristiche tecniche delle stampanti. È effettuata un'analisi sui costi operativi mettendo in risalto principalmente il costo della manodopera, il costo delle materie prime, il costo del magazzino, il costo del "downtime" [12] (legato ai ritardi sulla consegna e quindi esplicativo della soddisfazione del cliente) e il costo delle stampanti espresso annualmente grazie alla vita utile stimata del macchinario (così da esplicitare il costo di acquisto dei macchinari all'interno dei costi operativi). Confrontando le due metodologie di produzione nello scenario con la tecnologia presente nell'anno in cui l'articolo [12] è stato realizzato, la scelta di posizionare le stampanti esclusivamente in un nodo della filiera è più conveniente. Successivamente, nell'elaborato sono state introdotte delle ipotetiche migliorie alle caratteristiche tecniche dei macchinari additive. Con tali modifiche, la produzione distribuita ha dei costi totali inferiori rispetto alla centralizzata. Un altro importante elemento espresso nell'articolo [12] è l'analisi sull'utilizzo delle stampanti 3D nei due approcci di produzione. Le macchine additive nella produzione distribuita hanno un livello di utilizzo più basso rispetto alla produzione centralizzata, dunque l'introduzione di tale

metodologia permette di sfruttare meno i macchinari. Questo comporta una minore coda, un tempo di risposta tipicamente inferiore ed una maggiore flessibilità produttiva.

L'articolo [13] analizza le differenze tra queste due tipologie di filiere logistiche all'interno del mercato della ricambistica per aeromobili, utilizzando una logica SCOR. Esso pone l'attenzione sulla soddisfazione del cliente, sulla responsiveness del sistema e sul livello di inventory [13]. Secondo gli autori dell'articolo [13], queste tre misure di performance dipendono dalle scorte di sicurezza, infatti, le imprese hanno il problema di mantenere alto il livello di servizio cercando di abbassare le scorte di sicurezza. Nell'articolo [13] sono stati analizzati tre scenari: produzione centralizzata convenzionale, produzione centralizzata con additive manufacturing e produzione decentralizzata con AM. Sono considerati sei pezzi aventi domanda e tempi di produzione differenti, quest'ultimo dovuto alle dimensioni differenti dei prodotti da stampare. In questo articolo, la domanda dei prodotti è distribuita con una normale avente deviazione standard espressa in percentuale alla media. Analizzando le tre misure di performance precedentemente citate, la produzione AM è conveniente rispetto alla convenzionale. Per quanto riguarda la scelta tra produzione centralizzata o distribuita è effettuata una distinzione per prodotto, cioè per pezzi di ricambio aventi una domanda bassa, molto variabile e tempi di produzione alti è consigliata la produzione centralizzata AM [13]. Invece, per prodotti con una domanda alta, con bassi livelli di deviazione standard e tempi di produzione bassi è consigliata una dislocazione delle stampanti nei vari service location [13].

L'analisi sui tassi di domanda e sui tempi di produzione è stata svolta anche nell'articolo [11], precedentemente discusso, ed è stata proposta una nuova struttura di filiera logistica AM, definita "ibrida" [11], cioè una produzione sia centralizzata sia distribuita. Infatti, può essere profittevole produrre unicamente in un nodo i prodotti aventi domanda sporadica e tempi di produzione alti e invece, distribuire la produzione nei 'service location' per quei pezzi aventi una domanda più frequente e di dimensioni più piccole. L'articolo [11], dunque, mette in risalto la possibilità di non avere obbligatoriamente due metodologie di produzione agli estremi ma anche delle soluzioni intermedie, per l'appunto ibride, che possono generare l'ottimo per la supply chain.

1.2. Gap della letteratura

In letteratura sono presenti un discreto numero di articoli riguardanti l'additive manufacturing e la filiera logistica. La maggior parte di essi analizza le differenze tra la produzione tradizionale e la produzione additiva mettendo in risalto i vantaggi e gli svantaggi delle due metodologie. Questi articoli analizzano sia la tecnologia in sé ma anche l'impatto che queste metodologie di produzione hanno sui costi e sui tempi lungo la filiera logistica. Oltre alle differenze tra convenzionale e additiva, durante gli anni sono stati pubblicati alcuni articoli che analizzano gli impatti sui tempi e sui costi nel produrre con una produzione centralizzata AM o con una produzione distribuita AM. Tali paper riguardano principalmente il mercato della ricambistica nei settori aeronautici e automotive [9, 10, 11, 12, 13, 14]. Pochi sono gli articoli che analizzano i settori meno convenzionali, in cui tale produzione potrebbe avere impatti considerevoli sulla diminuzione dei costi e dei tempi. Infatti, la tesi pone l'attenzione sulla realizzazione di un prodotto d'arredamento customizzato, nel caso specifico, una lampada con annesso portalampada realizzata mediante la tecnologia Fused Deposition Modeling. Il prodotto scelto ha valenza solo esplicativa, in quanto i risultati possono essere applicabili ad altri prodotti realizzati su richiesta specifica del cliente, aventi tempi di produzione approssimabili. È stato, dunque, realizzato un confronto tra la produzione centralizzata additive e distribuita additive, mediante l'ausilio della simulazione utilizzando Arena Simulation Software.

Inoltre, negli articoli presenti in letteratura manca spesso l'analisi sul riordino delle materie prime e dei relativi costi di gestione di esse, in quanto tipicamente l'attenzione degli autori è posta sulla parte finale della filiera, cioè al posizionamento delle macchine additive lungo la rete. Le materie prime, in letteratura, sono prese in considerazione quando è effettuato un confronto tra produzione tradizionale e produzione additiva, in quanto esse presentano costi di acquisto diversi. Dunque, nella tesi è stata considerata anche l'interazione con il fornitore delle materie prime e mediante l'introduzione di alcune assunzioni semplificative, è stato possibile valutare se la parte iniziale della filiera logistica avesse impatti economici. Inoltre, è stato valutato se eventuali interazioni tra produttori e fornitori di materie prime possano alterare i tempi d'attesa dei clienti.

2. Descrizione delle filiere logistiche, dei tempi e dei costi logistici

2.1. Descrizione della filiera logistica

La supply chain, così come gran parte dei parametri dell'elaborato, è tratta dall'articolo [17].

Il prodotto analizzato è un portalampada con annessa struttura di supporto, realizzato mediante la tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM). Il portalampada è totalmente modificabile dal cliente, invece per la struttura di supporto, il cliente può scegliere tra tre configurazioni di lunghezza e grandezza predefinite. Il prodotto è realizzato in ABS (Acrilnitrile butadiene stirene), copolimero termoplastico, molto leggero e presente sotto forma di filamenti. La fornitura di tale materia prima è affidata a due fornitori.

Un'ulteriore componente del prodotto è la lampadina, in quanto il prodotto finito è fornito al cliente pronto all'uso. Per semplicità di scrittura, questa componente è stata definita anch'essa materia prima, pur essendo un sub assemblato. Per l'approvvigionamento della lampadina è presente un fornitore apposito. Dunque, sono presenti tre fornitori di materie prime, due per i filamenti di ABS e uno per la lampadina.

Nell'articolo [17], la produzione è esclusivamente centralizzata e pone l'attenzione sui vantaggi dell'introduzione della tecnologia additive all'interno del sistema produttivo. La tesi, invece, ha lo scopo di analizzare le differenze nella produzione centralizzata o distribuita dunque, è stato ipotizzato che il sistema produca già utilizzando la tecnologia additive e che l'obiettivo della tesi sia quello di capire quale tra le due configurazioni possa essere la migliore per il sistema. Per effettuare tale confronto sono stati introdotti nella filiera quattro 'service location' che sono stati rappresentati come dei retailer di prossimità, nei quali il cliente può effettuare l'ordine e ritirare il prodotto finito.

Dunque, la catena logistica, oltre ad i tre fornitori di materie prime, è composta da un produttore e quattro retailer (*figura 2.1*).

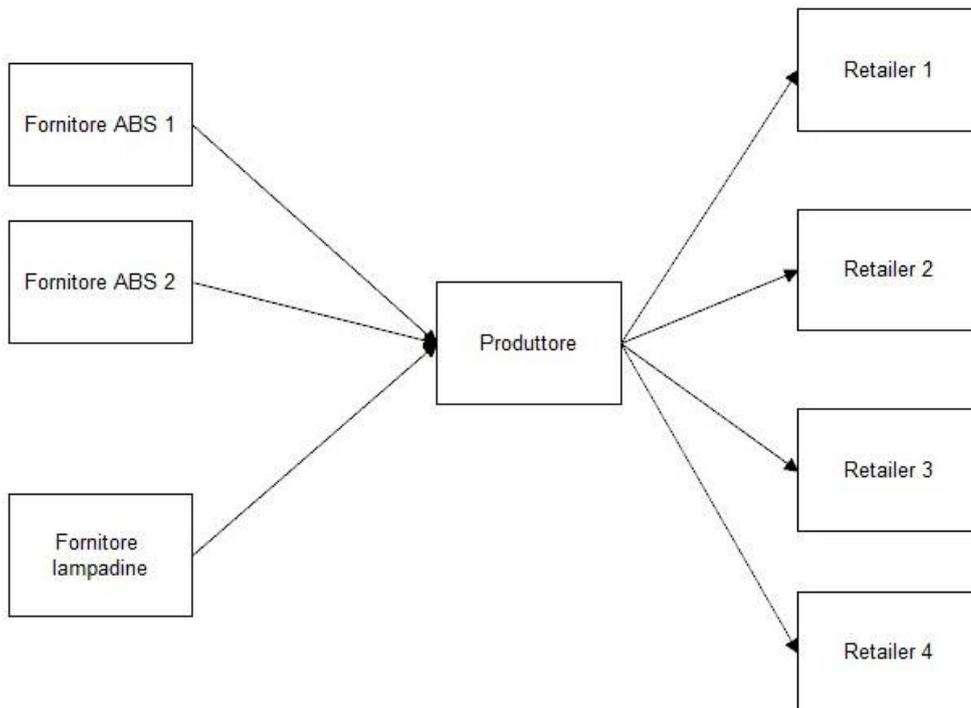


Figura 2.1 Schema rappresentativo della filiera logistica generale

Nello scenario di produzione centralizzata, il produttore realizza il file CAD 3D seguendo le istruzioni del cliente, lo converte in formato STL e produce il portalampada e la struttura di supporto mediante tre macchinari additive con tecnologia Fused Deposition Modeling. In tale scenario i retailer svolgono soltanto la funzione di interfaccia con il cliente, raccogliendo le informazioni sull'ordine da inoltrare al produttore e quando il prodotto finito è in negozio, l'operatore lo consegna al cliente.

Nello scenario di produzione distribuita, il cliente comunica le caratteristiche del prodotto sempre al retailer, il quale inoltra tali informazioni al produttore che realizza i file CAD 3D e STL. Questi file sono inoltrati al retailer corrispondente e lì avviene la produzione. Infatti, ciascun retailer ha a disposizione una stampante 3D, avente le stesse caratteristiche tecniche di quelle dello scenario centralizzato. Essendo presenti quattro retailer di prossimità, il numero totale di macchinari additive aumenta da tre a quattro rispetto al

caso a produzione centralizzata. Successivamente, il prodotto finito, una volta stampato è consegnato al cliente finale.

L'elaborato, come detto in precedenza, pone il focus anche sulla gestione delle materie prime. Infatti, sono stati sviluppati due scenari estremi e totalmente differenti tra loro per tale problematica.

Il primo si basa su una logica PULL avente dei riordini giornalieri, cioè o il produttore o il retailer, in base alla tipologia di produzione in atto, tengono tracce del quantitativo di materie prime necessarie alla realizzazione della domanda giornaliera ed effettuano un ordine giornaliero ai fornitori, richiedendo il quantitativo di materie prime necessarie a produrre la domanda del giorno corrente. I filamenti di ABS e le lampadine sono consegnate dopo un intervallo temporale attivando di conseguenza la produzione. In questo scenario non è presente un magazzino materie prime, perché quando esse giungono o al produttore o al retailer sono subito utilizzate per realizzare gli ordini in coda.

Il secondo scenario, invece, segue una metodologia di gestione diametralmente opposta, infatti, è presente un magazzino materie prime. Per il dimensionamento di esso è stato ipotizzato che sia già presente a sistema tutto il quantitativo necessario per realizzare tutti i prodotti finiti. Tale assunzione deriva da un'analisi dei costi di riordino dell'ABS, infatti, essi sono molto bassi quando il quantitativo di ABS non è elevato e pressoché nulli quando tale quantitativo supera una determinata soglia. Dunque, è stato ipotizzato di avere in magazzino, al tempo zero, tutto il quantitativo di materie prime necessarie per produrre tutta la domanda.

Dunque, confrontando le due logiche di gestione emerge che la prima gestisce le materie prime mediante dei riordini giornalieri, con la totale assenza di un magazzino MP. La seconda, invece, non presenta dei riordini di materie prime, infatti, tutto il necessario per produrre la domanda annuale è presente in magazzino all'inizio della simulazione.

Nel complesso, sono stati realizzati quattro filiere logistiche:

1. Produzione centralizzata con gestione PULL
2. Produzione distribuita con gestione PULL
3. Produzione centralizzata con inventory
4. Produzione distribuita con inventory

2.1.1. Produzione centralizzata con logica PULL

La filiera logistica avente la produzione centralizzata e riordini giornalieri è formata da tre livelli:

1. Retailer
2. Produttore
3. Fornitori

La *figura 2.2* spiega schematicamente il sistema con logica PULL e produzione centralizzata, rappresentando il numero e il posizionamento dei macchinari additive con tre cerchi gialli.

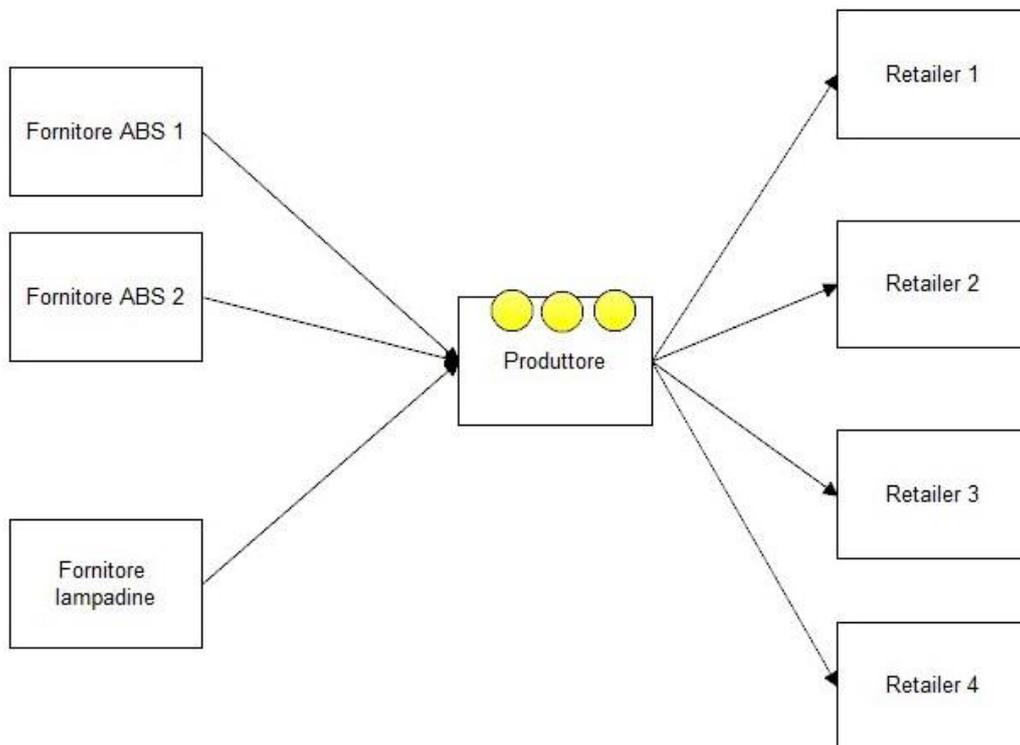


Figura 2.2 Schema rappresentante la filiera logistica del sistema PULL con produzione centralizzata

I clienti finali richiedono il prodotto ad uno dei quattro retailer di prossimità, il quale raccoglie le informazioni riguardanti il prodotto finito e le inoltra al produttore. Tali informazioni sul prodotto sono trasmesse agli operatori software del produttore, i quali generano il file CAD 3D e i file STL necessari alla stampa. Il produttore giornalmente tiene traccia del quantitativo di materie prime necessarie a produrre la domanda del giorno corrente. I dati sulle materie prime necessarie sono utilizzati per effettuare l'ordine dell'ABS e delle lampadine al cliente, infatti, ogni giorno il produttore richiede ai fornitori il quantitativo di materie prime necessarie a produrre la domanda di prodotto finito generatosi nel medesimo giorno. Una volta effettuato l'ordine, esso è elaborato dal fornitore ed è consegnato dopo un tempo di fornitura. Le materie prime giunte al produttore permettono di attivare la produzione degli ordini in coda alla stampaggio grazie alla presenza di tre stampanti 3D in possesso al produttore. Infatti, è stato ipotizzato che il produttore non abbia un magazzino materie prime e quindi per poter avviare la produzione è necessario attendere la consegna di esse. Conclusasi la produzione, il prodotto finito è trasportato al retailer che lo aveva precedentemente richiesto così da consegnarlo al cliente.

2.1.2. Produzione distribuita con logica PULL

La filiera logistica avente la produzione distribuita e riordini giornalieri è formata da due livelli:

1. Retailer
2. Produttore e Fornitori

In questa filiera logistica il produttore e i fornitori sono posizionati nel medesimo livello della catena, in quanto essi presentano scambi di materiale o informazioni esclusivamente con i retailer. Infatti, produttore e fornitori non interagiscono tra di essi. Questa variazione è dovuta allo spostamento del luogo di produzione, infatti, la produzione non è più localizzata nel produttore, ma bensì nei retailer. Producendo nei retailer, il produttore non richiede materie prime al fornitore e dunque non interagisce più con esso. In questa filiera, dunque, il ruolo del produttore è quello di realizzare i file CAD 3D e i file STL da fornire ai retailer.

La *figura 2.3* rappresenta schematicamente il sistema PULL con produzione distribuita. I cerchi gialli rappresentano le stampanti 3D dislocate nei quattro retailer. L'utilizzo delle frecce con colorazione differenziate mette in risalto che ciascun retailer è direttamente in contatto con i fornitori di materie prime e con il produttore.

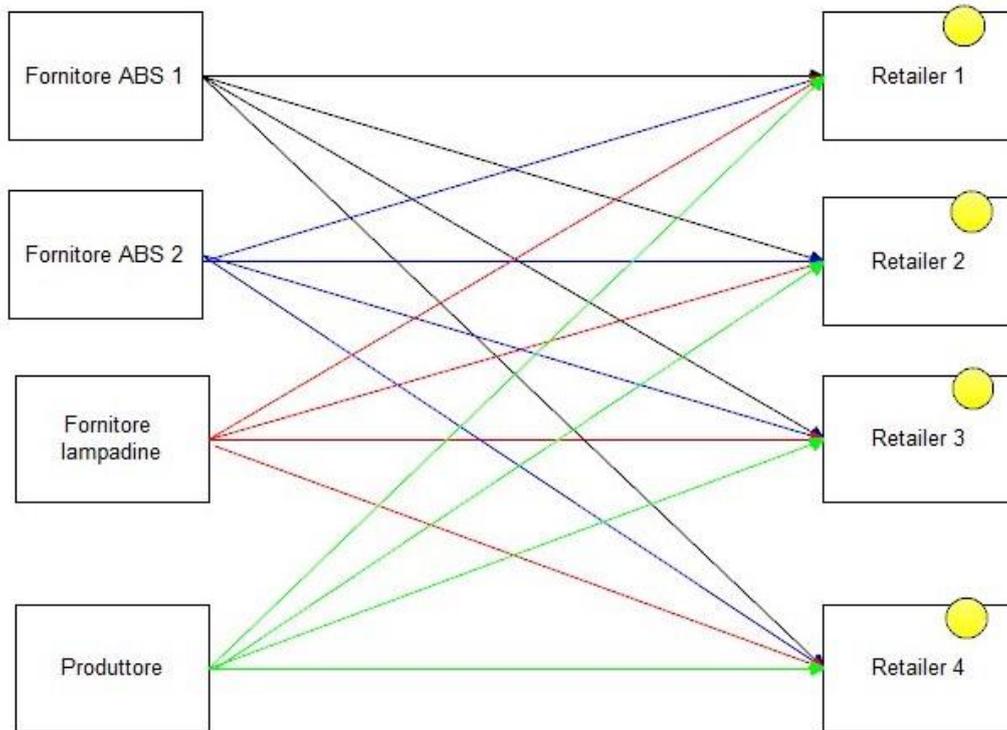


Figura 2.3 Schema rappresentante la filiera logistica del sistema PULL con produzione distribuita

Come nel caso della produzione centralizzata, i clienti finali richiedono il prodotto ad uno dei quattro retailer di prossimità, il quale raccoglie le informazioni riguardanti il prodotto finito e le inoltra al produttore. Tali informazioni sul prodotto sono trasmesse agli operatori software del produttore, i quali generano il file CAD 3D e i file STL necessari alla stampa. In questa filiera logistica, il produttore non ha il compito di realizzare il prodotto, infatti, quando i file sono pronti, sono inoltrati ai retailer, i quali possono stampare le due componenti.

Ogni giorno, i retailer tengono traccia del quantitativo di materie prime necessarie a produrre la domanda del giorno corrente. I dati sulle materie prime necessarie sono utilizzati da ciascun retailer per effettuare l'ordine dell'ABS e delle lampadine al cliente. Infatti, il retailer, qualora fosse necessario, richiede ai fornitori il quantitativo di materie prime utili a produrre la domanda di prodotto finito generatosi nel medesimo giorno. Una volta effettuato l'ordine, esso è elaborato dal fornitore ed è consegnato al retailer dopo il tempo di fornitura precedentemente descritto. Ciascun retailer sceglie il fornitore ABS avente il minor numero di ordini in coda, in quanto può vedere quale fornitore è stato scelto dagli altri retailer e quindi è consapevole della coda presente in quel fornitore ABS. Le materie prime giunte al retailer permettono di attivare la produzione degli ordini in coda alla stampaggio. Infatti, è stato ipotizzato che i retailer non abbiano il magazzino materie prime e quindi per poter avviare la produzione è necessario attendere la consegna di essa. La produzione in ciascun retailer è possibile grazie alla presenza di un macchinario additive per retailer, con un totale di quattro stampanti. Ultimato lo stampaggio mediante tecnologia AM, il prodotto finito non necessita di essere movimentato lungo la filiera e quindi è possibile consegnarlo al cliente finale.

2.1.3. Produzione centralizzata con inventory

La filiera logistica avente la produzione centralizzata e magazzino materie prime è formata da due livelli:

1. Retailer
2. Produttore

L'assenza dei fornitori è dovuta ad un'assunzione effettuata in fase sperimentale, cioè in questo sistema il produttore presenta un magazzino materie prime, sia ABS che lampadine, con il quale può produrre tutta la domanda annuale di lampade e portalampade senza aver bisogno di riordinare le materie prime dai fornitori.

La *figura 2.4* rappresenta schematicamente il sistema a produzione centralizzata con inventory. Come nei casi precedenti le stampanti 3D sono rappresentate dai tre cerchi gialli, i quali sono posizionati nel produttore. Diversamente dai sistemi precedenti, nel produttore centrale è stato introdotto il simbolo dell'inventory, rappresentato da un triangolo capovolto.

I clienti finali richiedono il prodotto ad uno dei quattro retailer di prossimità, il quale raccoglie i dati riguardanti il prodotto finito e li inoltra al produttore. Tali dati sul prodotto sono trasmessi agli operatori software del produttore, i quali generano il file CAD 3D e i file STL necessari alla stampa. Ultimata la fase di design, è possibile passare direttamente allo stampaggio delle due componenti, qualora fosse presente un macchinario additive libero, in quanto non è necessario attendere l'arrivo delle materie prime, essendo già presenti in magazzino. Quando la produzione è conclusa, il prodotto finito è trasportato al retailer che lo aveva richiesto, così da consegnarlo al cliente.

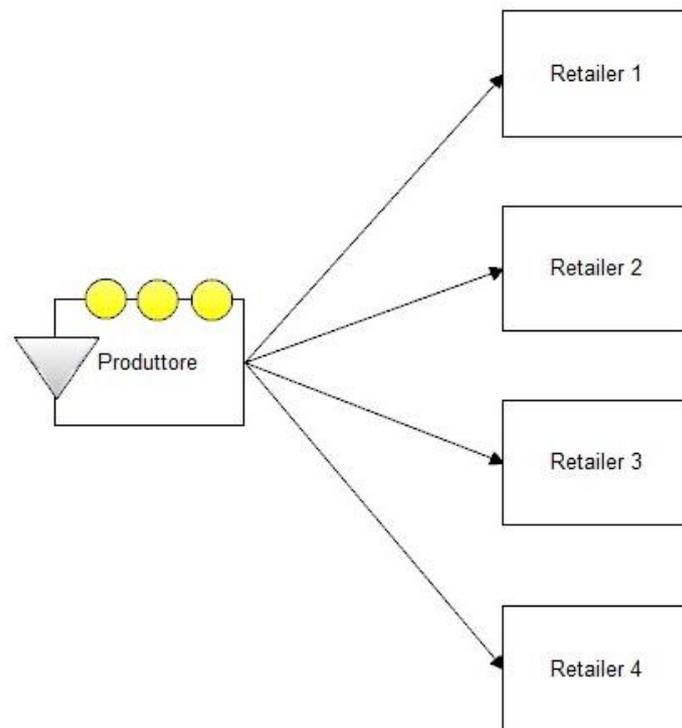


Figura 2.4 Schema rappresentante la filiera logistica del sistema Inventory con produzione centralizzata

2.1.4. Produzione distribuita con inventory

La filiera logistica avente la produzione distribuita e magazzino materie prime è costituita da due livelli:

1. Retailer
2. Produttore

L'assenza dei fornitori è dovuta ad un'assunzione effettuata in fase sperimentale, cioè i retailer possiedono un magazzino materie prime, grazie al quale possono produrre tutta la loro domanda annuale di lampade e portalampade senza la necessità di riordinare le materie prime dai fornitori. Infatti, al giorno zero, essi presentano a magazzino un quantitativo di materie prime sufficiente a produrre tutto quello domandato dal cliente finale a ciascuno di loro.

La *figura 2.5* rappresenta schematicamente il sistema a produzione distribuita con inventory. Le stampanti presenti nei vari retailer sono rappresentate mediante dei cerchi gialli. Invece, l'inventory, che nello scenario in esame è presente in ciascun retailer, è rappresentato con un triangolo capovolto.

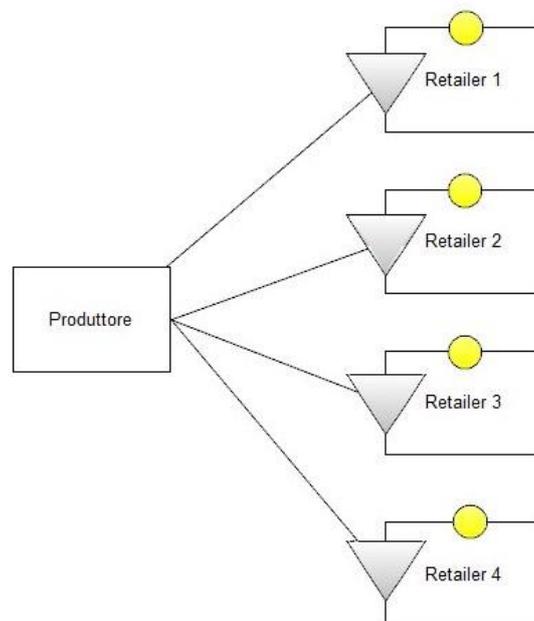


Figura 2.5 Schema rappresentante la filiera logistica del sistema Inventory con produzione distribuita

I clienti finali richiedono il prodotto ad uno dei quattro retailer di prossimità, il quale raccoglie i dati riguardanti il prodotto finito e li inoltra al produttore. Tali dati sul prodotto sono trasmessi agli operatori software del produttore, i quali generano il file CAD 3D e i file STL necessari alla stampa. Ultimata la fase di design, i file STL sono trasferiti ai retailer che possono attivare direttamente lo stampaggio delle due componenti, qualora il macchinario additive in loro possesso fosse disponibile. Infatti, non è necessario attendere l'arrivo delle materie prime, essendo già presenti in magazzino. Ultimato lo stampaggio mediante tecnologia AM, il prodotto finito non necessita di essere movimentato lungo la filiera e quindi è possibile consegnarlo al cliente finale.

2.1.5. Step produttivi

Le fasi relative allo stampaggio delle componenti costituenti il prodotto finito sono le medesime in tutte e quattro le filiere logistiche.

La produzione si articola in tre fasi:

1. Setup
2. Stampaggio
3. Fase di post-processing.

Il setup comprende: la fase di trasferimento del file STL al macchinario, la fase di caricamento del materiale necessario allo stampaggio sulla macchina AM e infine, la fase di preparazione della macchina. Dal paper [17], il setup dura 53.52 minuti, e per effettuare tale fase è necessario che sia disponibile oltre ad una stampante 3D anche un operatore.

Lo step successivo al setup è la stampa delle componenti. La fase di stampaggio è completamente automatizzata ed è avviata da un operatore, che svolta tale mansione, è libero di occuparsi di altre attività a lui assegnate. Il tempo di produzione dipende dalle dimensioni del prodotto ed è calcolato mediante la seguente formula:

$$\textit{Tempo di produzione} = \textit{volume prodotto} * \textit{tasso di produzione} \quad (1)$$

Il prodotto stampato è prelevato dall'operatore e successivamente trasportato in un'area dove è sottoposto a delle semplici e veloci operazioni di post-processing. Tali operazioni sono svolte dall'operatore che si occupa sia del setup della macchina sia del prelievo del pezzo. In particolare, le due componenti stampate sono pulite, assemblate insieme generando il prodotto finito che è inserito in apposite scatole insieme alla lampadina. La fase di post-processing ha una durata in ore, anch'essa presa dall'articolo [17] che dipende da un fattore chiamato 'post' che segue una distribuzione uniforme con parametri 15 e 25.

$$\text{Tempo post processing} = \frac{\text{post}-15}{125} \quad (2)$$

2.2. Dati di input di domanda e produzione

I dati di domanda (*tabella 2.1*) e produzione (*tabella 2.2*) utilizzati nella tesi sono stati presi dall'articolo [17].

Gli ordini hanno dei tempi di interarrivo che seguono una distribuzione esponenziale con parametro pari ad 1. Ciascun ordine segue una distribuzione normale la cui media è pari a quattro e con la deviazione standard che è pari ad una percentuale delle media. Infatti, sono stati definiti tre scenari di variabilità: bassa, media e alta, con deviazione standard rispettivamente pari al 10%, al 30% e al 50% della media. Dunque [17]:

- Variabilità bassa → Normale (4, 0.4)
- Variabilità medio → Normale (4, 1.2)
- Variabilità alta → Normale (4, 2)

Tabella 2.1 Tabella riassuntiva dei tempi interarrivo e della domanda. Fonte dati: articolo [17]

Tempo di interarrivo ordini	Esponenziale (1)	Giorno
Domanda alta variabilità	Normale (4, 2)	Pezzi per ordine
Domanda media variabilità	Normale (4, 1.2)	Pezzi per ordine
Domanda bassa variabilità	Normale (4, 0.4)	Pezzi per ordine

Il prodotto finito (figura 2.6 articolo [17]) è composto da tre componenti:

- La lampadina, gestita mediante un fornitore esterno
- Il portalampada, avente volume di $32.2 + \text{Weibull}(1080, 0.506) \text{ cm}^3$
- La struttura di supporto, definita “body” [17], che può avere tre dimensioni;
 1. Piccolo, dal peso di 0.504 kg e scelta con probabilità del 30%
 2. Medio, dal peso di 3 kg e scelta con probabilità del 30%
 3. Grande, dal peso di 12 kg e scelta con probabilità del 40%

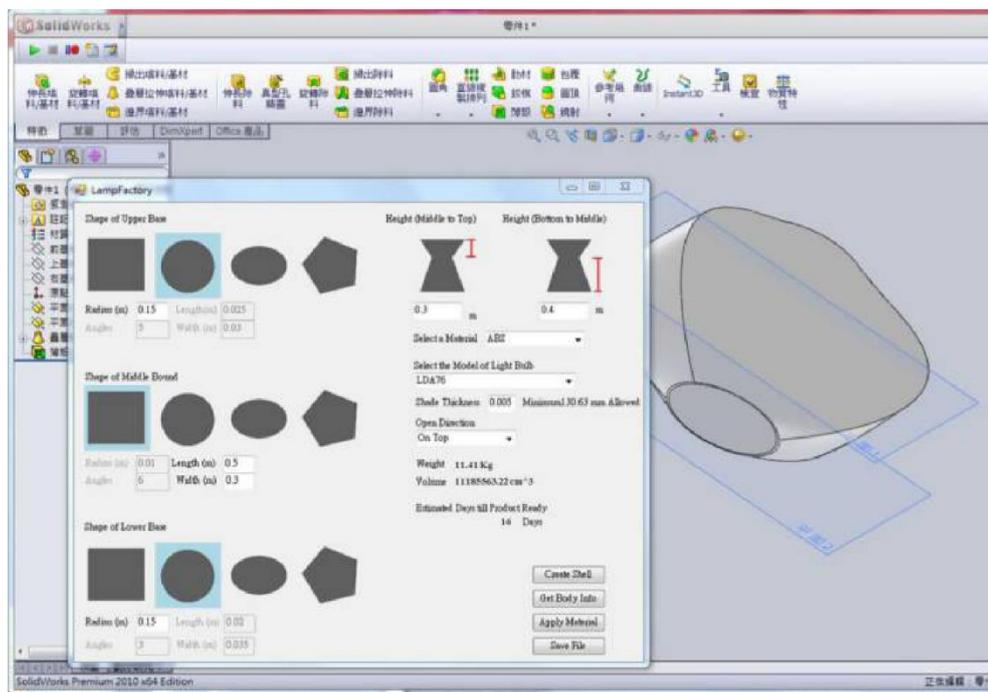


Figura 2.6 Rappresentazione in Solidworks del portalampada. Fonte: articolo [17]

Il tasso di produzione delle stampanti necessario a calcolare il tempo di produzione è espresso in ore/cm³, anch'esso preso dal paper [17] ed è pari a 0.001995 ore/cm³, è stato necessario convertire i body, espressi in chilogrammi, in centimetri cubici mediante la densità dell'ABS, pari a 1.08 g/cm³.

Il tempo di produzione, oltre a dipendere dal tasso di produzione della macchina, è legato anche alle dimensioni del prodotto da realizzare. Più il prodotto è grande in volume maggiore è il tempo necessario per produrlo. Mediamente, sono necessarie circa 17 ore per realizzare le due componenti.

Tabella 2.2 Tabella riassuntiva dei dati di produzione. Fonte dati: articolo [17]

Portalampada	32.2 + Weibull (1080, 0.506)	cm ³	
Body piccolo	0.504	Kg	Probabilità: 0.3
Body medio	3	Kg	Probabilità: 0.3
Body grande	12	Kg	Probabilità: 0.4
Densità ABS	1.08	g/cm ³	
Tasso di produzione	0.001995	h/cm ³	

2.3. Dati di input sui tempi

I tempi inseriti nei modelli (*tabella 2.3*) sono stati presi dall'articolo [15] e dall'articolo [17]. Il primo articolo presenta i tempi di attesa per la fornitura delle materie prime, e il secondo è quello riguardante la struttura della supply chain e il prodotto analizzato.

I tempi presi dall'articolo [17] sono i seguenti:

- Tempo di setup, 53.52 minuti;
- Tempo di produzione, calcolato come: volume del prodotto * tasso di produzione

Il tempo preso dall'articolo [15] è il seguente:

- Tempo di trasporto dell'ABS, UNIF (8.3, 8.9) h;

Il tempo di trasporto per le lampadine è stato ipotizzato pari al tempo necessario per consegnare l'ABS, in modo tale da non rendere tale componente eccessivamente impattante sul sistema. Infatti, l'elaborato vuole essere più generale possibile e dunque, applicabile anche ad altri prodotti customizzati aventi dimensioni di produzione simili. Quindi, il tempo di trasporto delle lampadine segue una distribuzione UNIF (8.3,8.9) h.

I dati provenienti dai paper sono stati analizzati con l'obiettivo di verificarne la validità. Il primo dato di input analizzato è il tempo di trasporto delle materie prime, il quale è presente negli scenari aventi riordini giornalieri. Per esso è stata effettuata un'analisi per valutare se fosse possibile ricevere la merce così brevemente. Per fare questo, dunque, sono state effettuate delle ricerche sui tempi di fornitura di alcuni fornitori italiani ed esteri

di ABS [30, 31]. Essi garantiscono la consegna di piccoli lotti entro le 24 ore successive all'ordine e dunque, in linea con le tempistiche definite nel modello.

Un particolare analisi necessitano i tempi di trasporto del prodotto finito al retailer. Come descritto nell'articolo [10], questa operazione è affidata a corrieri esterni, quali UPS e FedEx, infatti, il produttore stipula dei contratti su tempi e costi di consegna per far svolgere tale attività ad operatori logistici terzi. Nella tesi è stata effettuata la medesima assunzione, utilizzando come corriere UPS, infatti, mediante un'analisi dei servizi svolti dalla compagnia, era possibile ottenere una consegna entro 24h, data la vicinanza teorica del produttore con i retailer. Per la precisione essi assicuravano la consegna il giorno successivo, per semplicità di modellazione e per essere più conservativi, causa eventuali ritardi, è stato scelto un tempo di trasporto di 24 ore dalla presa in consegna del prodotto da parte del corriere.

Un ulteriore attenzione necessita il tempo di realizzazione del file CAD 3D e STL, è un tempo molto complesso da calcolare in quanto dipende dalle abilità degli operatori software, dalla complessità del pezzo e dal livello prestazionale delle macchine su cui sono realizzati. Oltre alla complessità di calcolo tale operazione è realizzata sempre nel nodo "produttore centrale" quindi per semplicità e per evitare di inserire un valore temporale discordante dalla realtà, tale tempo non è stato definito

Tabella 2.3 Tabella riassuntiva dati input sui tempi. Fonte dati: articolo [15], articolo [17] e assunzioni dell'autore della tesi

Tempo di setup	53.52	minuti
Tempo di produzione	Volume*tasso di produzione	ore
Tempo trasporto ABS	UNIF (8.2, 8.9)	ore
Tempo trasporto lampadine	UNIF (8.2, 8.9)	ore
Tempo trasporto prodotto finito	24	ore

2.4. Obiettivi della tesi e misure di performance

L'obiettivo della tesi è quello di calcolare il tempo necessario per servire il cliente e i costi logistici delle rete per definire quale catena logistica sia la migliore mediante un'analisi tempi e costi. Per fare questo, sono state calcolate alcune misure di performance utili al calcolo dei costi nonché alcuni tempi del sistema.

La prima statistica calcolata è il tempo che intercorre tra l'invio della richiesta d'ordine al produttore e la consegna del prodotto al cliente, chiamata tempo di consegna dei prodotti finiti. Inoltre, sono state calcolati i tempi di attesa in coda prima della stampa, il tempo medio di produzione e l'utilizzo dei macchinari additive.

Negli scenari aventi riordini giornalieri è stato calcolato il numero di ordini richiesti ai fornitori di ABS e lampadine, per poter calcolare il costo fisso del riordino delle materie prime. Negli scenari ad inventory, invece, è stato calcolato il quantitativo di materie prime consumate per definire la grandezza del magazzino iniziale in modo tale da definire il costo di magazzino. Negli scenari con produzione centralizzata è stato calcolato il numero prodotti finiti inviati ai retailer in modo da poter calcolare i costi fissi di spedizione di essi.

In tutti i sistemi è stato calcolato il quantitativo di materie prime, il quale è pressoché il medesimo, quindi il costo delle materie prime non è un fattore discriminante tra i vari sistemi, in quanto si tratta di una voce di costo che sarebbe stata sommata in egual modo in tutti i costi logistici dei vari sistemi.

2.5. Costi della rete

L'analisi economica dei modelli è stata svolta esclusivamente sui costi di natura logistica, cioè il costo di riordino materie prime, il costo di mantenimento a magazzino delle materie prime e il costo di spedizione del prodotto finito dal produttore al retailer. Questi costi non sono tutti presenti in ciascuna filiera, infatti, i costi sono calcolati nelle varie reti in base alla metodologia di produzione e di gestione delle materie prime presenti.

Precisamente, nel modello:

- PULL centralizzato, sono presenti i costi di riordino materie prime e di spedizione prodotto finito;
- PULL distribuito, sono presenti i costi di riordino materie prime;
- Inventory centralizzato, sono presenti i costi di mantenimento a magazzino e di spedizione del prodotto finito;
- Inventory distribuito, sono presenti i costi di mantenimento delle materie prime a magazzino.

È stato ipotizzato di non analizzare altri costi di natura differente, quali ad esempio i costi della manodopera, il costo dell'energia elettrica, il costo dell'investimento nell'acquisto dei macchinari additive e il costo delle attrezzature necessarie alle operazioni di post-processing. Questa ipotesi è basata sulla mancanza di dati proveniente da un sistema reale approssimabile a quello analizzato. Infatti, in letteratura i costi sopracitati non sono trattati in maniera univoca, in quanto legati alla specifica filiera logistica o allo specifico settore analizzato. Dunque, essi sono estremamente dipendenti dal caso trattato nell'articolo, quindi è stata effettuata l'ipotesi di escludere tali costi, evitando di introdurre dei dati di input errati.

È importante ricordare che, le analisi economiche sono state effettuate in assenza di tali costi, andando dunque a calcolare solo i costi. Dunque, i risultati che saranno discussi in seguito sono estremamente legati a tale ipotesi. Tuttavia, i costi non considerati hanno una valenza non indifferente all'interno di un'analisi economica di un sistema reale. Infatti, possedendo le informazioni necessarie provenienti da un caso reale, questi possono essere calcolati correttamente e potrebbero non dare conferma dei risultati trovati nella tesi.

2.5.1. Costo di riordino delle materie prime

Il costo di riordino delle materie prime è stato definito mediante una ricerca tra i principali fornitori di esse. Per le lampadine il costo di riordino è stato considerato nullo in quanto è una materia prima facilmente reperibile e inoltre data le piccole dimensioni degli ordini, effettuati quasi giornalmente, non è appunto presente tale costo.

Per Acrilonitrile butadiene stirene (ABS) è stato definito un costo medio tra i vari costi di riordino riscontrati tra i vari fornitori di materie prime italiani ed europee. Per la precisione è stato definito un costo di riordino fisso di 12.00€, legato sia alla breve distanza tra fornitore e produttore o retailer sia alle piccole dimensioni dei lotti richiesti dal produttore o dai retailer.

Il numero di riordini annuali ha permesso di calcolare il costo totale di riordino come descritto nella formula seguente.

$$\text{Costo di riordino MP totale} = \text{costo di riordino} * \text{riordini totali} \quad (5)$$

2.5.2. Costo di mantenimento a magazzino delle materie prime

Il costo di mantenimento a magazzino delle materie prime è stato calcolato sia per l'ABS sia per le lampadine. Quest'ultimo ha un impatto percentuale molto basso e quindi poco importante nel complesso ma per completezza è stato calcolato pur non essendo un fattore discriminante nei risultati e dunque nelle conclusioni.

Per entrambe le materie prime è stato definito un costo del capitale del magazzino annuale del 25%, preso dall'articolo [11], il quale è stato moltiplicato per il costo unitario della materia prima e suddiviso per il tempo (un anno). Così facendo è stato calcolato il costo del magazzino giornaliero (CMg) per ciascuna materia prima (tabella 2.4). Il costo della materia prima ABS è di 14.90€/kg e il costo unitario delle lampadine è di 5€ al pezzo.

$$\text{costo magazzino giornaliero MP} = \frac{\text{costo del capitale} * \text{costo unitario MP}}{365 \text{ giorni}} \quad (6)$$

Tabella 2.4 Costo del magazzino materie prime giornaliero

CMg _{abs}	0.010 €/(kg*giorno)
CMg _{lampadine}	0.0034 €/(unità*giorno)

Successivamente, nel caso di produzione centralizzata, è stato calcolato l'inventory medio del magazzino del produttore. Invece, nel caso di produzione distribuita, è stato calcolato l'inventory medio per ciascuno dei quattro retailer. La formula utilizzata per il calcolo dell'inventory medio è la seguente:

$$Inventory\ medio = \frac{Inventory\ iniziale - inventory\ finale}{2} \quad (7)$$

Rispettivamente, l'inventory iniziale è il quantitativo necessario a produrre tutta la domanda e l'inventory finale è stato ipotizzato nullo.

Definito il costo unitario giornaliero del magazzino per le due materie prime e il livello di inventory medio per ciascuna di esse in tutti le filiere logistiche aventi magazzino è stato possibile calcolare il costo del magazzino totale.

$$Costo\ del\ mantenimento\ a\ magazzino = Inventory\ medio * CMg * 365\ giorni \quad (8)$$

2.5.3. Costo di spedizione prodotto finito

Il costo di spedizione del prodotto finito, come specificato precedentemente, dipende da accordi con alcune aziende logistiche che operano nell'ultimo miglio. È stata scelta, come nell'articolo [10], l'azienda UPS che garantisce la consegna del prodotto entro le ventiquattro ore successive, che per ciascuna spedizione richiede mediamente un costo di 19.52€. Dunque, definito il numero totale di spedizioni di prodotto finito è possibile calcolare il costo totale annuale di trasporto dei prodotti finiti, come descritto nella seguente formula:

$$Costo\ di\ trasporto\ PF\ totali = costo\ di\ spedizione * spedizioni\ totali \quad (9)$$

Da una prima analisi è importante riscontrare che tale costo può avere un impatto importante sulla scelta della filiera logistica da implementare. Infatti, questo costo è presente soltanto nella produzione centralizzata, in quanto nella produzione distribuita AM, stampando la lampada direttamente nel retailer, l'operazione di trasferire il prodotto finito non è presente.

Per completezza e facilità di comprensione sono stati riassunti tutti i fattori di costo nella *tabella 2.5* così da permettere una lettura più incisiva di tali dati.

Tabella 2.5 Tabella riassuntiva dei fattori di costo usati nei modelli

Costo fisso riordino ABS	12 €/ordine
Costo ABS	14.90 €/Kg
Costo lampadina	5 €/unità
Costo spedizione PF	19.52 €/spedizione
Costo del capitale in magazzino annuale	25%
Costo del magazzino ABS giornaliero	0.010 €/Kg
Costo del magazzino lampadine giornaliero	0.0034 €/kg

2.6. Modellizzazione delle filiere logistiche in Arena Simulation

La simulazione dei modelli rappresentanti le quattro filiere inizia con il cliente che raggiunge il retailer e mediante il supporto di un operatore definisce il prodotto finito che desidera e genera l'ordine. Quando il prodotto finito è concettualmente definito, l'operatore presente nel retailer, inoltra le informazioni sulle componenti al produttore che le inserisce in coda per la fase di elaborazione e definizione del file CAD 3D e STL.

L'operatore software presente nel produttore realizza i file CAD 3D e i file STL. Quando tale operazione è conclusa, esso ha il compito di raccogliere le informazioni volumetriche del pezzo e il quantitativo di ABS necessario per quel prodotto. Le informazioni volumetriche del prodotto sono utili per calcolare il tempo di produzione del prodotto. Invece, il quantitativo di ABS è un dato necessario alla compilazione dell'ordine giornaliero di materie presente nei sistemi PULL. Infatti, in questi sistemi alle ore 20 di ciascun giorno, il produttore nella produzione centralizzata o il retailer nella produzione distribuita emette

l'ordine ai fornitori con il quantitativo di ABS e lampadine necessarie a produrre la domanda generatosi nel giorno in essere.

Per poter gestire i riordini, la simulazione è stata settata in modo tale da iniziare alle 8.00 ed ogni 12 ore una variabile cambia valore permettendo l'attivazione dell'iter legato ai riordini. Inoltre, la variabile permette di gestire l'orario di apertura dei retailer, in quanto essi sono aperti dalle 8.00 alle 20.00 per un totale di 12 ore. Questa assunzione è stata fatta per rendere più reale il modello, in quanto essendo dei retailer di prossimità, ipotizzare che essi siano sempre aperti e operativi, è stata ritenuta un'assunzione troppo forte e che avrebbe semplificato eccessivamente la realtà.

Dopo la fase di design del prodotto, nei sistemi a produzione centralizzata, i file necessari alla stampa rimangono al produttore, viceversa, nella produzione distribuita tali file sono inoltrati ai retailer. Successivamente, nelle filiere nei quali è presente l'inventario, è possibile avviare la produzione, verificando precedentemente la disponibilità di stampanti 3D libere. Invece, nei sistemi PULL, è necessario attendere le materie prime e successivamente è possibile avviare la produzione, qualora fosse disponibile un macchinario AM. Verificate tali condizioni è possibile avviare la produzione nei sistemi centralizzati, invece, nei sistemi a produzione distribuita è necessario un ulteriore controllo. Infatti, è possibile avviare la produzione soltanto se il retailer fosse aperto, in quanto è necessario che l'operatore sia presente nei retailer in modo tale da occuparsi della fase di setup. Una volta concluso il setup, lo stampaggio delle componenti può continuare anche con il retailer chiuso, in quanto tale fase è completamente automatica.

Conclusasi la produzione, nei sistemi a produzione distribuita il prodotto è consegnato al cliente ponendo fine alla simulazione. Invece, nei sistemi a produzione centralizzata, è necessario trasportare i prodotti finiti ai retailer. La spedizione è affidata a dei corrieri specializzati e il prodotto è consegnato dopo ventiquattro ore al negozio che si occupa di contattare il cliente e di completare l'ordine.

2.7. Setup della simulazione

La simulazione inizia alle ore 8.00 di uno specifico giorno (precisamente il 27 ottobre) e ha una durata di 635 giorni, di cui 270 giorni di transitorio, con l'obiettivo di valutare l'andamento del sistema lungo un intero anno. Sono state effettuate 30 repliche per ciascun scenario analizzato.

2.7.1. Definizione del transitorio

L'operazione di definizione del transitorio è stata realizzata mediante un processo di analisi degli output, composto da tre fasi: la raccolta delle statistiche che possono essere alterate dalle condizioni iniziali, successivamente questi dati sono stati inseriti in dei grafici, rappresentando il valore delle statistiche nel tempo ed infine è stato definito il transitorio.

Per ciascun modello, dunque, sono stati raccolti i valori, sia giornalieri che settimanali, del tempo di consegna dei prodotti finiti, del tempo di produzione e del throughput del sistema. In seguito, sia con i dati giornalieri sia con i dati settimanali sono stati realizzati dei grafici in modo tale da verificare quando il valore delle statistiche non presentava eccessivi scostamenti, quindi quando l'effetto delle condizioni iniziali è assente. Questa operazione ha permesso di calcolare il transitorio del modello, prendendo il periodo di transitorio maggiore tra i vari transitori trovati. Per semplicità di comprensione sono stati riportati i grafici usati per la definizione del transitorio del modello di simulazione del sistema con magazzino avente una produzione centralizzata. Nel grafico in *figura 2.7* è rappresentato l'andamento del tempo di consegna dei prodotti finiti su base giornaliera. Invece, nel grafico in *figura 2.8*, è rappresentato l'andamento di tale misura di performance su base settimanale. I tempi di produzione e il throughput del sistema sono stati presentati su base giornaliera nel grafico in *figura 2.9* e su base settimanale nel grafico in *figura 2.10*. L'analisi dell'andamento di queste misure di performance mette in risalto che in questo specifico modello il transitorio è di circa 210 giorni.

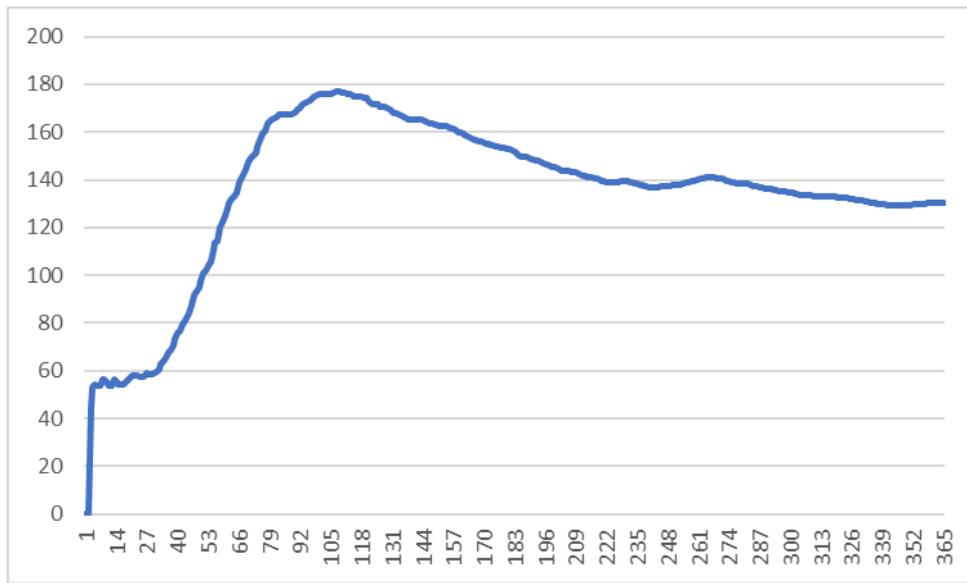


Figura 2.7 Andamento del tempo di consegna dei prodotti finiti su base giornaliera nel modello "Inventory centralizzato"

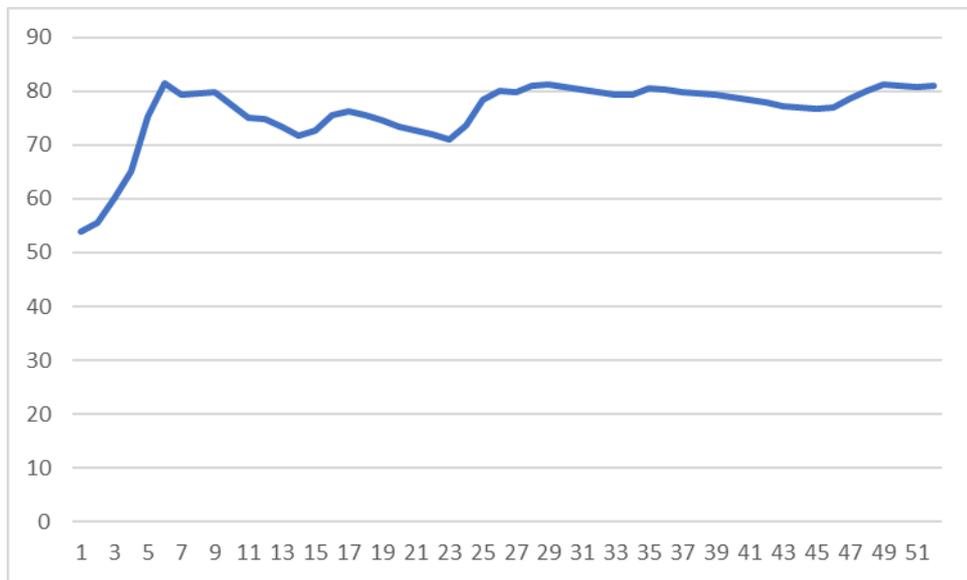


Figura 2.8 Andamento del tempo di consegna prodotti finiti su base settimanale nel modello "Inventory centralizzato"

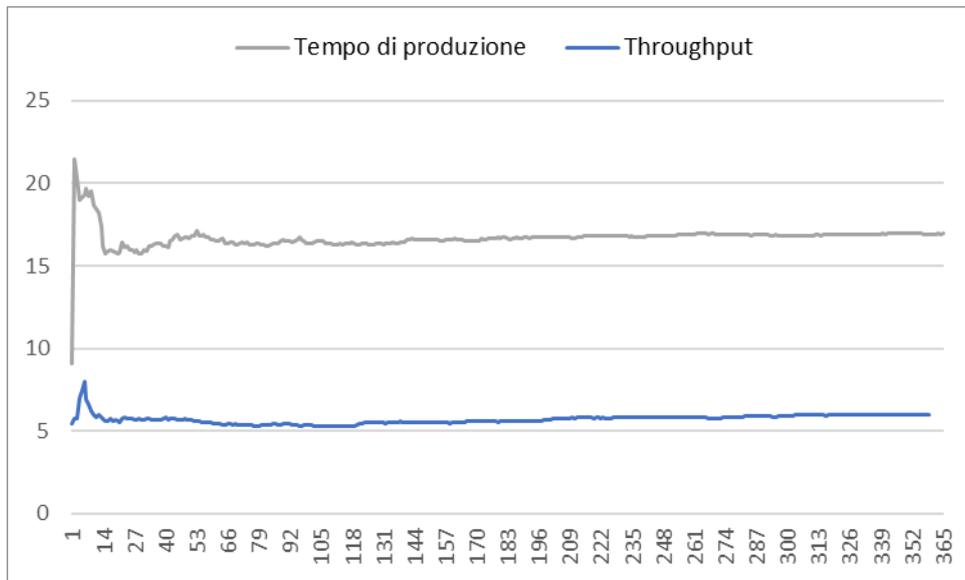


Figura 2.9 Andamento del tempo di produzione e del throughput su base giornaliera nel modello "Inventory centralizzato"

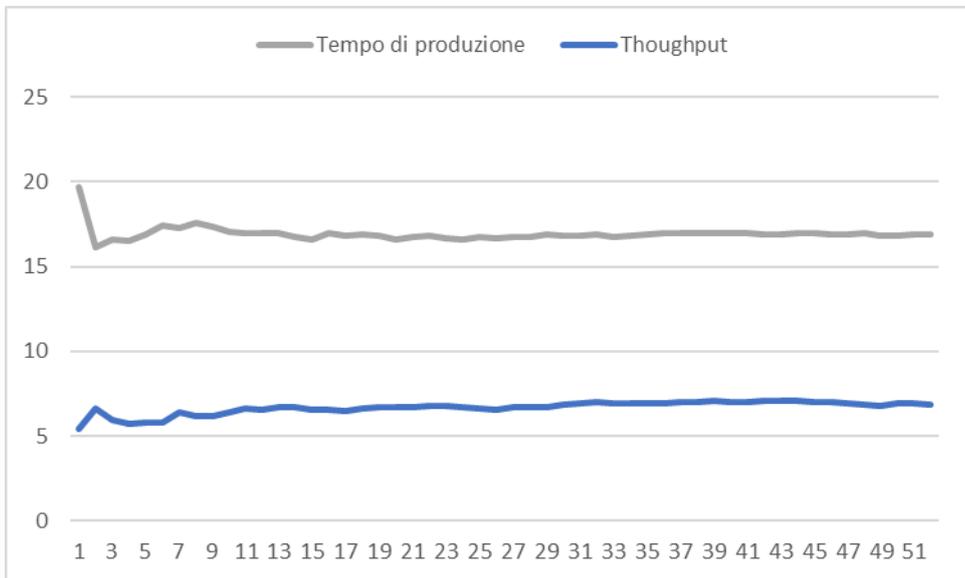


Figura 2.10 Andamento del tempo di produzione e del throughput su base settimanale nel modello "Inventory centralizzato"

Questa operazione di raccolta, rappresentazione grafica e di definizione del transitorio è stata fatta per tutti e quattro i modelli (*tabella 2.5*) e una volta definito il transitorio per ciascuno di essi, è stato scelto il transitorio generale che, come detto, precedentemente è pari a 270 giorni. Dunque, escludendo il transitorio, sono state raccolte statistiche per un totale di 365 giorni.

Tabella 1.5 Periodo di transitorio in giorni e in settimane dei quattro modelli

Modello	Transitorio in giorni	Transitorio in settimane
PULL centralizzata	170/180	19/20
PULL distribuita	150/170	24/25
Inventory centralizzata	200/210	24/25
Inventory distribuita	180/190	23/24

La scelta più conservativa sulla definizione del transitorio è dovuta all'utilizzo di un'analisi grafica dei dati che comporta un'inesattezza dovuta ad una percentuale di soggettività nella scelta.

2.7.2. Numero di repliche

In ogni run sono state calcolate le misure di performance necessarie alla definizione dei tempi e dei costi. I valori finali di misura di performance calcolati in ciascuna run rappresentano i dati sperimentali del campione di quella specificata misura di performance. Ottenuto il campione è stato utilizzato per calcolare il valore medio della statistica in esame e definire degli intervalli di confidenza dei valori medi.

Così come per il calcolo dei valori medi, ancor più nel calcolo degli intervalli di confidenza, un problema molto importante è il numero di repliche da effettuare. Infatti, per poter calcolare gli intervalli di confidenza è necessario che le misure di performance Y_{ij} , con i che rappresenta la i -esima misura di performance (tempo di consegna, numero di ordini materie prime effettuate ecc.) e con j che rappresenta la j -esima run, seguano una distribuzione normale. Qualora tale ipotesi non fosse verificata, è possibile approssimare la statistica t ad una distribuzione T di student mediante il teorema del limite centrale. Per

far questo, sono state effettuate delle run, nelle quali sono stati raccolti i dati in output per verificare quando tale condizione fosse verificata. Alla fine del processo emerge che il numero di repliche necessarie fosse pari a 30.

La formula per il calcolo dell'intervallo di confidenza è la seguente:

$$Y_m \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} * \sqrt{\frac{S^2}{n}} \quad (3)$$

Rispettivamente:

- Y_m rappresenta la media della misura di performance;
- α rappresenta l'errore di prima specie, cioè la probabilità di rifiutare l'ipotesi nulla quando l'ipotesi nulla è vera;
- $n-1$ gradi di libertà,
- S^2 rappresenta lo stimatore della varianza campionaria

$$S^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (Y_j - Y_m)^2}{n-1} \quad (4)$$

- Y_j , i valori delle misure di performance ottenuti in ciascuna run.

3. Analisi dei risultati

Per semplicità di lettura è stata introdotta una nomenclatura per descrivere facilmente lo scenario che si sta analizzando:

- Per la gestione delle materie prime si distinguono gli scenari in “PULL” per le filiere logistiche aventi riordini giornalieri e “INV” per quelle con magazzino;
- Per la tipologia di produzione è stato usato “C” per la produzione centralizzata e “D” per la produzione distribuita;
- Per la variabilità della domanda si differenziano in “H” lo scenario ad alta variabilità, “M” il caso a media variabilità e “L” il restante scenario.

Un esempio esplicativo di tale nomenclatura è PULL_C_3_M, il quale rappresenta i modelli aventi riordini giornalieri, con produzione centralizzata avente tre macchinari additive analizzata nello scenario con livello di variabilità della domanda medio.

I risultati sui tempi e sui costi sono presentati separatamente per poi confrontarli tra loro così da avere una visione d’insieme del sistema analizzato. Sono stati presentati i dati suddivisi per livelli di variabilità confrontando tempi e costi dei vari sistemi relativi al livello di deviazione standard in analisi.

3.1. Media variabilità della domanda

3.1.1. Tempo di consegna prodotti finiti

Le prime simulazione dei modelli sono state effettuate con un livello di variabilità della domanda medio, cioè gli ordini seguono una distribuzione normale con media 4 e deviazione standard di 1.2 [17]. Le prime analisi sono state effettuate sui tempi di consegna dei prodotti finiti (*tabella 3.1*), cioè il tempo che intercorre tra l’emissione dell’ordine da parte del cliente fin quando il prodotto finito non è consegna ad esso.

Tabella 3.1 Tempo di consegna prodotti finiti con livello di variabilità medio della domanda

Scenario	Tempo di consegna prodotto finito
PULL_C_3_M	107.9
INV_C_3_M	86.7
PULL_D_1x4_M	71.7
INV_D_1x4_M	51

Da una prima analisi, il sistema che presenta il minor tempo di consegna è quello avente sempre in magazzino le materie prime con una produzione distribuita. Infatti, il sistema INV_D_1x4 grazie alla presenza delle materie prime sempre in magazzino, annulla i tempi di riordino ed inoltre grazie alla produzione distribuita permette di annullare i tempi di trasporto dei prodotti finiti dal produttore ai retailer. L'annullamento di questi due tempi permette di ridurre notevolmente il tempo necessario per servire i clienti. Contrariamente, dai dati in *tabella 3.1* emerge che il tempo di consegna maggiore è quello del sistema PULL_C_3. Infatti, esso presenta entrambi i tempi citati precedentemente, i quali peggiorano la rapidità del sistema nel servire il cliente finale.

Nel complesso, confrontando i sistemi che gestisco nello stesso modo le materie prime, emerge che la produzione distribuita abbatta i tempi d'attesa dei clienti, principalmente grazie all'annullamento del tempo di trasporto della lampada dal produttore al retailer.

Inoltre, da una prima analisi risalta anche la problematica legata al numero delle stampanti, in quanto, nella produzione distribuita il numero di esse è maggiore rispetto alla produzione centralizzata. Infatti, nel capitolo 4 è stata analizzata come varia tale misura di performance nei sistemi con produzione centralizzata se essi operassero con quattro stampanti additive.

Per maggiore comprensione i tempi di consegna dei prodotti finiti dei quattro sistemi, essi sono stati espressi sotto forma di variazione percentuale (*tabella 3.2*), così da risaltare l'impatto di una variazione nella logica di gestione delle materie prime o nel posizionamento dei macchinari additive.

Tabella 2.2 Variazione percentuale dei tempi di consegna con livello medio della variabilità della domanda

Dallo scenario	Allo scenario	Diminuzione del tempo di consegna
PULL_C_3_M	PULL_D_1x4_M	19.65%
PULL_C_3_M	INV_C_3_M	33.55%
PULL_C_3_M	INV_D_1x4_M	52.73%
PULL_D_1x4_M	INV_C_3_M	17.30%
PULL_D_1x4_M	INV_D_1x4_M	41.18%
INV_C_3_M	INV_D_1x4_M	28.87%

Successivamente, sono stati calcolati, mediante la formula (3), i vari intervalli di confidenza dei tempi di consegna dei quattro sistemi con differenti valori di α , errore di prima specie.

Sono stati scelti tre livelli di confidenza da analizzare:

- Livello di confidenza del 95%, con $\alpha=5\%$
- Livello di confidenza del 97.5%, con $\alpha=2.5\%$
- Livello di confidenza del 99%, con $\alpha=1\%$

Per ciascun valore di α , errore di prima specie, è stato calcolato mediante l'ausilio delle tavole della t di student il termine $t_{(n-1,1-\alpha/2)}$ con n pari a trenta:

- $t_{(n-1,1-\alpha/2)} = 2.045$, con $\alpha=5\%$
- $t_{(n-1,1-\alpha/2)} = 2.368$, con $\alpha=2.5\%$
- $t_{(n-1,1-\alpha/2)} = 2.756$, con $\alpha=1\%$

Calcolati gli intervalli, sono stati confrontati tra loro per verificare se essi si sovrapponevano. Se questo avvenisse, sarebbe possibile affermare che le misure di performance prese in esame non avrebbero un diverso valore di media campionaria con il livello di confidenza considerato.

Gli intervalli di intervalli di confidenza dei tempi di consegna dei prodotti finiti con $\alpha=0.05$ sono descritti nel grafico in *figura 3.1*.

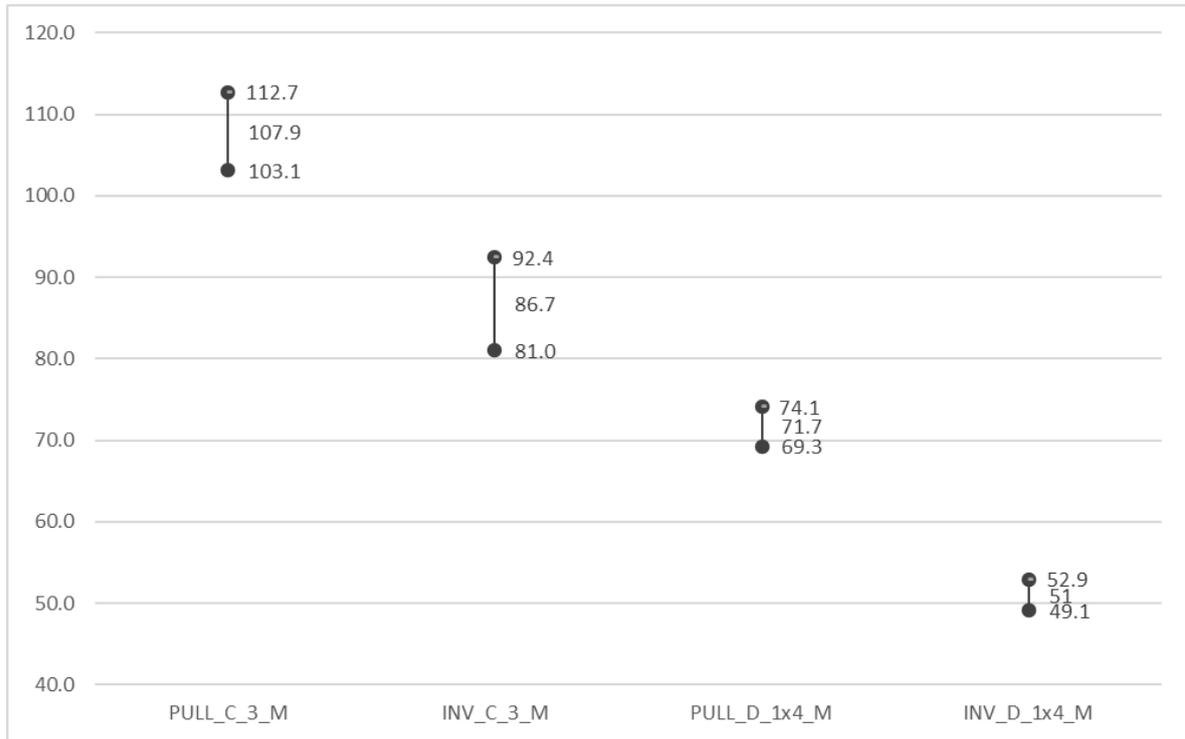


Figura 3.1 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.05$ del tempo di consegna con livello di variabilità della domanda medio

Confrontando i vari intervalli tra loro emerge che non si sovrappongono dunque, non è possibile affermare che i tempi di consegna siano i medesimi con un livello di confidenza del 95%. Successivamente, la medesima analisi è stata effettuata con $\alpha=0.025$ e $\alpha=0.01$. Gli intervalli di confidenza sono stati rappresentati in tabella, rispettivamente nella *tabella 3.3* quelli con $\alpha=0.025$ e nella *tabella 3.4* gli intervalli con $\alpha=0.01$.

Tabella 3.3 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.025$ del tempo di consegna con livello di variabilità della domanda medio

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.025$ del Tempo di consegna PF	
PULL_C_3_M	102.3	113.5
INV_C_3_M	80.1	93.3
PULL_D_1x4_M	68.9	74.5
PULL_D_1x4_M	48.8	53.2

Tabella 3.4 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ del tempo di consegna con livello di variabilità della domanda medio

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ del Tempo di consegna PF	
PULL_C_3_M	101.4	114.4
INV_C_3_M	79	94.4
PULL_D_1x4_M	68.4	75
PULL_D_1x4_M	48.4	53.6

Dunque, data la mancata sovrapposizione degli intervalli di confidenza, non è possibile affermare che i valori medi della misura di performance “tempo di consegna dei prodotti finiti” siano uguali, con un livello di confidenza del 99%.

3.1.2. Tempo di attesa in coda e utilizzo delle stampanti

In seguito, sono stati analizzati i tempi di attesa medi in coda davanti alle stampanti additive dei vari ordini e l'utilizzo dei macchinari additive. Queste due statistiche sono state calcolate perché spesso prese in considerazione in letteratura [11], in quanto elementi differenzianti i sistemi di produzione additive centralizzata e distribuita.

Il tempo di attesa medio in coda nei vari sistemi è presentato nella *tabella 3.5* ed è espresso in ore. Per i sistemi con produzione distribuita, tale statistica è stata calcolata utilizzando la media di questa misura di performance nei vari retailer. Tale operazione serve per avere un unico valore da poter confrontare con i tempi di attesa prima dello stampaggio nei sistemi a produzione centralizzata. È importante ricordare che nei sistemi ad inventory, l'attesa in coda è dovuta esclusivamente alla mancata presenza di macchinari additive liberi. Invece, nei sistemi aventi riordini giornalieri, questa misura di performance è influenzata anche dal tempo di attesa delle materie prime.

Tabella 3.5 Tempo in coda allo stampaggio con livello medio della variabilità della domanda

Scenario	Tempo in coda prima dello stampaggio
PULL_C_3_M	45.8
INV_C_3_M	42.6
PULL_D_1x4_M	32.6
INV_D_1x4_M	32.1

I valori in *tabella 3.5*, espressi in ore, evidenziano che il tempo in coda prima dello stampaggio è molto simile tra i vari sistemi aventi il medesimo posizionamento delle stampanti. Tale misura di performance, in tutti e quattro i sistemi, non è un elemento da trascurare e ha un impatto considerevole sul totale dei tempi di consegna. Infatti, per esempio, nel sistema INV_D_1x4_M, questo tempo rappresenta il 63.1% del tempo di attesa dei clienti. Dunque, non si esclude che l’inserimento di ulteriori stampanti 3D potrebbe implicare un miglioramento della misura di performance “tempo di consegna prodotti finiti”, analisi che è stata effettuata nel capitolo 4.

Successivamente, è stato analizzato l’utilizzo delle stampanti nei vari sistemi. I valori di tale statistica sono riportati nella *tabella 3.6* e confermano quello descritto nell’articolo [11], cioè che la produzione additive distribuita permette di avere un utilizzo minore dei macchinari, quindi una minore efficienza produttiva ma allo stesso tempo una maggiore flessibilità del sistema. Viceversa, produrre centralmente permette di avere una maggiore efficienza produttiva, in quanto i macchinari sono liberi per meno tempo ma aumenta la possibilità di avere una stampante occupata e dunque, di non riuscire a rispondere velocemente ad una variazione imprevista della domanda.

Tabella 3.6 Utilizzo dei macchinari additivi con livello medio della variabilità della domanda

Scenario	Utilizzo macchinari AM
PULL_C_3_M	0.783
INV_C_3_M	0.777
PULL_D_1x4_M	0.571
INV_D_1x4_M	0.573

Mediante un'analisi congiunta dei dati in *tabella 3.5* e in *tabella 3.6* emerge che i sistemi aventi una produzione centralizzata AM hanno un utilizzo delle stampanti maggiore che si riflette su di un tempo in coda prima dello stampaggio maggiore. Viceversa, le filiere logistiche con produzione distribuita AM, in cui l'utilizzo dei macchinari additive è minore, il tempo in coda è minore.

3.1.3. Costi logistici

I costi analizzati sono quelli di natura logistica, cioè il costo di riordino delle materie prime, il costo di magazzino materie prime e il costo di spedizione dei prodotti finiti.

Le differenze strutturali dei quattro filiere logistiche modellizzate implicano un calcolo dei costi logistici totali a sé per ogni rete. Infatti, non tutti i costi sopracitati e descritti nel capitolo precedente sono presenti in tutte le filiere. La prima fase dell'analisi dei costi riguarda il confronto tra i costi logistici totali dei quattro scenari con livello medio di variabilità della domanda, cioè degli ordini giornalieri che seguono una distribuzione Normale con media 4 e deviazione standard 1.2 [17].

I costi logistici totali di questo scenario sono presentati nella *tabella 3.7*.

Tabella 3.7 Costi logistici totali con livello medio della variabilità della domanda

Scenario	Costi logistici totali
PULL_C_3_M	27,648 €
INV_C_3_M	45,152€
PULL_D_1x4_M	7,940 €
INV_D_1x4_M	20,260 €

Il sistema più economico è quello avente i riordini delle materie prime e la produzione AM distribuita. In generale, la produzione distribuita permette di abbassare i costi, grazie all'assenza del costo di spedizione del prodotto finito, in quanto stampato direttamente nei retailer. Inoltre, dai dati in *tabella 3.7*, emerge che mantenere in magazzino le materie prime aumenta notevolmente i costi. Infatti, i sistemi aventi inventory presentano dei costi più elevati confrontati con i sistemi aventi lo stesso posizionamento delle stampanti additive ma privi di magazzino. Questo è dovuto al basso costo di riordino delle materie prime confrontato con l'alto costo di acquisto che esse hanno, nonché alla scelta di avere

a magazzino, al tempo zero, tutto il quantitativo necessario a produrre l'intera domanda annuale. Come discusso nel capitolo precedente, sono state definite delle logiche di gestione delle materie prime diametralmente opposte ed estreme, le quali esaltano sia vantaggi che gli svantaggi di ciascuna di esse. Un eventuale applicazione ad un contesto reale potrebbe generare delle logiche intermedie dovute a particolari accordi con i fornitori.

Prima di effettuare un confronto tra tempi e costi, data la differente natura dei sistemi, è necessario capire quali voci di costo compongono ciascun costo totale. Le varie voci di costo sono state calcolate utilizzando le formule descritte nel capitolo precedente. Nello specifico, per il costo di riordino è stata usata la formula (5), per il costo di spedizione prodotti finiti la formula (9) e per il costo di mantenimento delle materie prime in magazzino la formula (8).

Il sistema più economico, PULL_D_1x4_M, non necessita di particolari analisi in quanto tutti i costi logistici sono attribuibili esclusivamente al riordino materie prime. Tale costo, pari a 7.9K€, è ottenuto dalla formula (5), nella quale è stato moltiplicato il costo fisso di riordino pari a 12€/ordine con il numero totale dei riordini dei quatti retailer, che ha un valore medio pari a 662.

Il sistema PULL_C_3_M necessita di una maggiore analisi, perché oltre al riordino delle materie prime è presente anche la voce di costo legata alla spedizione dei prodotti finiti. Infatti, tale rete presenta un costo totale di 27.6K€, la cui quota principale è il costo di spedizione dei prodotti finiti, che è pari a 24.9 K€. Tale voce di costo è stata calcolata con la formula (9), cioè il prodotto tra costo fisso di spedizione del prodotto finito, pari a 19.52€/ordine, e il numero totale di spedizioni, che ha un valore medio pari a 1275. La restante parte del costo totale è attribuibile al costo di riordino delle materie prime, calcolato mediante la formula (5), con un numero medio di ordini di ABS pari a 230. La composizione del costo totale di tale filiera logistica è presentata nel grafico in *figura 2.2*.

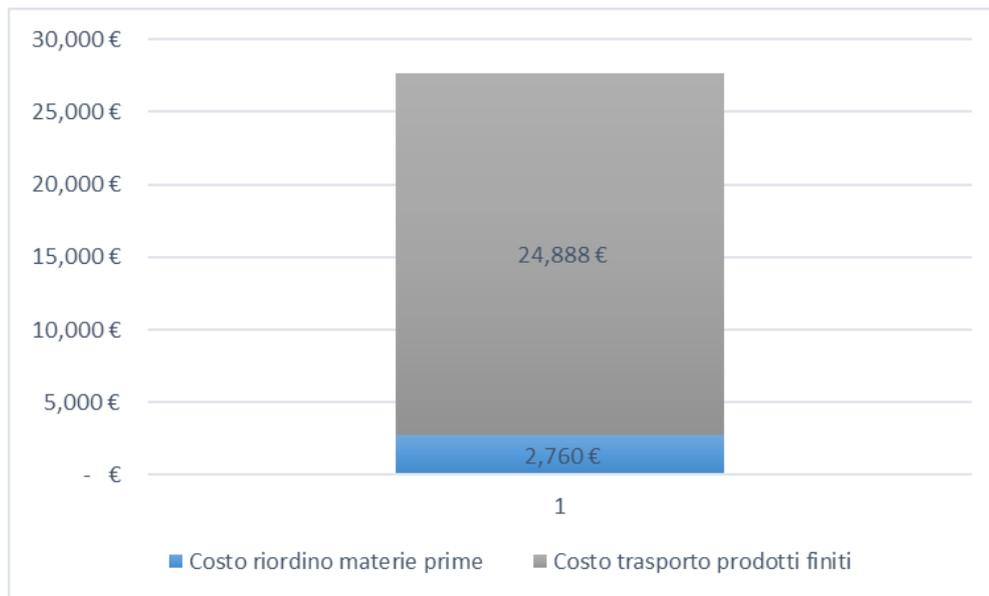


Figura 3.2 Analisi delle voci di costo del sistema PULL_C_3_M

Analizzando la differenza di costi tra i sistemi a gestione PULL emerge che il costo di riordino delle materie prime è maggiore nella produzione distribuita AM. L'aumento è dovuto al numero maggiore di riordini effettuati da ciascun retailer. Infatti, nel medesimo giorno più di un retailer può richiedere ABS e lampadine per produrre. Tale dinamica non avviene nel sistema a produzione centralizzata additiva, in cui l'ordine giornaliero era al più unico ed era effettuato dal produttore centrale.

Il numero maggiore di riordini presente nel sistema PULL_D_1x4_M comporta un costo del riordino delle materie prime maggiore rispetto al medesimo costo nel sistema PULL_C_3_M. Però tale differenza di costo non è così ampia da compensare il costo del trasporto dei prodotti finiti presente esclusivamente nelle filiere a produzione centralizzata. Dunque, nel caso di gestione delle materie prime mediante dei riordini giornalieri, produrre nei vari retailer permette di abbassare i costi logistici totali.

I sistemi ad inventory presentano la voce di costo legata alla gestione dell'ABS e delle lampadine in magazzino. Come emerge anche dai grafici in *figura 3.4* e *figura 3.5* rispettivamente per il modello distribuito e centralizzato, il costo di magazzino per le lampadine ha un impatto trascurabile sul totale dei costi logistici. Tale voce è stata comunque calcolata per completezza mediante la formula (8), ottenendo i valori di tale formula dalle formule (6) e (7).

Nel sistema a INV_D_1x4_M, l'inventory medio annuo delle lampadine è pari a 635 unità, il quale è stato moltiplicato per il costo di mantenimento a magazzino annuo che è pari 1.241 €/unità. Dunque, il costo totale di mantenimento a magazzino delle lampadine in tale sistema è circa 800€, rappresentante il 3.9% del totale dei costi logistici che ammonta a circa 20,2 K€. Dunque, la quota maggiore di costo logistico risiede nella gestione del materiale necessario alla produzione additive. Tale voce di costo è stata calcolata con la formula (8), in cui il costo di mantenimento a magazzino unitario annuo è pari a 3.65€/Kg e un inventory medio pari a 5226 Kg. Dunque, il costo totale di mantenimento a magazzino dell'ABS è di circa 19.4 K€. La composizione del costo logistico totale del sistema INV_D_1x4_M è presentata nel grafico in *figura 3.3*.

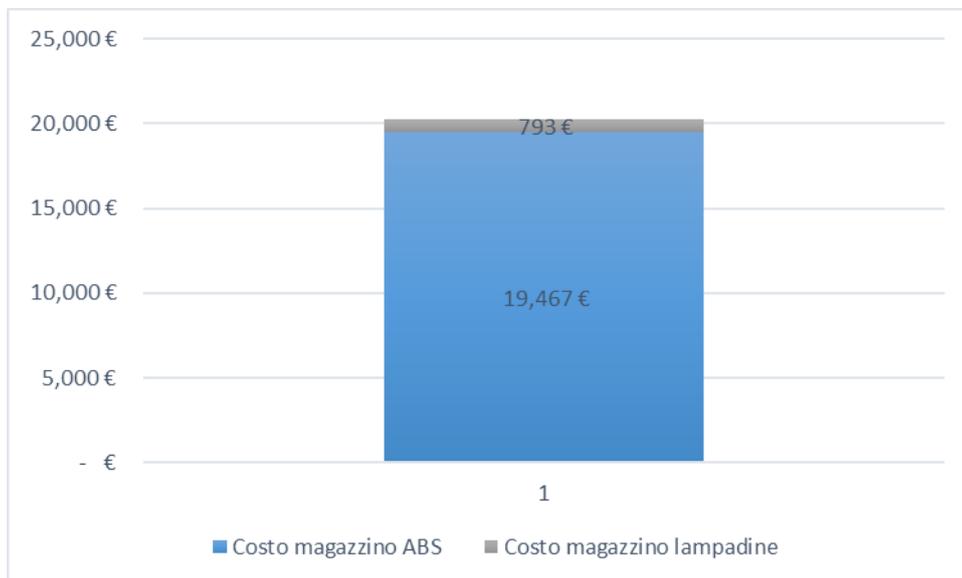


Figura 3.3 Analisi delle voci di costo del sistema INV_D_1x4_M

Nel sistema INV_C_3_M, il costo di magazzino delle lampadine rappresenta circa l'1.7% del totale. L'impatto di tale costo è minore in questo sistema, non perché il costo di magazzino dell'ABS sia più alto rispetto al sistema a produzione distribuita, bensì perché i costi logistici totali sono più elevati. Infatti, i costi totali sono 45.1 K€, composti dal costo di mantenimento a magazzino materie prime e dal costo del trasporto dei prodotti finiti. La quota più ampia di costo totale è rappresentata da quest'ultima voce. Essa è stata calcolata con la formula (9), andando a moltiplicare il costo del trasporto prodotti finiti, pari a 19.52€/spedizione, per il totale delle spedizioni effettuate, pari a 1279. Dunque, il costo del trasporto prodotti finiti è di circa 25K€. La seconda voce di costo più impattante nello scenario INV_C_3_M è il costo di mantenimento a magazzino dell'ABS, il quale è stata calcolato con la formula (8), moltiplicando l'inventario medio (5207 Kg) per il $CM_{g_{abs}}$, il tutto per 365 giorni. Dunque, il costo totale di mantenimento a magazzino dell'ABS è di circa 19.4K€. La composizione del costo logistico totale del sistema INV_C_3_M è presentata nel grafico in figura 3.4.

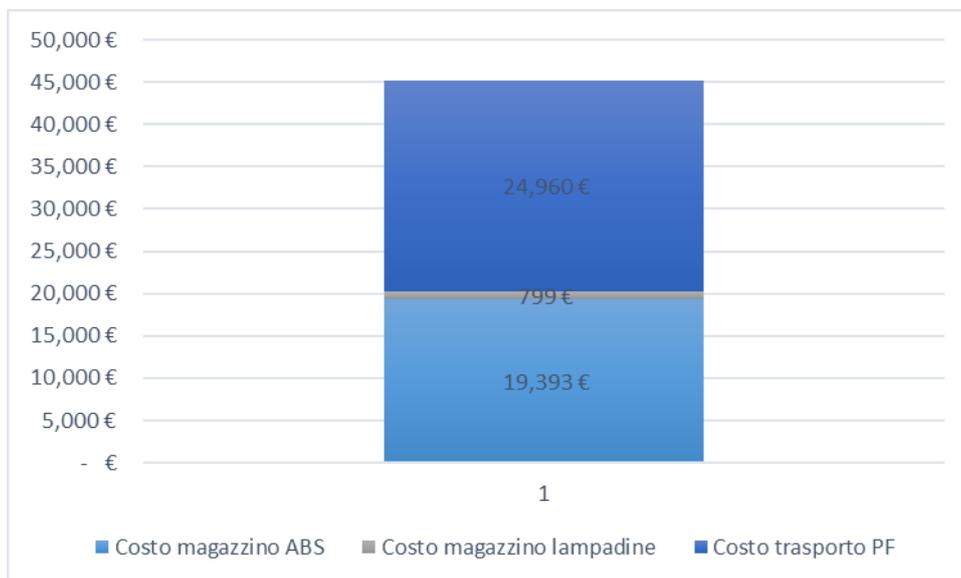


Figura 3.4 Analisi delle voci di costo del sistema INV_C_3_M

Mettendo a confronto i valori medi dei costi dei due sistemi ad inventory, la differenza risiede nel costo di trasporto delle lampade. Infatti, i costi di gestione del magazzino, di entrambe le materie prime, non presentano eccessivi scostamenti. Dunque, qualora fosse presente una gestione delle materie prime ad inventory è conveniente utilizzare un sistema a produzione distribuita AM.

Dopo aver analizzato i costi nel dettaglio, così come per i tempi di consegna, sono stati calcolati gli intervalli di confidenza per i costi logistici al variare dell'errore di prima specie α . Nella *tabella 3.8* sono rappresentati i valori degli intervalli con un livello di confidenza del 99%, avente $\alpha=0.01$, cioè gli intervalli più ampi.

Tabella 3.8 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ dei costi logistici con livello di variabilità della domanda medio

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ dei Costi logisti totali	
PULL_C_3_M	26,872	28,425
INV_C_3_M	43,861	46,442
PULL_D_1x4_M	7,756	8,123
INV_D_1x4_M	19,688	20,832

Analizzando gli intervalli di confidenza essi non si sovrappongono, dunque, i valori medi dei costi logistici dei vari scenari non sono uguali tra di loro con un livello di confidenza del 99%. Essendo possibile affermare tale conclusione con $\alpha=0.01$, è possibile affermarla anche con i livelli di confidenza del 95% e del 97.5%, in quanto gli intervalli presentano un'ampiezza minore.

3.1.4. Confronto tempi di consegna e costi logistici

È stato effettuato un confronto tra i tempi e costi logistici per identificare quale fosse il sistema migliore. I tempi di consegna dei prodotti finiti sono presentati in *figura 3.5*, espressi in ore, e i costi logistici totali nel grafico in *figura 3.6*.

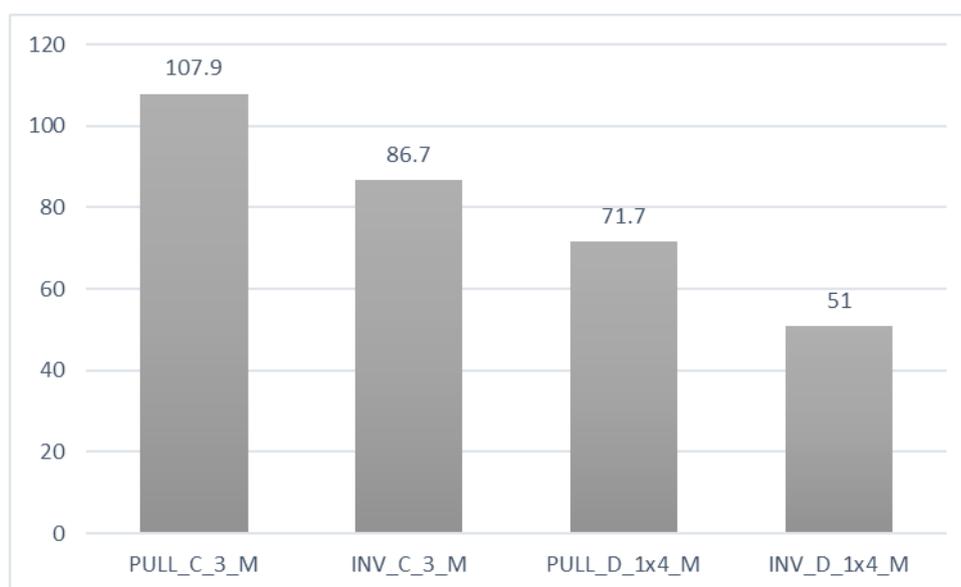


Figura 3.5 Tempi di consegna dei prodotti finiti con livello di variabilità della domanda medio

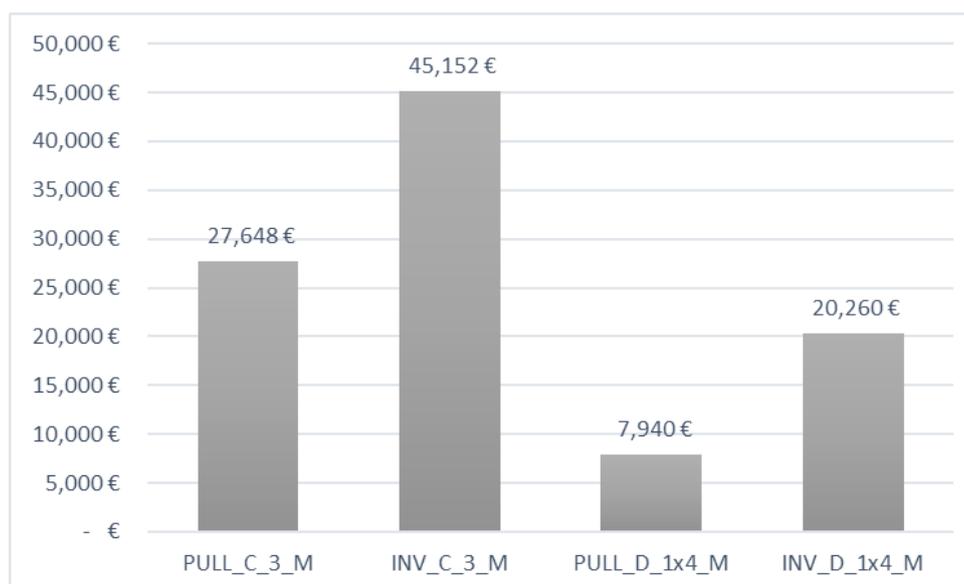


Figura 3.6 Costi logistici totali con livello di variabilità della domanda medio

Da una prima analisi dei dati delle due tabelle emerge che la produzione centralizzata non è conveniente né sui tempi né sui costi. Dunque, lavorando all'interno di uno scenario avente variabilità media della domanda, la produzione distribuita permette ai sistemi di rispondere più velocemente ai clienti e di ridurre i costi logistici.

Analizzando i due sistemi a produzione distribuita, emerge che non esiste una scelta migliore univoca, in quanto è presente un trade-off tra i tempi di consegna dei prodotti finiti e costi della rete. Infatti, il sistema PULL_D_1x4_M ha i tempi di consegna dei prodotti finiti più elevati rispetto al medesimo sistema ma con inventory. Allo stesso tempo, però, ha dei costi logistici totali più bassi.

Il fattore discriminante, per quanto riguarda i tempi, è il tempo di fornitura delle materie prime, il quale aumenta l'attesa dei clienti nello scenario con i riordini giornalieri. Invece, per quanto riguarda i costi, data l'assenza in entrambi i sistemi del costo di spedizione dei prodotti finiti, la differenza risiede nel costo di riordino e nel costo di magazzino. Infatti, mantenere a magazzino un così ampio quantitativo di materie prime non è conveniente, dato anche il basso costo di riordino di esse.

Dunque, qualora fosse necessario prendere una decisione su che tipologia di sistema attuare nel caso di domanda avente una variabilità media, si opterebbe per una produzione distribuita dati i tempi e i costi minori. Successivamente, qualora l'impresa ponesse maggiore attenzione sui costi sarebbe consigliato non possedere materie prime in magazzino e riordinare quando necessario. Diversamente, se l'obiettivo dell'impresa fosse quello di servire più velocemente il cliente allora avere sempre merce in magazzino ridurrebbe notevolmente i tempi, a discapito dei costi.

3.2. Alta e bassa variabilità della domanda

Conclusasi le analisi sulla media variabilità della domanda, sono state effettuate le simulazioni dei modelli facendo variare il valore di deviazione standard, definendo altri due livelli di variabilità della domanda. Un livello ad alta variabilità della domanda con gli ordini giornalieri che seguono una distribuzione Normale (4, 2) [17] e un livello a bassa variabilità della domanda con gli ordini giornalieri aventi una distribuzione Normale (4, 0.4) [17].

3.2.1. Tempo di consegna dei prodotti finiti

La prima misura di performance calcolata è il tempo di consegna dei prodotti finiti, per semplicità i dati di bassa e alta variabilità saranno presentati insieme in modo tale da permetterne il confronto. I valori medi, espressi in ore, sono presentati nella *tabella 3.9*.

Tabella 3.9 Tempo di consegna prodotti finiti con livello di variabilità alto e basso della domanda

Scenario	Tempo di consegna PF ad alta variabilità della domanda	Tempo di consegna PF a bassa variabilità della domanda
PULL_C_3	117.3	100.2
INV_C_3	96.1	86.7
PULL_D_1x4	75	72.6
INV_D_1x4	55.2	46.7

Il sistema più veloce nel soddisfare il cliente è quello con produzione distribuita aventi ABS e lampadine presenti nei magazzini dei retailer. Inoltre, permane la convenienza in termini di tempi nel produrre in prossimità dei clienti finali. Infatti, i sistemi a produzione distribuita permettono di ridurre notevolmente il tempo di attesa dei clienti, principalmente grazie all'annullamento del tempo di trasporto dei prodotti finiti dal sito produttivo principale ai retailer distribuiti nel territorio. Il sistema avente il tempo di consegna maggiore, in tutti e due gli scenari di variabilità, è quello con produzione centralizzata e prodotti finiti riordinati giornalmente. La presenza del tempo di attesa delle materie prime e del tempo necessario per consegnare i prodotti finiti ai retailer rende questo sistema molto più lento rispetto alle tre reti logistiche in esame.

La fase successiva è stata quella di calcolare gli intervalli di confidenza dei tempi di consegna dei prodotti finiti per i quattro sistemi negli scenari di alta e bassa variabilità della domanda. L'obiettivo è quello di verificare se le differenze tra le varie medie campionarie fossero significativamente statistiche. È stato testato per primo il caso con errore di prima specie $\alpha=0.01$. Gli intervalli di confidenza del tempo di consegna con $\alpha=0.01$ con livello di variabilità della domanda alta sono rappresentati nella *tabella 3.10*.

Tabella 3.10 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ del tempo di consegna con livello di variabilità della domanda alto

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ del Tempo di consegna PF	
PULL_C_3_H	109.5	125.1
INV_C_3_H	87.5	104.7
PULL_D_1x4_H	71.5	78.5
INV_D_1x4_H	51.4	59

Data l'assenza di sovrapposizione degli intervalli non è possibile affermare che i tempi di consegna dei prodotti finiti tra i vari sistemi siano uguali con livello di confidenza del 99%.

La medesima analisi è stata effettuata per gli scenario a variabilità della domanda bassa. Gli intervalli di confidenza con $\alpha=0.01$ sono rappresentati nella *tabella 3.11*.

Tabella 3.11 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ del tempo di consegna con livello di variabilità della domanda basso

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ del Tempo di consegna PF	
PULL_C_3_L	94.9	105.5
INV_C_3_L	79	94.4
PULL_D_1x4_L	69.4	75.8
INV_D_1x4_L	44.3	49.1

Anche in questi scenari, gli intervalli dei tempi di consegna non si sovrappongono dunque, è possibile rifiutare l'ipotesi di uguaglianza tra le medie campionarie con un livello di confidenza del 99%.

L'ultima analisi riguardante i tempi di consegna è stata effettuata confrontando l'andamento di tale misura di performance al variare della variabilità della domanda. Nel grafico in *figura 3.7* sono presentati tutti i valori medi della misura di performance, così da avere una visione totale dell'andamento di essa.

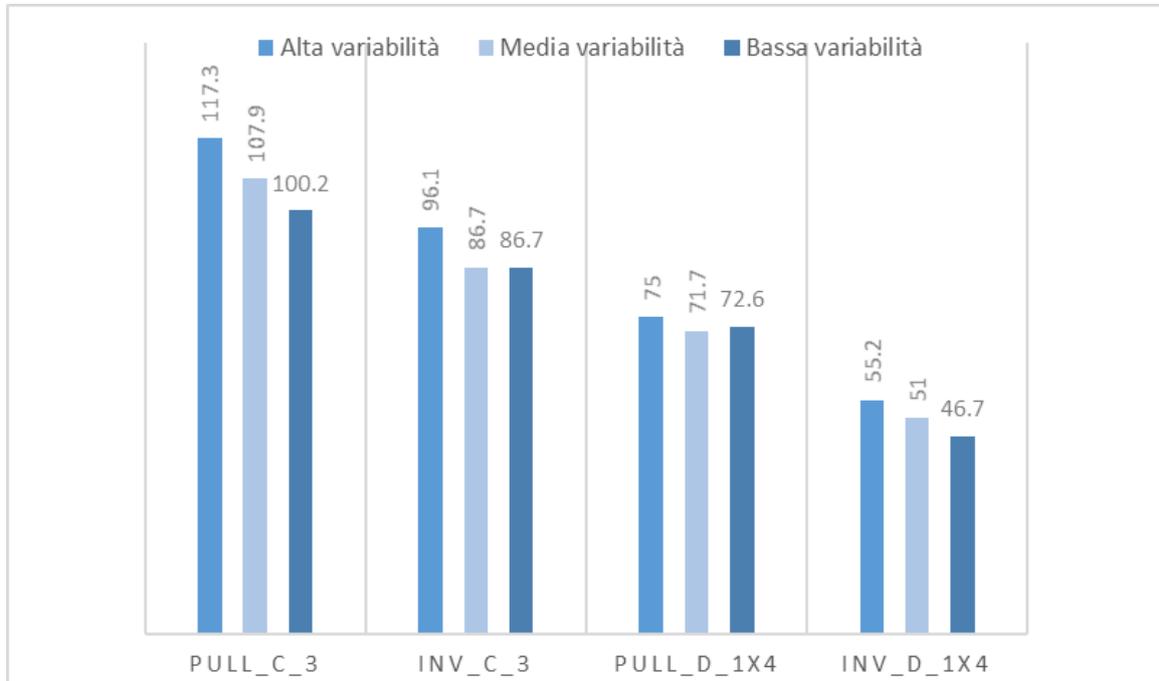


Figura 3.7 Tempo di consegna prodotti finiti nei quattro modelli analizzati al variare delle variabilità della domanda

Dal grafico in *figura 3.7* emerge che, nei casi di alta variabilità della domanda il tempo necessario a servire il cliente è maggiore rispetto agli scenari a media e bassa variabilità della domanda. Per i sistemi aventi riordini giornalieri tale differenza è maggiore rispetto ai sistemi privi di interazioni con i fornitori. Analizzando le singole filiere logistiche negli scenari a media e bassa variabilità della domanda non è presente un'eccessiva differenza sui tempi di consegna dei prodotti finiti. Infatti, prendendo in esame singolarmente le filiere logistiche, tale misura di performance, nelle condizioni di bassa e media variabilità della domanda è pressoché uguale. Tale considerazione è meno evidente per il sistema PULL_C_3, in cui è presente una differenza non trascurabile come nei casi precedenti.

3.2.2. Costi logistici

Come per i tempi, sono stati analizzati i costi logistici dei sistemi al variare del livello della variabilità della domanda. I dati dei tempi di consegna dei prodotti finiti, espressi in ore, e del costo logistico totale riguardanti gli scenari ad alta variabilità della domanda sono presentati nella *tabella 3.12*.

Tabella 3.12 Tempo di consegna prodotti finiti e costi logistici totali con livello di variabilità alto della domanda

Scenario	Tempo consegna prodotti finiti	Costo logistico totale (€)
PULL_C_3_H	117.3	27,527 €
INV_C_3_H	96.1	45,425 €
PULL_D_1x4_H	75	7,606 €
INV_D_1x4_H	55.2	20,605 €

I dati sul tempo di consegna dei prodotti finiti, espressi in ore, e sul costo logistico totale degli scenari a bassa variabilità della domanda sono presentanti nella *tabella 3.13*.

Tabella 3.13 Tempo di consegna prodotti finiti e costi logistici totali con livello di variabilità basso della domanda

Scenario	Tempo consegna prodotti finiti	Costo logistico totale (€)
PULL_C_3_L	100.2	27,326
INV_C_3_L	86.7	44,536
PULL_D_1x4_L	72.6	8,280
INV_D_1x4_L	46.7	20,157

Sia per l'alta variabilità sia per la bassa variabilità della domanda, i sistemi a produzione distribuita hanno un costo minore rispetto alla produzione centralizzata. Questo è dovuto principalmente all'assenza dei costi di trasporto dei prodotti finiti dal produttore ai retailer.

Anche in questi scenari aventi dei valori di deviazione standard differenti, i costi di mantenimento a magazzino hanno un impatto molto importante sul totale dei costi logistici. Infatti, i sistemi aventi le materie prime sempre in magazzino (INV) presentano un costo totale maggiore confrontato con il sistema aventi riordini giornalieri con il medesimo posizionamento dei macchinari additive.

Successivamente, sono stati calcolati gli intervalli di confidenza al variare dell'errore di prima specie. Nella *tabella 3.14* sono presentati gli intervalli di confidenza con $\alpha=0.01$ riguardanti i costi logistici dei sistemi sotto la condizione domanda distribuita secondo un Normale con media 4 e deviazione standard 2 [17], cioè lo scenario ad alta variabilità della domanda.

Tabella 3.14 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ dei costi logistici totali con livello di variabilità della domanda alto

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ dei Costi logistici totali	
PULL_C_3_H	26,727 €	28,326 €
INV_C_3_H	43,888 €	46,961 €
PULL_D_1x4_H	7.574 €	7,638 €
INV_D_1x4_H	19,945 €	21,265 €

Come evidenziato in *tabella 3.14* non è presente sovrapposizione degli intervalli, dunque, è possibile affermare con un livello di confidenza del 99% i costi logistici dei vari sistemi non presentano valori medi uguali.

Nella *tabella 3.15* sono presentati gli intervalli di confidenza con l'errore di prima specie $\alpha=0.01$ riguardanti i costi logistici dei sistemi sotto la condizione di domanda avente livello di variabilità definito basso, cioè ordini giornalieri che seguano una distribuzione Normale con media 4 e deviazione standard 0.4 [17].

Tabella 3.15 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ dei costi logistici totali con livello di variabilità della domanda basso

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ dei Costi logistici totali	
PULL_C_3_L	26,780	27,871
INV_C_3_L	43,260	45,811
PULL_D_1x4_L	8,092	8,468
INV_D_1x4_L	19,722	20,592

Così come per lo scenario ad alta variabilità, anche nello scenario con un livello di variabilità della domanda basso, gli intervalli di confidenza dei costi logistici non si sovrappongono in nessun caso. Dunque, è possibile rifiutare l'ipotesi di uguaglianza dei costi logistici con un livello di confidenza del 99%.

Come fatto per i tempi di consegna dei prodotti finiti, anche per i costi logistici sono stati confrontati i valori medi di tale misura di performance al variare della variabilità della domanda. Essi sono rappresentati nel grafico in *figura 3.8*.

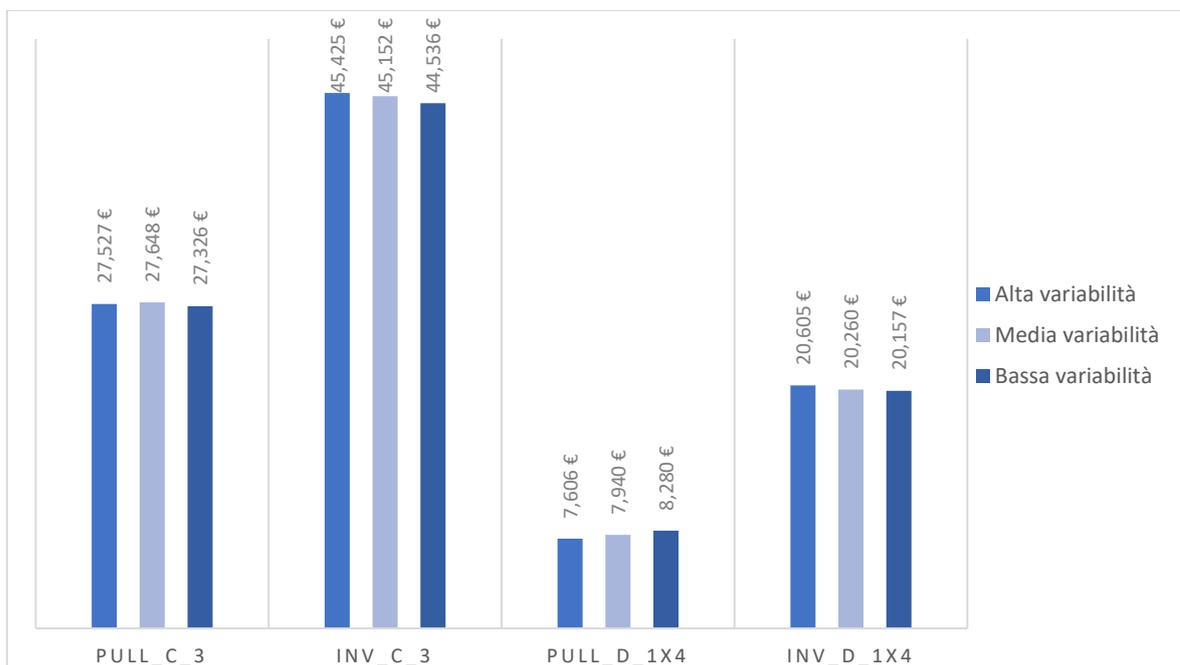


Figura 3.8 Costi logistici totali nei quattro modelli analizzati al variare delle variabilità della domanda

Come si evince dai dati presenti nel grafico in *figura 3.8*, i diversi valori variabilità della domanda non hanno eccessivi impatti sui costi logistici totali. Infatti, i costi delle singole filiere logistiche non cambiano significativamente al variare della deviazione standard della domanda dei prodotti finiti.

Completata la fase di confronto delle filiere logistiche nei diversi valori di deviazione standard, è stato effettuato il confronto tra i tempi di consegna dei prodotti finiti e i costi logistici per gli scenari con domanda ad alta e bassa variabilità. Il trade-off tra costi e tempi permane anche in questi due livelli di variabilità. Infatti, il sistema più economico è sempre

quello avente una produzione distribuita con riordini giornalieri. Invece sui tempi di consegna, il sistema più rapido nel servire i clienti è INV_D_1x4. Dunque, qualora un'impresa dovesse effettuare una scelta su come impostare la propria filiera logistica, considerando i risultati ottenuti sui tempi e sui costi, dovrebbe optare per una produzione distribuita AM. Per poi applicare un sistema ad inventory qualora l'obiettivo principale fosse quello di servire al più presto il cliente, viceversa qualora l'obiettivo fosse quello di minimizzare i costi logistici allora converrebbe riordinare giornalmente le materie prime.

3.2.3. Produzione

Un'ulteriore analisi è stata effettuata sul quantitativo di prodotti finiti realizzati con lo scopo di comprendere se fosse presente una metodologia di produzione che permetta di produrre maggiormente e dunque di realizzare maggiori ricavi. Nella tesi in esame, l'analisi è stata realizzata esclusivamente sui costi logistici, non valutando il prezzo di vendita del prodotto e di conseguenza i ricavi. Qualora emergesse una forte disparità nella produzione, potrebbe essere interessante, anche in studi futuri, l'analisi dei profitti dei sistemi.

I valori medi sul quantitativo di prodotti finiti stampati da ciascun sistema nei tre livelli di variabilità della domanda sono presentati nel grafico in *figura 3.9*.

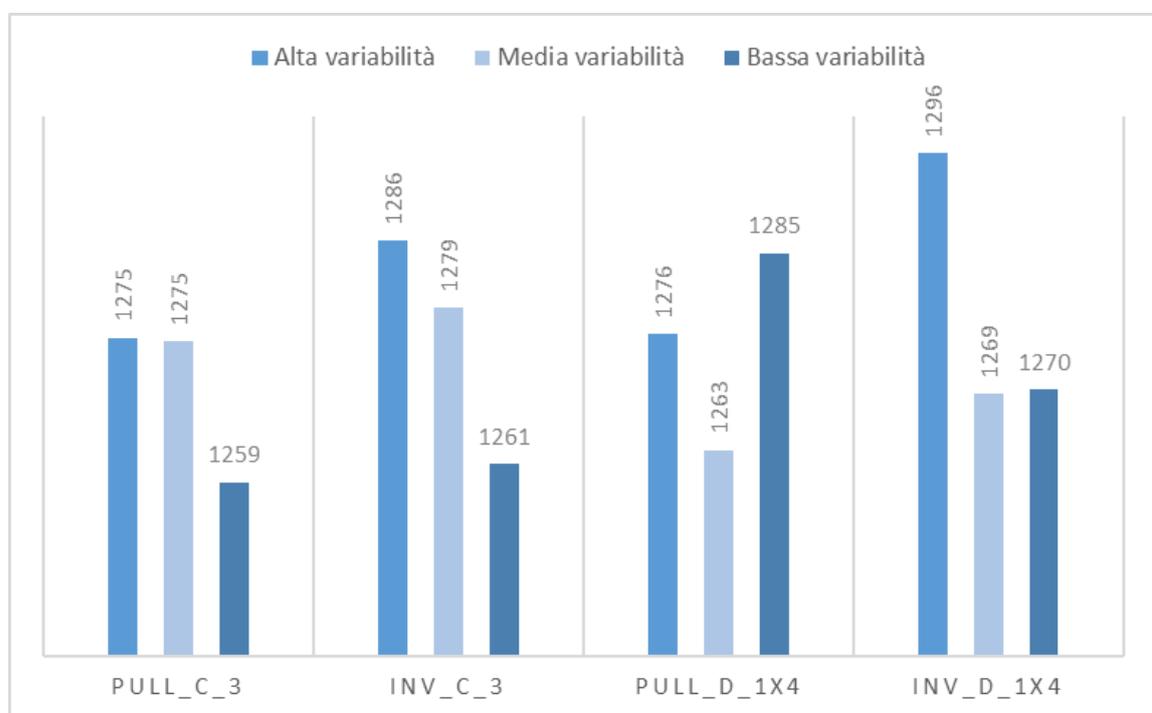


Figura 3.9 Numero prodotti finiti stampati nei quattro sistemi al variare del livello di variabilità della domanda

Da una prima analisi dei dati di produzione non sembra essere presente una diversità sul quantitativo di prodotti finiti realizzati nei vari sistemi. Per completezza è stato necessario effettuare il calcolo degli intervalli di confidenza in modo da far emergere eventuali differenze statisticamente significative.

Nella *tabella 3.16* sono rappresentati gli intervalli di confidenza sul numero di prodotti finiti stampati con $\alpha=0.05$ nello scenario a bassa variabilità della domanda.

Tabella 3.16 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.05$ dei prodotti finiti con livello di variabilità della domanda basso

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.05$ dei PF stampati	
PULL_C_3_L	1240	1279
INV_C_3_L	1236	1287
PULL_D_1x4_L	1259	1310
INV_D_1x4_L	1251	1289

Nella *tabella 3.17* sono rappresentati gli intervalli di confidenza sul numero di prodotti finiti stampati con $\alpha=0.05$ nello scenario a media variabilità della domanda.

Tabella 3.17 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.05$ dei prodotti finiti con livello di variabilità della domanda medio

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.05$ dei PF stampati	
PULL_C_3_M	1247	1303
INV_C_3_M	1253	1305
PULL_D_1x4_M	1233	1293
INV_D_1x4_M	1245	1290

Nella *tabella 3.18* sono rappresentati gli intervalli di confidenza sul numero di prodotti finiti stampati con $\alpha=0.05$ nello scenario ad alta variabilità della domanda.

Tabella 3.18 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.05$ dei prodotti finiti con livello di variabilità della domanda alto

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.05$ dei PF stampati	
PULL_C_3_H	1247	1304
INV_C_3_H	1256	1317
PULL_D_1x4_H	1252	1300
INV_D_1x4_H	1262	1330

Confrontando gli intervalli di confidenza in ciascuno degli scenari di variabilità della domanda, essi si sovrappongono. Dunque, per ciascun livello di variabilità della domanda, non è possibile affermare con un livello di confidenza del 95% che il numero di lampade prodotte non sia uguale nelle varie filiere logistiche. Essendo valida per α pari al 5%, tale affermazione è valida per i valori di $\alpha=2.5\%$ e $\alpha=1\%$, in quanto con questi valori di errore di prima specie, gli intervalli hanno un'ampiezza ancor maggiore, dunque, la sovrapposizione degli intervalli sarebbe ancor più netta.

4. Analisi di sensibilità

L'ultimo step della fase sperimentale ha posto il focus sulla variazione di alcuni elementi presenti lungo le filiere logistiche, analizzando se alcune assunzioni fatte in precedenza potessero alterare notevolmente le misure di performance del sistema.

4.1. Variazione numero macchinari additive nella produzione centralizzata

La prima modifica risiede nel numero dei macchinari additive nella produzione centralizzata, passando da tre stampanti 3D a quattro. L'obiettivo di questa analisi è quello di capire se le differenze sui tempi e sui costi fossero dovute esclusivamente al posizionamento dei macchinari additive lungo la catena logica, oppure fossero dipendenti dal numero di essi. Per effettuare questa analisi sono state effettuate delle simulazioni delle filiere aventi produzione centralizzata AM, introducendo una stampante 3D in più e con un livello di variabilità medio della domanda, cioè aventi gli ordini giornalieri che seguono una distribuzione Normale (4, 1.2) [17].

La misura di performance analizzata è il tempo di consegna dei prodotti finiti, cioè il tempo che intercorre dal momento in cui il cliente richiede la lampada fino alla consegna del prodotto al cliente stesso. Dunque, sono state effettuate le simulazioni dei modelli a produzione centralizzata con quattro macchinari AM, invece che tre, raccogliendo il valore della misura di performance in esame.

Il primo confronto è stato effettuato tra i tempi di consegna dei sistemi a produzione centralizzata aventi tre o quattro stampanti 3D, per verificare se fosse presente una riduzione di tale misura di performance. I valori medi, espressi in ore, sono presentati nella *tabella 4.1*.

Tabella 4.1 Tempi di consegna dei prodotti finiti nel caso a tre o quattro macchinari AM nello scenario con il livello della variabilità della domanda medio

Scenario	Tempo di consegna prodotti finiti
PULL_C_3_M	107.9
PULL_C_4_M	76.1
INV_C_3_M	86.7
INV_C_4_M	59.1

Dai dati in *tabella 4.1*, è presente una differenza sostanziale tra i tempi di consegna nello scenario a tre stampanti rispetto allo scenario a quattro stampanti. È un risultato atteso dato che, aumentando la capacità produttiva era ipotizzabile che il tempo necessario per servire il cliente diminuisse. Per completezza sono stati confrontati gli intervalli di confidenza al variare dell'errore di prima specie così da esprimere tali differenze con il livello di confidenza opportuno. Nella *tabella 4.2* sono presenti gli intervalli di confidenza con $\alpha=0.01$.

Tabella 4.2 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ dei tempi di consegna per gli scenari aventi produzione centralizzata a tre e quattro stampanti variabilità media

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ dei Tempi di consegna PF	
PULL_C_3_M	101.4	115.4
PULL_C_4_M	74.6	77.6
INV_C_3_M	79	94
INV_C_4_M	56.8	61.4

È possibile affermare con un livello di confidenza del 99% che i tempi di consegna dei prodotti finiti, tra metodologia di riordino uguali ma numero di stampanti differenti, non sono i medesimi.

Ottenuto tale risultato, sono stati confrontati i tempi di consegna dei prodotti finiti degli scenari a produzione centralizzata con quattro macchinari AM e quelli degli scenari a produzione distribuita. In quest'ultimi, il numero delle stampanti è rimasto il medesimo, cioè quattro, con ciascun retailer che ha in dotazione un solo macchinario additive. Nella *tabella 4.3*, sono presentati i valori del tempo di consegna dei prodotti finiti dei quattro sistemi in esame, espressi in ore.

Tabella 4.3 Tempo di consegna dei prodotti finiti con quattro stampanti 3D e media variabilità della domanda

Scenario	Tempo di consegna dei prodotti finiti
PULL_C_4_M	76.1
INV_C_4_M	59.1
PULL_D_1x4_M	71.7
INV_D_1x4_M	51

Dai valori in *tabella 4.3* emerge una differenza meno marcata sui tempi di consegna tra la produzione centralizzata e la produzione distribuita. Nel caso di gestione delle materie con una logica PULL, la differenza è di circa quattro ore, invece nell'altra metodologia di gestione delle scorte (INV), la differenza è di circa otto ore.

In seguito, sono stati calcolati gli intervalli di confidenza al variare dell'errore di prima specie α . Confrontando gli intervalli della misura di performance in esame negli scenari PULL_C_4_M e PULL_D_1x4_M con il valore di α pari a 0.05 e 0.025, gli intervalli non si sovrappongono, mentre se il valore di α è posto a 0.01, gli intervalli di confidenza hanno una sovrapposizione (*tabella 4.4*). Dunque, è possibile affermare che i tempi di consegna del prodotto finito non sono uguali con un livello di confidenza del 97.5%.

Tabella 4.4 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ dei tempi di consegna per le supply chain con riordino giornaliero con livello di variabilità della domanda medio

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ del Tempo di consegna PF	
PULL_C_4_M	74.6	77.6
PULL_D_1x4_M	68.4	75

Nelle filiere logistiche aventi le materie prime in inventory, gli intervalli di confidenza non si sovrappongono con $\alpha=0.01$, come mostrato dai valori in *tabella 4.5*. Dunque, in questo caso, è possibile affermare con livello di confidenza del 99% che i tempi di consegna dei prodotti finiti non hanno lo stesso valore medio.

Tabella 4.5 Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ dei tempi di consegna per le supply chain con magazzino con livello di variabilità della domanda medio

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.01$ del Tempo di consegna PF	
INV_C_4_M	56.8	61.4
INV_D_1x4_M	48.4	53.6

Nonostante ciò, confrontando le differenze sui tempi di consegna dei prodotti finiti, esse sono minime, dell'ordine delle poche ore. Infatti, il divario tra i tempi della produzione distribuita AM e quelli della centralizzata AM è meno ampio. Questo implica che non è fondamentale soltanto il posizionamento delle stampanti ma anche il numero di esse per determinare se fosse conveniente una rete logistica oppure un'altra.

Date le piccole differenze sui tempi necessari a servire il cliente, il vero fattore discriminante tra produrre centralmente o nei retailer, a parità di stampanti 3D, sono i costi logistici. Essi, considerando la produzione centralizzata con quattro stampanti 3D, come mostrato nel grafico in *figura 4.1* non presentano eccessivi scostamenti rispetto al medesimo scenario ma con tre macchinari AM. Dunque, la presenza di una stampante AM in più non altera le considerazioni economiche fatte precedentemente

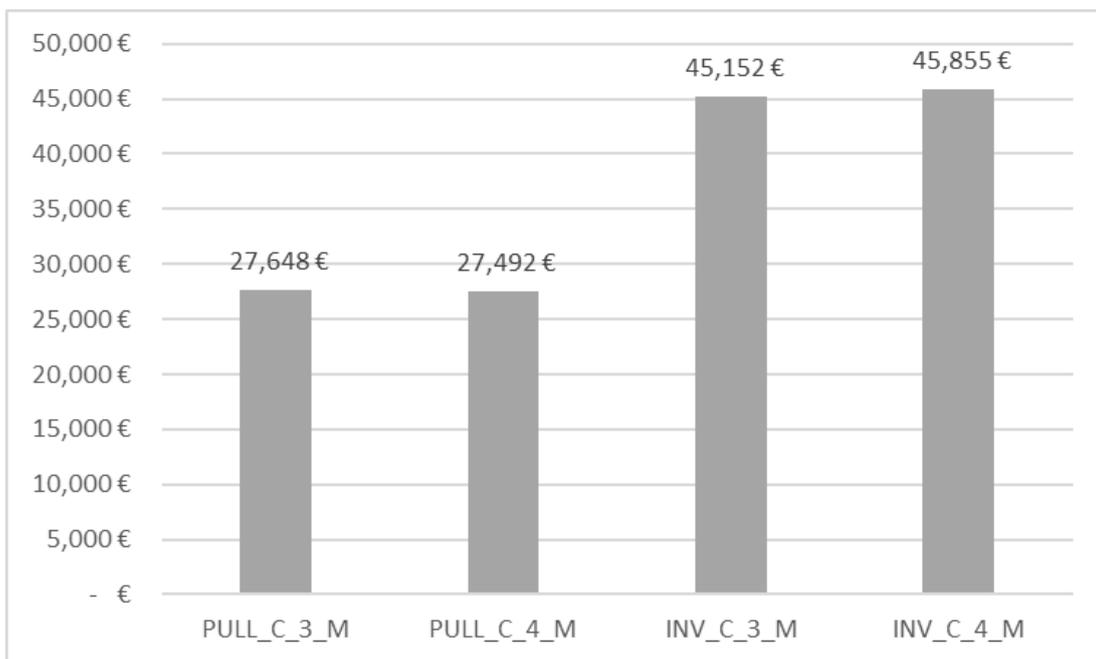


Figura 4.1 Confronto dei costi logistici nel caso a tre o quattro macchinari AM (variabilità media)

Infatti, come detto nel capitolo 3, permane la convenienza economica nel produrre nei vari retailer. Dunque, anche a parità di macchinari additive, la produzione distribuita AM è la miglior soluzione. Inoltre, la riduzione dei costi logistici presente nella produzione distribuita non può essere compensata da degli ipotetici costi di investimento nell'acquisto dei macchinari additive in più necessari per la produzione distribuita. Infatti, tali costi di investimento sono i medesimi sia nella produzione centralizzata sia nella produzione distribuita, in quanto sono presenti quattro stampanti AM in entrambi gli scenari.

4.2. Ritardo nella consegna delle materie prime

La seconda modifica effettuata riguarda esclusivamente i modelli con riordini giornalieri. Tali filiere logistiche, aventi o produzione centralizzata o distribuita nei vari retailer, sono estremamente dipendenti dai fornitori delle materie prime. Infatti, un eventuale disservizio in tale fase di fornitura potrebbe alterare le misure di performance della catena, in quanto la produzione inizierebbe con un ritardo che potrebbe estendersi ulteriormente lungo la filiera, avendo conseguenze sul tempo di consegna del prodotto finito.

Negli scenari PULL, il tempo di consegna delle materie prime utilizzato seguiva una distribuzione uniforme UNIF (8.3, 8.9) h [15], il quale non prevede la possibilità che il fornitore potesse mancare o tardare la consegna. Dunque, per verificare quanto sia forte la dipendenza dai fornitori di materie prime e quanto un ritardo possa impattare sulla velocità del sistema, è stato introdotto, all'interno dei modelli, un tempo aggiuntivo legato alla consegna delle materie prime. Tale tempo, chiamato "ritardo" segue una distribuzione UNIF (0, 8.9) ed è un tempo extra necessario per effettuare la consegna. La scelta dei parametri è stata effettuata inserendo come valore minimo della distribuzione, detto "a", la totale assenza di ritardo e come valore massimo, detto "b", lo stesso parametro presente nel tempo di consegna utilizzato precedentemente e preso dall'articolo [15].

Il ritardo è stato inserito nei modelli aventi riordino giornaliero, sia con produzione distribuita che centralizzata, quest'ultima con tre e quattro macchinari AM. Sono state effettuate le simulazioni con le medesime caratteristiche descritte nei capitoli precedenti, raccogliendo le informazioni sul tempo di consegna del prodotto finito. I valori medi, espressi in ore, con la presenza del ritardo sono presentati in *tabella 4.6*.

Tabella 4.6 Tempo di consegna con ritardo nella consegna delle materie prime nei sistemi PULL

Scenario	Tempo di consegna prodotti finiti con ritardo
PULL_C_3_M	113.2
PULL_C_4_M	82.1
PULL_D_1x4_M	77.3

La presenza di un ritardo nella consegna non altera le considerazioni sulla scelta di produrre nei vari retailer di prossimità. Infatti, confrontando la produzione distribuita con la produzione centralizzata permane il vantaggio nel produrre nei service location, con meno enfasi nel caso di parità sul numero delle stampanti 3D.

Successivamente, sono stati confrontati a due a due i sistemi con e senza il ritardo per verificare se il tempo di consegna dei prodotti finiti aumentasse. L'analisi è riassunta nel grafico in *figura 4.2*.

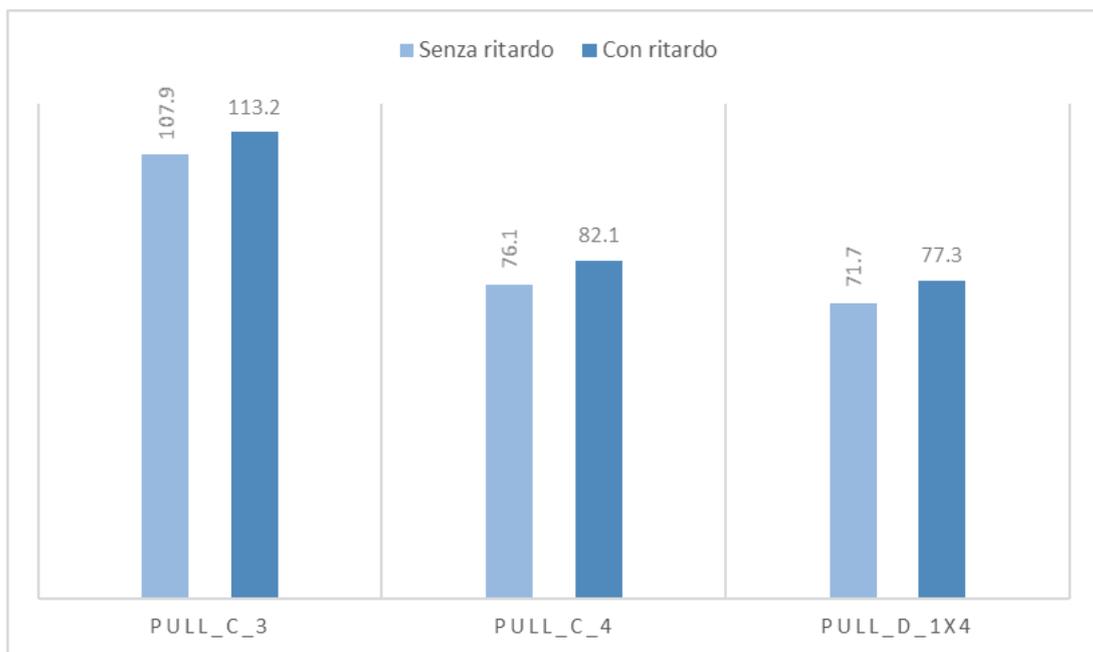


Figura 4.2 Confronto sui tempi di consegna con e senza ritardo dei sistemi PULL

La presenza del ritardo aumenta il tempo di consegna di circa sei ore, impattando mediamente nello stesso modo nelle tre reti analizzate.

L'ultima fase di tale analisi è stata il calcolo degli intervalli di confidenza al variare di α per valutare se la misura di performance, nei sistemi con o senza ritardo, potesse avere lo stesso valore medio. Gli intervalli di confidenza con $\alpha=0.01$ sono presentati nel grafico in *figura 4.3*, in cui è stata aggiunto un nuovo elemento della nomenclatura, per specificare se fosse presente il ritardo nella consegna delle materie prime (SI) o nel caso opposto, cioè se non fosse presente (NO).

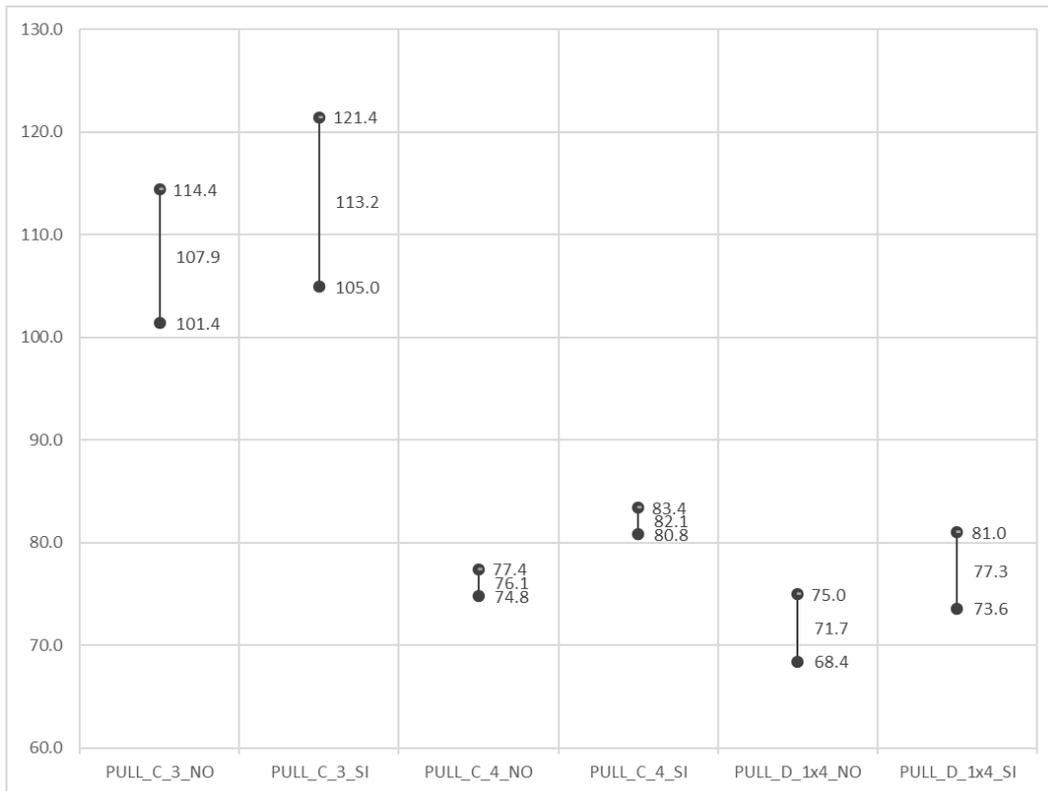


Figura 4.3 Intervalli di confidenza con $\alpha=0.01$ del tempo di consegna dei prodotti finiti nei tre sistemi con e senza ritardo

Analizzando il grafico in figura 4.3 emerge che nel sistema a produzione centralizzata con quattro stampanti, la presenza di un ritardo altera il tempo di consegna dei prodotti finiti. Infatti, i due valori medi possono essere ritenuti differenti con un livello di confidenza del 99%.

Per i sistemi PULL_C_3_M e PULL_D_1x4_M, la presenza del ritardo non ha un impatto statisticamente significativo con un livello di confidenza del 99%. Dunque, sono stati calcolati gli intervalli di confidenza con valori di $\alpha=0.05$ e $\alpha=0.025$.

Per la produzione centralizzata con tre stampanti anche con $\alpha=0.05$, gli intervalli di confidenza del tempo di consegna dei prodotti finiti si sovrappongono (tabella 4.7). Quindi, non è possibile affermare che i due valori medi siano diversi con un livello di confidenza del 95%.

Tabella 4.7 Intervalli di confidenza con $\alpha=0.05$ del tempo di consegna dei prodotti finiti nei sistemi PULL_C_3_M con e senza ritardo

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.05$ del Tempo di consegna PF	
PULL_C_3_M_NO	103.1	112.7
PULL_C_3_M_SI	107.1	119.3

Invece, per lo scenario PULL_D_1x4_M è possibile affermare con un livello di confidenza del 95% (tabella 4.8), che i due valori medi del tempo di consegna dei prodotti finiti sono diversi.

Tabella 3.8 Intervalli di confidenza con $\alpha=0.05$ del tempo di consegna dei prodotti finiti nei sistemi PULL_D_1x4 con e senza ritardo

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.05$ del tempo di consegna PF	
PULL_D_1x4_M_NO	69.3	74.1
PULL_D_1x4_M_SI	74.5	80.1

Aumentando il livello di confidenza al 97.5%, tale affermazione non è più valida in quanto gli intervalli si sovrappongono, se pur marginalmente, come mostrato in tabella 4.9.

Tabella 4.9 Intervalli di confidenza con $\alpha=0.025$ del tempo di consegna dei prodotti finiti nei sistemi PULL_D_1x4_M con e senza ritardo

Scenario	Intervallo di confidenza con $\alpha=0.025$ del Tempo di consegna PF	
PULL_D_1x4_M_NO	68.9	74.5
PULL_D_1x4_M_SI	74.1	80.5

Dunque, è possibile affermare che la dipendenza dei produttori nei confronti dei fornitori non è così presente come era possibile ipotizzare da un'analisi qualitativa delle filiere. Pur non essendo presente un magazzino materie prime e quindi la produzione inizia solo quando esse sono consegnate o al produttore o il retailer, non emerge una problematica su un eventuale ritardo delle consegne di materie prime. Questo implica che non è necessario introdurre il magazzino per ovviare ad eventuali ritardi legati alla fornitura delle materie prime, in quanto con o senza ritardo nella consegna di esse, il tempo di consegna dei prodotti finiti è da considerare il medesimo con il corretto livello di confidenza.

5. Conclusione

L'additive manufacturing è una rivoluzione per la produzione industriale di diversa natura, infatti, la versatilità e le caratteristiche tecniche che la contraddistinguono rendono le tecnologie a produzione additiva una svolta consistente per moltissimi settori industriali. Infatti, in alcuni settori, quali il settore automobilistico, aeronautico, spaziale e biomedico, tale cambiamento sta già avvenendo. In altri, invece, è ancora in una fase embrionale. Infatti, sono poche le aziende appartenenti ai settori non citati precedentemente che utilizzano tali tecnologie per produrre i loro prodotti finiti.

L'obiettivo di questa tesi era quello di verificare se fosse conveniente stampare, mediante tecnologia additive, dei prodotti finiti altamente customizzati ed appartenenti a dei mercati differenti da quelli citati, in un unico centro produttivo oppure dislocare la produzione in diversi retailer di prossimità. Per fare ciò, è stato analizzato una parte del settore dell'oggettistica di design, in cui i prodotti sono richiesti dal cliente e posseggono delle forme e caratteristiche molto diverse tra loro. In modo tale da mettere in risalto la capacità della tecnologia AM di realizzare prodotti estremamente customizzati. Dunque, sono stati modellati dei sistemi a produzione centralizzata e distribuita con differenti metodologie di gestione delle materie prime per verificare se fosse possibile produrre direttamente nei vari retailer.

La tesi ha verificato alcuni dei risultati presenti in letteratura, con la differenza che essi erano prettamente legati ai settori della ricambistica di pochi mercati specializzati, riuscendo ad ampliare alcuni di questi risultati anche al settore della produzione customizzata. Inoltre, ha posto anche l'attenzione sulla gestione delle materie prime, argomento che spesso non era trattato in letteratura.

Dall'analisi dei risultati, sotto le ipotesi discusse nella tesi e confrontando esclusivamente i costi di natura logistica, emerge che produrre centralmente non è conveniente a livello economico. Il principale vantaggio della produzione additiva distribuita risiede nell'assenza del costo di trasporto dei prodotti finiti. Infatti, realizzando l'oggetto direttamente in loco, mediante l'ausilio delle stampanti 3D apposite, non è necessario trasferire il prodotto dall'unico produttore ai vari retailer. I risultati trovati riguardano solo i costi logistici, senza

entrare nel merito di eventuali costi amministrativi, costi di manodopera o costi di investimento, spesso utilizzati in letteratura per decretare il sistema produttivo migliore per quel determinato caso reale. Questo implica che, l'applicazione di tali modelli a delle realtà industriali potrebbe non confermare le affermazioni sull'economicità del sistema a produzione distribuita con tecnologia AM, rispetto alla medesima produzione ma effettuata in un unico sito di stampaggio additivo.

Sui tempi, dai primi risultati, era emerso che produrre centralmente comportava un aumento del tempo necessario per servire il cliente, rendendo la produzione additiva distribuita conveniente anche su questo aspetto. Successivamente, analizzando i sistemi a parità di capacità produttiva, la differenza tra le due metodologie di produzione era meno evidente e quasi trascurabile. Dunque, nelle filiere logistiche analizzate, il vero discriminante tra la produzione additiva centralizzata e quella distribuita è il costo di natura logistica. È importante ricordare che i tempi calcolati sono privi del tempo necessario a realizzare i file CAD 3D e i file STL. Queste fasi allungherebbero probabilmente i tempi di consegna del prodotto ma come discusso nella tesi, esse oltre ad essere difficilmente esprimibile sotto forma di un tempo data la complessità del processo, andrebbero ad aumentare in egual misura il tempo necessario per consegnare il prodotto finito ai clienti in tutti gli scenari

Un altro risultato ottenuto dal confronto tra i due sistemi di gestione delle materie prime considerati è la presenza di un trade-off tra i tempi di consegna dei prodotti finiti e costi logistici delle reti. Infatti, i sistemi con i riordini giornalieri hanno un costo nettamente inferiore rispetto alle filiere logistiche con materie prime in magazzino. Tale vantaggio però è compensato dal maggior tempo necessario nel consegnare il prodotto finito al cliente. Dunque, in fase di scelta della logica di gestione delle materie prime è necessario scegliere una metodologia o l'altra, in base alla volontà di ridurre i costi logistici o ridurre i tempi consegna del prodotto finito.

6. Bibliografia

1. K. Rajaguru, T. Karthikeyan, V. Vijayan, Additive manufacturing – State of art, *Materials Today: Proceedings*, Volume 21, Part 1, 2020, Pages 628-633, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.728>.
2. Vojislav Petrovic, Juan Vicente Haro Gonzalez, Olga Jordá Ferrando, Javier Delgado Gordillo, Jose Ramón Blasco Puchades & Luis Portolés Griñan (2011) Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies, *International Journal of Production Research*, 49:4, 1061-1079, DOI: 10.1080/00207540903479786
3. H. Khajavi, S., Holmström, J. and Partanen, J. (2018), "Additive manufacturing in the spare parts supply chain: hub configuration and technology maturity", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24 No. 7, pp. 1178-1192. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2017-0052>
4. Yao Li, Guozhu Jia, Yang Cheng & Yuchen Hu (2017) Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study, *International Journal of Production Research*, 55:5, 1498-1515, DOI: 10.1080/00207543.2016.1231433
5. Manyika, J., M. Chui, J. Bughin, R. Dobbs, P. Bisson, and A. Marrs. 2013. *Disruptive Technologies: Advances That Will Transform Life, Business, and the Global Economy*. Vol. 180. San Francisco, CA: McKinsey Global Institute.
6. Barry Berman, 3-D printing: The new industrial revolution, *Business Horizons*, Volume 55, Issue 2, 2012, Pages 155-162, ISSN 0007-6813, <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.
7. Zhang, Y., Jedeck, S., Yang, L. and Bai, L. (2019), "Modeling and analysis of the on-demand spare parts supply using additive manufacturing", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 25 No. 3, pp. 473-487. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2018-0027>
8. Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O. and Garrett, B. (2011), *Could 3D Printing Change the World. Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*, Atlantic Council, Washington, DC.

9. Yao Li, Guozhu Jia, Yang Cheng & Yuchen Hu (2017) Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study, *International Journal of Production Research*, 55:5, 1498-1515, DOI: [10.1080/00207543.2016.1231433](https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1231433)
10. Jaime Bonnín Roca, Parth Vaishnav, Rianne E. Laureijs, Joana Mendonça, Erica R.H. Fuchs, Technology cost drivers for a potential transition to decentralized manufacturing, *Additive Manufacturing*, Volume 28, 2019, Pages 136-151, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.010>.
11. Yao Li, Yang Cheng, Qing Hu, Shenghan Zhou, Lei Ma & Ming K. Lim (2019) The influence of additive manufacturing on the configuration of make-to-order spare parts supply chain under heterogeneous demand, *International Journal of Production Research*, 57:11, 3622-3641, DOI: [10.1080/00207543.2018.1543975](https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1543975).
12. Siavash H. Khajavi, Jouni Partanen, Jan Holmström, Additive manufacturing in the spare parts supply chain, *Computers in Industry*, Volume 65, Issue 1, 2014, Pages 50-63, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.07.008>.
13. Peng Liu, Samuel H. Huang, Abhram Mokasdar, Heng Zhou & Liang Hou (2014) The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: supply chain operation reference (scor) model-based analysis, *Production Planning & Control*, 25:13-14, 1169-1181, DOI: [10.1080/09537287.2013.808835](https://doi.org/10.1080/09537287.2013.808835).
14. Zhang, Y., Jedeck, S., Yang, L. and Bai, L. (2019), "Modeling and analysis of the on-demand spare parts supply using additive manufacturing", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 25 No. 3, pp. 473-487. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2018-0027>
15. Özceylan, E.; Çetinkaya, C.; Demirel, N.; Sabırlıoğlu, O. Impacts of Additive Manufacturing on Supply Chain Flow: A Simulation Approach in Healthcare Industry. *Logistics* 2018, 2, 1. <https://doi.org/10.3390/logistics2010001>
16. T. A. Moore, B. M. McConnell, and J. R. Wilson, "SIMULATION-BASED EVALUATION ON INTEGRATING ADDITIVE MANUFACTURING CAPABILITY IN A DEPLOYED MILITARY ENVIRONMENT," *2018 Winter Simulation Conference (WSC)*, Gothenburg, Sweden, 2018, pp. 3721-3729, doi: [10.1109/WSC.2018.8632474](https://doi.org/10.1109/WSC.2018.8632474).
17. Chiu, M.-C. and Lin, Y.-H. (2016), "Simulation based method considering design for additive manufacturing and supply chain: An empirical study of lamp industry", *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 116 No. 2, pp. 322-348. <https://doi.org/10.1108/IMDS-07-2015-0266>.

18. Brown, A. S. (October 1, 2018). "Chain Reaction." ASME. *Mechanical Engineering*. October 2018; 140(10): 30–35. <https://doi.org/10.1115/1.2018-OCT1>
19. Meier, K.-J. (2020), "Additive manufacturing – driving massive disruptive change in supply chain management", *Journal of Work-Applied Management*, Vol. 12 No. 2, pp. 221-231. <https://doi.org/10.1108/JWAM-05-2020-0024>
20. Huang, R., Riddle, M.E., Graziano, D., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J. and Masanet, E. (2017), Environmental and Economic Implications of Distributed Additive Manufacturing: The Case of Injection Mold Tooling. *Journal of Industrial Ecology*, 21: S130-S143. <https://doi.org/10.1111/jiec.12641>.
21. Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J. and Walter, M. (2010), "Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 21 No. 6, pp. 687-697. <https://doi.org/10.1108/17410381011063996>
22. H. Khajavi, S., Holmström, J. and Partanen, J. (2018), "Additive manufacturing in the spare parts supply chain: hub configuration and technology maturity", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24 No. 7, pp. 1178-1192. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2017-0052>
23. Mohsen Attaran, The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing, *Business Horizons*, Volume 60, Issue 5, 2017, Pages 677-688, ISSN 0007-6813, <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>.
24. Lisen Ge, Longteng Dong, Dong Wang, Qi Ge, Guoying Gu, A digital light processing 3D printer for fast and high-precision fabrication of soft pneumatic actuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 273, 2018, Pages 285-292, ISSN 0924-4247, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.02.041>.
25. Dionysios E. Mouzakis (March 21st, 2018). Advanced Technologies in Manufacturing 3D-Layered Structures for Defense and Aerospace, Lamination - Theory and Application, Charles A. Osheku, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.74331. Available from: <https://www.intechopen.com/books/lamination-theory-and-application/advanced-technologies-in-manufacturing-3d-layered-structures-for-defense-and-aerospace>.

26. Andersson, O., Graichen, A., Brodin, H., and Navrotsky, V. (October 4, 2016). "Developing Additive Manufacturing Technology for Burner Repair." *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power.* March 2017; 139(3): 031506. <https://doi.org/10.1115/1.4034235>
27. <https://www.treccani.it/vocabolario/fotopolimerizzazione/>
28. F900 3D Printers for Large Build Manufacturing | Stratasys
29. https://www.earthisland.org/journal/index.php/articles/entry/can_we_3d_print_our_way_to_sustainability/
30. <https://reapworld.it/>
31. <https://3dfillies.com/>