

POLITECNICO DI TORINO
Collegio di Ingegneria Gestionale
Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

**“Analisi della supply chain di assiemi in materiale
polimerico realizzati tramite Additive Manufacturing”**



Relatrice

Prof.ssa Cagliano Anna Corinna

Candidato

Di Renzo Giovanni

Anno Accademico 2018/2019

*A tutti quelli che hanno sempre creduto in me,
questo è solo l'inizio!*

Indice

Introduzione	1
1 Supply Chain Management e Additive Manufacturing.....	3
1.1 Presentazione della supply chain tradizionale in un contesto generale.....	3
1.1.1 Presentazione di una generica supply chain di assiemi meccanici	6
1.2 Impatto dell'Additive Manufacturing sulla supply chain	9
1.2.1 L'Additive Manufacturing come nuova tecnologia di produzione.....	9
1.2.2 Analisi dei costi di produzione con l'adozione dell'Additive Manufacturing.....	13
1.2.3 La creazione di valore lungo la supply chain tramite l'Additive Manufacturing.....	14
1.2.4 L'Additive Manufacturing nella realtà produttiva attuale	16
1.2.5 Gli impatti dell'Additive Manufacturing sul Supply Chain Management.....	17
1.2.6 Analisi sul punto della supply chain in cui adottare l'Additive Manufacturing.....	21
1.2.7 Additive Manufacturing e sostenibilità.....	22
1.2.8 Adozione dell'Additive Manufacturing nel caso di assiemi	28
1.2.9 La supply chain ibrida	28
1.2.10 Additive Manufacturing nel caso di sistemi isolati	29
1.3 Il modello Supply-Chain Operations Reference (SCOR).....	30
1.4 Individuazione dei research gap di letteratura.....	33
2 Primo caso di studio: la supply chain degli F-18 Super Hornet.....	36
2.1 Descrizione della supply chain.....	36
2.2 Come introdurre l'Additive Manufacturing nella supply chain	38
2.3 Mappatura della supply chain tramite modello SCOR.....	41
2.3.1 La supply chain tradizionale.....	43
2.3.2 La supply chain con Additive Manufacturing centralizzato	51
2.3.3 La supply chain con Additive Manufacturing distribuito	57
2.3.4 Confronto tra gli scenari	61
3 Secondo caso di studio: la supply chain delle parti di ricambio di PSA	68

3.1	Presentazione della supply chain delle parti di ricambio del gruppo PSA	68
3.1.1	Indicatori di performance	75
3.2	Mappatura della supply chain con Additive Manufacturing centralizzato	77
3.2.1	Indicatori di performance	81
3.3	Mappatura della supply chain con Additive Manufacturing distribuito	83
3.4	Confronto tra gli scenari	86
3.4.1	Primo scenario: la supply chain tradizionale	87
3.4.2	Secondo scenario: la supply chain con Additive Manufacturing centralizzato	88
3.4.3	Scenario tre: la supply chain con Additive Manufacturing distribuito	89
3.5	Performance e criticità della supply chain del gruppo PSA	91
4	Conclusioni	94
4.1	Benefici e valore aggiunto del lavoro di tesi allo stato dell'arte della letteratura	94
4.2	Limiti del lavoro di tesi	95
4.3	Passi futuri per la ricerca	96
	Bibliografia	98
	Sitografia	101
	Ringraziamenti	102

Introduzione

Il presente elaborato ha come obiettivo finale quello di analizzare l'impatto di una nuova tecnologia di produzione, l'Additive Manufacturing, sulla supply chain di assiemi meccanici in materiale polimerico. La motivazione risiede nel fatto che la manifattura additiva sta rendendo disponibili nuove soluzioni ai problemi di ottimizzazione delle filiere logistiche, come ad esempio per quanto riguarda i tempi di produzione e di configurazione della catena di approvvigionamento.

In letteratura l'Additive Manufacturing sta diventando sempre più un tema dibattuto e si sta cercando di comprendere appieno quali siano i cambiamenti che la nuova tecnologia di produzione potrebbe portare alle supply chain. Per ogni tipo di prodotto, infatti, gli effetti della sostituzione della manifattura tradizionale o dell'integrazione con quella additiva possono essere molto diversi, ad esempio per quanto riguarda la configurazione e la complessità della catena di approvvigionamento in base alle diverse materie prime utilizzate.

Il lavoro è stato impostato nel seguente modo: in prima battuta è stata presentata una generica catena di approvvigionamento tradizionale, dopodiché si è scesi più nel dettaglio, aggiornandola in merito alla produzione di assiemi meccanici e individuando i possibili cambiamenti relativi all'introduzione della manifattura additiva. Gli assiemi meccanici, infatti, sono prodotti la cui filiera logistica potenzialmente potrebbe cambiare molto con l'implementazione di sistemi di produzione che sfruttano la nuova tecnologia, in quanto sono molteplici le fasi di vita del prodotto che potrebbero essere impattate, dalla progettazione stessa fino alla distribuzione delle parti di ricambio. In letteratura, infatti, per quanto riguarda il tema della progettazione di assiemi meccanici nel caso in cui la produzione avvenga tramite Additive Manufacturing, è stato visto come, tramite la nuova tecnologia, i vincoli di realizzazione siano meno stringenti rispetto al caso in cui la produzione avvenga tramite manifattura tradizionale. Un esempio concreto sono gli angoli di smussatura che non devono essere più necessariamente superiori a 10° ma possono essere anche inferiori se la produzione avviene con la nuova tecnologia.

L'analisi è stata condotta tramite lo studio di due casi reali, tratti dalla letteratura scientifica, entrambi relativi alla produzione di parti di ricambio, prima nel contesto aeronautico ed in un secondo momento nel contesto automobilistico.

In particolare, l'analisi degli impatti sulla supply chain della manifattura additiva è stata strutturata in tre parti. Nel primo capitolo è stata data una definizione di filiera logistica tradizionale ed è stato presentato l'Additive Manufacturing in un contesto generale, specificando i diversi modi in cui

attualmente è possibile implementare la nuova tecnologia di produzione in sostituzione di quella tradizionale. Nel secondo e nel terzo capitolo sono stati presentati i due casi di studio reali: il primo appartiene al settore aeronautico, in quanto è stata analizzata la catena di approvvigionamento del condotto di aerazione degli F-18 Super Hornet prodotti dalla Boeing, mentre il secondo è tratto dal settore automobilistico, con un focus sulla supply chain dei fanali anteriori della Peugeot 206, appartenente al gruppo PSA. In entrambi i casi di studio è stato preso in esame un assieme in materiale polimerico. A conclusione di entrambi i capitoli è stato eseguito un confronto tra i tre scenari individuati, ovvero la supply chain tradizionale, la supply chain con Additive Manufacturing centralizzato, cioè implementato in un nodo a monte della filiera, e la supply chain con Additive Manufacturing distribuito, ovvero lo scenario in cui la produzione avviene a ridosso dei clienti finali e possono essere eliminati i nodi di distribuzione a monte. La mappatura delle due filiere logistiche è stata eseguita tramite il modello Supply-Chain Reference Operations (modello SCOR). Per rendere il confronto quantificabile sono stati presi in considerazione due indicatori di performance: il tempo di trasporto totale da monte a valle della catena di approvvigionamento, che dà una prima misura della complessità e della lunghezza della supply chain, e le scorte di sicurezza totali all'interno della filiera, al fine di comprendere come varia tra gli scenari la gestione dell'incertezza sulla domanda finale dei consumatori.

I benefici portati alla letteratura dal presente lavoro di tesi sono principalmente legati all'analisi eseguita sui due casi di studio: tramite la mappatura derivante dal modello SCOR è stato dimostrato come cambiano le attività svolte all'interno della supply chain partendo dal caso di manifattura tradizionale e successivamente implementando la manifattura additiva. Inoltre, grazie all'analisi quantitativa su tempi di trasporto totali e scorte di sicurezza complessive è stato possibile analizzare i potenziali benefici che l'Additive Manufacturing potrebbe portare alla supply chain di assiami meccanici.

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno del Progetto "Produzione di componenti in materiale polimerico realizzati mediante fabbricazione additiva: studio di accoppiamenti cinematici integrati, valutazione dell'usura, analisi del valore e della sostenibilità con ricadute sul sistema produttivo" presso il Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione del Politecnico di Torino.

1 Supply Chain Management e Additive Manufacturing

Il Capitolo 1 ha come obiettivo quello di presentare la supply chain in un contesto generale. Per farlo è stata data una definizione derivante dalla letteratura della filiera logistica, dei nodi che la compongono e delle relazioni che intercorrono tra di essi. Successivamente è stato introdotto il Supply Chain Management, ovvero i vari metodi di gestione e di controllo della supply chain, vista sia come un insieme di singoli componenti che devono essere coordinati tra loro, sia come un'unica entità che deve essere gestita nel suo complesso con fini di ottimizzazione. Infine, in questa prima parte dell'elaborato viene presentato l'Additive Manufacturing come nuova tecnologia di produzione disponibile in ambiente manifatturiero, con particolare attenzione agli aspetti riguardanti gli assiemi meccanici in materiale polimerico, che rappresentano l'oggetto di studio principale su cui è stato concentrato il lavoro di individuazione dei possibili cambiamenti nella catena di approvvigionamento.

1.1 Presentazione della supply chain tradizionale in un contesto generale

In questo paragrafo viene presentata la supply chain tradizionale, partendo da definizioni teoriche per arrivare ad una contestualizzazione idonea all'obiettivo dell'elaborato.

In letteratura esistono molte definizioni di "supply chain" (Mentzer et al., 2001): LaLonde e Masters (1994) hanno proposto una definizione secondo cui una supply chain è un insieme di imprese che si scambiano prodotti, nel senso che operano sul mercato un numero definito di imprese indipendenti che sono coinvolte una dopo l'altra in uno scambio di prodotti, che possono essere materie prime, componenti, prodotti assemblati, servizi di trasporto, servizi di immagazzinaggio, fino al consumatore finale. Una definizione simile è quella data da Lambert, Stock ed Ellram (1998), che hanno definito la supply chain come l'allineamento di più imprese che procurano prodotti o servizi al mercato. In questa seconda definizione è possibile notare come venga incluso nella supply chain anche il consumatore finale. Una ulteriore definizione è quella data da Christofer (1992), secondo cui una supply chain è il reticolo di organizzazioni che sono coinvolte, sia con collegamenti verso monte sia con collegamenti verso valle, nei diversi processi e attività che producono valore nella forma di prodotti e servizi per il consumatore finale.

Riprendendo le tre definizioni date, è possibile caratterizzare la supply chain come l'insieme di tre o più entità, che possono essere organizzazioni o individui, direttamente coinvolti nel flusso verso monte e verso valle di prodotti, servizi, finanze e/o informazioni da una fonte primaria al

Presentazione della supply chain tradizionale in un contesto generale

consumatore (Mentzer et al., 2001). È importante notare, inoltre, che una stessa impresa può essere parte di più supply chain, aspetto che sottolinea ancora una volta l'importanza del network che si crea tra più imprese.

Una definizione più attuale definisce la supply chain come il sistema di organizzazioni, persone, attività, informazioni e risorse coinvolte nel processo atto a trasferire o fornire un prodotto o un servizio dal fornitore al cliente (Bucap, 2019). In questa ultima definizione viene messo in risalto il fatto che l'intera supply chain, qualunque sia la sua complessità, ha come obiettivo finale quello di rispondere ad un bisogno del consumatore finale, che quindi viene inserito all'interno della catena di approvvigionamento.

Una rappresentazione grafica di una generica supply chain è nella Figura 1.1:



Figura 1.1 Rappresentazione grafica di una supply chain (Rouse, 2018)

Nel contesto appena delineato, può diventare importante il concetto di Supply Chain Management, cioè come controllare, monitorare e misurare il flusso di materiali, informazioni e risorse economiche tra le imprese coinvolte nella supply chain. Un primo approccio può essere quello di considerare la supply chain come un unico sistema e non come l'insieme di più nodi, cioè vederla esclusivamente nel suo insieme piuttosto che come il collegamento tra più singole parti. In altre parole, in questa visione, bisogna gestire il flusso totale di beni dal produttore al consumatore (Ellram e Cooper, 1990). Per quanto detto, il supply chain management diventa in questo senso la

gestione dell'insieme di modalità con cui una singola impresa che fa parte della supply chain può influenzare le prestazioni delle altre imprese del network e quindi della supply chain vista nel suo complesso (Cooper et al. 1997).

Riassumendo quanto detto fin qui, le attività principali del supply chain management quando la supply chain è vista come un'unica entità sono:

- Integrare i comportamenti delle singole imprese e fare in modo che queste cooperino: è questa l'attività principale del supply chain management in quanto è necessario che le imprese rispondano dinamicamente ai bisogni dei consumatori e non è possibile farlo senza integrazione tra le componenti della supply chain.
- Condividere mutuamente informazioni lungo la supply chain: questa attività consente la pianificazione ed il controllo dei processi; inoltre, la condivisione di informazioni lungo la supply chain consente di avere a disposizione i dati necessari per le decisioni tattiche e strategiche, cioè per le decisioni sia di breve che di lungo periodo. Un altro aspetto da considerare a questo proposito è l'incertezza: la condivisione delle informazioni sui livelli di inventario, sulle previsioni, sulle strategie di vendita e di marketing consente di ridurre l'incertezza e la variabilità lungo la supply chain, migliorando le prestazioni dell'intera catena di distribuzione.
- Condividere mutuamente rischi e guadagni: questa attività è una delle basi per la collaborazione a lungo termine tra le imprese che fanno parte della supply chain.
- Definire lo stesso obiettivo per tutte le singole imprese: secondo gli studi di LaLonde e Masters (1994) è questo il fattore che determina il successo o il fallimento delle attività all'interno della supply chain. Infatti, avere lo stesso obiettivo consente di comprendere le attività ridondanti all'interno del network in modo tale da ridurre i costi ed essere più efficienti.
- Integrare i processi delle singole imprese: questa attività richiede di integrare il reperimento delle materie prime, la manifattura e la distribuzione lungo la supply chain tramite gruppi di lavoro condivisi tra le imprese del network, condivisione di personale tra fornitori e consumatori e utilizzo di fornitori di servizi esterni.
- Costruire una collaborazione di lungo termine tra le imprese: secondo gli studi fatti da Cooper (1997), la relazione che lega le componenti della supply chain dovrebbe durare più di quanto stabilito dai contratti commerciali stipulati, al limite non dovrebbe mai avere fine,

e ogni impresa dovrebbe essere legata ad un numero limitato di altre imprese, in modo tale da facilitare la cooperazione.

Un altro approccio di gestione della supply chain riguarda i processi: Davenport (1993) ha definito un processo come l'insieme di attività strutturate e misurabili progettate per produrre uno specifico output per un particolare consumatore o mercato. LaLonde (1994), riprendendo questa definizione, ha definito il supply chain management come il processo di gestione delle relazioni, delle informazioni e del flusso di materiali oltre i confini aziendali con l'obiettivo di fornire al consumatore finale un servizio o prodotto migliore attraverso la gestione sincronizzata del flusso di beni fisici e tutte le informazioni associate dall'approvvigionamento al consumo finale. In questa visione, Lambert, Stock ed Ellram (1998) hanno proposto che, per gestire al meglio la supply chain, tutte le imprese devono andare oltre le proprie singole funzioni e attività e tutte le componenti della catena di approvvigionamento devono avere come obiettivo quello di soddisfare il consumatore finale. Solo in questo modo, secondo questa visione, si raggiunge l'efficienza a livello di supply chain complessiva.

1.1.1 Presentazione di una generica supply chain di assiemi meccanici

Uno degli aspetti fondamentali da considerare nello studio di una supply chain tradizionale è la complessità dei prodotti quando questi sono assiemi, cioè quando sono composti da più parti che devono interagire tra di loro in modo tale da formare un unico prodotto finale partendo da più sottoprodotti o subassemblati o, ancora, da più particolari elementari (Li et al., 2014). Il motivo di questa affermazione è che nel caso in cui il prodotto finale sia composto da più parti occorre una ulteriore coordinazione tra le varie componenti della supply chain, in quanto queste devono fornire i loro subassemblati entro i tempi prefissati e rispettare i tassi di produzione di tutti gli altri nodi che fanno parte della filiera, in quanto se ciò non avvenisse si avrebbero dei ritardi nell'intera supply chain, perché sarebbe impossibile completare l'assieme senza tutti i subassemblati che lo compongono. Un esempio pratico di assieme meccanico è mostrato nella Figura 1.2 e Figura 1.3, in cui è riportata una rappresentazione schematica semplificata di un albero motore:

Presentazione della supply chain tradizionale in un contesto generale

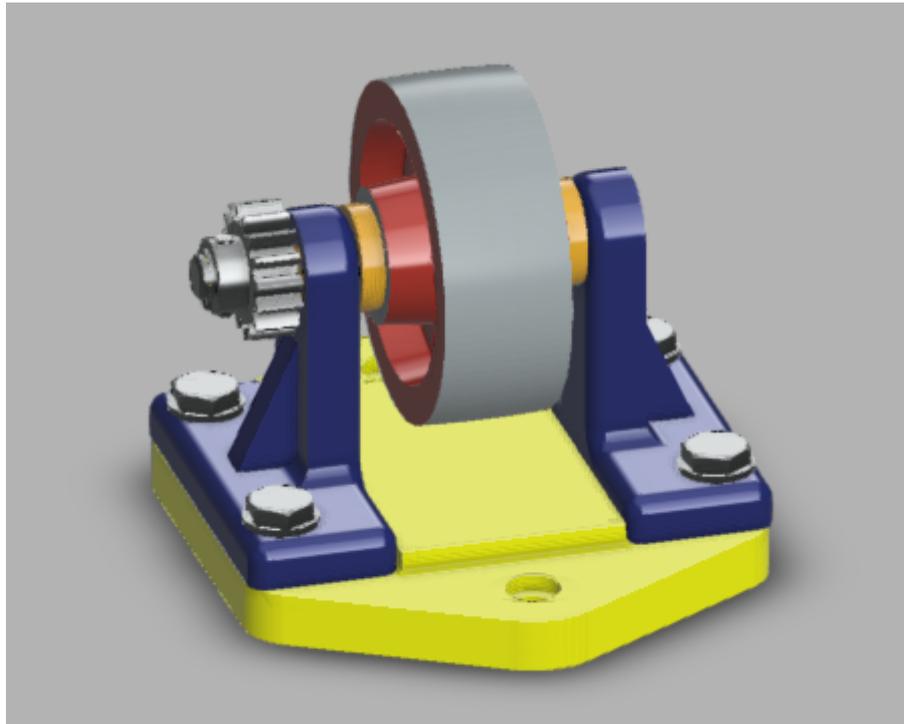


Figura 1.2 Esempio di assieme meccanico (non esploso) (Tornincasa et al., 2014)

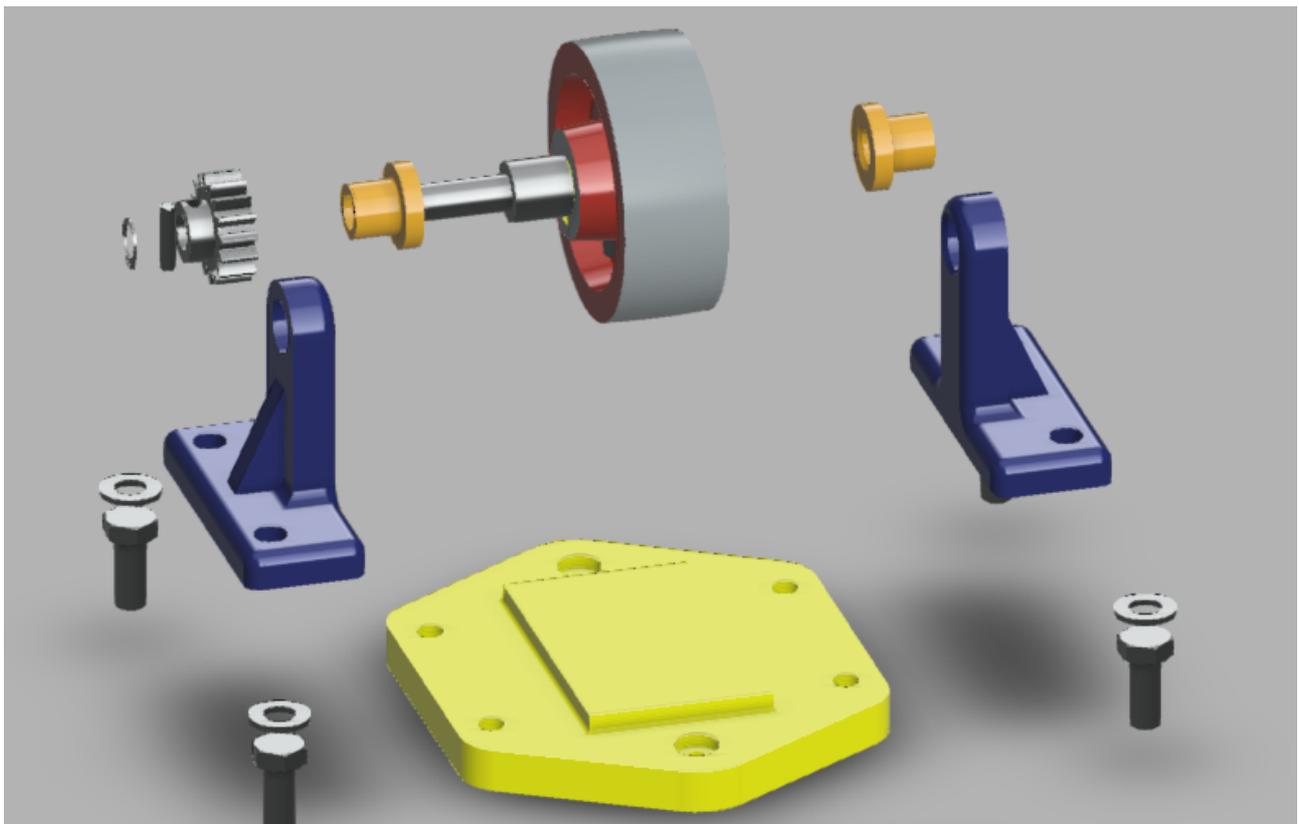


Figura 1.3 Esempio di assieme meccanico (esploso) (Tornincasa et al., 2014)

Nel caso di bassa varietà, l'assemblatore finale potrebbe preferire assemblare al suo interno la maggior parte dei moduli in quanto la difficoltà dell'operazione in relazione alla varietà non è molto

alta. Alternativamente, nel caso di alta varietà, l'assemblatore finale potrebbe considerare l'opzione di assegnare a sub-assemblatori il compito di assemblare i vari moduli provenienti dai fornitori all'interno della supply chain. Si parla in questo ambito di due tipi di supply chain, la supply chain modulare, in cui sono presenti subassemblatori intermedi, e di supply chain non modulare (Li et al., 2014), come mostrato nella Figura 1.4:

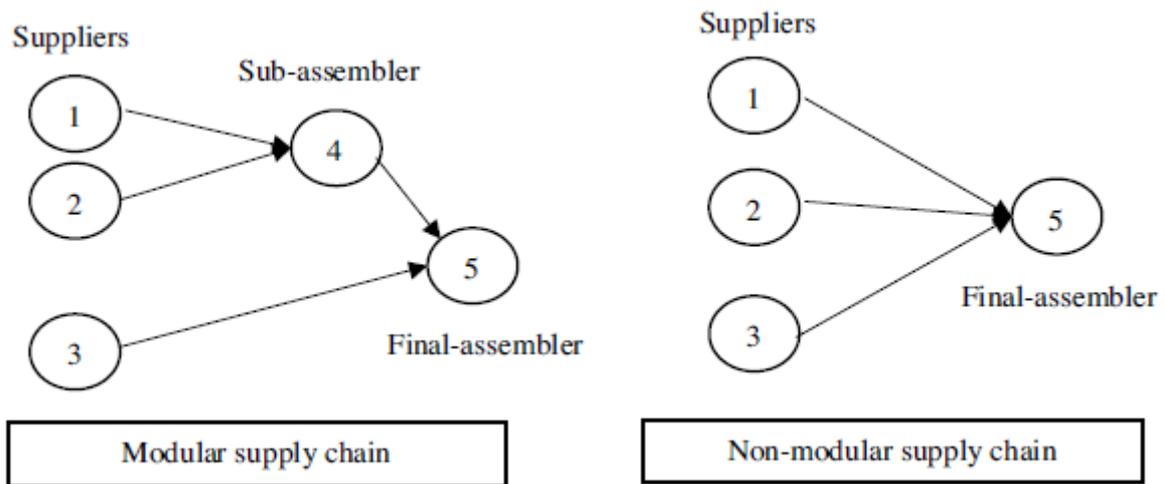


Figura 1.4 Schemi rappresentativi della supply chain modulare e della supply chain non modulare (Li et al., 2014)

La varietà di prodotto offerta dalle imprese sul mercato è aumentata molto negli ultimi anni (Daie et al., 2016). A qualunque settore ci si riferisca, avere sul mercato un'alta varietà di prodotti è sempre una grande sfida dal punto di vista della produzione. Molti studi, tra cui i già citati Li et al., 2016, e Daie et al., 2016, hanno dimostrato che un'alta varietà di prodotti ha impatti negativi sulle performance dei sistemi manifatturieri, ad esempio poiché aumenta la complessità della produzione, diminuendo la qualità e la produttività.

Con l'obiettivo di far fronte alle problematiche derivanti dall'alta varietà, molte aziende manifatturiere hanno adottato la progettazione modulare per i loro prodotti. Ciò significa che il prodotto finale è scomposto in più moduli con interfacce standard. Ogni modulo può quindi essere prodotto in grandi quantità e le economie di scala possono essere mantenute.

La complessità in una supply chain di questo tipo è data da diversi fattori: la struttura della supply chain, il livello di varietà di prodotto per ogni nodo della supply chain e l'incertezza della domanda per ogni nodo. La struttura della supply chain è determinata dal numero di nodi che la compongono e dalle relazioni tra di essi. Il livello di varietà del prodotto per ogni nodo è il numero di varianti prodotte dal singolo nodo. L'incertezza della domanda deriva dal mix di varianti prodotte ad ogni nodo, che riguarda anche la probabilità che nei nodi a valle vengano richieste determinate varianti.

Per concludere quanto detto fin qui, è necessario analizzare la supply chain dal punto di vista decisionale. Per raggiungere l'obiettivo di proporre sul mercato un'alta varietà di prodotto, le aziende manifatturiere implementano una strategia di rinvio delle decisioni (Li et al., 2014), che è resa possibile dalla modularità dei prodotti. L'essenza di questa strategia è quella di rimandare la decisione su come proporre il prodotto al consumatore finale e ciò significa che viene spostato più a valle possibile il nodo in cui avviene la differenziazione del prodotto. In ogni caso, è stato osservato nella realtà che il punto di differenziazione del prodotto e quindi la possibilità di introdurre varianti sul mercato è spesso determinato e fisso nella supply chain. Per esempio, il problema della configurazione della supply chain riguarda la selezione dei fornitori e dei processi per ogni stage della supply chain e ciò presuppone che gli stage della supply chain siano già determinati, riducendo, se non azzerando, le possibilità che il punto di differenziazione possa essere modificato a seconda delle esigenze date dal mercato che deve soddisfare l'assemblatore finale.

1.2 Impatto dell'Additive Manufacturing sulla supply chain

1.2.1 *L'Additive Manufacturing come nuova tecnologia di produzione*

È possibile definire l'Additive Manufacturing come una tecnologia digitale per la produzione di oggetti fisici strato su strato da un progetto digitale tridimensionale, ad esempio un file CAD, che si pone all'opposto della manifattura tradizionale, che generalmente è sottrattiva o di formatura. Il processo di produzione tramite Additive Manufacturing inizia con la scansione di un oggetto per generare un modello CAD 3D che contenga tutte le informazioni sulle dimensioni. Oltre a quanto descritto, è possibile che i dati tridimensionali possano essere generati da una tomografia computerizzata, da una risonanza magnetica o utilizzando sistemi di digitalizzazione 3D. Il passo successivo è quello di trasformare il file CAD di partenza in un file *STereo Lithography interface format* (STL), ovvero il formato di file, binario o ASCII, nato per i software di stereolitografia CAD, che può essere direttamente processato dalla macchina di produzione tramite manifattura additiva. Ogni strato del file STL rappresenta una sezione 2D dell'oggetto da produrre. Questi strati 2D sono poi inviati alla macchina di stampa uno alla volta in modo tale che la stampante costruisca il prodotto sovrapponendo uno strato sull'altro, utilizzando diversi metodi di solidificazione in base alla materia prima utilizzata. Il processo potrebbe richiedere qualche ora oppure qualche giorno, in base alla grandezza del prodotto e alla precisione richiesta.

Esempi di oggetti realizzati tramite Additive Manufacturing sono riportati nella Figura 1.5 e nella Figura 1.6:

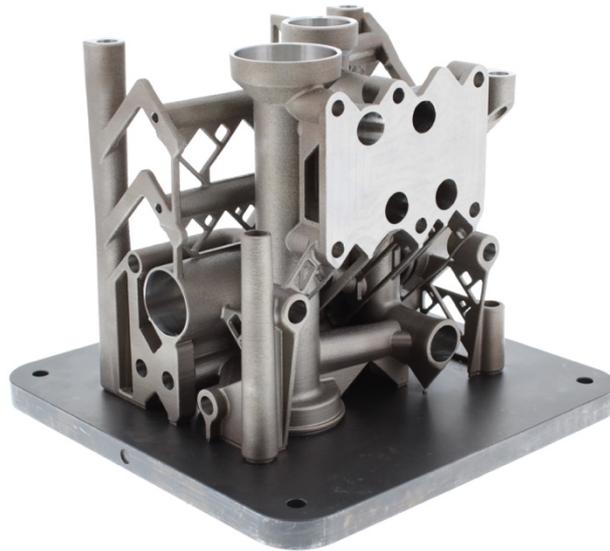


Figura 1.5 Collettore di un blocco idraulico prodotto con Additive Manufacturing (Renishaw, 2019)

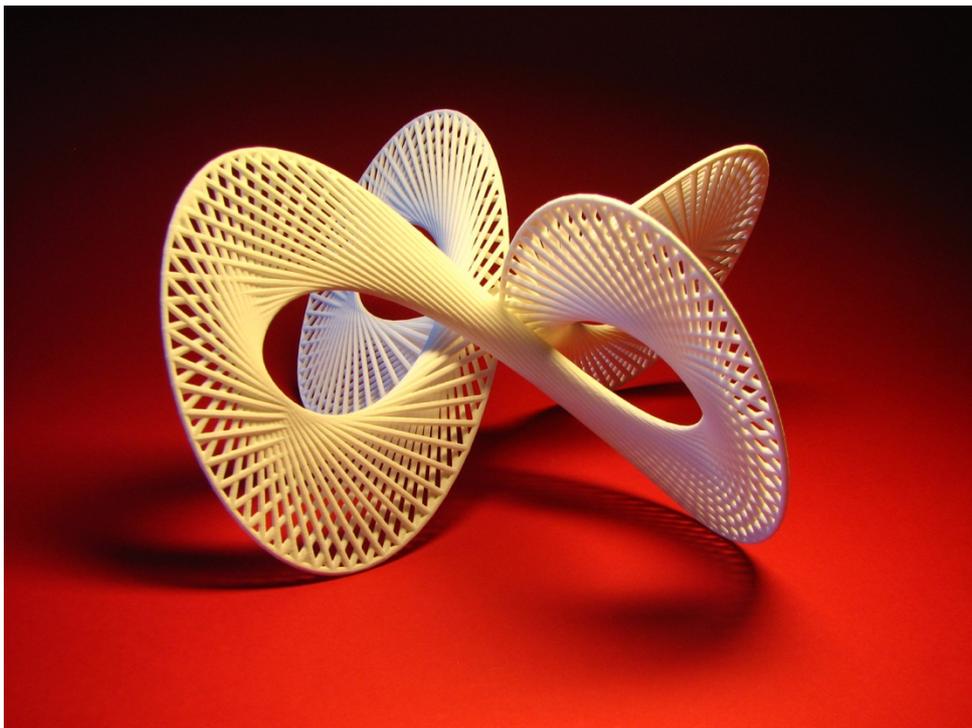


Figura 1.6 Architettura geometrica realizzata tramite Additive Manufacturing (Diam, 2019)

L'Additive Manufacturing è una tecnica inventata negli Stati Uniti negli anni '80 ed è stata inizialmente utilizzata come metodo di produzione di prototipi fisici di nuovi prodotti. Dopo questa fase iniziale, la tecnologia si è evoluta in ambiti diversi, anche grazie all'emergere di nuovi materiali di produzione.

Le principali tecniche di produzione che sfruttano i principi dell'Additive Manufacturing sono (Tekinalp et al., 2014):

- Il Selective Laser Sintering (SLS), che fa uso di un laser per sinterizzare, fondere polveri di diversi materiali, dagli elastomeri al nylon (la macchina stende strato dopo strato le polveri su una tavola che si abbassa progressivamente, la funzione del laser è saldare fra loro le piccole particelle solide).
- Il Direct Metal Laser Sintering (DMLS), in cui si fondono uno sull'altro diversi strati di materiale già prodotto tramite una tecnologia laser.
- Il Fused Deposition Modelling (FDM), in cui si rilascia, srotolando delle bobine in determinati punti, un materiale plastico o un filo metallico strato su strato fino a comporre il prodotto finale.
- La Stereolithography (SLA), in cui una vasca contiene una speciale resina liquida in grado di polimerizzare se esposta alla luce (fotopolimerizzazione) e appena al di sotto del livello del fluido è presente una piastra forata; a questo punto un raggio laser viene proiettato da un sistema di specchi in modo da scandire la superficie del liquido e nel contempo modulato in modo da ricostruire una immagine raster, cioè l'immagine digitale che rappresenta il progetto da realizzare, della prima sezione dell'oggetto da costruire; terminata la prima scansione la piastra si abbassa leggermente e una successiva scansione laser genera una seconda sezione (il processo si ripete fino a completare l'oggetto).

L'Additive Manufacturing può avere potenzialmente un effetto molto significativo sulla supply chain tradizionale e la sua configurazione, in molti ambiti industriali, come ad esempio nella produzione di apparecchi acustici, nell'industria dentale e nell'industria aeronautica (Li et al., 2017). L'impatto dell'Additive Manufacturing in ottica futura potrebbe essere molto rilevante in quanto potrebbe dare l'opportunità di ridurre il numero di partecipanti alla supply chain e renderla molto più "corta". In linea generale, nelle supply chain delle parti di ricambio, ad esempio, lo sviluppo delle tecnologie di Additive Manufacturing potrebbe risolvere problematiche quali la poca prevedibilità della domanda, in quanto la produzione potrebbe avvenire molto più a ridosso dei nodi finali della catena di approvvigionamento e quindi evitare il cosiddetto effetto Bullwhip, secondo cui, risalendo verso monte, la domanda, o la sua previsione, diventa sempre più incerta, gli elevati costi operativi e di trasporto, in quanto non sarebbe più necessario far procedere lungo la catena il prodotto finale o le sue componenti, in quanto, come detto, la produzione potrebbe avvenire nei nodi a valle, gli elevati

costi di inventario e di obsolescenza, che rappresentano un ulteriore effetto della maggiore precisione riguardo la domanda da soddisfare, e la possibilità di produrre solamente quando la domanda si realizza o comunque avendo un orizzonte di previsione molto più breve. In letteratura esistono tipicamente due approcci sull'implementazione dell'Additive Manufacturing nella supply chain: il primo è quello di avere un impianto di produzione tramite manifattura additiva centralizzato, che in linea generale dovrebbe sostituire il magazzino centrale della filiera logistica. In un impianto centrale così definito, la nuova tecnologia verrebbe impiegata nella produzione dei prodotti a bassa movimentazione quando questi vengono richiesti dai nodi della supply chain a valle. Questo approccio viene utilizzato soprattutto quando viene richiesto solamente un numero ristretto di parti di ricambio ed il tempo di risposta alla domanda non è un fattore critico. Un esempio di questa implementazione della manifattura additiva in una generica supply chain è nella Figura 1.7:

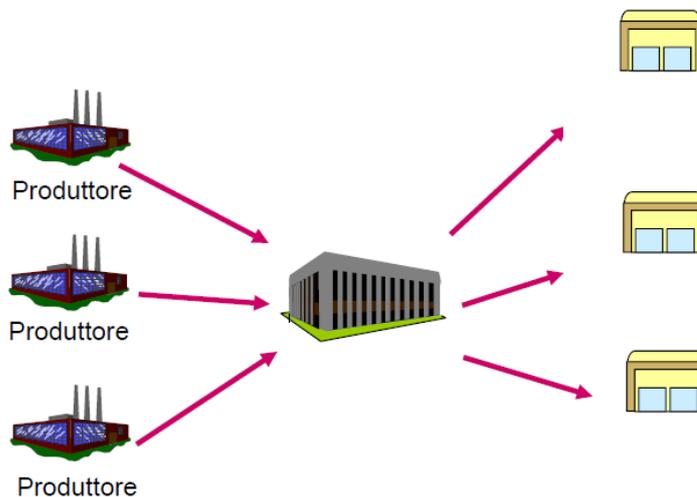


Figura 1.7 Rappresentazione schematica dell'implementazione dell'AM centralizzato (Ottimo et al., 2006)

Com'è possibile notare, in una supply di questo tipo esistono dei produttori a monte, che hanno il compito di fornire o il sottoassemblato necessario per la composizione del prodotto finale o le materie prime di lavorazione, ed il trasporto procede verso un centro di produzione centralizzato, da cui infine il prodotto finale viene distribuito ai centri di vendita.

Il secondo approccio è invece quello di sviluppare la tecnologia AM in modo distribuito, cioè in ogni impianto di produzione. Questo secondo approccio è giustificato quando la domanda di parti prodotte con tecnologia additiva è sufficientemente alta da bilanciare il capitale da investire. I vantaggi principali sono l'eliminazione dei costi di inventario e di trasporto ed il tempo di risposta alla domanda molto breve. Una rappresentazione schematica di questo secondo modello è nella Figura 1.8:

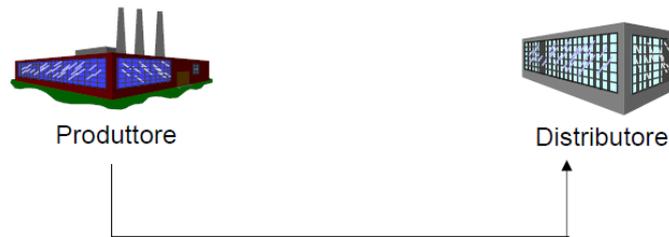


Figura 1.8 Rappresentazione schematica dell'implementazione dell'AM distribuito (Ottimo et al., 2006)

In Figura 1.8 è riportato il caso di supply chain in cui esiste un produttore di materie prime o di subassemblati ed un unico centro di vendita. In questo secondo modello è proprio in quest'ultimo che avviene la produzione/assemblaggio finale. Amplificando il modello, si potrebbero avere più produttori a monte e più centri di distribuzione a valle.

1.2.2 Analisi dei costi di produzione con l'adozione dell'Additive Manufacturing

La capacità dell'Additive Manufacturing nel realizzare parti geometricamente complesse senza aumenti significativi nei costi sta rendendo possibile la progettazione personalizzata e la produzione di articoli unici in modo economicamente conveniente (Zhang et al., 2018). Dal punto di vista economico, ci si aspetta che l'adozione dell'Additive Manufacturing trasformerà in futuro il modello di business attuale in tutto il ciclo di vita dei prodotti ingegneristici. Più che una nuova tecnologia di produzione, l'Additive Manufacturing dovrebbe essere considerato come uno strumento che rende possibile la creazione di valore nel contesto dell'industria digitalizzata del futuro. In questa nuova supply chain che si sta delineando, l'Additive Manufacturing non solo semplificherà il flusso di informazioni e di oggetti fisici, ma renderà possibile una maggiore integrazione nel ciclo di vita dei prodotti. Dal punto di vista della supply chain, l'Additive Manufacturing potrebbe rendere possibile il make-to-order di praticamente tutti i prodotti, minimizzando il bisogno di avere prodotti in magazzino, con i relativi costi, e ridurre gli sprechi.

Un'analisi più approfondita delle voci di costo dirette legate all'utilizzo dell'Additive Manufacturing è la seguente (Zhang et al., 2018):

- *Creazione del modello:* la creazione del modello CAD potrebbe essere basata su disegni bidimensionali, su reverse engineering o su modelli preesistenti. Questo passaggio è un processo molto importante in termini di creazione del valore in quanto permette l'ottimizzazione e la personalizzazione dei prodotti e spesso riguarda l'utilizzo di personale qualificato in questo tipo di software di modellazione.

- *Conversione del modello:* i modelli CAD tradizionali spesso devono essere convertiti in formati che sono compatibili con le tecnologie ed i sistemi dell'Additive Manufacturing. Generalmente viene utilizzato il formato STL.
- *Setup del modello:* le parti che devono essere prodotte devono essere impostate in modi particolari all'interno della struttura dei sistemi di Additive Manufacturing. Inoltre, bisogna considerare il fatto che durante la produzione le strutture sono spesso sottoposte a stress di tipo termico. Infine, un altro aspetto da considerare è l'annidamento che potrebbe esserci tra alcuni particolari ed il prodotto complessivo. Per tutte queste ragioni, esistono dei costi di settaggio dell'Additive Manufacturing.
- *Setup del macchinario:* i sistemi di produzione con Additive Manufacturing generalmente devono essere impostati prima di iniziare la produzione. Questa fase include ad esempio il carico delle materie prime da utilizzare, l'impostazione dei parametri di processo, l'inizializzazione della macchina e altre preparazioni necessarie.
- *Produzione:* una volta che i sistemi sono stati impostati, la produzione è generalmente autonoma e non richiede apporto umano.
- *Recupero delle parti:* dopo che la produzione si è conclusa e la parte di ricambio desiderata è pronta per uscire dal sistema, ci sono generalmente dei passaggi da seguire nella rimozione del prodotto dalla macchina di produzione con Additive Manufacturing, ad esempio in alcuni casi potrebbero essere stati aggiunti dei sottostrati per rendere più agevole l'automazione della produzione e dopo che la produzione si è conclusa devono essere rimossi.
- *Pulizia delle parti:* alcuni sistemi di produzione additiva, anche in relazione al tipo di prodotto nel sistema, richiedono processi di pulizia prima di essere utilizzati, ad esempio per rimuovere residui di polvere accumulatisi durante la produzione.
- *Processi post-produzione:* esistono nella pratica diversi processi da attuare prima che le parti prodotte arrivino al consumatore finale, come ad esempio processi di trattamento delle superfici, assemblaggio e altri processi simili.

1.2.3 La creazione di valore lungo la supply chain tramite l'Additive Manufacturing

Se ci si pone dal punto di vista del supply chain management, negli ultimi anni sono emersi molti concetti che, se sviluppati, riescono a garantire la creazione di valore all'interno della catena di approvvigionamento. Questi principi, presentati di seguito, sono utilizzati per comprendere come l'Additive Manufacturing può contribuire alla loro realizzazione pratica:

- *Lean supply chain*: alla base di questo paradigma risiede l'idea che bisogna ridurre gli sprechi all'interno della supply chain. Per farlo esistono diversi metodi e diversi punti di applicazione, che partono dalla produzione delle materie prime fino alla consegna del prodotto al consumatore finale. In questo contesto la produzione tramite Additive Manufacturing può essere molto utile per raggiungere l'efficienza all'interno della supply chain. In particolare, uno degli aspetti fondamentali da considerare è la possibilità di produrre solamente quando è necessario, concetto alla base del Just-In-Time (Tuck et al., 2007). Ciò significa che la supply chain potrebbe avere le seguenti caratteristiche:
 - *Supply chain dematerializzata*: la produzione solamente quando è necessario permette di non avere bisogno di una supply chain molto estesa ed inoltre diminuisce, se non si annulla, il bisogno di avere unità in magazzino.
 - *Just-In-Time effettivo*: poiché la produzione potrebbe, teoricamente, avvenire solamente nell'ultimo nodo della supply chain, non c'è bisogno di avere distribuzione lungo la supply chain di materiali o di prodotti in corso di lavorazione. L'abilità di amalgamare l'Additive Manufacturing con le tecnologie digitali, come ad esempio collegamenti in rete ed ai sistemi di gestione aziendale, potrebbe portare alla manifattura Just-In-Time, che sostituirebbe il concetto di spedizione Just-In-Time.
 - *Riduzione dei set-up, dei tempi di passaggio e del numero di assemblati*: uno dei fattori principali nella possibile riduzione dei costi di produzione riguarda la progettazione dei prodotti. L'Additive Manufacturing potrebbe ridurre il numero di assemblati e quindi far diminuire il bisogno di parti e componenti. Inoltre, poiché l'Additive Manufacturing non richiede cambiamenti di utensili di lavorazione, si ha generalmente una riduzione dei tempi di settaggio e di adattamento dei macchinari.
 - *Eliminazione degli sprechi*: l'Additive Manufacturing permette di ridurre gli sprechi all'interno della supply chain in diversi modi. Un primo aspetto da considerare è: se la produzione può avvenire anche solamente quando è necessario, non si ha più la necessità di prodotti in magazzino ed inoltre non si ha più la necessità di avere materiali o sottoassemblati a disposizione, ma solamente il disegno digitale del prodotto finale da produrre. Il secondo aspetto riguarda il metodo di produzione: la manifattura additiva si differenzia da quella tradizionale perché in quest'ultima si produce generalmente tramite sottrazione di materiale, con tutti gli sprechi collegati a questo aspetto.

- *Agile supply chain*: una supply chain agile è una supply chain in cui si utilizzano le conoscenze sul mercato e la cooperazione tra le imprese per sfruttare possibili opportunità favorevoli. Questo principio riguarda ad esempio la diminuzione dei tempi di consegna tra i nodi della supply chain. L'utilizzo di metodi di produzione flessibili è la base per raggiungere le idee legate a questo principio, in quanto permette, ad esempio, una riconfigurazione dei processi molto rapida e quindi lo sfruttamento di tutte le variazioni nella domanda in termini di quantità e di qualità. Quanto detto si traduce nella necessità di avere una supply chain make-to-order, cioè una supply chain in cui è il cliente con la sua domanda a guidare la produzione sia in termini di volumi di produzione sia in termini di caratteristiche di prodotto (Tuck et al., 2007).
- *Mass customisation*: come detto in precedenza, i bisogni dei consumatori stanno diventando sempre più differenziati e la richiesta di prodotti personalizzati è sempre più forte. L'abilità di rispondere ai bisogni dei consumatori è il cuore di questo principio. La produzione a basso costo e ad alta varietà è diventata una necessità per molte aree di mercato. La personalizzazione è usata per differenziare i prodotti e aggiungere una quota molto significativa di valore al consumatore. Se si pensa alla famosa frase di Henry Ford, "Potete avere una macchina di qualsiasi colore purché sia nero" si può notare il cambiamento radicale nel mercato negli ultimi anni. Esempi di questa personalizzazione sono presenti nel mercato dei prodotti tecnologici, ad esempio nel mercato dei personal computers con aziende come Dell che offrono ad ogni consumatore la scelta di una propria personale configurazione di prodotto (Tuck et al., 2007).

1.2.4 L'Additive Manufacturing nella realtà produttiva attuale

Delineate le caratteristiche principali della supply chain in presenza di Additive Manufacturing, è possibile a questo punto fare dei primi esempi qualitativi reali, scelti perché esempi di adozione effettiva della manifattura additiva come tecnologia di produzione in sostituzione della manifattura tradizionale.

Il primo caso è preso dal mercato dei componenti automobilistici (Khajavi et al., 2014). Un produttore nel mercato automotive, durante le fasi finali di sviluppo di un nuovo prodotto scopre un problema di progettazione che richiede di essere risolto prima del lancio del nuovo prodotto. Una possibile soluzione è utilizzare la progettazione digitale tramite modelli 3D CAD. Se si utilizzasse la produzione tradizionale si avrebbe un tempo di produzione molto lungo, definibile in termini di

mesi, in quanto tutti i macchinari dovrebbero essere adattati alla produzione del nuovo componente. Utilizzando, invece, la manifattura additiva si ha una produzione molto più veloce, ad esempio in termini di giorni o poche settimane, e la progettazione potrebbe procedere molto più rapidamente. Come riportato da Kochan (2003), l'Additive Manufacturing è in via di sviluppo nella Formula 1. Un esempio è la Renault che, nello sviluppo della sua nuova autovettura da corsa nel 2002, ha avuto la necessità di produrre più di duemila parti diverse tra loro e testarle. Con la produzione tradizionale questo processo avrebbe avuto una durata eccessiva, in quanto si parlerebbe di quattro o cinque mesi, e gli ingegneri avrebbero dovuto abbandonare il progetto, ma tramite l'Additive Manufacturing è stato possibile completare gli studi, perché la produzione di ogni prototipo è possibile in termini di giorni.

Un altro esempio di come l'Additive Manufacturing stia diventando un sistema di produzione molto importante è nel mercato delle apparecchiature mediche, in cui spesso si devono produrre oggetti unici e in relazione alle specifiche caratteristiche di ogni paziente, come ad esempio negli apparecchi acustici. Come riportato da Phonak (2003), la manifattura additiva sta diventando il metodo di produzione principale in Siemens nel mercato biomedico. Tramite questo nuovo sistema di produzione, l'impresa sta raggiungendo livelli di accuratezza e performance molto superiori al passato.

1.2.5 Gli impatti dell'Additive Manufacturing sul Supply Chain Management

Il motivo alla base dell'interesse degli impatti dell'Additive Manufacturing sulle supply chain è individuabile nel fatto che, secondo Wolhers Associates (2014), un'impresa di consulenza specializzata nel reperire informazioni commerciali sul mercato dell'Additive Manufacturing, il 34.7%, che vuol dire 1.065 miliardi di dollari, del mercato mondiale di prodotti tramite Additive Manufacturing nel 2013 facevano riferimento alla manifattura industriale. Nel 2003 questa percentuale raggiungeva appena il 3,9%. Attualmente, il settore in cui sono più sviluppate le tecnologie di manifattura additiva è il mercato biomedico, tanto è vero che nel 2013 approssimativamente cinquanta milioni di apparecchi odontoiatrici sono stati prodotti tramite Additive Manufacturing (EOS, 2013). Il settore aereo e l'industria automotive sono altri mercati in cui si sta sviluppando rapidamente l'utilizzo della nuova tecnologia.

Per comprendere ulteriormente l'impatto dell'Additive Manufacturing sui processi e sui componenti del Supply Chain Management, è possibile analizzare come i cinque processi generali alla base della gestione della filiera logistica, ovvero la gestione delle relazioni con i fornitori, la gestione del flusso

dei materiali di produzione, lo sviluppo e la commercializzazione dei prodotti, la gestione della domanda e delle relazioni con i clienti finali e la logistica inversa (Mentzer et al., 2001), possano cambiare quando la produzione avviene tramite la nuova tecnologia:

- *Gestione delle relazioni con i fornitori:* in generale, ci sono due scenari differenti riguardo l'approvvigionamento quando viene utilizzato l'Additive Manufacturing (Holmström et al., 2017). Il primo è quello in cui l'impresa acquista parti prodotte con manifattura additiva già pronte all'utilizzo mentre il secondo è quello in cui l'impresa deve acquistare le materie prime da utilizzare nella produzione al fine di produrre tramite Additive Manufacturing. Ciò che si osserva nel mercato dei prodotti biomedici, ad esempio, è che in entrambi i casi aumenta la standardizzazione dell'approvvigionamento, in quanto si hanno gli stessi processi, gli stessi materiali, lo stesso equipaggiamento e lo stesso tempo di produzione in tutti gli impianti. L'acquisto da parte dei fornitori a monte, quindi, diventa molto più semplice perché non si devono più integrare più parti dello stesso prodotto e diminuisce il bisogno di cooperazione. Si può quindi affermare che la transizione dalla manifattura tradizionale all'Additive Manufacturing aumenta l'importanza dei piani di produzione strategici di lungo termine, in quanto bisogna comprendere quale sarà il livello di produzione e decidere quali macchinari utilizzare, con poche possibilità di cambiarli "in corsa". Inoltre, la transizione verso la nuova tecnologia richiede la costruzione di conoscenze specifiche dei macchinari e dei materiali possibili nel loro utilizzo.

- *Gestione del flusso di produzione*: i processi di produzione prima e dopo la transizione verso la nuova tecnologia sono schematizzati nella Figura 1.9:

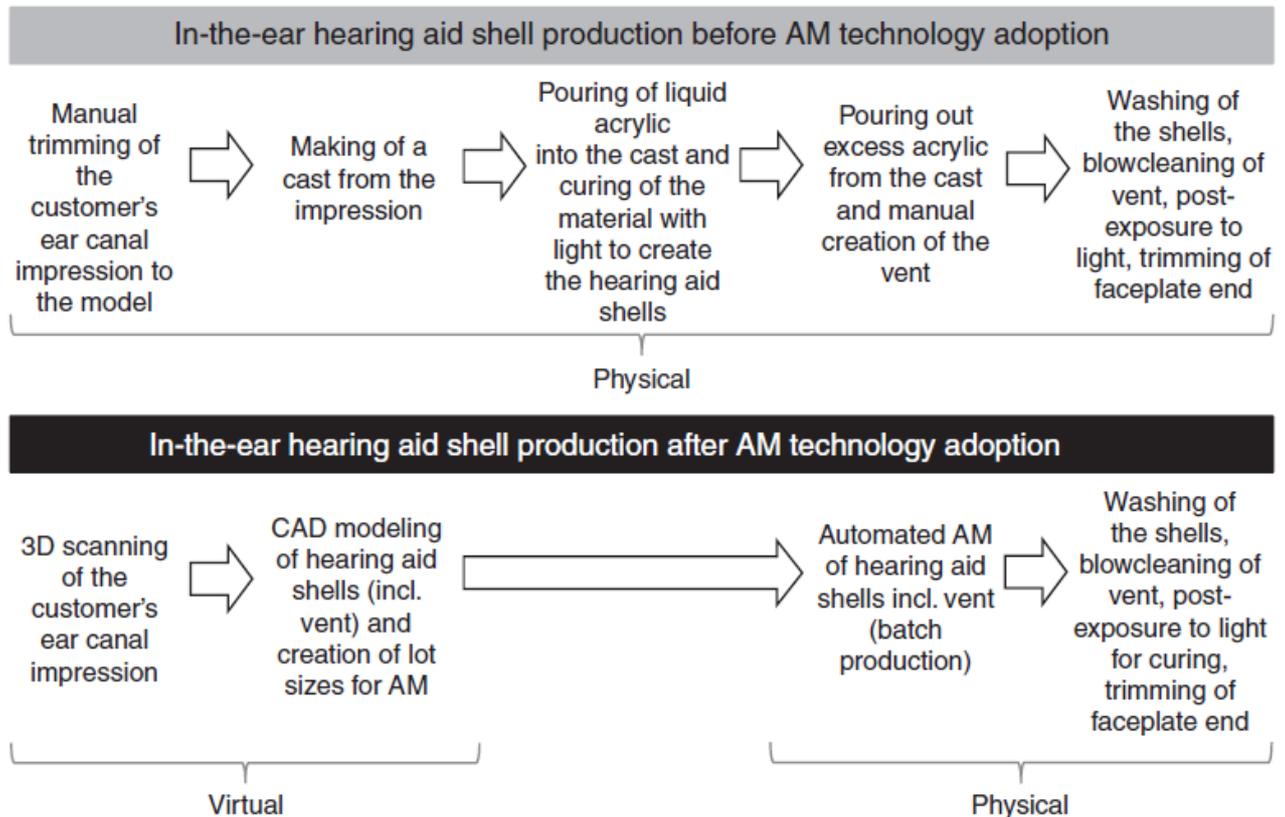


Figura 1.9 Produzione di apparecchi acustici prima e dopo l'introduzione dell'Additive Manufacturing (Oettmeier et al., 2016)

Le principali differenze tra i due modelli riguardano il fatto che, ad esempio, se in precedenza un apparecchio acustico veniva prodotto da una singola persona, con l'Additive Manufacturing devono essere impiegate diverse figure, ad esempio i modellatori 3D, i controller dei macchinari e gli specialisti nel controllo finale e durante la lavorazione. L'alta separazione del lavoro ha effetti positivi sul processo e sulla qualità del prodotto. Tuttavia, le competenze richieste nell'utilizzo della nuova tecnologia non sono facilmente individuabili nello staff di produzione utilizzato in precedenza. Ciò significa che le imprese devono assumere nuove figure o formare il personale già esistente. Inoltre, è possibile che per diversi tipi di prodotti occorran competenze diverse, ad esempio nella modellazione 3D. Si può quindi affermare che la transizione verso l'Additive Manufacturing aumenta l'industrializzazione della manifattura. In aggiunta a ciò, la nuova tecnologia di produzione favorisce la generazione di economie di scala nella modellazione e nella progettazione dei prodotti e nella produzione. Infine, l'adozione della manifattura additiva aumenta le possibilità nella gestione della qualità e nella formazione degli operatori.

- *Sviluppo del prodotto e gestione del marketing:* generalmente uno degli utilizzi maggiori dell'Additive Manufacturing è nella produzione di nuovi prototipi. Da questo punto di vista, la manifattura additiva è uno strumento molto potente nello sviluppo di nuove idee, in quanto rende possibile una visualizzazione pressoché immediata di ciò che si sta progettando. Quanto detto porta al fatto che le imprese riescono ad aumentare la propria varietà di prodotti offerti e integrare i nuovi prodotti più velocemente nella produzione. Un altro aspetto da considerare è la diminuzione delle barriere a cosa può essere realizzato fisicamente. Per esempio, grazie all'Additive Manufacturing, i gusci di molti oggetti hanno uno spessore più piccolo e meglio controllabile. Inoltre, la creazione di modelli 3D CAD permette ai progettatori di controllare meglio ciò che stanno disegnando e ridurre le possibilità di errori. Anche in questo caso, però, le competenze richieste agli operatori sono molto più specializzate e spesso le imprese devono formare il personale già esistente o assumerne di nuovo. A proposito delle implicazioni dell'adozione dell'Additive Manufacturing sullo sviluppo e sulla commercializzazione di nuovi prodotti, quindi, è possibile affermare che nella transizione verso la nuova tecnologia vengono ampliate le possibilità di sviluppo di nuovi prodotti o di miglioramenti di quelli esistenti tramite la collezione di una quantità molto maggiore di dati.
- *Gestione della fornitura, della domanda e delle relazioni con i clienti:* una volta che viene adottato l'Additive Manufacturing, generalmente le imprese hanno meno bisogno di relazioni fisiche e più di avere relazioni digitali con i propri fornitori. Quanto detto si traduce in un miglioramento dei lead time all'interno della supply chain. D'altro canto, però, con l'adozione della nuova tecnologia non si hanno particolari cambiamenti nella domanda e nella sua previsione. È quindi possibile dire che la transizione verso l'Additive Manufacturing tende a ridurre i lead time, ad esempio eliminando nodi intermedi all'interno della supply chain, ma non influenza la previsione della domanda. Inoltre, l'Additive Manufacturing favorisce l'integrazione dei consumatori finali nel processo di creazione del valore nella supply chain
- *Gestione della logistica inversa:* generalmente l'adozione dell'Additive Manufacturing fa aumentare il riutilizzo di materiale in quanto quello non processato durante il processo di manifattura può essere immesso senza particolari problematiche nel processo successivo. Tuttavia, si potrebbero creare delle attività specifiche di riprocessamento per assicurare il livello di qualità richiesto. Il processo di rimpiazzo è generalmente molto più rapido con

l'utilizzo della manifattura additiva, in quanto si parla generalmente di modelli digitali che possono essere facilmente modificati o sostituiti.

1.2.6 Analisi sul punto della supply chain in cui adottare l'Additive Manufacturing

Uno degli aspetti focali dell'Additive Manufacturing e di come sta cambiando il modo di concepire e di gestire le supply chain è che questa tecnologia potrebbe permettere, e in alcuni casi già permette, di consegnare ai consumatori finali unità di prodotto completamente personalizzate, di produrre solamente quando è necessario e solamente dove è richiesto (Minguella-Canela et al., 2017). Tuttavia, bisogna indagare il punto esatto in cui inserire l'Additive Manufacturing come tecnologia di produzione all'interno della catena di creazione di valore per il consumatore finale. Se si considerano le fasi di produzione, il numero di imprese che utilizza la nuova tecnologia non è molto elevato e spostandosi verso la consegna del prodotto al cliente solamente una piccola percentuale ha implementato la manifattura additiva. Le ragioni di questa distribuzione molto diversa in base alla posizione all'interno della catena di approvvigionamento sono sia tecnologiche, alcuni materiali e requisiti di prodotto sono poco adattabili alle tecnologie di Additive Manufacturing, sia economiche, non converrebbe un investimento così ingente per i volumi prodotti.

È stato più volte evidenziato fin qui che l'introduzione dell'Additive Manufacturing all'interno delle supply chain delle varie imprese produttrici sta cambiando il modo di gestire la produzione e sta permettendo alle aziende di modificare dove e come eseguire le attività di manifattura (Ford et al., 2016). L'adozione della manifattura additiva permette di avere una supply chain più corta, più piccola, localizzata con più precisione, più collaborativa e offre significativi benefici in termini di sostenibilità. Quanto detto è riassumibile in tre punti focali:

- Aumento dell'efficienza nell'utilizzo delle risorse: miglioramenti possono essere realizzati sia nella produzione sia nella progettazione dei processi di produzione
- Allungamento del ciclo di vita dei prodotti: poiché ci sono molti più collegamenti tra produttori e consumatori, aumentano le attività quali la riparazione, la rimanifattura, la ristrutturazione e tutte le attività sostenibili in termini socioeconomici
- Riprogettazione della value chain: l'Additiva Manufacturing porta a supply chain più corte e semplici, a produzione più localizzata, a modelli di distribuzione innovativi e a nuove collaborazioni tra i partecipanti alla supply chain

1.2.7 Additive Manufacturing e sostenibilità

Un importante quesito da porsi a questo punto è il seguente: *in che modo l'Additive Manufacturing può rendere possibili modelli di produzione e consumo più sostenibili?*

La manifattura in generale è definita come la conversione di materie prime in beni e servizi. L'efficienza di questo processo di conversione è il fattore chiave nello studio dell'impatto ambientale associato alla manifattura. L'Additive Manufacturing è stato identificato come una tecnologia potenzialmente in grado di fornire numerosi vantaggi in questi termini. I vantaggi di questa tecnologia di produzione includono la generazione di minori scarti di lavorazione, la capacità di ottimizzare le geometrie e creare componenti molto più leggeri rispetto al passato, la riduzione dei trasporti all'interno della supply chain e in alcuni casi la riduzione del peso dei prodotti trasportati e il minore bisogno di avere magazzino grazie alla possibilità di produrre parti di ricambio on-demand. Nonostante sia spesso poco citato, l'Additive Manufacturing ha anche un risvolto di sostenibilità sociale: questa tecnologia potrebbe permettere agli operatori di evitare l'esposizione a lungo termine ad ambienti potenzialmente dannosi per la salute in quanto generalmente vengono utilizzate materie prime meno tossiche, ma ciò non è sempre vero.

Per analizzare l'impatto della manifattura additiva anche in questo contesto, il ciclo di vita dei prodotti è stato supposto come rappresentato nella Figura 1.10:

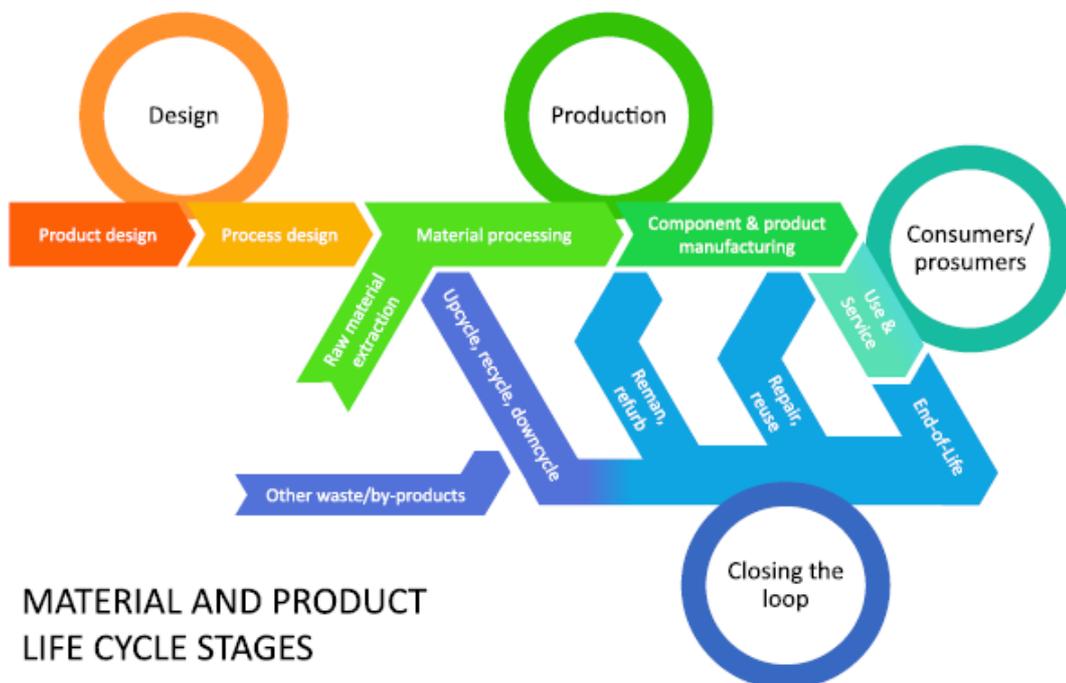


Figura 1.10 Schematizzazione del ciclo di vita dei prodotti (Ford et al., 2016)

L'analisi è quindi stata focalizzata sull'identificazione dei benefici in termini di sostenibilità e dei cambiamenti nella produzione quando viene utilizzato l'Additive Manufacturing.

- *Progettazione del prodotto e dei processi:* l'Additive Manufacturing permette la progettazione di componenti più complessi e ottimizzati grazie ai maggiori gradi di libertà geometrici ed inoltre permette di produrre assemblati che comprendono minori parti e materiali meno diversi tra loro. Esempi di miglioramenti dei prodotti includono la maggiore efficienza operativa, la durabilità, la facilità di utilizzo ed il mantenimento (Ford et al., 2016).
- *Riprogettazione di componenti e prodotti:* l'Additive Manufacturing permette la creazione di nuove strutture, ad esempio le strutture porose. Incorporando queste nuove tipologie di strutture nei componenti può migliorare le caratteristiche dei componenti prodotti (Lindemann et al., 2012). Possibili miglioramenti includono l'aumento della durezza, della rigidità, dell'efficienza energetica e della resistenza alla corrosione. Uno dei settori in cui sono più applicati i concetti presentati è il settore aerospaziale, in cui si hanno requisiti di performance molto elevati ma bassi volumi di produzione. Gli impatti ambientali nella produzione dei componenti di un velivolo sono principalmente legati alla produzione dei componenti della parte meccanica. Il tipico coefficiente buy-to-fly di 4:1 (rapporto tra materiali di input e componenti finali) (Ford et al., 2016) esprime al meglio il concetto degli sprechi nella produzione di questo tipo di componenti: del volume/peso delle materie prime immesse nel processo, solamente un quarto rappresenta il risultato della lavorazione quando si utilizzano i metodi di manifattura tradizionale e questo è solamente un valore medio, tanto è vero che per alcune componenti il coefficiente osservato è di 20:1 (Ford et al., 2016). Inoltre, il materiale scartato da questi processi generalmente non è riutilizzabile. Quando viene utilizzato la manifattura additiva, questo tipo di sprechi viene generalmente evitato ed è stato stimato che in media si ha un risparmio nel consumo dei materiali pari al 60% ed in termini di tempo di produzione si ha una diminuzione pari al 30%. L'esempio reale più significativo si è avuto nella riprogettazione adottata dalla General Electric (GE) per i motori LEAP nel 2016: dopo molti anni di sviluppo tramite Additive Manufacturing, GE è riuscita ad includere diciannove ugelli in un nuovo motore. I nuovi ugelli progettati sono cinque volte più resistenti in termini di durabilità e sono stati disegnati per permettere la miglior geometria possibile nel flusso di combustibile. Inoltre, il peso degli ugelli prodotti tramite Additive Manufacturing è diminuito del 25% rispetto al peso degli ugelli prodotti tramite manifattura tradizionale. Parte di questa riduzione di peso è dovuta

anche alla semplificazione della progettazione, in quanto la GE è riuscita a comprendere 20 componenti separati in un unico componente.

- *Riprogettazione dei processi*: quando viene implementato l'Additive Manufacturing nella produzione dei componenti, i processi di produzione diventano più efficienti in termini di consumi di risorse ed energia. Un esempio di quanto detto si ha nella Finnish company Salcomp, leader a livello mondiale nella produzione di spine elettriche nella produzione dei cellulari. In questo settore, in cui si hanno alti volumi di produzione, i costi e l'efficienza sono i maggiori fattori da tenere in considerazione nel mantenimento della posizione competitiva. Con l'intento di migliorare l'efficienza di produzione nel suo impianto a Chennai, Salcomp ha identificato che il processo di produzione era troppo lungo e rappresentava un fattore limitante allo sviluppo dell'impianto. In collaborazione con EOS, sviluppatrice tedesca in ambito Additive Manufacturing, Salcomp ha riprogettato la struttura di produzione adottando la nuova tecnologia, riuscendo a diminuire il tempo di produzione unitario da quattordici ad otto secondi, raggiungendo un volume di produzione pari a 56,000 unità ogni mese. Un secondo effetto in questa riprogettazione dei processi riguarda la qualità degli oggetti prodotti: il tasso di rifiuto è passato da 2,0% a 1,4% (Ford et al., 2016).

Gli esempi fatti fin qui dimostrano il potenziale dell'Additive Manufacturing nella riprogettazione di processi, prodotti e componenti nell'ottica del miglioramento delle performance di sostenibilità. Quanto detto, però, implica che spesso l'adozione della nuova tecnologia imponga una riconfigurazione della supply chain. Il passaggio da un sistema centralizzato di produzione ad uno molto più decentralizzato implica che l'impatto del trasporto sulla sostenibilità della supply chain può essere ridotto e allo stesso tempo a trarre vantaggio delle operazioni all'interno della supply chain sono più comunità locali. Tuttavia, esistono molte barriere e limitazioni all'esplorazione completa dei potenziali benefici dell'Additive Manufacturing. La prima e più importante riguarda la concezione attuale di questa nuova tecnologia da parte degli ingegneri e progettatori all'interno delle imprese manifatturiere: la manifattura additiva era usata ai suoi albori come tecnologia di produzione di prototipi e nuovi componenti e questa concezione non è stata ancora superata in favore dell'idea di tecnologia di produzione diretta di componenti e prodotti finali. Una seconda limitazione riguarda il fatto che l'Additive Manufacturing può creare nuove forme e nuove geometrie ma queste non sono ancora implementabili con le attuali conoscenze degli altri aspetti di funzionalità di un prodotto, come ad esempio la microelettronica.

In particolare, si è osservato che l'Additive Manufacturing può influenzare i seguenti aspetti della supply chain:

- *Processi di inserimento delle materie prime nella supply chain:* i materiali utilizzati come input nell'Additive Manufacturing danno la possibilità di migliorare molto la sostenibilità. La natura dei materiali dipende principalmente dai processi di manifattura additiva implementati ma le quattro maggiori categorie sono i materiali liquidi, i materiali filamentososi, le polveri ed i fogli solidi. Nella manifattura tradizionale, esistono casi in cui c'è un elevato consumo di energia e di risorse sin dalle prime fasi di approvvigionamento delle materie prime, ad esempio nella preparazione per la lavorazione dei metalli. L'impresa inglese MetalYSIS ha commercializzato negli ultimi anni un processo di produzione di polveri di titanio direttamente dal minerale. Questo processo, chiamato FFC, richiede una quantità molto significativa in meno di energia rispetto alla produzione della polvere di titanio tramite il metodo tradizionale, ovvero il metodo Kroll (Ford et al., 2016). Inoltre, il nuovo processo utilizza un reagente non tossico. Uno dei concetti chiave dell'Additive Manufacturing in questo ambito è che i materiali riciclati possono essere immessi nel processo come materiali vergini. Un esempio può essere quello delle comuni stampanti 3D in commercio attualmente, che utilizzano il deposito di materiale fuso (FDM). I materiali utilizzati in questo caso possono essere riciclati senza perdite significative di qualità. Un altro esempio si ha nella stampante 3D EKOCYCLE Cube, un altro modello di stampante tridimensionale domestica, che può utilizzare nella produzione anche polietilene riciclato. Inoltre, attualmente, una collaborazione tra 3D Systems e Coca-Cola riguarda proprio il riutilizzo delle bottiglie in PET già usate.
- *Manifattura make-to-order di componenti e prodotti:* l'Additive Manufacturing rende reale l'idea di produrre solamente quando è richiesto e dove è richiesto, ad esempio nel mercato delle parti di ricambio. L'unico requisito in questo caso è quello di avere a disposizione il modello digitale delle parti di ricambio e poi produrle solamente quando è necessario, cioè on-demand. In questo modo, è possibile eliminare o comunque diminuire i livelli di magazzino e quindi gli sprechi derivanti dall'aver materiale in stock, ridurre il rischio di avere prodotti invenduti e aumentare il flusso dei ricavi. Nello scenario tradizionale, quando un componente in un prodotto non funziona più come dovrebbe, il consumatore può scegliere tra riparare il prodotto, sostituendo il componente difettoso, oppure eliminare il prodotto. La scelta dipende principalmente dal valore del prodotto. Ripararlo vuol dire

generalmente ottenere un componente di ricambio dall'impresa manifatturiera o dai suoi distributori. Per ogni organizzazione, avere a disposizione tutti i componenti di ricambio è spesso molto costoso, così come produrli solamente quando è richiesto. L'Additive Manufacturing in questi casi è una possibile soluzione al problema: la produzione di un solo componente non richiede particolari investimenti in termini di utensili di produzione da utilizzare e quindi un lotto di una sola unità può diventare conveniente. Inoltre, la condivisione del modello digitale è molto agevole e può avvenire addirittura dove il componente è richiesto, al limite dove è utilizzato il prodotto. Un esempio di quanto detto è Kazzata (Ford et al., 2016), un deposito digitale di modelli 3D di componenti di ricambio, di cui gli utenti possono fare il download e quindi produrre autonomamente. Tuttavia, in un sistema di questo tipo, esistono forti limitazioni date dalla certificazione e da aspetti legali legati all'utilizzo libero dei modelli.

Come descritto in questa parte dell'analisi, la configurazione dei sistemi di manifattura possono cambiare drammaticamente con l'introduzione dell'Additive Manufacturing. Il cambiamento dalla manifattura tradizionale alla nuova tecnologia permette la produzione in piccoli volumi di beni personalizzati con costi molto limitati. Lo sviluppo di tecniche di produzione domestiche o comunque all'interno di uffici e non più di impianti di produzione veri e propri, inoltre, rende molto meno percettibile il confine tra produttore e consumatore. Questi ultimi, infatti, possono progettare e produrre on-demand con le specifiche esatte richieste e nello stesso luogo di utilizzo o di richiesta. Inoltre, esistono diverse tecnologie che permettono di produrre tramite il riutilizzo di scarti o di prodotti non più utilizzati. Infine, i magazzini di componenti e di prodotti potrebbero essere ridotti o addirittura eliminati, riducendo le perdite economiche e gli impatti ecologici associati alle unità non vendute o obsolete. La sfida nello sviluppo di questo tipo di supply chain è che un modello di relazioni non lineari, in cui le responsabilità dei vari partecipanti non sono ben definite e possono spaziare tra produttore e consumatore, potrebbe portare a conflitti e incompatibilità. Inoltre, il continuo cambiamento negli attori coinvolti e nei possibili competitors crea un ambiente di grande incertezza, in cui sviluppare possibili strategie di business a lungo termine diventa sempre più difficile.

- *Chiusura del ciclo*: argomenti riguardanti la cosiddetta "chiusura del ciclo" della supply chain possono riguardare diversi passaggi e in diverso modo l'Additive Manufacturing. Il più grande valore di recupero possibile è raggiunto localmente durante il processo di produzione in cui

il materiale di manifattura additiva non usato viene introdotto nuovamente nel ciclo di produzione. Per le polveri metalliche si stima che il 95-98% di questo materiale possa essere riciclato e riutilizzato (Ford et al., 2016). Per quanto riguarda l'ultima fase del ciclo di vita del prodotto, i sistemi di riciclo in-situ possono essere collegati con l'Additive Manufacturing, cioè i materiali diventati ormai rifiuti da smaltire vengono riutilizzati in nuove applicazioni. Tuttavia, maggiore è la diversità dei materiali che entrano nel sistema di riciclaggio, maggiore è la complessità dei processi richiesti durante il riciclaggio, con la possibilità di perdere una quota molto elevata di valore quando non è possibile separare i vari tipi di materiale.

Nel contesto appena delineato, iniziative come Better Future Factory aiutano a prestare maggiore attenzione al riciclo in piccola scala di materiali riciclabili, come ad esempio la plastica. Il programma Perpetual Plastic Project (PPP) analizza le possibilità di riutilizzare la plastica in disuso come input per la stampa 3D.

Dal punto di vista della riparazione, manutenzione e rimanifattura dei prodotti, il modello make-to-order può essere applicato con gli stessi benefici di riduzione degli sprechi e dei livelli di magazzino visti in occasione delle analisi riguardanti la produzione di parti di ricambio. Un esempio reale è la tecnologia Additive Manufacturing LMD sviluppata da Rolls-Royce nel mercato aeronautico. Oltre che per la produzione di componenti, la tecnologia LMD può essere usata per la riparazione in-situ dei componenti danneggiati. Come risultato di ciò, questa tecnologia offre il potenziale per massimizzare l'utilizzo e l'estensione del ciclo di vita delle componenti. Uno strumento di rimanifattura molto utilizzato è lo spray freddo in ambito di manifattura additiva. Caterpillar ha iniziato ad usare questa tecnologia all'inizio degli anni '70 per la rimanifattura dei motori diesel e durante gli ultimi quaranta anni ha migliorato e adottato con sempre più frequenza questo tipo di lavorazione per rimpiazzare prodotti che prima sarebbero usciti dalla supply chain, raggiungendo un livello del 94% di prodotti riportati in funzione. Si è stimato che un motore rigenerato ha un costo pari al 60% del prezzo di uno nuovo, mentre le componenti rigenerate sono vendute al 40% del prezzo di quelle nuove. Solamente nel Regno Unito si è stimato che il mercato dei rigenerati ha il potenziale per creare un valore pari a 5.6 miliardi di sterline e 310,000 posti di lavoro in più, oltre ovviamente a far diminuire notevolmente le emissioni di gas e prodotti chimici nell'ambiente (Lavery et al., 2013).

1.2.8 Adozione dell'Additive Manufacturing nel caso di assiemi

Per rimanere competitivi all'interno dell'attuale mercato manifatturiero, i prodotti dovrebbero essere progettati e prodotti con due obiettivi, in contrasto tra loro: diminuire i tempi ed i costi di produzione ed aumentare la qualità e la flessibilità. La riduzione del numero di componenti, nel caso in cui si parli di assiemi, è uno dei modi più efficaci per ridurre i tempi di produzione ed i relativi costi. Un modo possibile per ridurre il numero di componenti è il consolidamento delle parti, che è definito come il processo con cui più parti discrete di uno stesso assieme sono progettate e prodotte insieme per formare un'unica parte risultante (Yang et al., 2015). La riduzione nel numero di parti di un assemblato e nelle relative operazioni può avere un impatto enorme sui costi di produzione e sulla complessità del prodotto finale. In primo luogo, infatti, non c'è necessità di strumenti specifici di produzione, ad esempio di utensili specifici. Inoltre, è spesso possibile progettare un componente consolidato che abbia performance migliori dell'insieme di partenza. Infine, una riduzione del numero di componenti significa anche una riduzione nella complessità riguardo la gestione e la produzione, in quanto c'è un numero minore di parti da controllare, ispezionare e fornire al mercato. Con l'evoluzione dell'Additive Manufacturing come nuova tecnologia di produzione, le limitazioni della manifattura tradizionale stanno via via scomparendo in ambito di consolidamento degli assiemi. Per esempio, tramite la manifattura additiva non è più necessario evitare angoli acuti e minimizzare le linee di saldatura. In linea generale, è possibile dire che l'Additive Manufacturing permette quattro categorie di gradi di complessità non permessi dalla manifattura tradizionale: complessità nelle forme, complessità nelle gerarchie, complessità nei materiali e complessità funzionale.

1.2.9 La supply chain ibrida

L'adozione dell'Additive Manufacturing come tecnologia di produzione non deve essere necessariamente sostitutiva per l'intera filiera bensì può riguardare solamente alcuni nodi di produzione. Ciò significa che, almeno dal punto di vista teorico, sarebbe possibile avere una catena di approvvigionamento in cui in alcuni nodi viene utilizzata la manifattura tradizionale, magari perché l'investimento iniziale da sostenere per adottare la tecnologia additiva potrebbe essere troppo elevato e quindi non conveniente, mentre in altri nodi, quali ad esempio i nodi iniziali in cui il prodotto deve essere progettato e quindi un sistema di produzione che permetta di produrre più prototipi senza avere il bisogno di progettare anche i relativi utensili di produzione potrebbe essere molto conveniente, viene utilizzato l'Additive Manufacturing.

Il concetto di supply chain ibrida non è stato molto approfondito in letteratura, in quanto generalmente è applicabile con maggiore efficacia a filiere logistiche in cui si producono assiemi meccanici. Il motivo di quanto detto è che tramite l'adozione della nuova tecnologia di produzione può essere possibile avere una progettazione più efficiente in termini del numero di componenti, che, come discusso nel paragrafo 1.2.2, potrebbe essere ridotto e di conseguenza avere un costo totale della produzione inferiore. Nel caso in cui, invece, il prodotto finale non è un assieme meccanico, in linea di massima non è conveniente avere una catena di approvvigionamento ibrida ma, in termini economici, adottare l'Additive Manufacturing per eliminare alcuni nodi della filiera (Strong et al., 2018).

1.2.10 Additive Manufacturing nel caso di sistemi isolati

Per concludere l'analisi sull'introduzione dell'Additive Manufacturing nelle supply chain, è possibile fare esempi di adozione della nuova tecnologia in sistemi isolati. Un sistema è considerato isolato se il tempo necessario per fornirgli i prodotti richiesti per il proprio funzionamento è incompatibile con la pianificazione delle sue attività (Oettmeier et al., 2016). In altre parole, un sistema è isolato quando è logisticamente isolato dalle condizioni esterne che governano le operazioni di approvvigionamento. È possibile fare tre esempi reali:

- Orbitante a quattrocento chilometri della Terra, la Stazione Spaziale Internazionale (ISS) è un esempio eccellente di isolamento geografico. L'unico collegamento tra la stazione e la Terra avviene tramite telecomunicazioni. Lo stoccaggio dei moduli richiesti per il suo funzionamento non è possibile in grandi quantità. Ogni due mesi, comunque, le parti di ricambio principali richieste sono spedite nello spazio tramite shuttle di servizio, che impiegano quarantacinque giorni per raggiungere la stazione orbitante. La soluzione a questi problemi fornita dall'Additive Manufacturing è quella più conveniente: piuttosto che avere un magazzino di parti di ricambio, è molto più conveniente avere a disposizione le materie prime per la produzione di qualsiasi particolare e produrlo in loco quando è necessario tramite macchinari di stampa 3D (Pérès et al., 2006).
- Un altro esempio di sistema isolato sono tutti quei sistemi in cui il problema dell'obsolescenza delle parti di ricambio è molto rilevante. Un esempio di quanto detto si ha nell'industria automotive. Per fornire le prestazioni elevate richieste dal mercato della manutenzione dei veicoli, i produttori devono avere sempre a disposizione tutte le possibili parti di ricambio necessarie. Ciò significa, oltre ai magazzini di parti di ricambio veri e propri,

avere a disposizione tutte le strumentazioni necessarie alla produzione, come ad esempio i macchinari, gli utensili di produzione specifici, le materie prime, ecc. Il problema principale in questo caso è dopo la fine della produzione di un determinato modello di automobile: quando avviene il fermo della produzione, quanto è stato immagazzinato per la produzione dei particolari delle automobili deve essere sostituito ma, nel caso in cui, ad esempio per fini di manutenzione, servisse una parte di ricambio non in magazzino, si dovrebbe di nuovo produrre, con i relativi costi di set-up degli impianti. Questo tipo di problemi è risolto sempre più tramite la manifattura additiva, ad esempio dalla Renault (Pérès et al., 2006).

- Un terzo ed ultimo esempio di sistema isolato sono i sistemi difficilmente raggiungibili in quanto sono esposti a condizioni di pericolo. Un esempio reale sono i campi di battaglia nelle guerre. L'equipaggiamento dei militari in queste zone è composto attualmente da un numero elevatissimo di particolari, tutti prodotti con livelli di tolleranza bassissimi e con richieste di prestazioni molto elevate. Fornire questo tipo di equipaggiamento tramite una produzione a distanza è molto difficile. La soluzione ideata dall'esercito statunitense è stata denominata Mobile Parts Hospital (MPH). L'MPH è stato sviluppato dall'U.S. Army's National Automotive Centre (NAC) in Michigan e dal Centre for Advanced Technologies at Focus (HOPE), a Detroit. Il sistema realizzato è una combinazione di tecnologie avanzate che permette all'MPH di riparare le parti su richiesta. Il centro di riparazione, infatti, riceve i dati di produzione ed un database di modelli digitali tramite satellite. Quando le comunicazioni non sono disponibili, l'MPH è dotato di un proprio scanner 3D che riesce a creare un modello geometrico in tre dimensioni di quanto si deve produrre. La produzione tramite manifattura additiva è il cuore del programma MPH, in quanto permette la produzione in loco delle parti di ricambio, risolvendo il problema della fornitura dall'esterno di quanto necessario per la produzione.

1.3 Il modello Supply-Chain Operations Reference (SCOR)

Per concludere il capitolo introduttivo di questo elaborato, viene di seguito presentato il modello Supply-Chain Operations Reference (SCOR). Il motivo dell'inserimento di questo paragrafo è che nei capitoli 2 e 3 è stato utilizzato questo schema operativo per la realizzazione della mappatura delle due filiere logistiche presentate, sia nel caso di produzione tradizionale, sia nel caso di adozione dell'Additive Manufacturing.

Il modello Supply-Chain Operations Reference (SCOR)

Il modello Supply-Chain Operations Reference è un framework che permette di analizzare e mappare una filiera logistica prendendo in considerazione la serie di operazioni, processi e attività che avvengono ad ogni nodo della catena (APICS, 2017).

Questo modello considera come fondamentali all'interno di una catena di approvvigionamento cinque processi: pianificazione (plan), approvvigionamento (source), produzione (make), spedizione (delivery) e logistica inversa (return), ovvero il flusso che risale la catena di approvvigionamento dal consumatore finale al produttore. Una rappresentazione grafica dei cinque processi che compongono il modello SCOR è riportata in Figura 1.11:

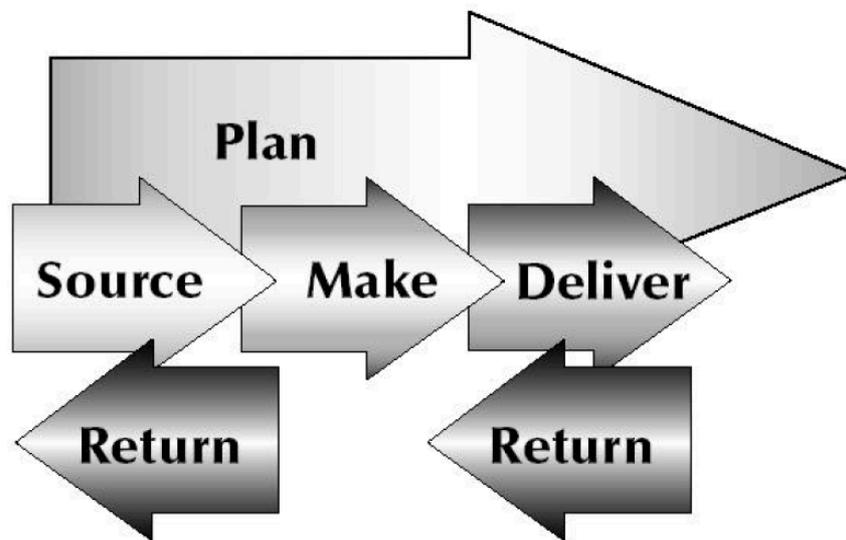


Figura 1.11 Rappresentazione grafica del livello 1 del modello SCOR (APICS, 2017)

Il modello SCOR, inoltre, identifica cinque attributi chiave nelle performance della supply chain: affidabilità, tempo di risposta, agilità, costi e gestione delle risorse. Sono tre i livelli di dettaglio considerati: l'ambito generale (livello 1), in cui si deve distinguere esclusivamente il tipo di processo considerato, la configurazione e il tipo di supply chain (livello 2), livello in cui il processo individuato viene scomposto a seconda della filosofia di gestione della filiera logistica e delle singole specifiche operative, ad esempio se si opera seguendo una gestione Make-to-Stock o Make-to-Order, e gli elementi di dettaglio dei processi (livello 3), cioè tutte le singole attività che compongono un macro-processo. Ad esempio, se si considera la spedizione come processo principale le singole attività potrebbero essere "Receive, Enter & Validate order", "Consolidate orders" e "Load vehicle, generate ship docs, verify credit & ship products". Al di sotto del livello 3, le imprese decompongono ulteriormente i processi per implementare specifiche pratiche di gestione. È a questo livello che le imprese definiscono i modi per raggiungere un vantaggio competitivo sul mercato e adattare i propri processi alle condizioni di business quando queste ultime variano all'interno del mercato. Il modello

Il modello Supply-Chain Operations Reference (SCOR)

SCOR aiuta le imprese ad esaminare e misurare i loro processi all'interno della supply chain, per determinare dove esistono debolezze e quindi individuare possibili aree di miglioramento.

Un elemento di pianificazione è un processo che adegua le risorse attese in modo tale da soddisfare la domanda e viene indicato con la lettera P. Un processo di pianificazione bilancia la domanda aggregata lungo un determinato orizzonte temporale. Un processo di esecuzione è generalmente innescato da una domanda pianificata o attuale e include le attività di schedulazione della produzione, di sequenziamento delle risorse, di trasformazione delle risorse e attività relative a servizi, quali ad esempio servizi di trasporto. I processi di abilitazione preparano, mantengono e gestiscono le informazioni o le relazioni tra i processi di pianificazione e di esecuzione. Nel modello SCOR sono usate delle notazioni standard: come detto, la lettera P indica elementi di pianificazione, la lettera S indica elementi di risorse, la lettera M indica elementi di manifattura, la lettera D indica elementi di spedizione, la lettera R indica elementi di logistica inversa. Una E prima di qualsiasi altra lettera indica che l'elemento di processo è un elemento di abilitazione all'esecuzione associato ad un elemento di pianificazione o di esecuzione (ad esempio EP sta ad indicare un elemento che abilita la pianificazione).

Oltre alla mappatura delle attività svolte, nel modello Supply-Chain Operations Reference vengono indicati per ogni elemento di livello tre dei KPI, cioè degli indicatori di performance, e delle cosiddette "best practice", ovvero dei comportamenti consigliati per ottenere risultati migliori in termini di prestazioni. I KPI vengono classificati in cinque categorie:

- Reliability (Affidabilità), sono gli indicatori che esprimono, generalmente in termini percentuali, con quale precisione e accuratezza vengono svolti i processi;
- Responsiveness (Tempestività), sono indicatori che misurano i tempi di risposta dei processi, ad esempio calcolando il periodo di tempo che intercorre dall'immissione nel processo degli input fino all'uscita degli output;
- Agility (Flessibilità), sono gli indicatori che cercano di catturare la flessibilità con cui vengono svolti i processi, ovvero quali sono i tempi con cui un processo viene eseguito correttamente quando le condizioni iniziali deviano da quelle standard;
- Cost (Costi), sono gli indicatori economici dei singoli processi;
- Asset management (Gestione degli asset), sono indicatori che esprimono come vengono gestiti gli asset utilizzati dai processi, ad esempio il magazzino e la gestione delle scorte.

Descrivere una supply chain utilizzando il modello SCOR permette di dare un'idea chiara e precisa sia di filiere logistiche molto semplici, sia di catene di approvvigionamento molto lunghe e articolate, magari formate da svariate imprese appartenenti a settori diversi tra loro. Ciò che si ottiene, quindi, è la rappresentazione tramite un set di elementi comuni a tutta la supply chain di tutte le imprese che la compongono, come mostrato nella Figura 1.12:

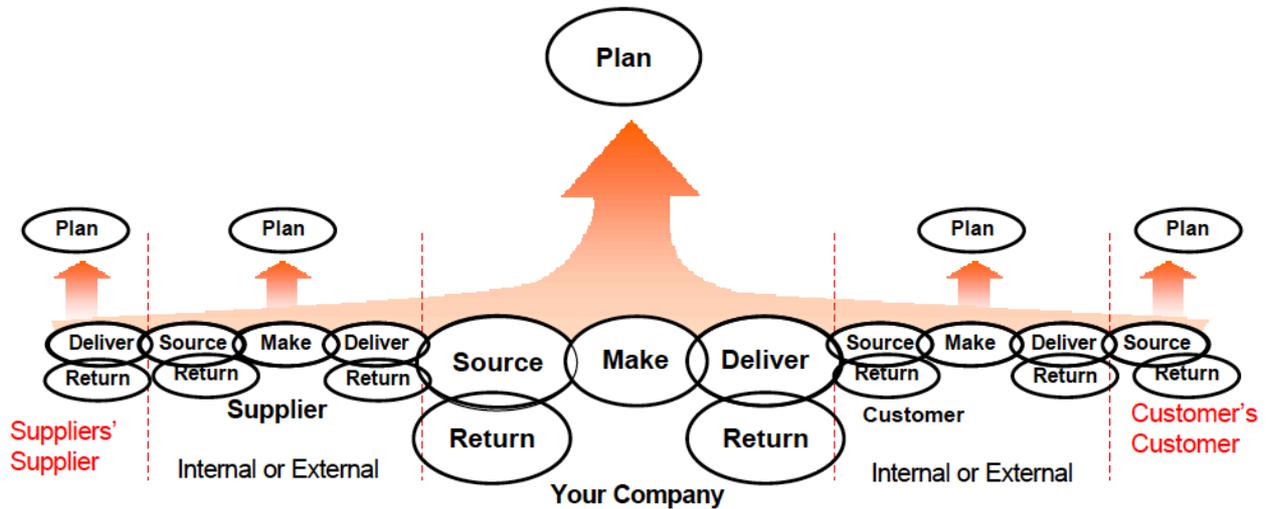


Figura 1.12 Rappresentazione grafica del modello SCOR applicato ad una generica supply chain (APICS, 2017)

1.4 Individuazione dei research gap di letteratura

Presentata la supply chain in un contesto generale e nell'ambito degli assiemi meccanici, con i relativi possibili cambiamenti imputabili all'adozione dell'Additive Manufacturing, è necessario a questo punto della trattazione individuare i research gap di letteratura che la tesi contribuisce a colmare. Ciò che emerge dall'analisi degli articoli accademici pubblicati finora, presentati nei paragrafi 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3, 1.2.4, 1.2.5, 1.2.6 e 1.2.10, è che ci sono principalmente due filoni di studi, ovvero articoli riguardanti gli effetti della nuova tecnologia di produzione a livello di accorciamento della supply chain, cioè l'eliminazione di alcuni nodi intermedi tra produttore e consumatore, ad esempio in Pérès et al., 2006, Emelogu et al., 2018 e Li et al., 2017, ed altri articoli sugli effetti a livello economico, cioè analisi sul trade-off tra l'eventuale aumento dei costi di materie prime per la produzione tramite manifattura additiva e la diminuzione dei costi di gestione del magazzino e dei costi di trasporto tra un nodo ed il successivo all'interno della filiera, per esempio nelle pubblicazioni Holmström et al., 2017, Gibson et al., 2015 e Minguella-Canela et al., 2017.

Da quanto detto emerge che esistono due ambiti di studio che sono ancora poco affrontati dalle analisi accademiche pubblicate:

- Il primo è quello riguardante il cambiamento nella gestione delle informazioni che devono fluire lungo la filiera. Con l'adozione dell'Additive Manufacturing, infatti, si potrebbero avere casi in cui il consumatore non riceve il prodotto finale ma solamente il suo progetto, ad esempio tramite un file CAD che ne rappresenta il modello tridimensionale, e poi produrre autonomamente quanto ricevuto, per ipotesi tramite stampanti 3D (Tuck et al., 2007). In questo caso si deve gestire una quantità maggiore di informazioni, banalmente anche solo per garantire che il consumatore che riceve il progetto del prodotto non lo divulghi ad altri. Tuttavia, questo research gap non è stato analizzato nel dettaglio in questo elaborato, in quanto ci si è concentrati sulla quantificazione a livello dei tempi di trasporto e delle scorte di sicurezza e dei relativi cambiamenti nel passaggio dalla manifattura tradizionale a quella additiva e non sul flusso delle informazioni lungo la filiera logistica.
- Il secondo ambito scarsamente dibattuto in letteratura è come cambiano le relazioni tra i nodi della supply chain e la struttura stessa della filiera logistica. In particolare, ciò che deve essere analizzato più approfonditamente è cosa varia nel passaggio dalla produzione tradizionale alla produzione tramite Additive Manufacturing nel caso in cui il prodotto finale sia un assemblato in materiale polimerico. L'obiettivo è quindi quello di comprendere meglio se esistono dei nodi all'interno delle filiere attuali che possono essere eliminati e, nel caso in cui ci fossero, se questi possano essere convertiti, ad esempio in centri di smistamento di materie prime, o se debbano essere semplicemente dismessi ed eliminati dalla catena di approvvigionamento. Questo secondo research gap individuato è stato analizzato all'interno della tesi di laurea nei capitoli due e tre.

In entrambi i casi reali riportati è stato mappato lo scenario in cui la produzione avviene tramite manifattura tradizionale, che rappresenta dunque lo stato *as is*, dopodiché sono stati ipotizzati due sviluppi, uno con Additive Manufacturing centralizzato, ovvero una filiera in cui la produzione avviene tramite manifattura additiva in un nodo a monte ed i prodotti finali vengono fatti fluire verso il consumatore finale attraverso dei nodi intermedi, che hanno quindi funzione esclusivamente di capillarizzazione della distribuzione, e uno con Additive Manufacturing distribuito, cioè una catena di approvvigionamento in cui la produzione avviene nei nodi direttamente a contatto con il cliente finale ed i collegamenti a monte riguardano solamente informazioni e materie prime da utilizzare nel processo di manifattura. L'obiettivo di questa tesi, infatti, è quello di comprendere quali possano essere i cambiamenti e gli impatti dell'Additive Manufacturing sulla supply chain di assieme in materiale polimerico, cioè

Individuazione dei research gap di letteratura

comprendere quale possa essere una ipotetica filiera logistica *to be*, e per farlo è stato necessario in primo luogo analizzare quali e quanti nodi della catena vengano mantenuti in una futura configurazione ed in seguito capire quali informazioni debbano fluire lungo la supply chain, cercando di individuare possibili differenze con il caso in cui la produzione avvenga tramite manifattura tradizionale.

2 Primo caso di studio: la supply chain degli F-18 Super Hornet

In questo capitolo è stato analizzato come l'Additive Manufacturing, introdotto nel capitolo 1, possa impattare sulla supply chain del condotto di aerazione degli F-18 Super Hornet. La scelta del caso di studio è stata dettata dal fatto che l'impresa produttrice dei velivoli considerati, la Boeing, ha implementato l'utilizzo della manifattura additiva per alcune parti di ricambio dei suoi prodotti, tra cui l'assieme meccanico studiato, ed è quindi stato possibile riportare dati tratti dalla realtà e dalla letteratura accademica disponibile. È stato scelto questo ambito di applicazione, inoltre, perché attualmente è in questo mercato che la nuova tecnologia produttiva si sta diffondendo più rapidamente, in virtù del fatto che i prodotti da realizzare sono spesso poco movimentati e rimangono per lunghi periodi nei magazzini dei produttori e quindi avere a disposizione una tecnologia che permetta di produrre solamente quando si realizza la domanda potrebbe far diminuire notevolmente i costi di mantenimento a magazzino e di gestione delle scorte. L'analisi è stata condotta principalmente sugli aspetti che, almeno in prima battuta, sono presumibilmente impattati maggiormente dal cambio di tecnologia di fabbricazione: tempi di produzione, gestione del magazzino e delle scorte, lead time tra fornitori e consumatori e rapporti tra fornitori di materie prime e impianti manifatturieri.

2.1 Descrizione della supply chain

Nel mercato aeronautico la creazione di valore per il consumatore è collegata al mantenimento dei velivoli nella condizione di poter essere operativi. I servizi di Manutenzione, Riparazione e Operations (MRO services) sono collegati all'accessibilità delle parti di ricambio e all'abilità di soddisfare la domanda quando e dove si realizza. L'abilità di fornire i prodotti necessari con livelli di servizio molto elevati e bassi livelli di costo è una delle sfide più grandi in questo mercato. Le imprese che fanno parte di una supply chain tradizionale appartenenti a questo mercato sono spesso costrette ad investire molto nella fornitura delle parti di ricambio e nei magazzini per ottenere un alto tasso di soddisfazione della domanda. Il bisogno di avere ingenti magazzini rappresenta in ogni caso un costo in termini di obsolescenza e di capitale investito. Inoltre, le parti di ricambio sono classificabili come slow-moving parts, cioè parti generalmente poco movimentate. Nel 1985 in America le compagnie aeree hanno speso 241 milioni di dollari per questo tipo di servizi, saliti a 2.4 miliardi di dollari nel 1999 (Canaday, 2000) e a 69,2 miliardi di dollari nel 2017 (Wyman, 2017). Il mercato globale dei MRO services è stato di 38,3 miliardi di dollari a livello mondiale nel 2005 (Jackman, 2006) e di 75,6 miliardi di dollari nel 2017 (Wyman, 2017). Nel 2006 la flotta totale di

Descrizione della supply chain

velivoli commerciali a livello mondiale era pari a 17.000 unità e, assumendo un costo di inventario pari al 17% e che non ci siano altri costi per avere disponibili le parti di ricambio, l'ammontare totale del mercato delle parti di ricambio per gli aerei è stato pari a 7,5 miliardi di dollari, che significa che ogni aereo aveva a disposizione 2,6 milioni di dollari di parti di ricambio.

Una delle decisioni che potrebbe causare un miglioramento significativo nelle performance delle supply chain delle parti di ricambio in un contesto di questo tipo è cambiare la localizzazione degli impianti di produzione (Khajavi et al., 2014). Esistono due opzioni principali per farlo: concentrare gli impianti di produzione in una localizzazione centralizzata e servire l'intero mercato da questa localizzazione oppure decentralizzare la produzione in più impianti, vicini ai maggiori mercati di riferimento. Decisioni di questo tipo influenzano non solo la configurazione della supply chain ma anche aspetti economici dell'impresa come ad esempio i lead time, i livelli di servizio offerti e la profittabilità. Per quanto detto, è evidente che la scelta di variabili di questo tipo è un fattore molto importante per la competitività dell'impresa sul mercato. Per comprendere come l'Additive Manufacturing influenzi questo tipo di decisioni, è possibile fare riferimento ad un esempio reale, la supply chain dei condotti di raffreddamento degli F-18 Super Hornet, una cui rappresentazione di partenza per questo elaborato è stata tratta da Khajavi et al., 2014.

Il metodo di analisi sviluppato di seguito fa riferimento ad una modellazione per scenari in cui l'obiettivo è la rappresentazione di come avviene la produzione tramite Additive Manufacturing delle parti di ricambio per i jet Super Hornet. Questo tipo di velivoli conta approssimativamente cento condotti di raffreddamento producibili tramite Additive Manufacturing.

Nel 2000, la marina militare statunitense ha selezionato l'impresa Boeing come appaltatore per lo sviluppo di jet F/A-18E/F Super Hornet. L'obiettivo del progetto era quello di ridurre i costi di produzione della fusoliera anteriore e di rendere il ciclo di produzione più corto di sedici mesi, facendolo passare da trentaquattro a diciotto. Inoltre, altri obiettivi erano aumentare la qualità del prodotto e aggiungere sei sistemi avionici (Khajavi et al., 2014). Per la produzione dei condotti di raffreddamento, con l'obiettivo di soddisfare i requisiti funzionali e le limitazioni imposte, fu scelta la tecnologia di produzione tramite sinterizzazione laser selettiva (SLS), cioè una tecnica di Additive Manufacturing, come mostrato nella Figura 2.1:

Come introdurre l'Additive Manufacturing nella supply chain

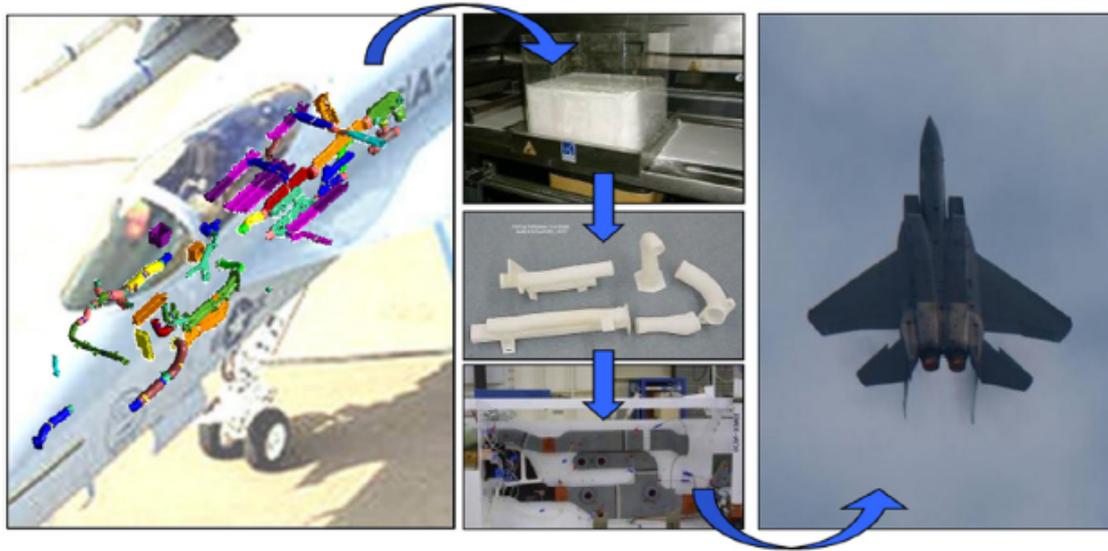


Figura 2.1 Progettazione, produzione, testing e implementazione dei condotti di raffreddamenti prodotti tramite AM (Khajavi et al., 2014)

Questo tipo di tecnologia di produzione ha reso possibile per gli ingegneri combinare i diversi condotti in singole parti, integrare i meccanismi di assemblaggio e ridurre il numero totale di parti dell'assieme complessivo. I risultati di quanto detto sono traducibili in una semplificazione dei processi di installazione e nella riduzione del peso dell'assieme.

2.2 Come introdurre l'Additive Manufacturing nella supply chain

Come è stato sottolineato nel Capitolo 1, esistono due approcci per integrare l'Additive Manufacturing nella supply chain tradizionale: il primo è quello di sostituire il magazzino centrale con un impianto di produzione, come mostrato nella Figura 2.2, mentre il secondo è quello di sostituire tutti i magazzini finali con impianti di produzione tramite manifattura additiva, eliminando generalmente i magazzini intermedi di parti di ricambio, come mostrato nella Figura 2.3.

Come introdurre l'Additive Manufacturing nella supply chain

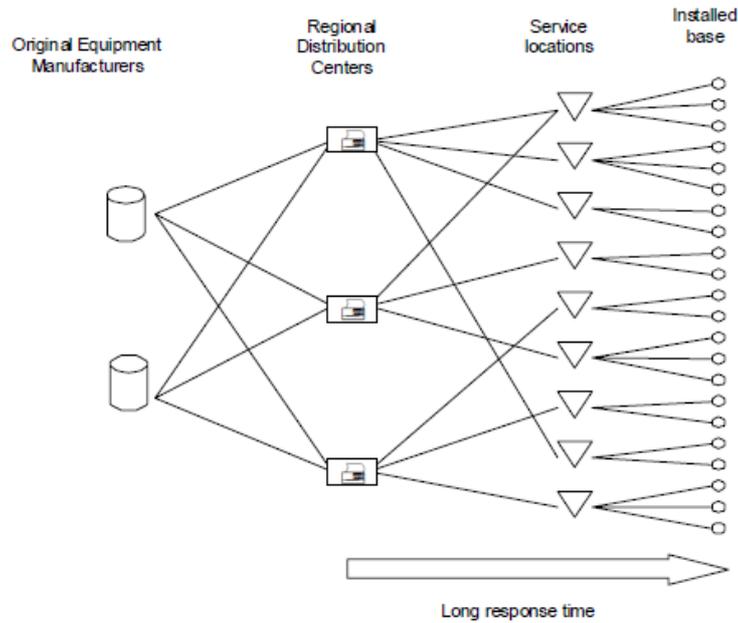


Figura 2.2 Supply chain con Additive Manufacturing centralizzato (Holmström et al., 2010)

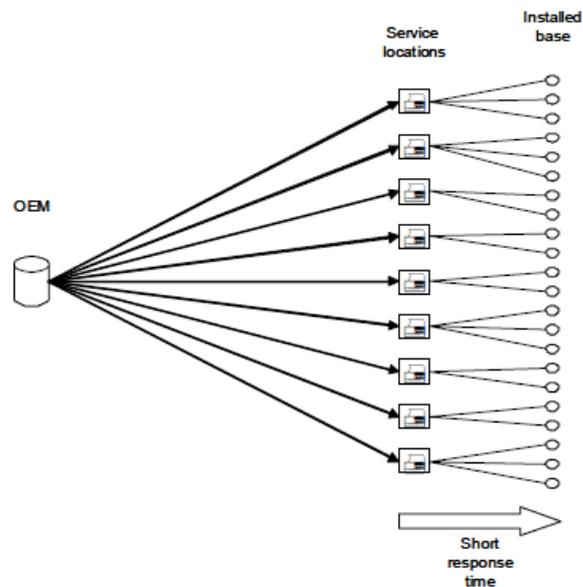


Figura 2.3 Supply chain con Additive Manufacturing distribuito (Holmström et al., 2010)

Nel primo caso, ovvero l'introduzione dell'Additive Manufacturing in modo centralizzato, a monte della supply chain vengono posti dei centri di produzione, da cui poi le parti realizzate discendono la filiera tramite centri di distribuzione e nodi intermedi fino al consumatore finale. Nel secondo caso, cioè il caso in cui la manifattura additiva viene introdotta a valle della supply chain, il cosiddetto Additive Manufacturing distribuito, la produzione avviene a ridosso del consumatore finale e si hanno molti centri di produzione, che ricevono le materie prime da un unico nodo a monte.

Per ridurre il bisogno di avere magazzini molto grandi, le compagnie aeronautiche hanno individuato la soluzione nel diminuire i lead time ed i costi di spedizione (Holmström et al., 2010). La supply chain delle parti di ricambio, in questo senso, è molto interessante, in quanto ha costi di magazzino molto elevati, stimati intorno ai 7,5 miliardi di dollari, circa 400.000 dollari per aereo, su scala annuale nel 2009. L'OEM in questo caso è in grado di offrire benefici all'intera supply chain grazie alla possibilità di rendere disponibili in modo migliore e più efficiente il servizio di parti di ricambio. Tutto ciò è stato reso possibile grazie all'innovazione e all'introduzione nella supply chain dell'Additive Manufacturing, che permette la produzione distribuita nei nodi finali della catena di approvvigionamento.

Lo sviluppo di una produzione distribuita grazie alla manifattura additiva in questo settore non riduce il bisogno di parti di ricambio ma supporta in modo più veloce e più affidabile la riparazione e la manutenzione dei velivoli e delle loro componenti. Il beneficio potenziale di uno sviluppo distribuito è la riduzione del bisogno di avere le parti di ricambio a disposizione in magazzino ed i tempi di non operatività degli aerei dovuti a guasti. Ciò porta inevitabilmente alla riduzione del bisogno di unità di rimpiazzo e quindi ad un loro maggiore utilizzo nel tempo.

I potenziali benefici dell'Additive Manufacturing nella supply chain delle parti di ricambio sono molto significativi. Se prendiamo ad esempio un magazzino di parti di ricambio per un Airbus, al suo interno sono presenti 120.000 componenti, di cui l'80% è utilizzato solamente poche volte in un anno. Tutte le componenti, però, devono essere disponibili quando necessario. Se i modelli di aerei aumentassero, i problemi di magazzino relativi a queste parti di ricambio slow-moving sarebbero enormi. L'Additive Manufacturing in questo senso potrebbe migliorare la supply chain, rendendo possibile la produzione quando la domanda si realizza, eliminando i magazzini (Ford et al., 2016).

Nell'adottare la nuova tecnologia di produzione, esistono due trade-off che devono essere considerati contemporaneamente: la produzione in grandi volumi rispetto alla produzione guidata dalla domanda e la specializzazione rispetto alla generalizzazione. Le variabili chiave da considerare sono i costi del materiale e della produzione, i costi di distribuzione e di inventario ed i costi del ciclo di vita dei prodotti per i consumatori finali.

Il primo trade-off presentato riguarda i volumi di produzione. Facendo riferimento alla supply chain dei condotti di raffreddamento degli F-18 Super Hornet presentata in precedenza, è possibile notare come la produzione non possa avvenire in grandi volumi, anche se la domanda potrebbe richiederlo, in quanto esistono molte certificazioni e test post-produzione che devono essere soddisfatti affinché

i prodotti realizzati possano essere installati sui velivoli. Per questo motivo, l'Additive Manufacturing in questo caso non può essere utilizzato come metodo di produzione per grandi lotti ma solamente per una produzione guidata dalla domanda.

Un altro aspetto da considerare in questo ambito riguarda i costi dei materiali, i costi di capacità di produzione ed i costi di inventario: è possibile dire che in linea generale i metodi di produzione tradizionali sono in molte situazioni più economici di quelli che sfruttano l'Additive Manufacturing quando si devono produrre grandi volumi. Molti tipi di prodotti che possono essere prodotti tramite manifattura additiva non sono convenienti se si considerano i costi dei materiali ed i costi della capacità produttiva. Lo scenario più economico in questo tipo di situazioni è quello in cui si produce in un impianto centrale tramite una produzione tradizionale e poi si effettua la distribuzione capillare dove c'è domanda. Un alto costo di obsolescenza, però, potrebbe far cambiare l'equilibrio delineato e spostarlo verso i metodi di Additive Manufacturing, che permettono la produzione anche solamente quando la domanda si realizza. Utilizzando i metodi di produzione tradizionale, i costi di produzione sono più alti perché bisognerebbe produrre in piccoli lotti. Con l'Additive Manufacturing, infatti, i costi non dipendono dai lotti di produzione o dalla complessità dei prodotti.

Un secondo trade-off da considerare è lo sviluppo centralizzato o distribuito della supply chain. In questo ambito, il costo del ciclo di vita di un prodotto per il consumatore finale è una delle variabili chiave. Nelle situazioni in cui si crea molto valore tenendo sempre operativi i prodotti considerati, lo sviluppo distribuito della supply chain tramite metodi di Additive Manufacturing è molto interessante. Un esempio di quanto detto si ha nelle applicazioni della manifattura additiva in ambito spaziale e militare. Anche in contesti commerciali, però, dove il costo dei guasti è molto alto, uno sviluppo distribuito è potenzialmente molto attrattivo per le imprese.

2.3 Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

Riassumendo quanto detto fin qui sulla supply chain delle parti di ricambio in ambito aereo, i produttori sono spesso sotto grande pressione in quanto devono fornire prodotti di alta qualità che costano molto in termini di materiali. Per farlo, devono impiegare molte ore lavorative in macchinari di alta precisione, in quanto le parti di ricambio possono avere, nel caso più ottimistico, una tolleranza pari al 2% rispetto alle specifiche di progetto. I tempi di produzione sono quindi molto lunghi quando vengono utilizzati metodi di produzione tradizionale. Non è così raro avere tempi di produzione in termini di mesi per questo tipo di particolari. D'altro canto, però, i consumatori finali, cioè le imprese aeronautiche, richiedono un livello di servizio molto elevato nella soddisfazione della

loro domanda. Ciò si traduce direttamente nel bisogno di avere a disposizione magazzini di parti di ricambio molto grandi, che aumentano significativamente i costi della supply chain. L'utilizzo di metodi di produzione innovativi, come ad esempio l'Additive Manufacturing, crea l'opportunità di produrre le parti di ricambio solamente quando è necessario e ciò potrebbe migliorare molto le dinamiche all'interno della supply chain. Per studiare l'impatto di questa nuova tecnologia di produzione su questo settore, è possibile utilizzare un metodo diverso rispetto ai precedenti, ovvero il modello Supply Chain Operations Reference (SCOR) (Liu et al., 2014).

Il prodotto analizzato è formato da sedici componenti, di cui una rappresentazione esplosa è riportata in Figura 2.4:

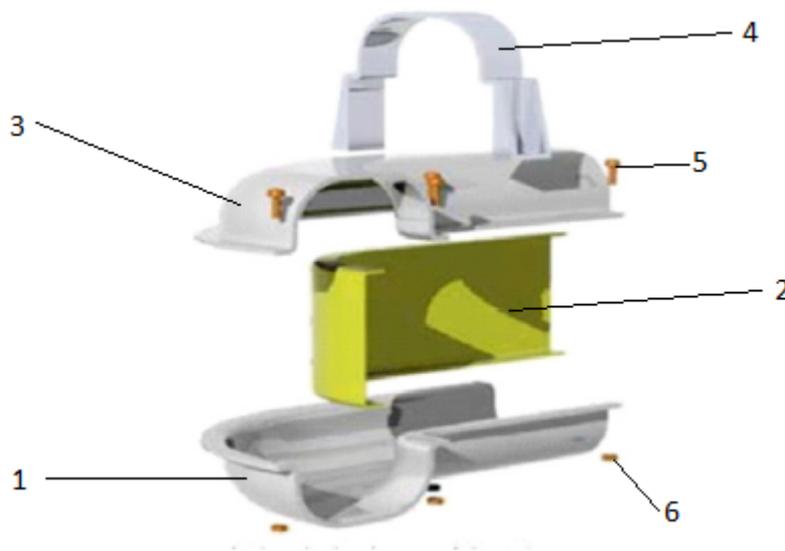


Figura 2.4 Componenti condotto aerazione F-18 Super Hornet (Chopra et al., 2013)

La distinta base dell'assieme considerato è riportata in Tabella 2.1:

<i>Codice</i>	<i>Componente</i>	<i>Quantità</i>
1	Base di alloggiamento	1
2	Separatore flussi aerei	1
3	Chiusura superiore	1
4	Staffa di collegamento	1
5	Vite	6
6	Rondella	6

Tabella 2.1 Distinta base condotto di aerazione degli F-18 Super Hornet

2.3.1 La supply chain tradizionale

La supply chain tradizionale è composta da diversi nodi iniziali, che rappresentano i fornitori di materie prime da cui poi può iniziare la fase di manifattura del condotto di aerazione, che avviene nell'Original Equipment Manufacturing (OEM), che è il nodo responsabile della produzione delle parti di ricambio. I fornitori individuati nella mappatura della filiera logistica sono tre (AirFramer, 2019): Composites Horizons LLC, situata a Covina, in California, a meno di cinquanta chilometri da Los Angeles, Arrowhead Products, la cui base operativa è poco distante da Los Angeles, e Voss Industries Inc., situato a Cleveland, in Ohio. I nodi OEM sono relativi a due impianti operativi di proprietà della Boeing, uno a Los Angeles, in California, e uno a Washington, sulla costa orientale. Geograficamente, la distribuzione dei primi nodi della catena logistica in analisi è riportata in Figura 2.5:



Figura 2.5 Rappresentazione della distribuzione sul territorio USA di fornitori (S) e OEM

Di seguito ai nodi OEM sono presenti i centri di distribuzione regionali (RDC) e di manutenzione, riparazione e revisione (MRO). Gli RDC distribuiscono le parti di ricambio ai diversi nodi della supply chain in cui vengono sostituite le parti del velivolo difettose (Service Location, SL). Le parti di ricambio sono ricevute sotto forma di assiemi già assemblati (Line Replaceable Unit, LRU). Nei centri operativi delle compagnie aeree sono presenti scorte di subassemblati pronti per l'utilizzo. Una rappresentazione schematica ottenuta applicando il modello SCOR alla filiera logistica presentata è nella Figura 2.6:

Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

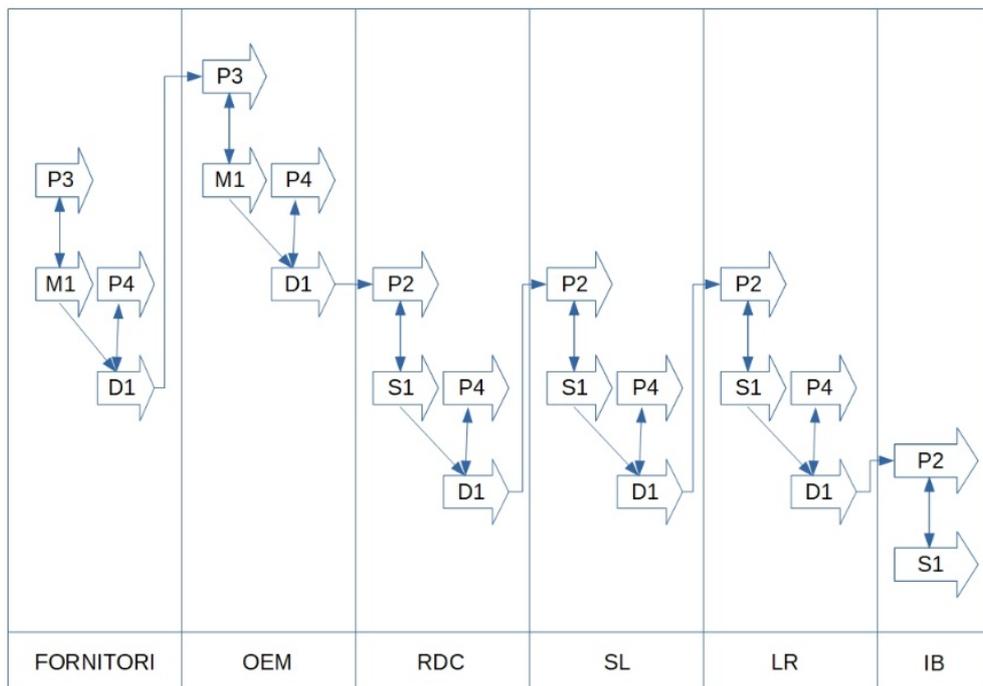


Figura 2.6 Mappatura secondo il modello SCOR della supply chain tradizionale

Come visibile dalla Figura 2.6, nei nodi relativi ai fornitori di materie prime la prima attività da svolgere è la pianificazione della produzione (elemento P3), seguita dalla produzione vera e propria (M1), dalla pianificazione della spedizione ai nodi a valle (P4) e dalla spedizione (D1). Una volta che il materiale è arrivato nel nodo Original Equipment Manufacturing (OEM), viene pianificata la produzione, questa volta del condotto di aerazione, come mostrato dall'elemento P3, dopodiché viene effettuata la produzione (M1), viene pianificata la spedizione nei nodi a valle (P4) ed infine viene eseguita la spedizione (D1). Nei nodi Regional Distribution Center (RDC), Service Location (SL) e nei nodi in cui si accumulano le parti di ricambio (Line Replaceable Unit, LRU), che sono tutti nodi intermedi di transito, smistamento e giacenza di scorte, viene pianificata l'allocazione delle risorse disponibili (elemento P2), dopodiché viene eseguita l'allocazione in base alla domanda dei nodi a valle (S1), viene pianificata la spedizione (P4) ed infine viene eseguita la spedizione (D1). Nel nodo finale della filiera, il nodo Installed Base (IB), cioè nei nodi in cui viene eseguito effettivamente il montaggio sui velivoli dei prodotti, avviene una pianificazione iniziale delle risorse ricevute dai nodi a monte (P2) e successivamente vengono utilizzate le risorse (S1).

Volendo analizzare più nel dettaglio la supply chain dell'assieme di materiale polimerico che compone il condotto di aerazione degli F-18 Super Hornet, è possibile raggiungere il livello tre del modello SCOR, ovvero il livello di dettaglio in cui si considerano i processi relativi a ciascun elemento che compone la supply chain.

Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

Per quanto riguarda l'OEM, ovvero il nodo responsabile della produzione delle parti di ricambio, si ottiene quanto schematizzato in Figura 2.7, in cui, come per le altre figure proposte nel seguito del capitolo, tra parentesi sono state indicate le attività standard del modello SCOR:

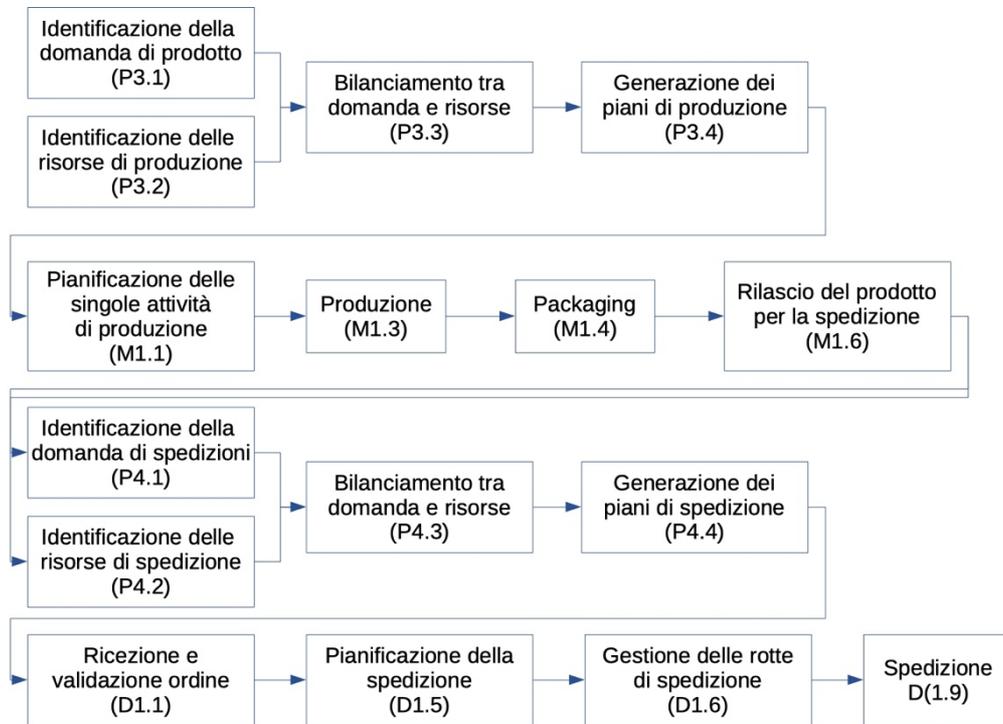


Figura 2.7 Schema delle attività del modello SCOR (livello 3) relativo al nodo OEM e al nodo dei fornitori di materie prime

Per quanto riguarda i due nodi appartenenti alla categoria Maintenance, Repair and Overhaul (MRO), ovvero i nodi relativi ai centri di distribuzione regionali (RDC) ed i nodi relativi ai punti operativi distribuiti capillarmente sul territorio (SL), oltre che al primo dei due nodi di responsabilità diretta degli operatori aerei, ovvero il nodo di stoccaggio delle parti di ricambio, indicato con LR, come visto nel livello due del modello SCOR, hanno la stessa identica struttura, che esplosa fino al livello tre si presenta come in Figura 2.8:

Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

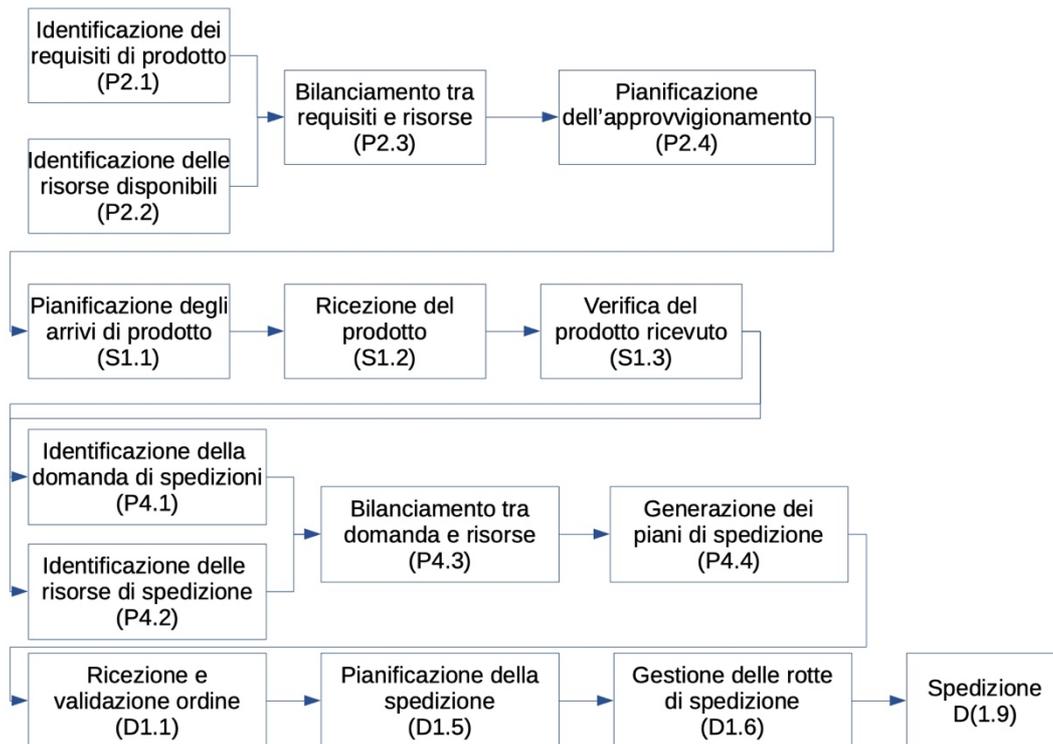


Figura 2.8 Schema delle attività relativo al livello tre del modello SCOR ai nodi RDC, SL, LR

Rispetto al nodo di competenza dell'OEM, è solo la parte iniziale del modello che cambia; in particolare, è stato inserito un elemento P2 (Pianificazione dell'approvvigionamento) al posto dell'elemento P3 (Pianificazione della produzione) ed un elemento S1 (Approvvigionamento di prodotto) al posto dell'elemento M1 (Manifattura del prodotto con gestione Make-to-Stock). Ciò è dovuto al fatto che in questi nodi della supply chain non si programma l'allocazione delle risorse di produzione con il fine di fornire ai nodi a valle la merce necessaria, bensì si programma l'allocazione delle risorse in termini di prodotti stoccati nella propria sede, al fine di soddisfare la domanda dei nodi a valle. La differenza tra l'elemento S1 e l'elemento M1, invece, è dovuta al fatto che nei nodi a valle dell'OEM non si produce ma si allocano le giacenze di magazzino in relazione alla domanda proveniente dai nodi successivi nella filiera logistica.

Infine, nell'ultimo nodo della supply chain in cui la produzione avviene tramite manifattura tradizionale, ovvero il nodo che rappresenta ogni singola base in cui operativamente si installano i componenti sui velivoli (Installed Base, IB), l'esplosione al livello tre del modello SCOR si presenta come schematizzato in Figura 2.9:

Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

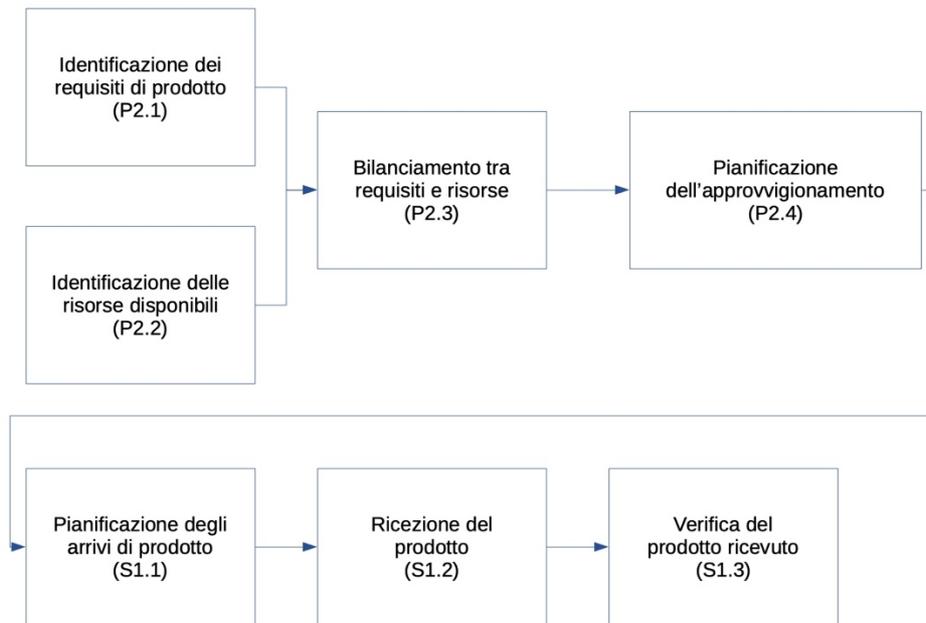


Figura 2.9 Schema delle attività di livello tre del modello SCOR relativo al nodo IB

In questi nodi è stato ipotizzato che l'utilizzo delle risorse stoccate, ovvero le giacenze di prodotto finale, sia prima pianificato in base a previsioni della domanda, come rappresentato dall'elemento P2, e poi, una volta che la domanda si è realizzata, vengano allocate ai singoli consumatori, come rappresentato dall'elemento S1.

Indicatori di performance

Presentata nel paragrafo precedente la mappatura della supply chain, è possibile a questo punto della trattazione fornire dei Key Performance Indicators per capire quali siano le caratteristiche principali della filiera logistica da considerare e comprendere e se vi siano differenze tra gli scenari individuati per quanto riguarda le grandezze da tenere sotto controllo per garantire un adeguato livello di efficienza.

Gli indicatori di performance relativi alla supply chain tradizionale suggeriti dal modello SCOR, raggruppati a seconda del tipo di attività svolta, sono i seguenti:

- Pianificazione della produzione (P3): gli indicatori selezionati dal modello SCOR hanno l'obiettivo di misurare gli scostamenti tra la programmazione iniziale ed i dati di produzione effettivi, al fine di comprendere se la pianificazione fatta ex-ante rispecchia effettivamente quanto è domandato dal consumatore a valle:
 - Aderenza al piano di produzione, calcolata come rapporto tra la produzione effettiva e la produzione teorica in un intervallo di tempo, ad esempio per ogni mese

- Accuratezza della previsione, calcolata come rapporto tra la domanda ipotizzata in un arco temporale e la domanda effettiva nello stesso periodo di tempo
- Tempo di produzione totale, calcolato come percentuale del tempo operativo totale
- Magazzino totale dei semilavorati, indicato come capitale immobilizzato in magazzino sotto forma di semilavorati
- Produzione Make-to-Stock: in questo caso sono stati selezionati dal modello SCOR indicatori di performance prettamente relativi alla produzione dell'assemblato meccanico in esame. Questi KPI hanno l'obiettivo di rendere un quadro d'insieme di come avviene la manifattura, dei tempi impiegati e dei relativi costi:
 - Costo della produttività a valore aggiunto, calcolato come rapporto tra il prezzo delle attività di produzione che aggiungono valore al prodotto finale ed il costo di produzione totale
 - Costo operativo dell'impianto di produzione per unità di tempo
 - Costo unitario di produzione
 - Costo globale di produzione
 - Utilizzo della capacità produttiva, calcolato come rapporto tra il tempo impiegato effettivamente nella produzione ed il tempo totale operativo dell'impianto
 - Costo totale delle risorse utilizzate nella produzione
 - Utilizzo della capacità produttiva, calcolato come rapporto tra il tempo impiegato effettivamente nella produzione ed il tempo totale operativo dell'impianto
 - Rendimento di produzione, calcolato come percentuale dei pezzi non difettosi in relazione ai pezzi totali prodotti
 - Spese di scarto, ovvero totale dei costi totali della produzione di pezzi difettosi
- Pianificazione della spedizione (P4): i KPI individuati per le attività connesse alla pianificazione delle spedizioni a valle rappresentano misure degli scostamenti tra quanto è stato previsto e quanto è avvenuto effettivamente, oltre ad una visione di alto livello sui costi sostenuti:
 - Accuratezza della previsione, calcolata come percentuale delle spedizioni effettuate secondo la schedulazione originaria rispetto alle spedizioni totali
 - Tempo totale del processo di gestione dell'ordine
 - Costi di spedizione totali

- Inventory Position dell'inventario, calcolato come giacenze reali in magazzino più ordini già effettuati
- Tempo di processo di gestione degli ordini
- Performance di consegna in relazione alla data di consegna richiesta dal cliente
- Spedizione di prodotto finito (D1): gli indicatori di performance selezionati dal modello SCOR nel caso degli elementi che rappresentano attività di spedizione dei prodotti finiti tengono conto dei tempi impiegati, cioè dei vari lead time, dei costi e delle performance, ad esempio mettendo in relazione la data di consegna reale con quella richiesta dal cliente:
 - Lead time reale di consegna al cliente della merce stoccata
 - Costo totale del processo di gestione degli ordini
 - Accuratezza delle spedizioni, calcolata come percentuale delle spedizioni non arrivate al cliente rispetto alle spedizioni totali
 - Performance di consegna in relazione alla data richiesta dal cliente
 - Costi di trasporto totali
- Pianificazione dell'approvvigionamento (P2): gli indicatori di performance scelti per questo tipo di attività hanno l'obiettivo di quantificare i lead time previsti per l'approvvigionamento, i costi di gestione e le performance da parte dei fornitori, ad esempio come percentuale delle spedizioni in tempo rispetto alle spedizioni totali:
 - Spedizioni in tempo da parte dei fornitori, calcolate come percentuale sulle spedizioni totali
 - Accuratezza della previsione, calcolata come rapporto tra la domanda reale e la domanda prevista in un determinato arco temporale
 - Performance di spedizione da parte dei fornitori, calcolate come percentuale delle spedizioni in tempo in relazione alle spedizioni totali
 - Tasso di soddisfazione della domanda da parte del fornitore, calcolato come percentuale delle richieste soddisfatte dal fornitore rispetto alle richieste totali
- Approvvigionamento (S1): in questo caso, i KPI scelti danno una visione complessiva delle performance da parte dei fornitori a monte, dei tempi impiegati per far fluire lungo la filiera logistica la merce spedita ed i relativi costi:
 - Percentuale di ordini ricevuti senza danneggiamenti rispetto agli ordini ricevuti totali

Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

- Percentuali di ordini ricevuti in tempo rispetto alla richiesta rispetto agli ordini ricevuti totali
- Tempo totale del processo di ricezione degli ordini
- Rapporto tra costo del processo di ricezione degli ordini per ogni prodotto e costo di acquisto unitario

2.3.2 La supply chain con Additive Manufacturing centralizzato

Nello scenario in cui nella supply chain venga adottato l'Additive Manufacturing in modo centralizzato, ovvero implementando la nuova tecnologia di produzione in uno dei livelli a monte e utilizzando i nodi a valle come centri di smistamento e capillarizzazione della distribuzione, la nuova tecnologia di produzione è introdotta come nella Figura 2.10:

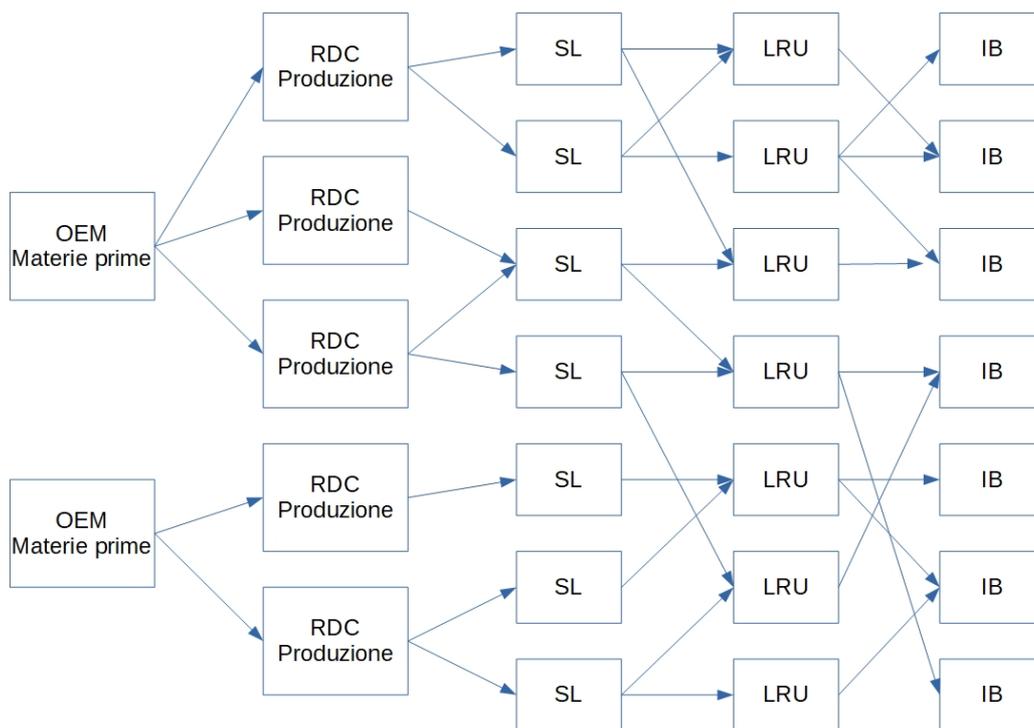


Figura 2.10 Rappresentazione schematica della supply chain nel caso di Additive Manufacturing centralizzato e installato negli RDC

In questa configurazione, l'impianto di produzione è costruito all'interno degli RDC, ovvero nei centri di distribuzione regionali. Questi particolari sono prodotti in modo make-to-order e sono richieste scorte di sicurezza per mantenere alti livelli di servizio. Come detto all'inizio del capitolo, i livelli di servizio devono essere molto vicini al 100% in quanto i velivoli devono essere sempre operativi. In questo scenario, gli OEM, cioè i nodi Original Equipment Manufacturing, provvedono alla fornitura delle materie prime per gli impianti con manifattura additiva. Le materie prime non sono più, come quando si è considerato il caso di manifattura tradizionale, i subassemblati che compongono il prodotto finale, ma sono i materiali polimerici da processare con manifattura additiva per la creazione delle parti di ricambio e dei prodotti da installare sui velivoli. In questo scenario, si hanno impianti produttivi più distribuiti sul territorio: i centri di distribuzione regionali sono maggiori in numero ai due nodi OEM. La conseguenza di questo iniziale decentramento della produzione è che le scorte di sicurezza da avere in ogni impianto produttivo

sono minori, proprio perché la domanda per ogni singolo nodo produttivo diminuisce (con la manifattura tradizionale si avevano due nodi in cui si produceva il prodotto finale, mentre in questo scenario i nodi in cui avviene la produzione sono maggiori in numero e quindi la domanda specifica diminuisce).

Al fine di calcolare le scorte di sicurezza lungo la filiera di approvvigionamento sono state fatte alcune ipotesi: la prima è che la domanda finale ed i lead time seguano una funzione di distribuzione normale, cioè che abbiano un valore medio ed una deviazione da questo valore misurabile statisticamente; la seconda ipotesi è che il livello di servizio che si vuole garantire nei livelli a valle della supply chain è pari al 95%. Tale ipotesi è dovuta al fatto che, come evidenziato nell'introduzione del capitolo, gli aerei non possono essere fermati a causa della mancanza di un pezzo di ricambio altrimenti si incorrerebbe in costi molto elevati.

È quindi possibile calcolare le scorte di sicurezza come (Brandimarte et al., 2007):

$$SS = z * \sqrt{AVGL * STD^2 + AVG^2 * STDL^2}$$

in cui con z è una costante associata al livello di servizio, che in questo caso è stata supposta pari a 1,65, dovuto al fatto che il livello di servizio desiderato è pari al 95%, $AVGL$ e $STDL$ sono media e varianza del lead time tra i nodi in cui sono stoccati i prodotti ed i nodi immediatamente a valle, ovvero tra i fornitori e gli impianti in cui si realizza la domanda, supponendo che questo segua una funzione di distribuzione normale, e AVG ed STD sono media e varianza della domanda, supponendo che questa segua una funzione di distribuzione normale. Nella formula appena presentata, rispetto al caso in cui la produzione avveniva con manifattura tradizionale, rimangono invariati i parametri che descrivono il lead time, mentre diminuisce la media della domanda, facendo diminuire di conseguenza anche le scorte di sicurezza. A proposito di $AVGL$, è necessario precisare che questo valore indica esclusivamente il tempo di trasporto totale da un nodo all'altro della supply chain e non il tempo di evasione di un ordine.

È possibile a questo mappare la supply chain nello scenario in cui viene ipotizzato che la produzione avviene tramite Additive Manufacturing centralizzato. Uno schema rappresentativo della filiera logistica risultante, elaborato ai fini di questa analisi, è mostrato in Figura 2.12:

Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

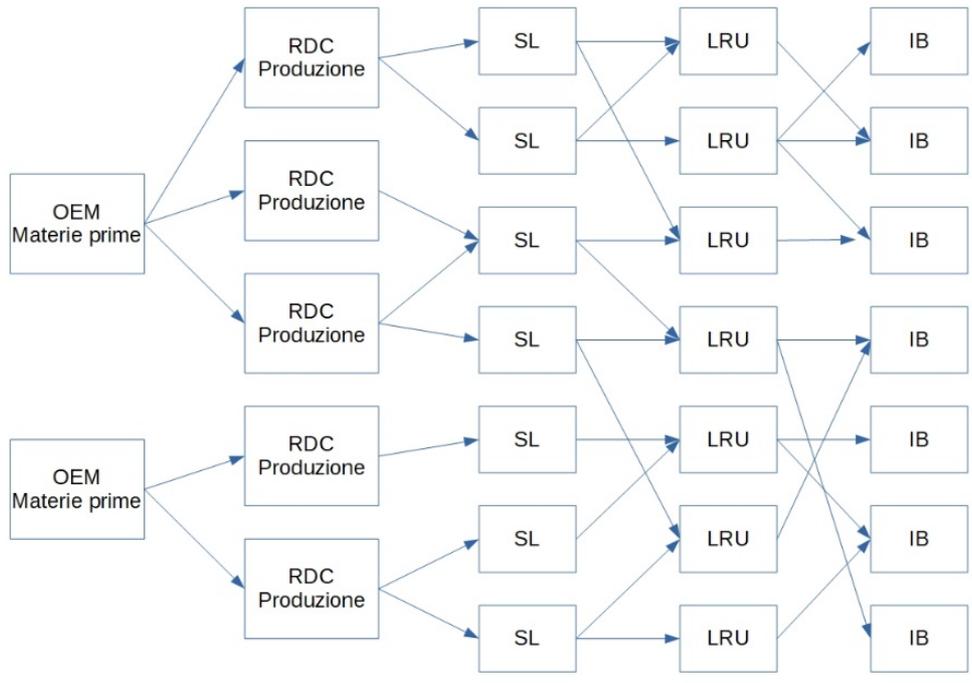


Figura 2.11 Supply chain con Additive Manufacturing centralizzato

Nella Figura 2.12 è mostrata una rappresentazione della supply chain in esame secondo il livello due del modello SCOR:

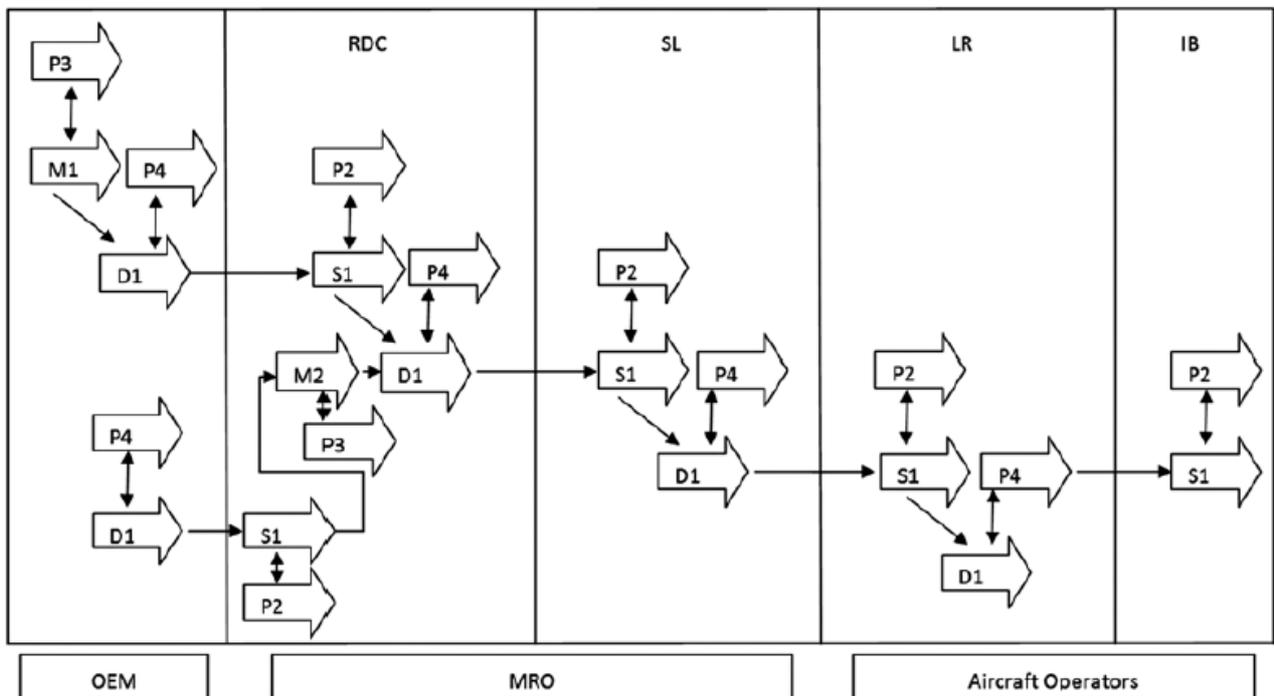


Figura 2.12 Modello SCOR della supply chain con Additive Manufacturing centralizzato (Liu et al., 2014)

Come visibile, nel modello SCOR sono state inserite delle attività aggiuntive nei nodi OEM e nei nodi RDC: in questo scenario, nel nodo OEM, oltre alla pianificazione della produzione di materie prime,

che in questo caso segue una filosofia make-to-stock, alla loro allocazione, alla pianificazione della spedizione ed alla spedizione vera e propria (attività P3, M1, P4 e D1, rispettivamente), è stato aggiunto l'elemento P4, che sta ad indicare che in questi nodi viene effettuata la pianificazione della fornitura a livello di intera supply chain, cioè vengono fatte previsioni sulla domanda finale, in modo tale da pianificare la produzione dell'assemblato finale, che avviene nel livello successivo, e distribuirla ai vari centri regionali di distribuzione (RDC). I piani elaborati sono poi fatti fluire lungo la supply chain dalle attività contenute nell'elemento D1. Negli impianti di produzione, invece, è stato inserito l'elemento M2, che sta ad indicare l'ipotesi che la produzione non avvenga più make-to-stock ma make-to-order, in quanto i tempi di produzione tramite manifattura additiva, comparati a quelli della manifattura tradizionale, sono minori e quindi consentono, in virtù di un livello adeguato di scorte di sicurezza, una produzione guidata dalla domanda reale e non dalla domanda prevista.

Anche in questo caso è possibile esplodere il livello due del modello SCOR fino al livello tre. Dei cinque nodi che compongono la supply chain, gli ultimi tre, nel caso in cui la produzione avvenga tramite manifattura additiva e l'impianto di produzione sia centralizzato, rimangono invariati, mentre vengono aggiunte delle attività nei due nodi iniziali, ovvero il nodo di competenza dell'OEM ed il nodo relativo agli RDC. In questo scenario il numero di nodi totali rimane invariato rispetto allo scenario iniziale, ovvero allo scenario in cui è stata descritta la supply chain as is, in quanto, poiché il livello di servizio deve essere pari al 100%, occorre avere una distribuzione del prodotto finale capillare sul territorio ed i tempi di trasporto necessari per coprire tutti i nodi finali della filiera logistica sono troppo elevati.

Per quanto riguarda il primo nodo della filiera logistica, il livello tre del modello SCOR può essere schematizzato come fatto in Figura 2.13:

Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

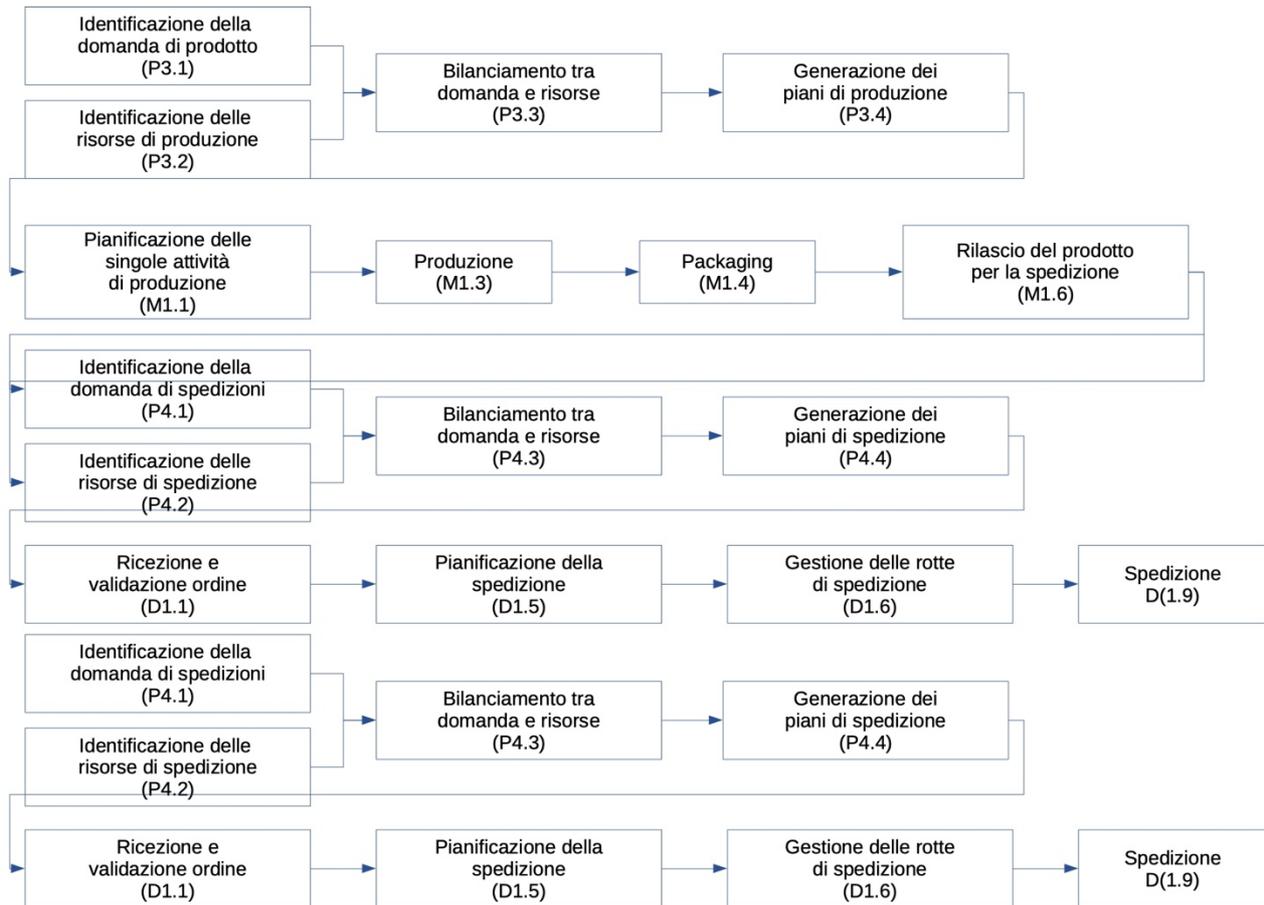


Figura 2.13 Schema delle attività del livello tre del modello SCOR relativo al nodo OEM nel caso di AM centralizzato

Una rappresentazione del livello tre del modello SCOR relativa ai nodi RDC è mostrata nella schematizzazione di Figura 2.14:

Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

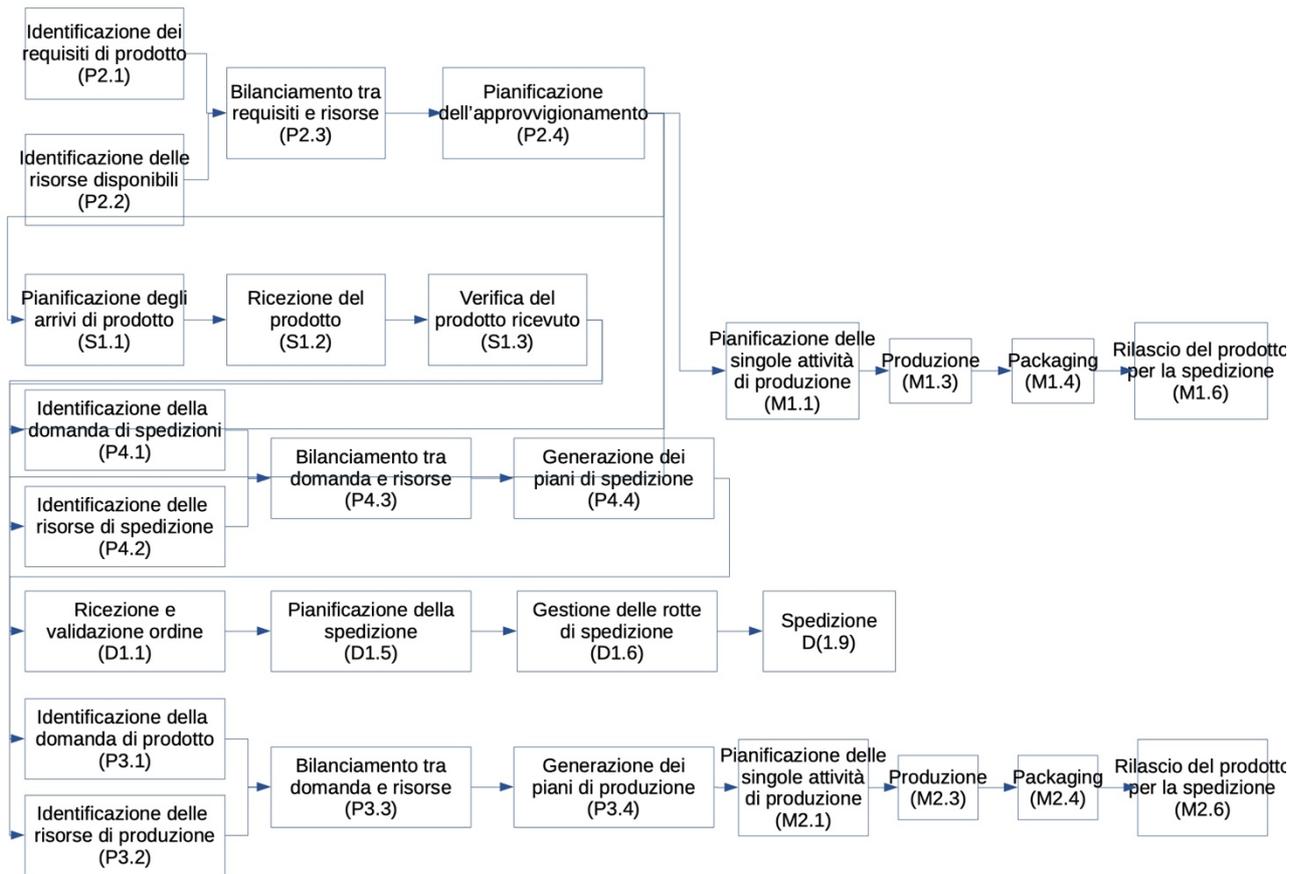


Figura 2.14 Schema delle attività del livello tre del modello SCOR relativo al nodo RDC con AM centralizzato

Indicatori di performance

Alcuni indicatori di performance aggiuntivi rispetto a quelli presentati nel paragrafo 2.3.1 relativi alla supply chain con Additive Manufacturing distribuito suggeriti dal modello SCOR, raggruppati a seconda del tipo di attività svolta, sono stati individuati in quanto la produzione in questo scenario avviene con una logica Make-to-Order. I KPI sono i seguenti:

- **Produzione Make-to-Order (M2):** per questo tipo di attività sono stati scelti tra gli indicatori di performance consigliati dal modello SCOR alcuni KPI che riescono a fornire una misura sull'efficienza e sui tempi del processo di produzione:
 - Rendimento, calcolato come rapporto tra i prodotti totali che passano il controllo qualità ed i pezzi totali prodotti
 - Tempo di produzione totale del prodotto
 - Costo orario operativo dell'impianto
 - Costo unitario di produzione
 - Costi totali di produzione

- Utilizzo della capacità produttiva, calcolato come rapporto tra il tempo di produzione totale ed il tempo operativo totale dell'impianto

2.3.3 *La supply chain con Additive Manufacturing distribuito*

Nello scenario della supply chain con Additive Manufacturing distribuito, mostrato nella Figura 2.15, gli impianti di produzione tramite Additive Manufacturing sono costruiti all'interno dei punti operativi distribuiti sul territorio, indicati con SL, invece che nei centri di distribuzione regionali come nello scenario precedente. Grazie alla distribuzione degli impianti di produzione, in questo scenario è possibile eliminare i nodi a monte degli SL, ovvero gli RDC, in modo tale da avere una supply chain più corta, meno costi di trasporto e livelli di magazzino complessivi più contenuti. L'eliminazione dei nodi RDC è dovuta al fatto che a monte degli impianti produttivi sono necessari solamente nodi che forniscano le materie prime necessarie alla produzione, che anche in questo caso si limitano ai materiali polimerici di input dell'Additive Manufacturing. Per quanto riguarda i livelli di magazzini complessivi nella filiera logistica, anche in questo caso è facilmente dimostrabile che sono minori rispetto allo scenario della supply chain con produzione tradizionale e anche rispetto allo scenario con produzione tramite manifattura additiva centralizzata e situata nei nodi RDC. Infatti, riprendendo la formula con cui sono stati calcolati i livelli delle scorte di sicurezza, ovvero:

$$SS = z * \sqrt{AVGL * STD^2 + AVG^2 * STDL^2}$$

è visibile come le scorte di sicurezza, SS, siano proporzionali alla media della domanda da soddisfare, AVG, che in questo scenario è minore rispetto agli altri due scenari in quanto avendo una produzione più distribuita, i nodi a valle da soddisfare per ogni impianto di produzione sono minori.

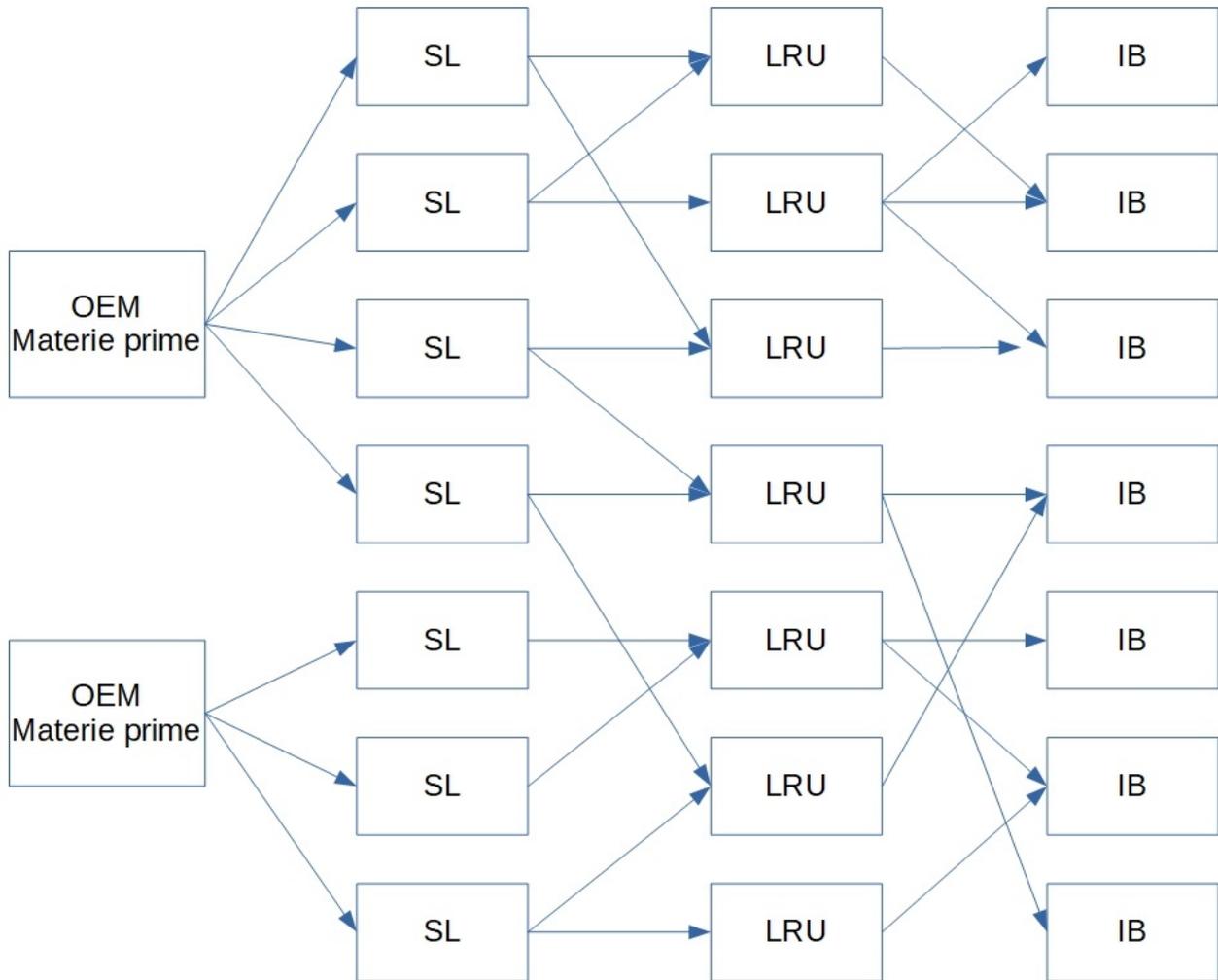


Figura 2.15 Rappresentazione schematica della supply chain con produzione tramite Additive Manufacturing distribuito sugli SL

Per quanto riguarda il modello SCOR, il livello due è riportato nella Figura 2.16:

Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

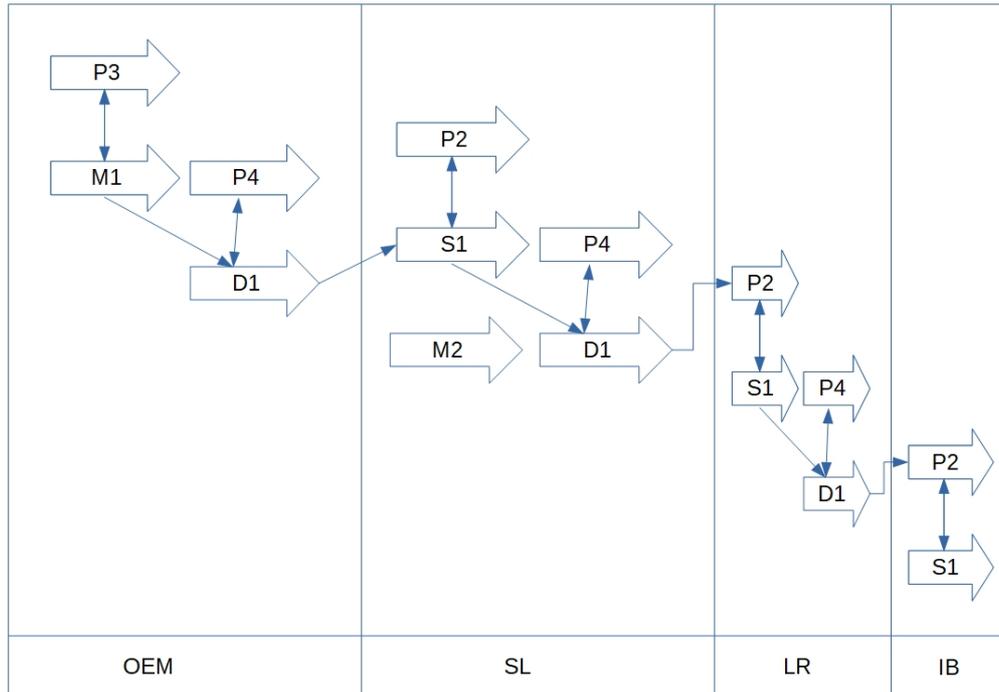


Figura 2.16 Rappresentazione schematica del livello due del modello SCOR dello scenario con Additive Manufacturing distribuito

Espandendo il livello due del modello SCOR appena presentato relativo allo scenario in cui l'Additive Manufacturing è implementato vicino al consumatore finale, ovvero nei nodi degli SL, si ottiene la schematizzazione riportata in Figura 2.17, Figura 2.18 e Figura 2.19:

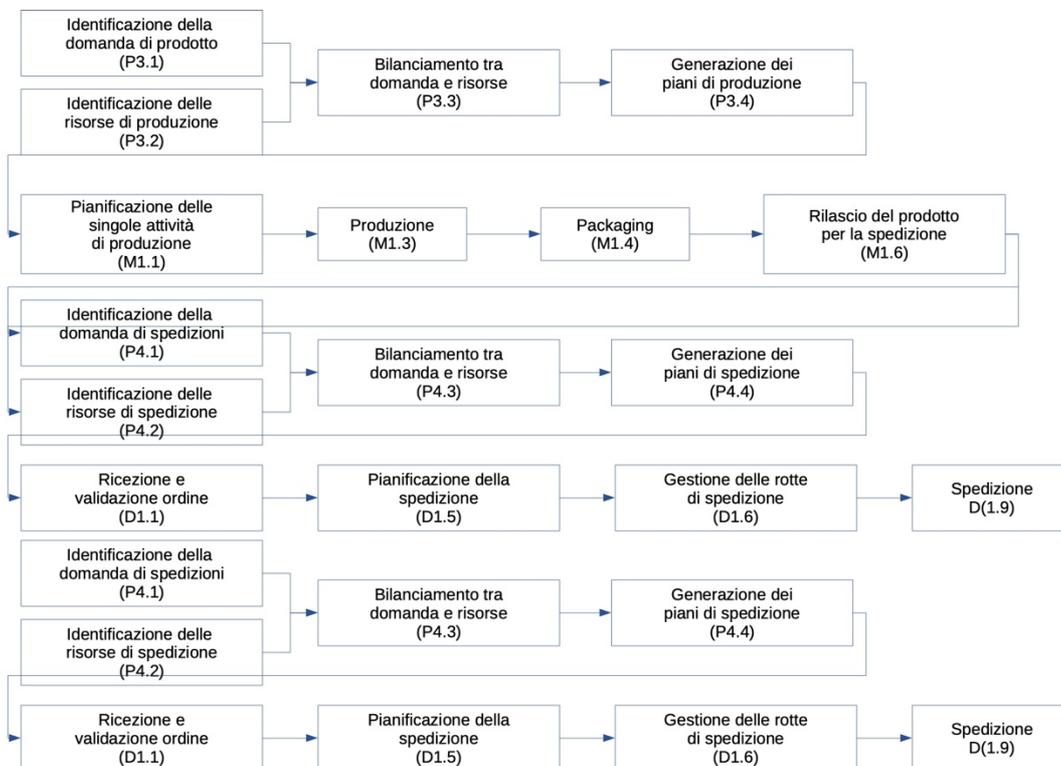


Figura 2.17 Schema delle attività del livello tre del modello SCOR relativo al nodo OEM nel caso di AM distribuito

Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

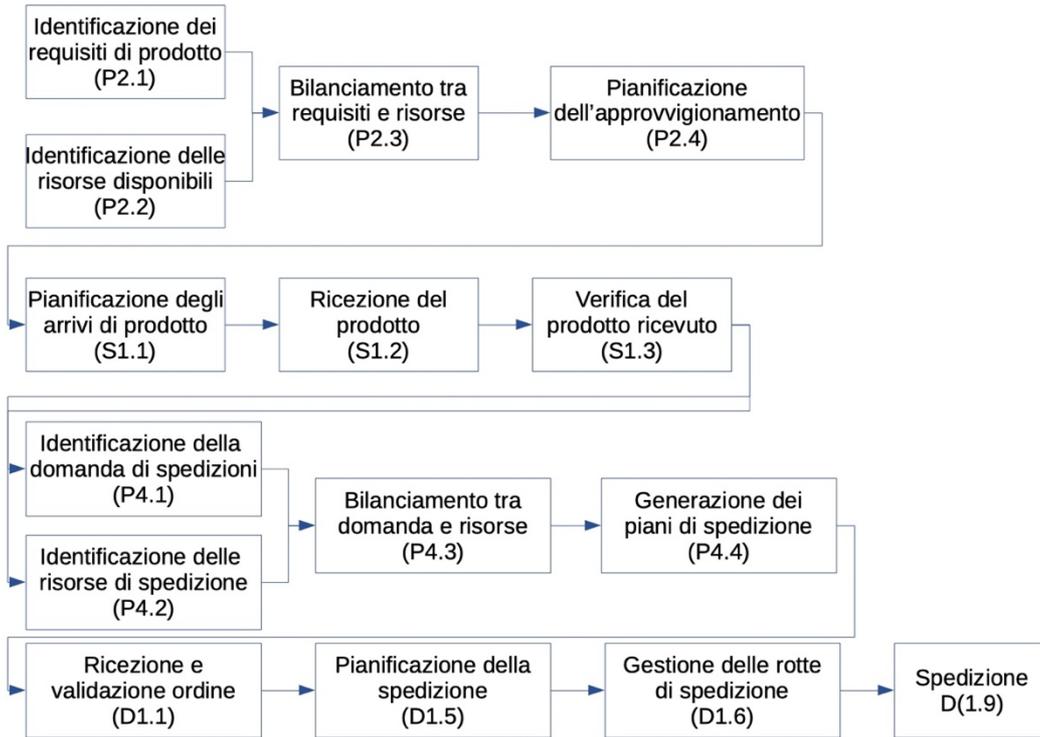


Figura 2.18 Schema delle attività del livello tre del modello SCOR relativo al nodo RDC nel caso di AM distribuito

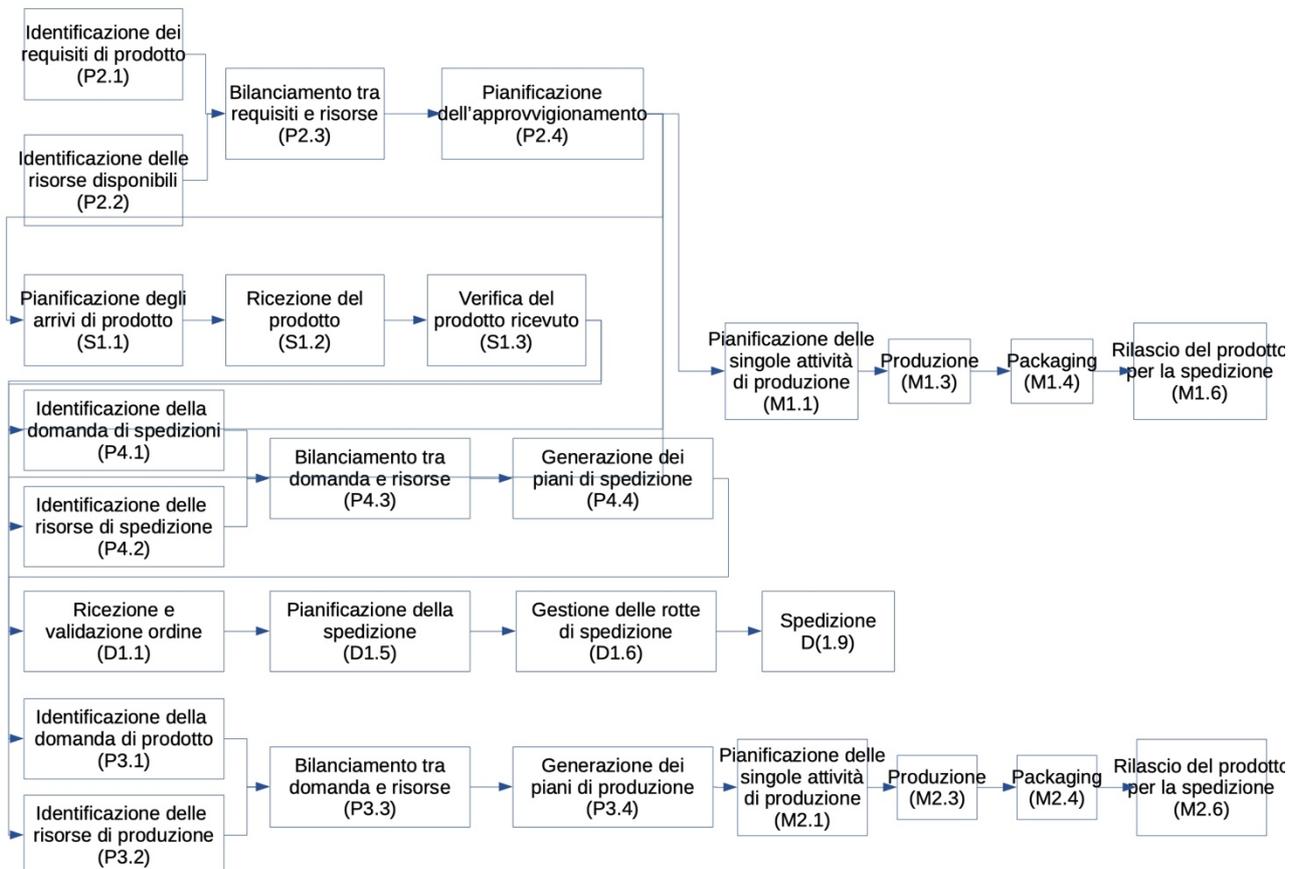


Figura 2.19 Schema delle attività del livello tre del modello SCOR relativo al nodo SL nel caso di AM distribuito

I due nodi finali, anche in questo caso, non subiscono variazioni rispetto al caso in cui la produzione avvenga tramite manifattura tradizionale, in quanto, anche in questo caso, rappresentano esclusivamente nodi di distribuzione capillare sul territorio del prodotto finale proveniente dai nodi di produzione a monte.

Gli indicatori di performance in quest'ultimo caso sono gli stessi dello scenario in cui viene adottato l'Additive Manufacturing centralizzato, in quanto sia nel primo che nel secondo caso si deve tenere sotto controllo il processo di pianificazione, di produzione e di consegna ai nodi a valle, con l'unica differenza rappresentata sul posizionamento del nodo in cui avviene la manifattura dei subassemblati.

2.3.4 Confronto tra gli scenari

Nella trattazione precedente sono stati presentati tre scenari di produzione dell'assieme in materiale polimerico che compone il condotto di aerazione degli F-18 Super Hornet. Nel primo scenario è utilizzata la manifattura tradizionale, la produzione avviene nei due nodi relativi agli Original Equipment Manufacturing (OEM), situato uno a Los Angeles, in California, ed uno a Washington, sulla costa orientale degli USA. Nel secondo scenario è stata ipotizzato che la produzione avvenisse tramite Additive Manufacturing centralizzato e che gli impianti produttivi fossero situati nei nodi relativi ai quattro centri di distribuzione regionali (RDC), situati a Seattle, in Washington, a Torrance, in California, a Chicago, in Illinois, e ad Atlanta, in Georgia; nel terzo scenario, infine, è stato ipotizzato che i nodi relativi ai centri di distribuzione regionali non facessero più parte della supply chain e che la produzione avvenisse in centri operativi distribuiti sul territorio. In particolare, nel terzo scenario è stato ipotizzato che i centri operativi, indicati con SL, fossero otto: a Broomfield (CO), a Phoenix (AZ), ad Austin (TX), a Burbank (CA), a Chicago (IL), ad Albuquerque (NM), a Fort Lauderdale (FL) e ad Atlanta (GA).

Per i calcoli necessari al confronto tra i tre scenari è stato utilizzato un caso di studio reale (Liu et al., 2014). I dati sulla domanda finale sono raccolti in tutti gli scenari nei nodi dei centri operativi territoriali, ovvero negli SL, che in tutti gli scenari sono otto. È stato supposto che la deviazione standard della domanda totale media sia pari al 2% del valore medio, in quanto dai dati storici (Liu et al., 2014) è stato osservato che la variazione statistica delle osservazioni rientra in questo range.

I dati relativi alla domanda totale annuale sono riportati in Tabella 2.2:

	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	SL6	SL7	SL8
<i>Domanda media</i>	1158	1080	1127	1186	1130	1160	1162	1171
<i>Deviazione standard</i>	232	216	225	237	226	232	232	234

Tabella 2.2 Domanda media annuale e deviazione standard (unità di prodotto) (Liu et al., 2014)

Per quanto riguarda invece i tempi di trasporto tra i diversi nodi della supply chain, sono stati calcolati tenendo in considerazione la distanza geografica. In particolare, il calcolo è stato eseguito con la seguente formula, con *AVGL* che indica il valore medio del tempo di trasporto tra un nodo e l'altro:

$$AVGL = \frac{\frac{Distanza[km]}{100 \left[\frac{km}{h} \right]}}{8 \left[\frac{h}{giorno} \right]}$$

Anche in questo caso è stata ipotizzata una deviazione standard della media pari al 20% del valore medio, in quanto dai dati storici è stato osservato che la variazione statistica rientra in questo range. Inoltre, è stata ipotizzata una velocità media durante il trasporto di 100 km/h e che ogni giornata lavorativa sia composta da 8 ore effettive di trasporto su strada. Oltre ciò, è stato ipotizzato che in caso di necessità tutti i nodi a valle siano raggiungibili dai nodi a monte, cioè che non esistano rotte preferenziali tra nodi di uno stesso livello all'interno della supply e nodi immediatamente successivi. Infine, il trasporto tra nodi sullo stesso livello, cioè il cosiddetto trasferimento orizzontale, è stato ipotizzato non possibile e quindi in ogni nodo della filiera logistica devono essere presenti scorte di sicurezza calcolate considerando la domanda totale a valle.

Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

I dati relativi ai tempi di trasporto sono riportati in Tabella 2.4 e Tabella 2.5, in cui è riportato il tempo di trasporto in giorni:

	OEM1	OEM2	RDC1	RDC2	RDC3	RDC4	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	SL6	SL7	SL8
CH	50	4294												
AH	0	4244												
VI	3774	604												
OEM1			1827	32	3244	3496	1646	600	2217	19	3244	1267	4357	3496
OEM2			4443	4321	1124	1028	2687	100	2452	4298	1124	3033	1664	1028
RDC1							2090	2281	3414	1812	3322	2298	5269	4240
RDC2							1675	618	2235	50	3272	1296	4375	3525
RDC3							1619	2827	1871	3246	0	2158	2183	1154
RDC4							2270	2972	1539	3519	1157	2254	1029	0

Tabella 2.3 Distanza (in chilometri) tra i nodi della supply chain

	OEM1	OEM2	RDC1	RDC2	RDC3	RDC4	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	SL6	SL7	SL8
CH	0,06	5,37												
AH	0,00	5,31												
VI	4,72	0,76												
OEM1			2,28	0,04	4,06	4,37	2,06	0,75	2,77	0,02	4,06	1,58	5,45	4,37
OEM2			5,55	5,40	1,41	1,29	3,36	0,13	3,07	5,37	1,41	3,79	2,08	1,29
RDC1							2,61	2,85	4,27	2,27	4,15	2,87	6,59	5,30
RDC2							2,09	0,77	2,79	0,06	4,09	1,62	5,47	4,41
RDC3							2,02	3,53	2,34	4,06	0,00	2,70	2,73	1,44
RDC4							2,84	3,72	1,92	4,40	1,45	2,82	1,29	0,00

Tabella 2.4 Tempo di trasporto medio (in giorni) tra i nodi specifici di ogni livello della supply chain

	OEM1	OEM2	RDC1	RDC2	RDC3	RDC4	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	SL6	SL7	SL8
CH	0,01	1,07												
AH	0,00	1,06												
VI	0,94	0,15												
OEM1			0,46	0,01	0,81	0,87	0,41	0,15	0,55	0,00	0,81	0,32	1,09	0,87
OEM2			1,11	1,08	0,28	0,26	0,67	0,03	0,61	1,07	0,28	0,76	0,42	0,26
RDC1							0,52	0,57	0,85	0,45	0,83	0,57	1,32	1,06
RDC2							0,42	0,15	0,56	0,01	0,82	0,32	1,09	0,88
RDC3							0,40	0,71	0,47	0,81	0,00	0,54	0,55	0,29
RDC4							0,57	0,74	0,38	0,88	0,29	0,56	0,26	0,00

Tabella 2.5 Deviazione standard dei tempi di trasporto (in giorni) tra gli specifici nodi di ogni livello della supply chain

Per effettuare un confronto tra gli scenari in cui la produzione avviene con manifattura tradizionale, con Additive Manufacturing centralizzato e con Additive Manufacturing distribuito, è possibile confrontare tra loro il lead time di trasporto totale per andare dal primo all'ultimo livello della supply chain e le scorte di sicurezza da tenere in ogni livello. Queste due grandezze sono state scelte come

termine di paragone in quanto forniscono un'idea di massima della lunghezza e della complessità della catena di approvvigionamento e di come venga gestita l'incertezza riguardo la domanda finale.

Nel primo scenario, cioè quello in cui sono presenti dei fornitori di subassemblati a monte della supply chain, poi sono presenti i nodi Original Equipment Manufacturing (OEM), in cui avviene la produzione tramite manifattura tradizionale, poi sono presenti i nodi dei centri regionali di distribuzione (RDC), i nodi dei centri operativi distribuiti sul territorio (SL), i nodi di immagazzinamento intermedi dei prodotti finali (LR) ed infine le stazioni di servizio (IB), il lead time per fluire dall'inizio alla fine della filiera logistica, non considerando i tempi di produzione e di preparazione di un ordine, sono pari al massimo, in media, a:

$$LT_{TOT} = LT_{CH-OEM2} + LT_{OEM2-RDC1} + LT_{RDC1-SL7} = 17,51 \text{ giorni}$$

In questo scenario, i dati sulle scorte di sicurezza, calcolate con la formula $SS = z * \sqrt{AVGL * STD^2 + AVG^2 * STDL^2}$, supponendo $z = 1,65$, sono riportati nella Tabella 2.6:

	Scorte di sicurezza (unità di prodotto)
CH	6
AH	6
VI	5
OEM1	7
OEM2	8
RDC1	12
RDC2	9
RDC3	8
RDC4	8

Tabella 2.6 Livello delle scorte di sicurezza ad ogni nodo della supply chain nello scenario relativo alla supply chain tradizionale (in unità di prodotto)

Il totale delle scorte di sicurezza, calcolato per l'intera supply chain, è quindi pari in media a 68 unità.

Per quanto riguarda il secondo scenario analizzato, ovvero lo scenario in cui la produzione avviene tramite Additive Manufacturing centralizzato e localizzato nei nodi RDC, scompaiono, rispetto al primo scenario, i tre nodi relativi ai fornitori di subassemblati ed è stato ipotizzato che il materiale polimerico da utilizzare come input di produzione venga fornito dai nodi OEM. In questo caso si

Mappatura della supply chain tramite modello SCOR

ottiene un lead time totale per la fornitura dal primo all'ultimo livello della supply chain nel caso peggiore possibile, in media, pari a:

$$LT_{TOT} = LT_{OEM2-RDC1} + LT_{RDC1-SL7} = 12,14 \text{ giorni}$$

Per quanto riguarda le scorte di sicurezza, invece, si ottiene la situazione riportata in Tabella 2.7:

	Scorte di sicurezza (in unità di prodotto)
OEM1	7
OEM2	8
RDC1	12
RDC2	9
RDC3	8
RDC4	8

Tabella 2.7 Livello delle scorte di sicurezza ad ogni nodo della supply chain nello scenario relativo alla produzione tramite Additive Manufacturing centralizzato (in unità di prodotto)

In questo scenario, quindi, si ottiene che in media le scorte di sicurezza a livello complessivo della supply chain sono pari a 52 unità di prodotto.

Infine, nel terzo scenario, ovvero lo scenario in cui la produzione avviene tramite manifattura additiva distribuita e localizzata nei nodi SL, scompaiono i nodi relativi ai centri di distribuzione regionali. Il lead time totale per fluire lungo tutta la supply chain rimane quindi esclusivamente quello tra i nodi a monte della produzione, ovvero i fornitori delle materie prime di produzione (i nodi OEM), ed i nodi a valle, i nodi SL. Quantitativamente, nel caso peggiore possibile, si ha, in media, che:

$$LT_{TOT} = LT_{OEM1-SL7} = 5,45 \text{ giorni}$$

Per quanto riguarda le scorte di sicurezza, in media si ha la situazione riportata nella Tabella 2.8:

	Scorte di sicurezza (in unità di prodotto)
OEM1	9
OEM2	9

Tabella 2.8 Livello delle scorte di sicurezza ad ogni nodo della supply chain nello scenario relativo alla produzione tramite Additive Manufacturing distribuito (in unità di prodotto)

Il livello complessivo delle scorte di sicurezza in media è quindi pari a 18 prodotti.

La comparazione tra i tre scenari è riportata schematicamente nella Tabella 2.9:

	<i>Lead time complessivo</i>	<i>Livello di scorte di sicurezza</i>
Scenario 1 – Manifattura tradizionale	17,51 giorni	68 unità
Scenario 2 – Additive Manufacturing centralizzato	12,14 giorni	52 unità
Scenario 3 – Additive Manufacturing distribuito	5,45 giorni	18 unità

Tabella 2.9 Riepilogo confronto tra i tre scenari

In definitiva, dunque, come visibile dalla Tabella 2.9, nello scenario in cui la produzione avviene tramite manifattura tradizionale si ottiene un tempo di trasporto tra il primo e l'ultimo nodo della filiera pari a 17,51 giorni, con un livello di scorte di sicurezza all'interno dell'intera supply chain pari a 68 unità in media. Questi valori subiscono potenzialmente una diminuzione rispettivamente del 30,67% e del 23,53% quando la manifattura avviene tramite Additive Manufacturing nei nodi relativi ai centri di distribuzione regionali (RDC) ed i prodotti fluiscono fino ai nodi di contatto con la domanda finale, i centri di servizio (SL). Infine, se l'Additive Manufacturing viene implementato in modo distribuito, ovvero la produzione avviene negli ultimi nodi della filiera, le Service Locations (SL), vengono eliminati i nodi relativi ai centri di distribuzione regionali (RDC) e quindi il tempo che impiegano le materie prime ad arrivare nei centri di produzione si riducono ulteriormente e diventano 5,45 giorni. Per quanto riguarda le scorte di sicurezza, grazie all'eliminazione dei nodi intermedi della catena di approvvigionamento, il valore diventa poco più di un terzo dello scenario in cui la produzione avviene tramite manifattura additiva centralizzata.

Un riepilogo delle differenze in termini di attività nei vari nodi è riportato nella Tabella 2.10:

	Attività svolta dai nodi OEM	Attività svolta dai nodi RDC	Attività svolta dai nodi SL
Scenario 1 – Manifattura tradizionale	Ricezione materie prime Pianificazione della produzione Produzione	Ricezione prodotto da OEM Smistamento ai livelli successivi	Ricezione prodotto da RDC Soddisfazione della domanda finale
Scenario 2 – Additive Manufacturing centralizzato	Ricezione materie prime da fornitori Pianificazione della produzione Distribuzione materie prime	Ricezione materie prime da OEM Produzione	Ricezione prodotti da RDC Soddisfazione della domanda finale
Scenario 3 – Additive Manufacturing distribuito	Ricezione materie prime da fornitori Pianificazione della produzione Distribuzione materie prime	<i>Eliminati dalla filiera</i>	Ricezione materie prime da OEM Produzione Soddisfazione della domanda finale

Tabella 2.10 Riepilogo attività svolte dai nodi della supply chain

3 Secondo caso di studio: la supply chain delle parti di ricambio di PSA

Nel capitolo 3 è presentato un secondo caso di studio tratto dalla letteratura e rielaborato al fine di comprendere l'impatto sulla supply chain dell'adozione dell'Additive Manufacturing per la produzione di un assieme meccanico in materiale polimerico. A differenza del capitolo 2, in cui il settore di riferimento era quello aeronautico, di seguito è stato analizzato un caso derivante dal settore automobilistico e nello specifico la filiera logistica del gruppo Peugeot Société Anonyme (PSA) relativamente alla produzione dei fanali della vettura Peugeot 206.

3.1 Presentazione della supply chain delle parti di ricambio del gruppo PSA

Prendendo in considerazione la supply chain di un'automobile, modellata secondo lo schema di Figura 3.1, è possibile notare come ci siano quattro livelli: al primo livello sono presenti i fornitori di materie prime, al secondo livello sono presenti i produttori dei sottoassemblati ("bodies", "components" ed "engines and transmissions"), infine i sottoassemblati sono mandati ad un assemblatore finale, da cui il prodotto finale, assemblato, raggiunge in ultima istanza il venditore finale, cioè nell'interfaccia tra il produttore ed il consumatore.

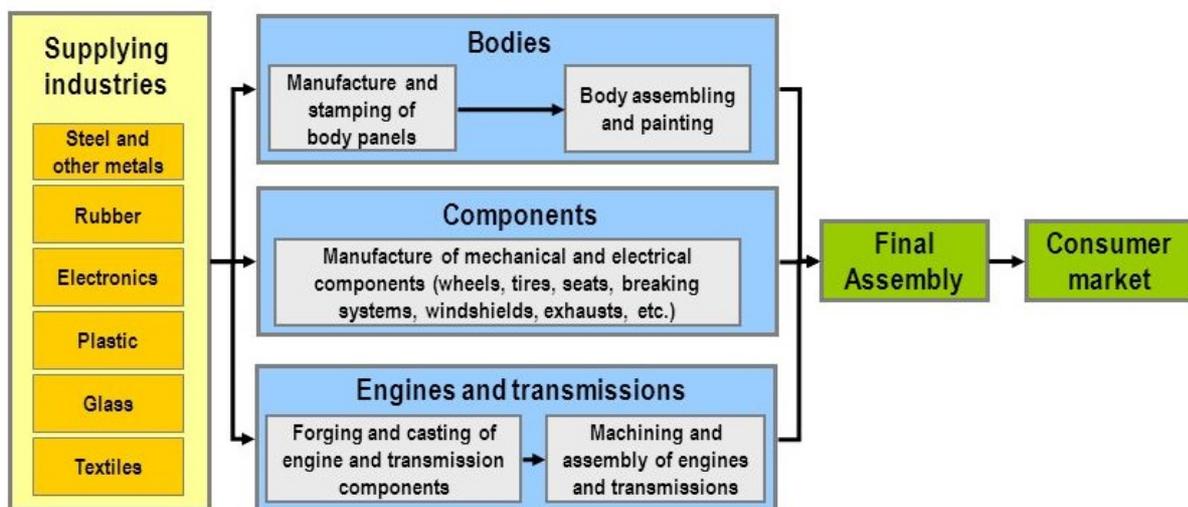


Figura 3.1 Supply chain di un generico costruttore di automobili (Lester, 2016)

Allo stesso modo è possibile modellare la filiera logistica anche dei ricambi automobilistici, che costituiscono una delle voci principali nel business post-vendita per i produttori di automobili. Si parla a proposito di circa il 40% del fatturato post-vendita (Manca, 2017). In particolare, per ogni componente principale, che costituisce un assemblato di più elementi elementari, è presente un gruppo di fornitori di materie prime o di subassemblati, che inviano tramite la supply chain di riferimento i propri prodotti agli assemblatori ed infine al venditore finale.

Ciò che si osserva nell'attuale mercato è che i maggiori produttori si stanno organizzando tramite delle piattaforme logistiche, anche chiamate placche (Manca, 2017). Si tratta di un radicale cambio di modello per la filiera del ricambio, con cui il costruttore punta a entrare direttamente nella distribuzione ricambi indipendenti. Se, infatti, fino a ieri il modello distributivo dei ricambi era attraverso i concessionari dei brand, attualmente il modello delle placche prevede la ricezione della merce direttamente dalla produzione; la placca poi, con una gestione centralizzata, sarà in grado di consegnare sia ai concessionari sia alle officine autorizzate, ma anche alle officine indipendenti.

Questo capitolo si concentra su un caso di studio riguardante il gruppo PSA (costituito dai marchi automobilistici Peugeot, Citroën, DS, Opel e Vauxhall Motors), secondo produttore europeo di automobili (Zumbo, 2016). Il prodotto considerato è il fanale anteriore della Peugeot 206, assieme meccanico costituito da materiali polimerici (plastiche e plexiglass).

Nella concezione di supply chain tradizionale esiste un magazzino centrale che aggrega tutta la domanda da parte dei consumatori finali. Ciò è dovuto al fatto di considerare come metriche di controllo fondamentali della filiera logistica il lead time di consegna, ovvero il tempo che intercorre tra la realizzazione della domanda e la sua soddisfazione, ed il livello di servizio, cioè la percentuale di ordini evasi entro le aspettative del consumatore finale. Nel caso di PSA, il servizio di consegna dei ricambi urgenti è realizzato la notte successiva all'ordine ed in aggiunta è realizzato un servizio di stock con tempi di consegna da 2 a 5 giorni. Il livello di servizio è superiore al 96% e dunque ogni 100 ricambi richiesti, più di 96 sono presenti ed evasi immediatamente ai clienti mentre i 3 o 4 restanti sono evasi 24 ore dopo in logica cross docking provenienti direttamente dal magazzino centrale dei costruttori che utilizzano la placca (Manca, 2017).

L'assemblato preso in considerazione è illustrato nella Figura 3.2 e nella Figura 3.3:



Figura 3.2 Fanale anteriore Peugeot 206 (www.fk-shop.de)



Figura 3.3 Retro del fanale Peugeot 206 (www.fk-shop.de)

La distinta base dell'assieme in materiale polimerico considerato è riportata in Tabella 3.1:

<i>Codice</i>	<i>Componente</i>	<i>Quantità</i>
1	Base di alloggiamento	1
2	Lampadina	1
3	Lamina riflettente	1
4	Chiusura fori in plastica	4
5	Morsetto elettrico	1
6	Cavo elettrico	1

Tabella 3.1 Distinta base fanale anteriore Peugeot 206

A monte della supply chain sono posti gli otto produttori del fanale (Abakus, la cui sede operativa è situata a Eupen, in Belgio, Alkar, situato a Oliveira de Azemeis, in Portogallo, Bosch, situato a Stoccarda, in Germania, Diederichs, a Bad Bentheim, in Germania, Magneti Marelli, con sede a Corbetta, in Italia, Prasco, a Leinì, in Italia, Tyc, la cui sede operativa è ad Almere, in Olanda, e Van Wezel, in Belgio, a Tienen), dopodiché il particolare, già assemblato, entra nella catena logistica delle parti di ricambio del gruppo PSA. Volendo creare un diagramma della supply chain relativo esclusivamente a questo particolare, quindi, si ottiene quanto illustrato in Figura 3.4:

Presentazione della supply chain delle parti di ricambio del gruppo PSA

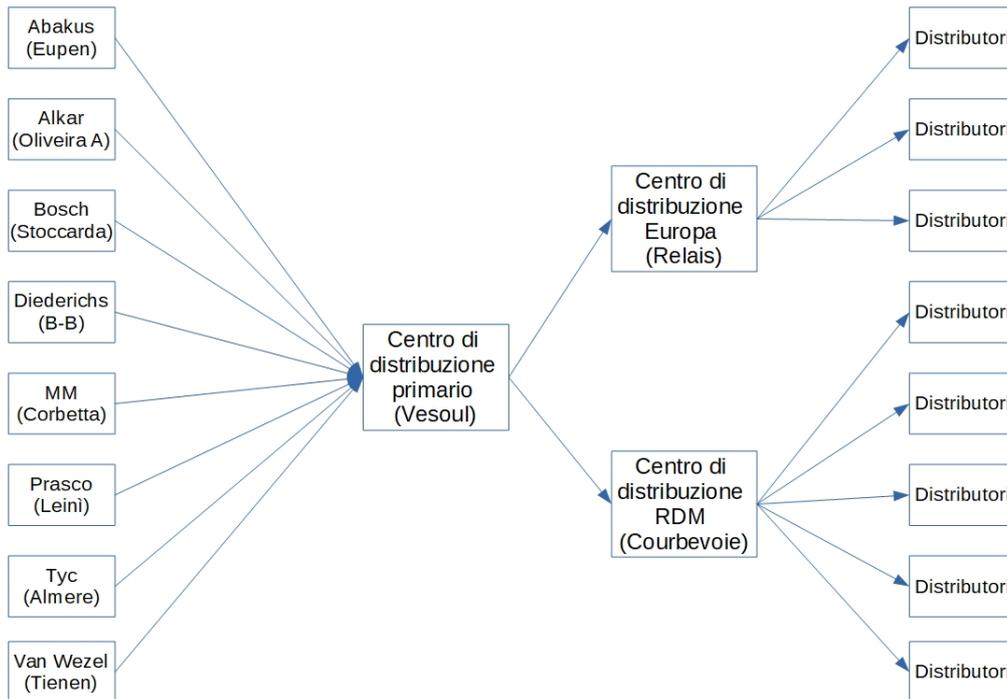


Figura 3.4 Rappresentazione schematica della supply chain

Come già effettuato nel capitolo 2, è possibile mappare la supply chain tramite il modello SCOR (APICS, 2017). Il livello due del modello è rappresentato in Figura 3.5:

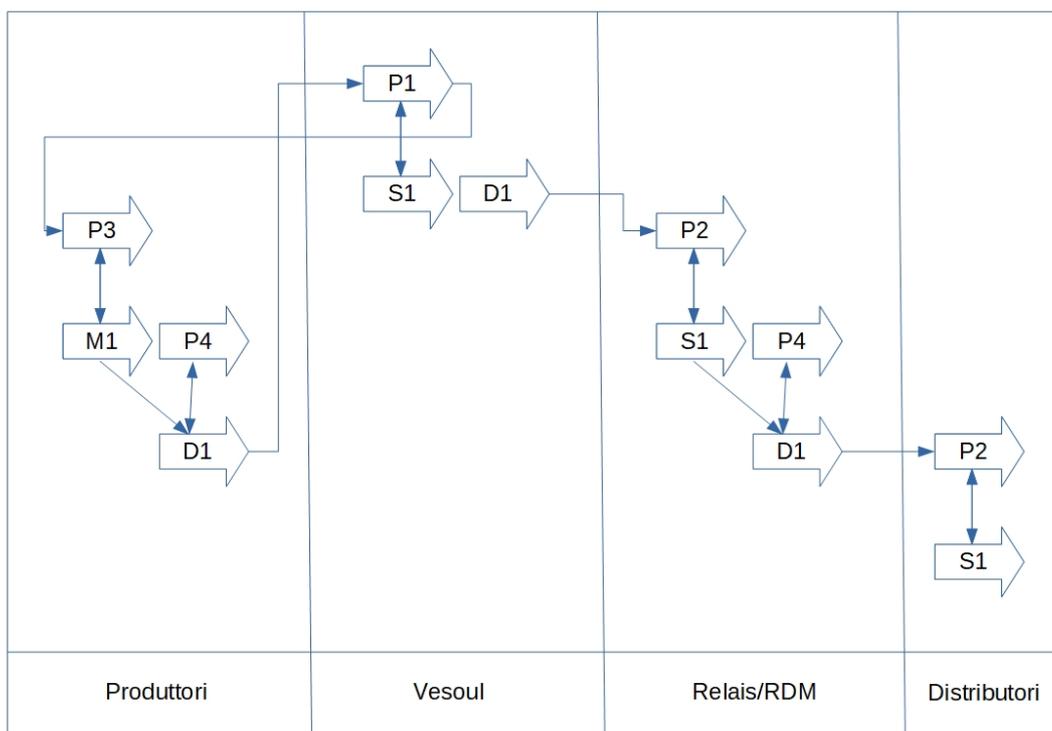


Figura 3.5 Livello due modello SCOR gruppo PSA

Come visibile, è nel nodo di Vesoul che si pianifica l'intera supply chain (P1) e quindi si allocano a livello generale le risorse ed i materiali che devono fluire all'interno della catena logistica (S1). Inoltre, in questo nodo arrivano tutti i prodotti provenienti dagli otto fornitori dell'assemblato finale, che quindi devono essere mandati a valle della filiera (D1). Per quanto riguarda il nodo dei produttori, le attività presenti sono le classiche attività di nodi produttivi con una logica Make-to-Stock: si pianifica la produzione (P3), dopodiché si produce (M1) e si pianifica la spedizione dell'output (P4) ed infine si spedisce il prodotto finito (D1). I nodi relativi alla distribuzione a monte della fine della filiera, ovvero i nodi relativi al centro di distribuzione per l'Europa situato a Relais e quello relativo al centro di distribuzione per il resto del mondo (RDM), localizzato a Courbevoie, invece, contengono attività di pura pianificazione (P2), che questa volta si basa direttamente sulla domanda reale, e poi di pianificazione delle spedizioni. Infine, nei nodi in cui si realizza la domanda finale si pianifica l'utilizzo delle risorse (P2), che in questo caso sono i prodotti finali, così come deducibile dall'attività S1, che riguarda proprio l'allocazione dei prodotti stoccati in magazzino.

Anche per questa filiera logistica, è possibile esplodere il livello due del modello SCOR fino al livello tre, con l'intento di analizzare le singole attività che compongono ogni processo in modo più specifico. Come nella trattazione presentata nel capitolo 2, ogni attività del livello tre del modello SCOR può avere in input i risultati di altre attività e l'output di ogni elemento può essere l'input per un altro processo.

Per quanto riguarda i nodi degli otto produttori, una rappresentazione schematica del livello tre del modello SCOR è riportata in Figura 3.6, in cui sono stati elaborati dati derivanti dalla letteratura per renderli attinenti a questo elaborato:

Presentazione della supply chain delle parti di ricambio del gruppo PSA

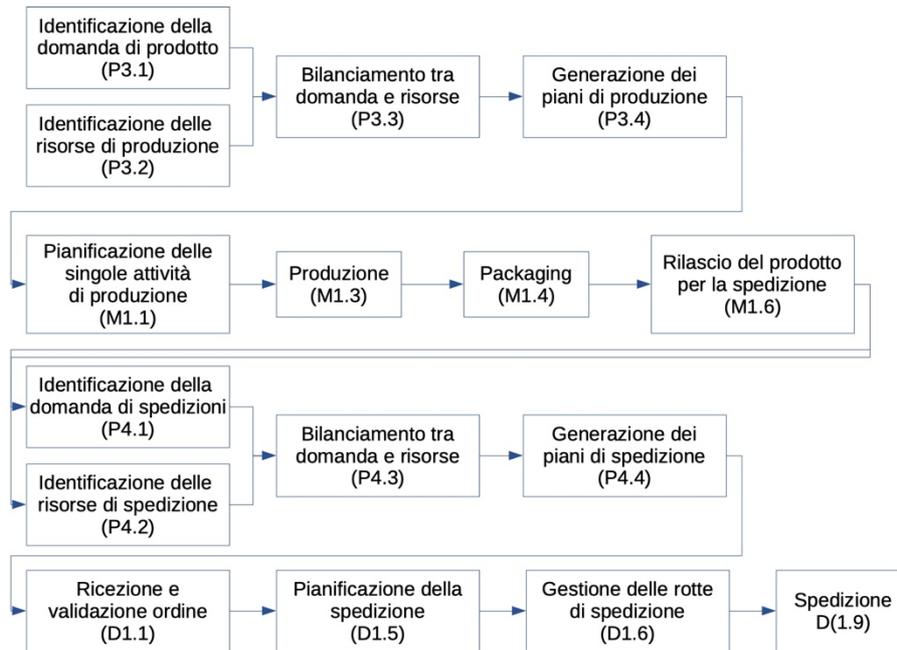


Figura 3.6 Schema delle attività del livello tre modello SCOR per i produttori

Per quanto riguarda il nodo di Vesoul, invece, il livello tre del modello SCOR è quello rappresentato nella Figura 3.7:

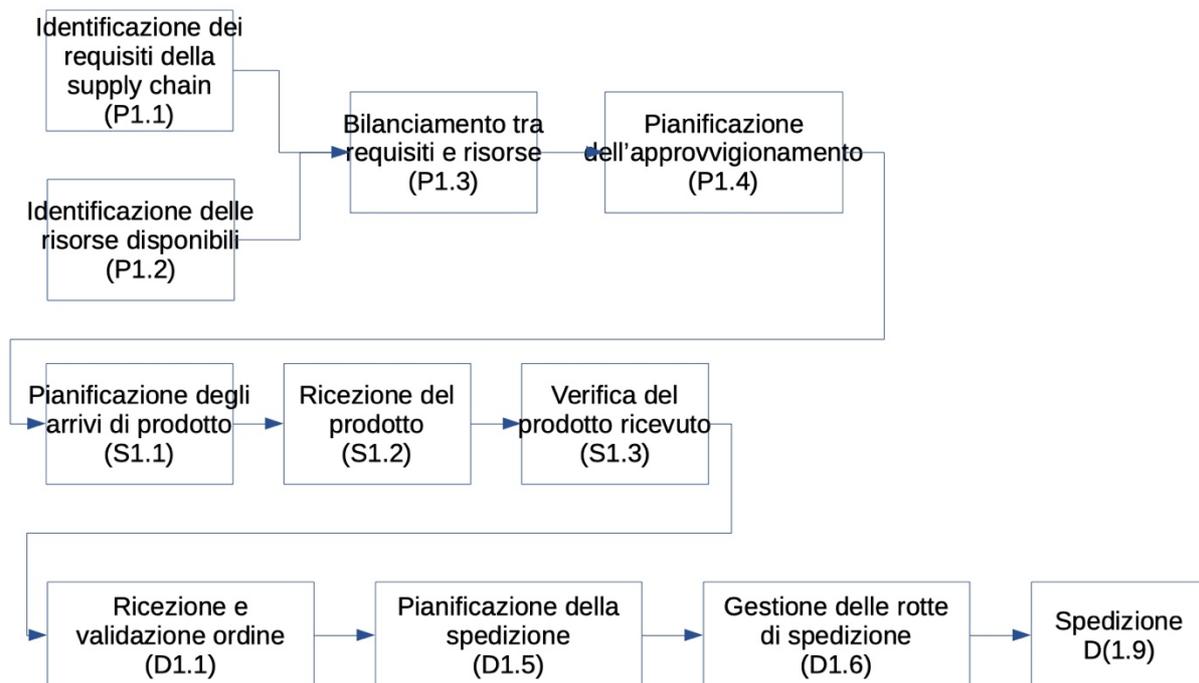


Figura 3.7 Schema delle attività del livello tre modello SCOR nodo Vesoul

I nodi a monte dei distributori finali sono rappresentati dagli elementi di livello tre del modello SCOR presentati in Figura 3.8:

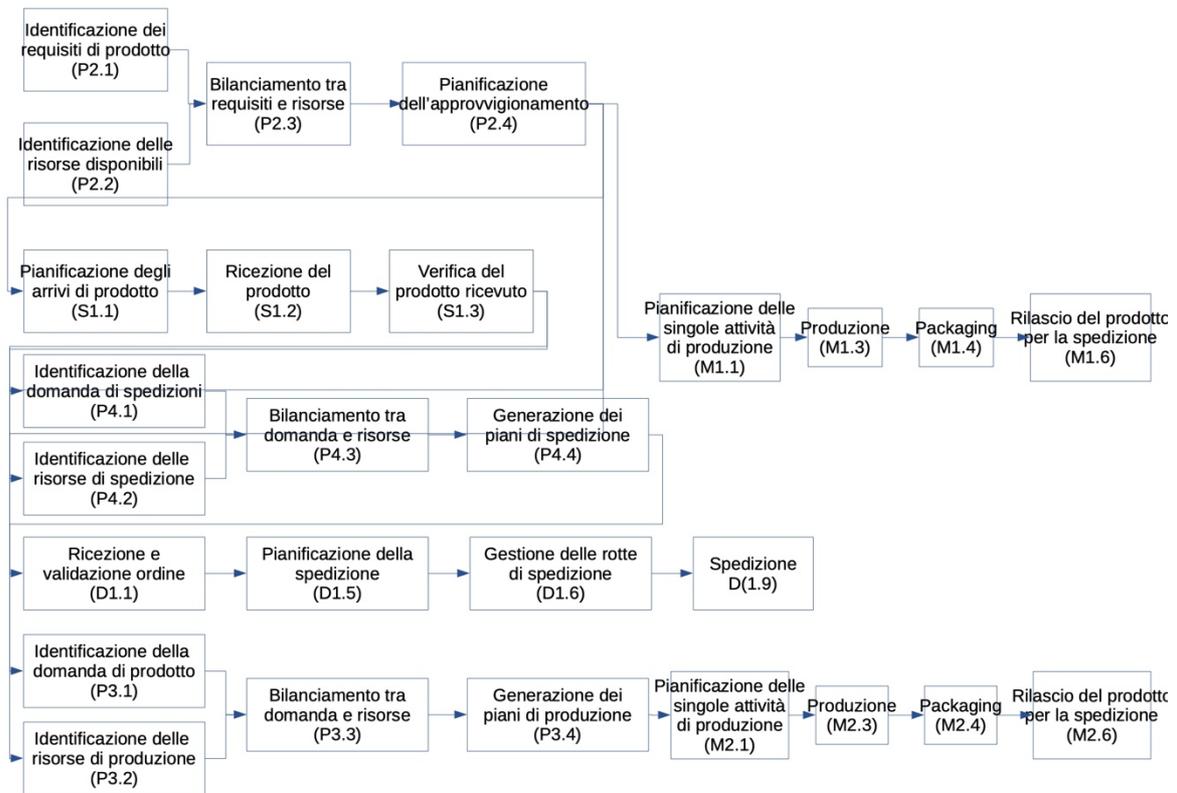


Figura 3.8 Schema delle attività del livello tre del modello SCOR dei nodi Relais, RDM, DOPR

Infine, i nodi dei distributori finali possono essere rappresentati fino al livello tre del modello SCOR come in Figura 3.9:

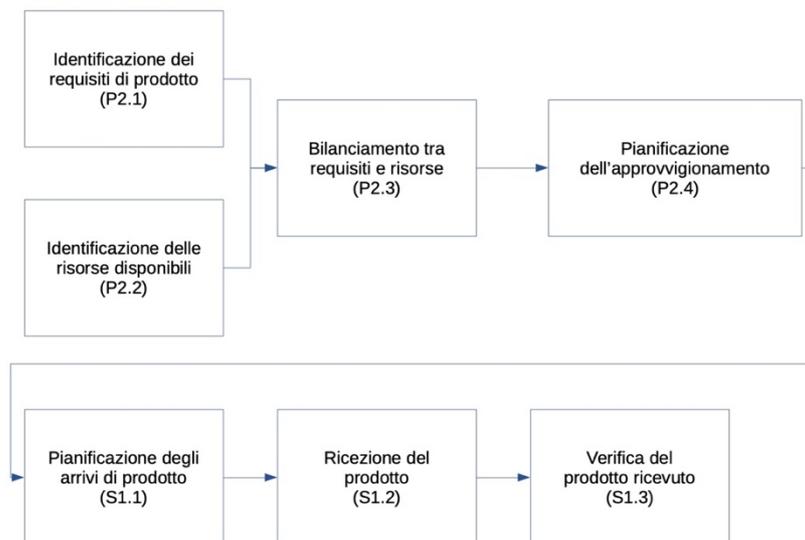


Figura 3.9 Livello tre modello SCOR dei distributori finali

3.1.1 Indicatori di performance

Dal modello SCOR sono stati selezionati alcuni tra gli indicatori di performance consigliati, al fine di ottenere per ogni nodo una visione di insieme relativamente ad aspetti quali efficienza, costi e tempi di pianificazione e di produzione. Questi indicatori sono stati riferiti ai singoli elementi di livello 1 del modello, in modo tale da renderli specifici per ogni attività svolta all'interno della supply chain:

- Pianificazione della catena di approvvigionamento (P1): per le attività di pianificazione della supply chain sono stati selezionati indicatori di performance che rendano misurabili aspetti quali il tempo necessario per il macro-processo, i relativi costi ed efficienza:
 - Accuratezza delle previsioni, calcolata come rapporto tra la domanda reale e la domanda prevista in uno stesso arco di tempo, ad esempio un mese
 - Costo totale del processo di pianificazione calcolato come percentuale dei costi totali della supply chain
- Pianificazione della produzione (P3): i KPI identificati per le attività di pianificazione della produzione sono relativi ai costi delle singole attività e all'efficienza e all'accuratezza delle previsioni:
 - Accuratezza della previsione, calcolata come rapporto tra la domanda ipotizzata in un arco temporale e la domanda effettiva nello stesso periodo di tempo
 - Differenza di consegna rispetto alla data richiesta dal cliente, indicata come variazione tra le due date
 - Rendimento della produzione, calcolato come rapporto tra pezzi non scartati dal controllo qualità e pezzi prodotti totali
- Produzione Make-to-Stock (M1): per le attività relative alla produzione tramite filosofia Make-to-Stock sono stati selezionati indicatori di performance relativi a costi, efficienza e tempi totali di produzione, oltre a KPI relativi a costi di gestione del magazzino e frequenza di stock-out:
 - Costo della produttività a valore aggiunto, calcolato come rapporto tra il prezzo delle attività di produzione che aggiungono valore al prodotto finale ed il costo di produzione totale
 - Costo operativo dell'impianto di produzione per unità di tempo
 - Costo unitario di produzione
 - Costo globale di produzione

- Utilizzo della capacità produttiva, calcolato come rapporto tra il tempo impiegato effettivamente nella produzione ed il tempo totale operativo dell'impianto
- Aderenza al piano di produzione, calcolata come rapporto tra la produzione effettiva e la produzione teorica in un intervallo di tempo, ad esempio per ogni mese
- Costo totale delle risorse utilizzate nella produzione
- Accuratezza del magazzino, calcolata come rapporto tra la giacenza teorica in magazzino e la giacenza reale
- Frequenza degli stock-out in una unità di tempo
- Rendimento, calcolato come percentuale dei pezzi non difettosi in relazione ai pezzi totali prodotti
- Pianificazione delle spedizioni (P4): in questo caso sono stati selezionati dal modello SCOR indicatori di performance che diano una visione d'insieme su costi e tempi totali impiegati nel processo di pianificazione delle spedizioni ai nodi a valle della supply chain:
 - Accuratezza della previsione, calcolata come percentuale delle spedizioni effettuate secondo la schedulazione originaria rispetto alle spedizioni totali
 - Tempo totale del processo di gestione dell'ordine
 - Costi di spedizione totali
 - Inventory Position dell'inventario, calcolato come giacenze reali in magazzino più ordini già effettuati
- Spedizione di prodotto dal magazzino (D1): i KPI selezionati per misurare le performance delle spedizioni di prodotto finale stoccato in magazzino verso i nodi a valle della filiera logistica tengono conto dei costi e dei tempi necessari:
 - Costo totale del processo di gestione degli ordini
 - Accuratezza delle spedizioni, calcolata come percentuale delle spedizioni non arrivate al cliente rispetto alle spedizioni totali
 - Tempo totale impiegato per la soddisfazione di un ordine
 - Costo totale della movimentazione interna al magazzino dei prodotti
 - Costi di trasporto totali
- Pianificazione dell'approvvigionamento (P2): in questo caso, dal modello SCOR sono stati individuati indicatori di performance in grado di misurare l'accuratezza della pianificazione da parte dei nodi a valle della domanda di prodotto da ricevere dai nodi a monte, oltre a KPI relativi a costi e tempi necessari per l'intero processo di pianificazione:

Mappatura della supply chain con Additive Manufacturing centralizzato

- Tempo totale impiegato nel processo di allocazione delle risorse
- Accuratezza della previsione, calcolata come rapporto tra la domanda reale e la domanda prevista in un determinato arco temporale
- Tasso di soddisfazione della domanda da parte del fornitore, calcolato come percentuale delle richieste soddisfatte dal fornitore rispetto alle richieste totali
- Allocazione di prodotto stoccato (S1): per il macro-processo di allocazione, in base alla domanda prevista, di prodotto stoccato da parte dei vari nodi all'interno della supply chain, sono stati selezionati dal modello SCOR alcuni KPI in grado di garantire una valutazione complessiva sull'accuratezza della fornitura e sui costi delle singole attività:
 - Percentuali di ordini ricevuti in tempo rispetto alla richiesta rispetto agli ordini ricevuti totali
 - Percentuale di ordini ricevuti con la giusta documentazione rispetto agli ordini ricevuti totali
 - Tempo totale del processo di ricezione degli ordini
 - Rapporto tra costo del processo di ricezione degli ordini per ogni prodotto e costo di acquisto unitario

3.2 Mappatura della supply chain con Additive Manufacturing centralizzato

Come già più illustrato nel 2, è possibile adottare una produzione tramite Additive Manufacturing in due modalità: la prima è quella di installare un impianto di produzione additiva centralizzato, da cui poi distribuire a valle i prodotti, mentre la seconda è quella di distribuire la produzione nei nodi vicini a dove si realizza la domanda, implementando la nuova tecnologia in modo, appunto, distribuito. Nelle due modalità presentate, ciò che cambia in maniera considerevole sono principalmente i costi relativi al mantenimento in magazzino dei prodotti o delle materie prime a livello complessivo sull'intera supply chain ed i costi relativi al trasporto di merci lungo la catena logistica.

In primo luogo, è possibile analizzare come potrebbe cambiare la supply chain nel caso di Additive Manufacturing centralizzato. Supponendo di installare la tecnologia di produzione nel magazzino centrale di Vesoul, la filiera logistica potrebbe essere rappresentata come in Figura 3.10:

Mappatura della supply chain con Additive Manufacturing centralizzato

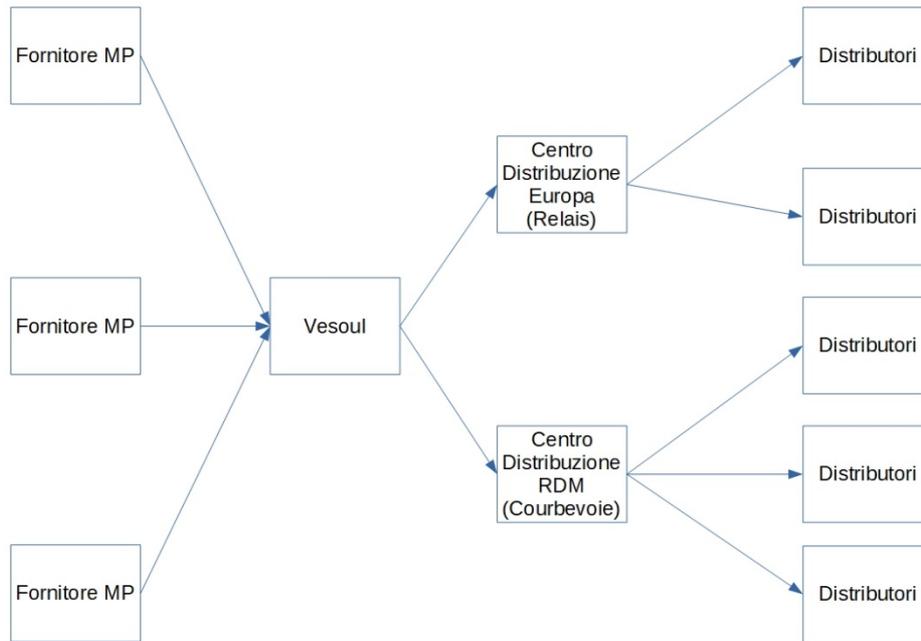


Figura 3.10 Rappresentazione della supply chain con Additive Manufacturing centralizzato

Come fatto nel capitolo 2, è stato utilizzato il modello SCOR, presentato nel paragrafo 1.3, per mappare questa prima evoluzione della supply chain.

Nello scenario in cui venga adottato l'Additive Manufacturing in modo centralizzato, la produzione avverrebbe nel nodo di Vesoul, da cui quindi partirebbe il flusso di prodotto finito fino ai distributori finali, che rappresentano l'interfaccia con la domanda finale. A monte del nodo produttivo ci sarebbero ancora i fornitori di materie prime, che però, a differenza dello scenario in cui la produzione avveniva in modo tradizionale, dovrebbero fornire il materiale polimerico da immettere nel processo di manifattura additiva.

Le attività svolte nei primi due nodi della filiera logistica sarebbero quindi le stesse, con l'unica differenza riguardante il prodotto da far fluire a valle: nel caso dei fornitori di materie prime si parla di materiali polimerici, nel caso del nodo di Vesoul si parla del prodotto finale, ovvero il fanale anteriore della Peugeot 206. Le attività svolte in questi centri sarebbero dunque quella di pianificazione della produzione (P3), cui seguirebbe il processo di produzione con una filosofia Make-to-Stock (M1). Identificata la domanda a valle e pianificata la spedizione di quanto prodotto verso i nodi in cui si è realizzata la domanda, attività che fanno parte dell'elemento P4 del modello SCOR, si procederebbe alla spedizione, che consente ai prodotti di fluire verso la fine della catena di approvvigionamento (D1).

Diversa è la mappatura relativa ai centri di distribuzione regionali, ovvero i nodi Relais e Courbevoie.

In questi casi le attività svolte sono quelle di pianificazione dell'approvvigionamento da parte dei nodi a monte (P4), di ricezione e verifica di quanto ricevuto (S1) ed infine le attività relative al flusso verso i distributori finali, ovvero gli elementi P4 e D1 del modello SCOR, che rappresentano rispettivamente la pianificazione della spedizione e la spedizione vera e propria verso i nodi in cui si è realizzata la domanda da parte del consumatore finale. A proposito di questi ultimi nodi, infine, una volta osservata la domanda da parte dei consumatori, viene eseguita una pianificazione dell'approvvigionamento (P2), dopodiché viene gestito il flusso in ingresso e in uscita tramite attività di allocazione delle risorse disponibili (S1).

Il livello tre del modello SCOR è riportato in Figura 3.11 per quanto riguarda i fornitori di materie prime e per quanto riguarda il nodo in cui avviene la produzione, Vesoul, con l'unica differenza derivante dal fatto che per i fornitori di materie prime il prodotto da far fluire verso valle sono le materie prime, appunto, mentre per il nodo di Vesoul si parla del prodotto finale, in Figura 3.12 per i nodi di distribuzione regionali, Relais e Courbevoie, ed infine in Figura 3.13 per i nodi relativi ai distributori finali, ovvero l'interfaccia tra produttori e consumatori finali:

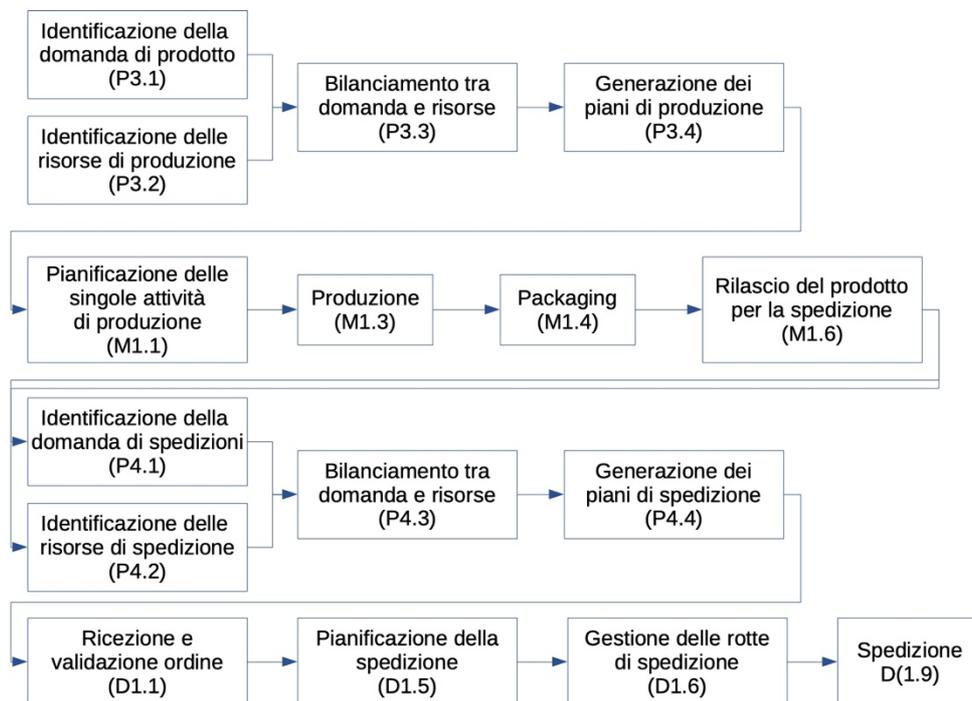


Figura 3.11 Schema delle attività relativo al livello tre del modello SCOR per i nodi dei fornitori di materie prime e per il nodo di Vesoul nel caso di implementazione di Additive Manufacturing centralizzato

Mappatura della supply chain con Additive Manufacturing centralizzato

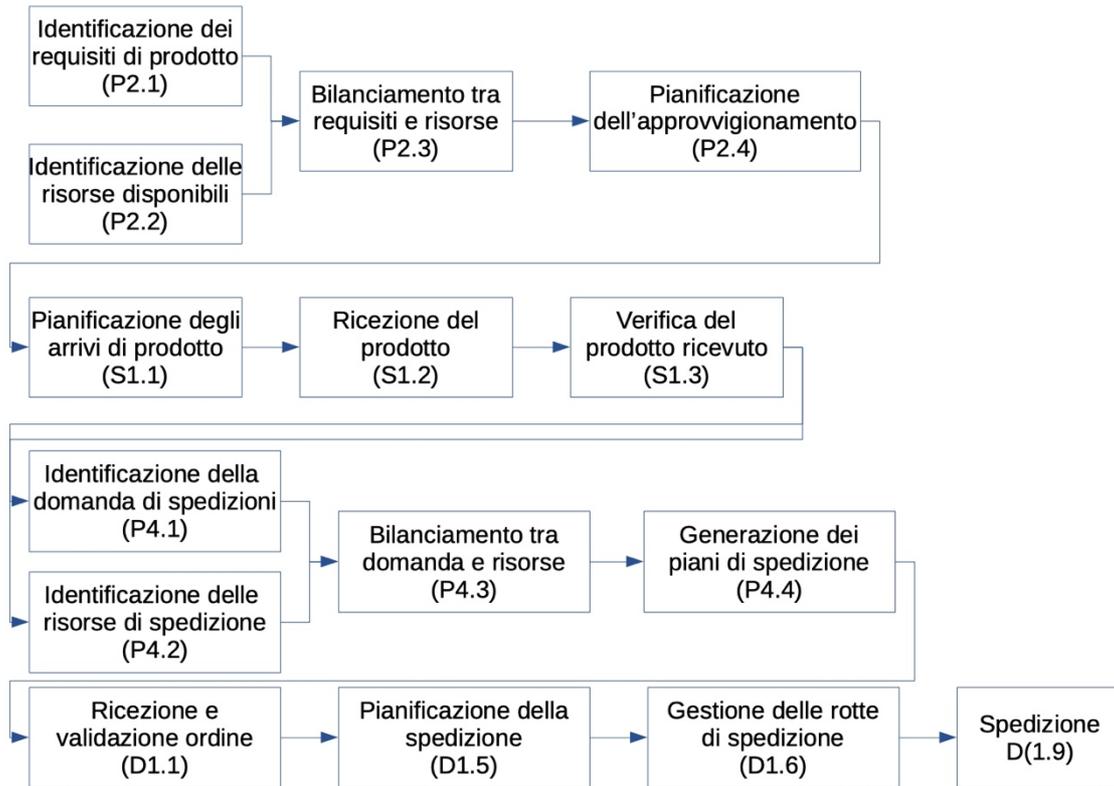


Figura 3.12 Schema delle attività relativo al livello tre del modello SCOR per i nodi dei centri regionali di distribuzione nel caso di implementazione di Additive Manufacturing centralizzato

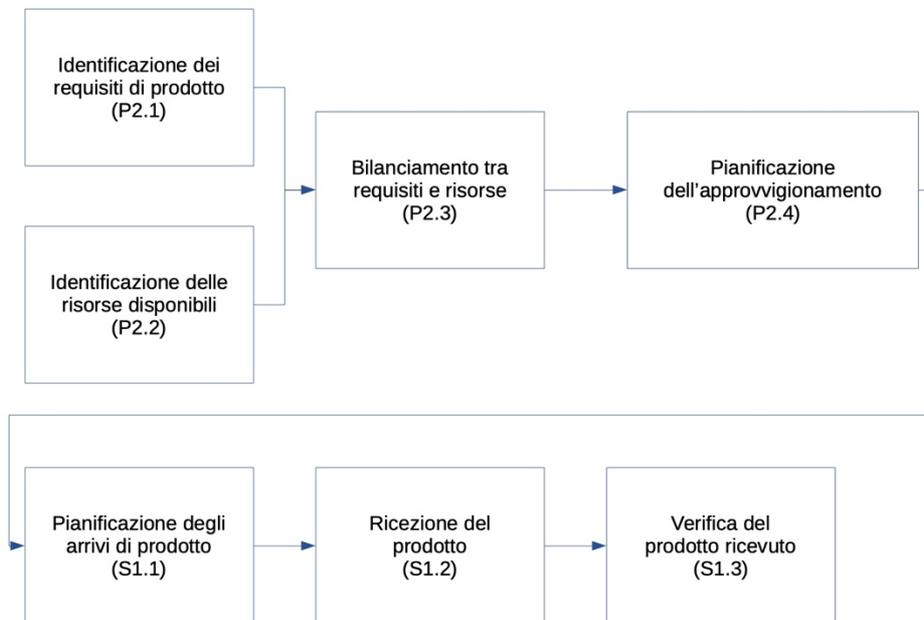


Figura 3.13 Schema delle attività relativo al livello tre del modello SCOR per i nodi dei distributori finali nel caso di implementazione di Additive Manufacturing centralizzato

3.2.1 Indicatori di performance

Gli indicatori di performance selezionati dal modello SCOR, raggruppati a seconda del tipo di attività svolta, sono i seguenti:

- Pianificazione della produzione (P3): gli indicatori selezionati dal modello SCOR hanno l'obiettivo di misurare gli scostamenti tra la programmazione iniziale ed i dati di produzione effettivi, al fine di comprendere se la pianificazione fatta ex-ante rispecchia effettivamente quanto è domandato dal consumatore a valle:
 - Aderenza al piano di produzione, calcolata come rapporto tra la produzione effettiva e la produzione teorica in un intervallo di tempo, ad esempio per ogni mese
 - Accuratezza della previsione, calcolata come rapporto tra la domanda ipotizzata in un arco temporale e la domanda effettiva nello stesso periodo di tempo
 - Tempo di produzione totale, calcolato come percentuale del tempo operativo totale
 - Magazzino totale dei semilavorati, indicato come capitale immobilizzato in magazzino sotto forma di semilavorati
- Produzione Make-to-Stock: in questo caso sono stati selezionati dal modello SCOR indicatori di performance prettamente relativi alla produzione dell'assemblato meccanico in esame. Questi KPI hanno l'obiettivo di rendere un quadro d'insieme di come avviene la manifattura, dei tempi impiegati e dei relativi costi:
 - Costo della produttività a valore aggiunto, calcolato come rapporto tra il prezzo delle attività di produzione che aggiungono valore al prodotto finale ed il costo di produzione totale
 - Costo operativo dell'impianto di produzione per unità di tempo
 - Costo unitario di produzione
 - Costo globale di produzione
 - Utilizzo della capacità produttiva, calcolato come rapporto tra il tempo impiegato effettivamente nella produzione ed il tempo totale operativo dell'impianto
 - Costo totale delle risorse utilizzate nella produzione
 - Utilizzo della capacità produttiva, calcolato come rapporto tra il tempo impiegato effettivamente nella produzione ed il tempo totale operativo dell'impianto
 - Rendimento di produzione, calcolato come percentuale dei pezzi non difettosi in relazione ai pezzi totali prodotti

- Spese di scarto, ovvero totale dei costi totali della produzione di pezzi difettosi
- Pianificazione della spedizione (P4): i KPI individuati per le attività connesse alla pianificazione delle spedizioni a valle rappresentano misure degli scostamenti tra quanto è stato previsto e quanto è avvenuto effettivamente, oltre ad una visione di alto livello sui costi sostenuti:
 - Accuratezza della previsione, calcolata come percentuale delle spedizioni effettuate secondo la schedulazione originaria rispetto alle spedizioni totali
 - Tempo totale del processo di gestione dell'ordine
 - Costi di spedizione totali
 - Inventory Position dell'inventario, calcolato come giacenze reali in magazzino più ordini già effettuati
 - Tempo di processo di gestione degli ordini
 - Performance di consegna in relazione alla data di consegna richiesta dal cliente
- Spedizione di prodotto finito (D1): gli indicatori di performance selezionati dal modello SCOR nel caso degli elementi che rappresentano attività di spedizione dei prodotti finiti tengono conto dei tempi impiegati, cioè dei vari lead time, dei costi e delle performance, ad esempio mettendo in relazione la data di consegna reale con quella richiesta dal cliente:
 - Lead time reale di consegna al cliente della merce stoccata
 - Costo totale del processo di gestione degli ordini
 - Accuratezza delle spedizioni, calcolata come percentuale delle spedizioni non arrivate al cliente rispetto alle spedizioni totali
 - Performance di consegna in relazione alla data richiesta dal cliente
 - Costi di trasporto totali
- Pianificazione dell'approvvigionamento (P2): gli indicatori di performance scelti per questo tipo di attività hanno l'obiettivo di quantificare i lead time previsti per l'approvvigionamento, i costi di gestione e le performance da parte dei fornitori, ad esempio come percentuale delle spedizioni in tempo rispetto alle spedizioni totali:
 - Spedizioni in tempo da parte dei fornitori, calcolate come percentuale sulle spedizioni totali
 - Accuratezza della previsione, calcolata come rapporto tra la domanda reale e la domanda prevista in un determinato arco temporale

Mappatura della supply chain con Additive Manufacturing distribuito

- Performance di spedizione da parte dei fornitori, calcolate come percentuale delle spedizioni in tempo in relazione alle spedizioni totali
- Tasso di soddisfazione della domanda da parte del fornitore, calcolato come percentuale delle richieste soddisfatte dal fornitore rispetto alle richieste totali
- Approvvigionamento (S1): in questo caso, i KPI scelti danno una visione complessiva delle performance da parte dei fornitori a monte, dei tempi impiegati per far fluire lungo la filiera logistica la merce spedita ed i relativi costi:
 - Percentuale di ordini ricevuti senza danneggiamenti rispetto agli ordini ricevuti totali
 - Percentuali di ordini ricevuti in tempo rispetto alla richiesta rispetto agli ordini ricevuti totali
 - Tempo totale del processo di ricezione degli ordini
 - Rapporto tra costo del processo di ricezione degli ordini per ogni prodotto e costo di acquisto unitario

3.3 Mappatura della supply chain con Additive Manufacturing distribuito

La seconda evoluzione possibile dello scenario in cui la produzione avviene tramite manifattura tradizionale è quella in cui si implementa l'Additive Manufacturing in modo distribuito, ovvero nei magazzini intermedi. In questo scenario sarebbe possibile eliminare il livello della supply chain relativo al magazzino centrale di Vesoul, in quanto la produzione avverrebbe nei magazzini intermedi a monte dei rivenditori finali e non occorrerebbe più un centro di smistamento intermedio tra fornitori e distributori.

Una rappresentazione schematica della supply chain con Additive Manufacturing distribuito a monte dei rivenditori finali è riportata nella Figura 3.14:

Mappatura della supply chain con Additive Manufacturing distribuito

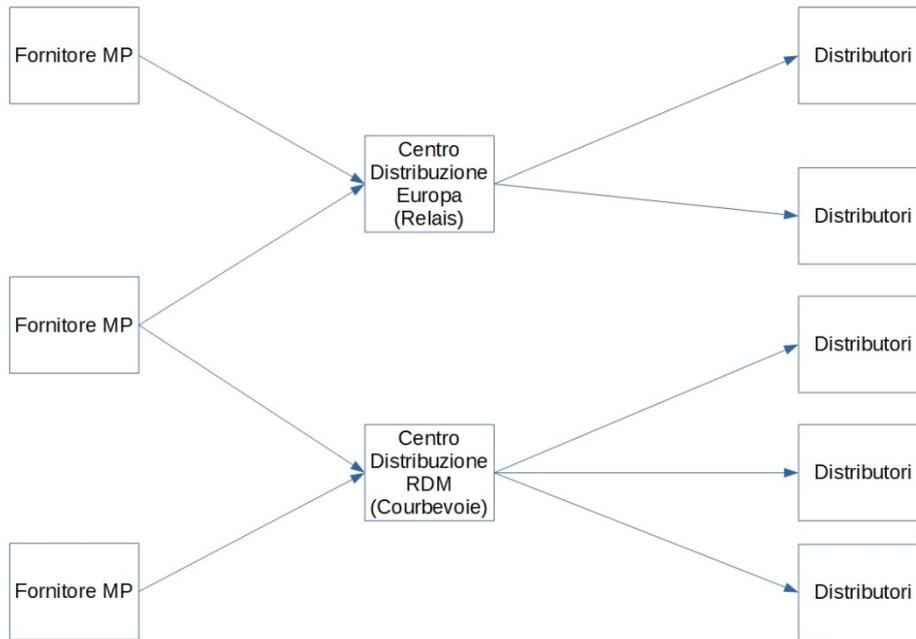


Figura 3.14 Rappresentazione schematica della supply chain distribuita a monte dei rivenditori finali

In questa seconda evoluzione della supply chain tradizionale le attività svolte dai fornitori di materie prime e dai due centri di distribuzione regionali sono le stesse, con la differenza che nel primo caso si producono i materiali polimerici necessari per la manifattura del fanale anteriore considerato, mentre nel secondo caso si produce il fanale vero e proprio. Queste attività riguardano una prima fase di pianificazione della produzione (P3), seguita dalla produzione vera e propria (M1), che avviene in una logica Make-to-Stock per garantire livelli di servizio adeguati, ed infine si procede con la pianificazione della spedizione verso valle di quanto stoccato (P4) e la successiva consegna (D1). Per quanto riguarda, invece, i distributori finali, in questi nodi avviene il processo di pianificazione dell'approvvigionamento da parte dei produttori competenti (P3) e le attività connesse all'approvvigionamento vero e proprio, quali ad esempio la ricezione dei prodotti e la loro verifica (S1).

Il flow chart relativo al livello tre del modello SCOR per i nodi relativi ai fornitori di materie prime e per i nodi relativi ai centri di distribuzione regionale di Relais e Courbevoie è riportato in Figura 3.15, mentre il flow chart del livello tre del modello SCOR relativo ai distributori finali è riportato in Figura 3.16:

Mappatura della supply chain con Additive Manufacturing distribuito

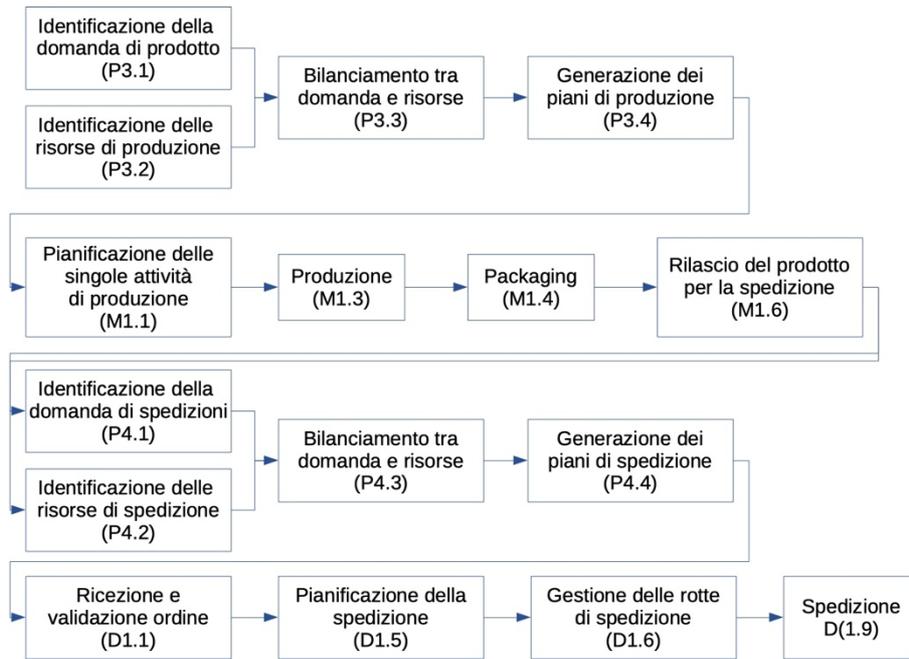


Figura 3.15 Schema delle attività del livello tre del modello SCOR relativo ai nodi dei fornitori di materie prime ed ai due nodi di produzione, Relais e Courbevoie nel caso di Additive Manufacturing distribuito

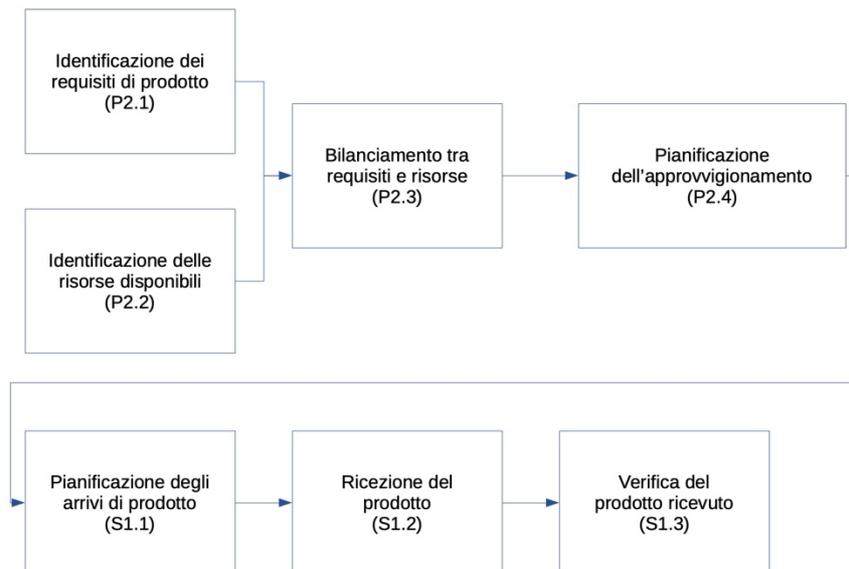


Figura 3.16 Schema delle attività del livello tre del modello SCOR relativo ai distributori finali nel caso di Additive Manufacturing distribuito

Gli indicatori di performance selezionati dal modello SCOR per le attività da svolgere individuate per ogni livello della supply chain nel caso di Additive Manufacturing distribuito sono riportati nel paragrafo 3.1.1.

3.4 Confronto tra gli scenari

Per confrontare i tre scenari presentati, ovvero la supply chain tradizionale, la supply chain in cui si implementa l'Additive Manufacturing centralizzato e la produzione avviene nel nodo di Vesoul, e lo scenario in cui si implementa l'Additive Manufacturing distribuito e la produzione avviene nei due nodi relativi ai centri di distribuzione regionali, Relais e Courbevoie, è possibile calcolare, come fatto nel capitolo 2, i tempi di trasporto tra i vari nodi della filiera logistica ed il livello delle scorte di sicurezza, che rappresentano una voce di costo considerevole tra i costi di gestione del magazzino totali.

La domanda complessiva aggregata a livello globale è stata ipotizzata pari a 2.973.000 unità di prodotto, divisa nei due canali di distribuzione: 1.864.000 unità in Europa, pari al 62,7% del totale, e 1.109.000 unità nel resto del mondo, pari al 37,3% del totale (Zumbo, 2016). È stato ipotizzato che la domanda complessiva sia distribuita uniformemente tra gli otto distributori di materie prime, che quindi devono soddisfare in media una domanda pari a 371.625 unità. Come fatto nel capitolo due è stata scelta una funzione di distribuzione normale, impostando come valori caratteristici un valore medio ed una deviazione standard, supposta pari al 20% in quanto dai valori storici è stato calcolato che la variazione dal valore medio rientra in questo range.

I tempi di trasporto tra i vari nodi della supply chain, come fatto nel capitolo 2, sono stati calcolati come:

$$LT = \frac{\text{Distanza [km]}}{100 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right]}$$

Nella formula proposta (Brandimarte et al., 2007), a differenza del capitolo due, il tempo di trasporto non è stato convertito in giorni in quanto i nodi considerati sono più vicini geograficamente e quindi le distanze sono esprimibili in ore.

3.4.1 Primo scenario: la supply chain tradizionale

In questo scenario la supply chain è la seguente:

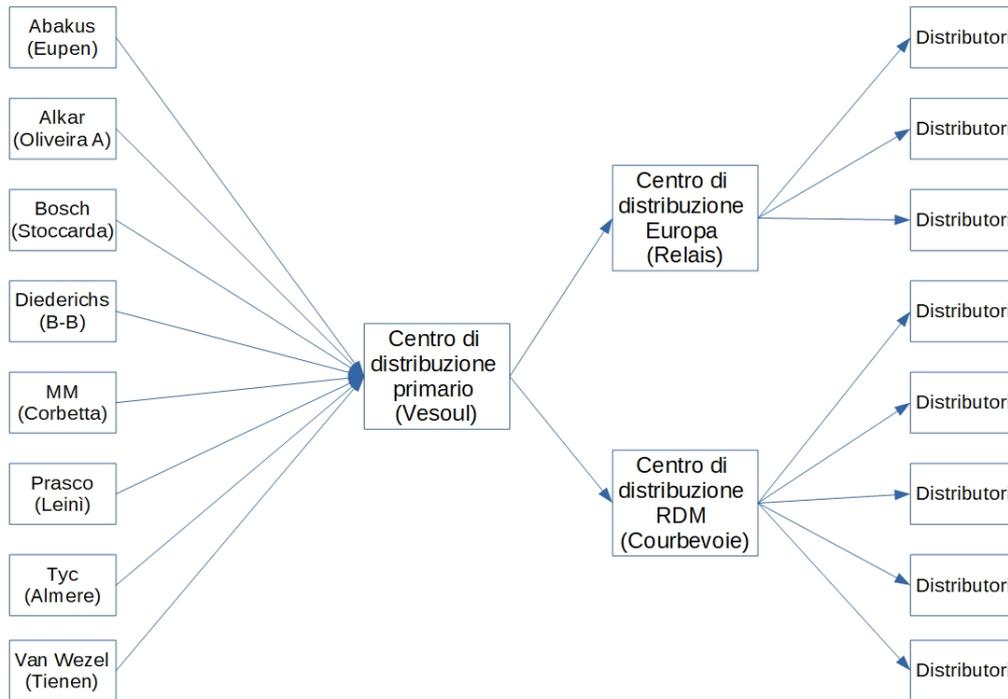


Figura 3.17 Rappresentazione schematica della supply chain

I tempi di trasporto risultanti, espressi in ore, sono riportati in Tabella 3.2 ed in Tabella 3.3:

	<i>Vesoul</i>
Abakus	4,68
Alkar	18,52
Bosch	3,77
Diederichs	7,47
Magneti Marelli	6,1
Prasco	5,49
Tyc	8,31
Van Wezel	5,53

Tabella 3.2 Lead time (in ore) tra i nodi dei fornitori di materie prime ed il nodo di Vesoul

	<i>Vesoul</i>
Relais	6,61
Courbevoie	4,58

Tabella 3.3 Lead time (in ore) tra i nodi dei centri regionali di distribuzione, Relais e Courbevoie, e Vesoul

Scegliendo il tempo peggiore possibile per quanto riguarda il trasporto dai fornitori ad inizio filiera ed il nodo centrale di Vesoul, si ottiene un lead time totale di consegna per l'Europa, ovvero per raggiungere il nodo del distributore situato a Relais, pari a $LT_{EU} = 18,52 + 6,61 = 25,13 h$, mentre per la consegna fino al magazzino da cui partono le spedizioni nel resto del mondo si ottiene un tempo di percorrenza totale pari a $LT_{RDC} = 23,1 = 8 h$.

Per quanto riguarda le scorte di sicurezza, invece, sono state calcolate come:

$$SS = z * \sqrt{AVGL * STD^2 + AVG^2 * STDL^2}$$

in cui con $AVGL$ è stato indicato il valore medio calcolato per il lead time dai nodi a monte della filiera, con AVG è indicato il valore medio della domanda da soddisfare, con $STDL$ la deviazione standard del lead time e con STD la deviazione standard della domanda. Con z è stato indicato il fattore moltiplicativo che tiene conto del livello di servizio che si vuole offrire, di cui un valore realistico potrebbe essere 0,85, in quanto si vuole garantire un buon livello di servizio ma al tempo stesso non avere troppe scorte in magazzino, che rappresentano un costo. Il valore di z corrispondente è quindi pari a 1,03.

I risultati di questa elaborazione, calcolati sono riportati in Tabella 3.4:

	Scorte di sicurezza (unità di prodotto)
Vesoul	586
Fornitori	557

Tabella 3.4 Livello delle scorte di sicurezza nella supply chain espresse in unità di prodotto

Le scorte di sicurezza complessive all'interno della supply chain sono quindi pari a 1.143 unità di prodotto finale.

3.4.2 Secondo scenario: la supply chain con Additive Manufacturing centralizzato

Nel secondo scenario individuato, che rappresenta una prima possibile evoluzione della supply chain tradizionale, si è implementata la manifattura additiva in modo centralizzato, ovvero in un solo nodo a monte della filiera logistica. La supply chain è quindi rappresentabile come in Figura 3.18:

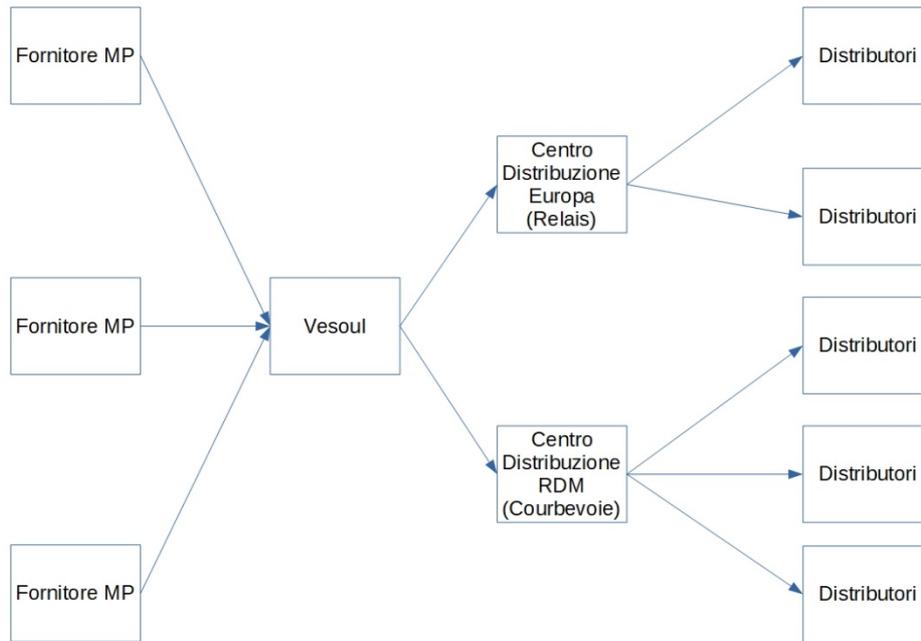


Figura 3.18 Rappresentazione della supply chain con Additive Manufacturing centralizzato

In questo caso, poiché la produzione avviene nel nodo di Vesoul ed i fornitori sono supposti essere gli stessi del caso in cui la produzione avviene in modo tradizionale, l'ammontare totale delle scorte di sicurezza non cambia, in quanto dal nodo di Vesoul si deve soddisfare ancora la domanda totale. Per questo motivo l'ammontare complessivo è pari a 1.143 unità di prodotto.

Per quanto riguarda il tempo di trasporto dal nodo a monte all'ultimo step della supply chain, invece, scegliendo il tempo maggiore possibile per il trasporto dai fornitori ad inizio filiera ed il nodo centrale di Vesoul, si ottiene un lead time totale di consegna per l'Europa, ovvero per raggiungere il nodo del distributore situato a Relais, pari a $LT_{EU} = 18,52 + 6,61 = 25,13h$, mentre per la consegna fino al magazzino da cui partono le spedizioni nel resto del mondo si ottiene un tempo di percorrenza totale pari a $LT_{RDC} = 18,52 + 4,58 = 23,1 h$.

3.4.3 Scenario tre: la supply chain con Additive Manufacturing distribuito

Nella terza e ultima evoluzione possibile individuata a partire dalla supply chain tradizionale, si è implementato l'Additive Manufacturing in modo distribuito, ovvero nel nodo immediatamente a monte dei distributori finali, in modo tale da rendere possibile l'eliminazione del nodo di Vesoul ed avere tempi di trasporto minori dall'inizio alla fine della filiera logistica, oltre che, ovviamente, in termini di scorte di sicurezza necessarie all'interno della catena di approvvigionamento. La situazione descritta è rappresentata in Figura 3.19:

Confronto tra gli scenari

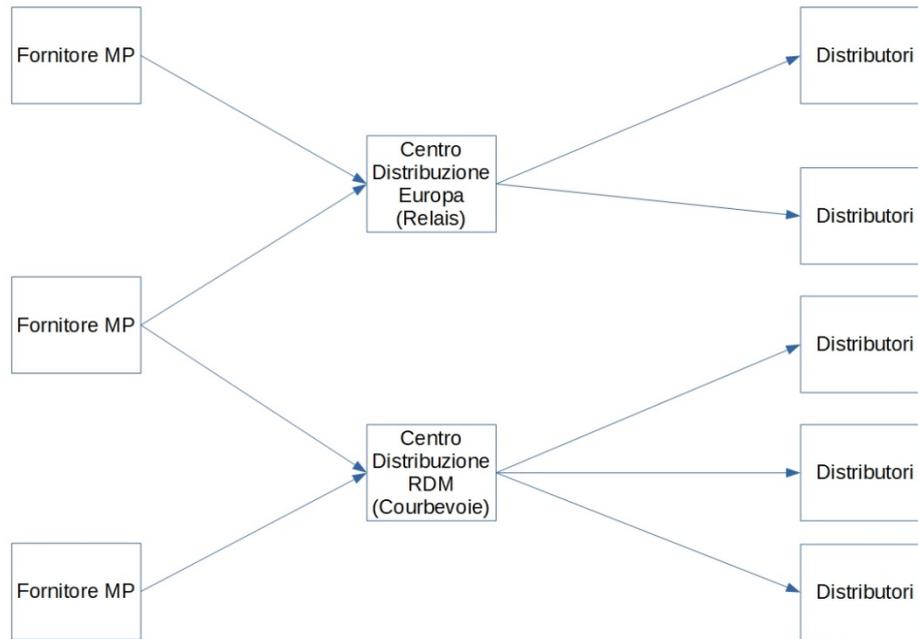


Figura 3.19 Rappresentazione schematica della supply chain distribuita a monte dei rivenditori finali

In questo terzo scenario, i tempi per fluire dai fornitori di materie prime ai nodi produttivi, Relais e Courbevoie, sono pari nel caso peggiore possibile, in media, a 19,56 ore nel caso di distribuzione europea e a 17,83 ore nel caso di distribuzione nel resto del mondo, mantenendo le stesse ipotesi di partenza dei paragrafi 3.4.1 e 3.4.2.

Per quanto riguarda le scorte di sicurezza, invece, ancora facendo le stesse ipotesi dei paragrafi precedenti, si ottiene che sono interamente depositate presso i fornitori a monte della catena di approvvigionamento, in quanto sono gli unici nodi da cui può partire la produzione e quelli immediatamente a monte della domanda finale. Per questo motivo, il totale delle scorte di sicurezza nel caso in cui nella supply chain venga adottato Additive Manufacturing distribuito è pari a 944 unità di prodotto.

Nella Tabella 3.5 è riportato un riepilogo del confronto, dal punto di vista del tempo di trasporto totale per fluire da monte a valle della filiera e dal punto di vista delle scorte di sicurezza totali all'interno della supply chain, tra lo scenario in cui la produzione avviene tramite manifattura tradizionale, lo scenario in cui avviene tramite Additive Manufacturing centralizzato nel nodo di Vesoul e lo scenario in cui avviene tramite manifattura additiva distribuita nei nodi di Relais e di Courbevoie:

	<i>Lead time complessivo</i>	Livello di scorte di sicurezza
Scenario 1 – Manifattura tradizionale	25,13 ore	1.143 unità
Scenario 2 – Additive Manufacturing centralizzato	25,13 ore	1.143 unità
Scenario 3 – Additive Manufacturing distribuito	19,56 ore	944 unità

Tabella 3.5 Riepilogo confronto tra i tre scenari

Come visibile dalla Tabella 3.5, in questo secondo caso di studio è stata presentata l'eventualità che l'Additive Manufacturing non riduca i tempi di trasporto per fluire da monte a valle della supply chain e le scorte di sicurezza totali all'interno della catena di approvvigionamento. Ciò è dovuto al fatto che, passando dallo scenario 1, in cui la produzione avviene tramite manifattura tradizionale, allo scenario 2, in cui avviene tramite manifattura additiva implementata nel nodo di Vesoul, non sono cambiati né i fornitori di materie prime né il nodo di distribuzione del prodotto finale. Nello scenario 3, invece, cioè lo scenario in cui l'Additive Manufacturing è implementato in modo distribuito, ovvero nei nodi di Relais per il mercato europeo e di Courbevoie per il resto del mondo, è stato possibile eliminare il nodo di Vesoul, con la conseguente diminuzione del tempo di trasporto totale, passato da 25,13 ore a 19,56 ore, e delle scorte di sicurezza totali, diminuite di circa il 18%.

3.5 Performance e criticità della supply chain del gruppo PSA

Per analizzare le performance di una supply chain, la sua efficienza e la sua risposta alla domanda finale, è possibile considerare cinque aspetti principali (Chopra et al., 2013):

- Impianti di produzione e loro localizzazione
- Politiche di gestione delle scorte
- Trasporti
- Informazioni
- Approvvigionamento
- Prezzo

Prendendo in considerazione la supply chain as is del gruppo PSA, è possibile analizzare le performance basandosi sui costi di magazzino, sui costi di trasporto, sui tempi di consegna e sullo scambio di informazioni tra i vari nodi:

- I costi di magazzino, in una filiera orientata alla soddisfazione della domanda nel più breve tempo possibile, sono supposti molto alti, in quanto il prodotto richiesto deve essere disponibile in ogni istante di tempo affinché possa essere consegnato quando la domanda si realizza. In particolare, nel magazzino centrale, in questo caso il magazzino a Vesoul, che aggrega la domanda a livello mondiale, ha al suo interno tutti gli items sul mercato, con un elevato costo di inventario e contemporaneamente un enorme patrimonio immobilizzato. In misura minore, inoltre, sono presenti elevati costi di giacenza nei magazzini intermedi tra il magazzino centrale ed i riparatori. Infine, il costo di magazzino nei riparatori è supposto pari a zero, in quanto il tempo di consegna estremamente breve consente loro di operare tramite una strategia completamente tirata dalla domanda (strategia pull).
- I costi di trasporto in una supply chain di questo tipo sono molto elevati, in quanto devono essere previste consegne da tutti i fornitori al magazzino centrale e da quest'ultimo ai nodi a valle, fino a raggiungere i punti in cui si realizza la domanda.
- I tempi di consegna variano a seconda del punto in cui ci si pone all'interno della catena di approvvigionamento. I fornitori hanno dei tempi di consegna propri e basati sui loro processi di produzione. Dal magazzino centrale di Vesoul al consumatore finale, invece, i tempi di consegna devono essere più brevi possibile.
- Il flusso di informazioni scambiate nella supply chain delle parti di ricambio del gruppo PSA è molto rilevante nei nodi che vanno dal magazzino centrale al consumatore finale, in quanto è fino al magazzino centrale che devono essere convogliate le informazioni sulla domanda finale, al fine di soddisfare i clienti nel più breve tempo possibile. A monte della filiera logistica, invece, non si hanno particolari scambi di informazioni, perché il magazzino centrale opera tramite una strategia push, ovvero tramite l'immagazzinamento secondo previsioni di domanda e non sulla domanda reale. È proprio per questo motivo che il gruppo PSA gestisce direttamente la supply chain da Vesoul fino ai nodi a valle.

Nonostante l'Additive Manufacturing aiuti a superare alcune delle criticità della supply chain tradizionale, come ad esempio i costi dei trasporti in alcuni casi ed i costi relativi al mantenimento in magazzino dei prodotti finali, anche in una catena logistica in cui venga adottata la manifattura additiva esistono delle criticità. La prima e più importante è quella relativa al tempo di produzione: attualmente, in un discorso generale, l'Additive Manufacturing non ha tempi di produzione compatibili con una strategia completamente guidata dalla domanda, cioè una strategia

Interamente pull, in quanto spesso i tempi di attesa per il consumatore finale sono troppo lunghi rispetto a quelli richiesti dal mercato. Ciò significa che un'evoluzione della supply chain che porti la produzione esclusivamente nei nodi finali, cioè quelli direttamente a contatto con la domanda finale, non sarebbe possibile, in quanto il tempo di produzione sarebbe troppo più lungo rispetto a quello che il consumatore è disposto ad aspettare per avere il prodotto. Per quanto detto fin qui, quindi, lo scenario più plausibile sarebbe quello in cui viene eliminato il magazzino centrale che aggrega la domanda finale, che nel caso del gruppo PSA è quello di Vesoul, mantenendo i magazzini intermedi, in cui dovrebbe avvenire la produzione e lo stoccaggio di prodotti in quantità tali da garantire comunque un buon livello di servizio al cliente.

A quanto detto riguardo i tempi di produzione, con tutte le implicazioni relative al costo di mantenimento in magazzino, si contrappone, in un trade off costi/benefici, il discorso relativo alla formazione del personale e all'investimento iniziale da sostenere per l'implementazione della nuova tecnologia di produzione. Se è vero che alcune voci di costo sembrerebbero essere minori quando si adotta la manifattura additiva in modo distribuito, è da tenere in considerazione il fatto che acquistare i macchinari di produzione necessari, duplicarli tante volte quante sono gli impianti di produzione individuati e formare il personale che si occuperà della gestione e delle operazioni relative alla nuova tecnologia potrebbe essere molto costoso e scoraggiare o rendere addirittura non conveniente l'adozione dell'Additive Manufacturing.

Per concludere, l'ultima voce considerata nella misura delle prestazioni in una supply chain è quella relativa allo scambio di informazioni: in una supply chain tradizionale ci si aspetta che le informazioni relative alla domanda finale risalgano la catena logistica fino al nodo in cui la domanda viene aggregata, che nel caso del gruppo PSA preso come riferimento è il magazzino centrale di Vesoul. Il flusso di informazioni in questo caso è molto elevato e, al fine di garantire un ottimo livello di servizio al cliente, la qualità delle informazioni scambiate deve essere notevole. In una supply chain in cui si adotta l'Additive Manufacturing questo aspetto viene in un certo senso reso secondario: i livelli di domanda influenzano un numero minore di nodi della filiera, al limite esclusivamente il nodo che funge da interfaccia tra venditore e consumatore, e quindi vengono eliminati gli effetti negativi relativi alla trasmissione di questo genere di informazioni, come ad esempio l'effetto Bullwhip, cioè l'aumento della varianza sulla domanda media man mano che si risale la filiera. Quanto detto aiuta a comprendere gli effetti positivi dell'adozione della manifattura additiva nel discorso relativo al flusso informativo all'interno della supply chain.

4 Conclusioni

In questo capitolo conclusivo sono stati individuati i benefici che l'elaborato ha apportato allo stato dell'arte della letteratura accademica relativa agli impatti dell'Additive Manufacturing sulla supply chain di assiemi meccanici in materiale polimerico, ciò che non è stato analizzato nel dettaglio e quindi i limiti del presente studio ed infine i passi futuri di ricerca che si potrebbero sviluppare per completare l'analisi in ogni suo aspetto.

4.1 Benefici e valore aggiunto del lavoro di tesi allo stato dell'arte della letteratura

Il presente elaborato, partendo da quanto già teorizzato in letteratura a riguardo degli impatti dell'Additive Manufacturing sulla supply chain, focalizzandosi sulle filiere logistiche di assiemi meccanici in materiale polimerico, ha avuto come obiettivo quello di comprendere e quantificare i cambiamenti possibili nelle catene di approvvigionamento. Ciò che si voleva dimostrare, in definitiva, è che la nuova tecnologia di produzione rende possibile l'eliminazione di nodi intermedi lungo la filiera e, almeno dal punto di vista teorico, rende la produzione più vicina, sia in termini di tempi di trasporto, sia in termini fisici e geografici, al consumatore finale. Addirittura, come evidenziato nel paragrafo 1.2.3, potrebbe essere lo stesso consumatore a diventare produttore, quando i limiti alla condivisione delle informazioni, quali ad esempio i progetti del prodotto finale, riescano ad essere superati.

Come dimostrato nei capitoli 2 e 3, la supply chain di assiemi meccanici può cambiare profondamente con l'adozione dell'Additive Manufacturing. Grazie alla nuova tecnologia, infatti, è possibile la produzione in un unico luogo dell'intero prodotto finale, che può non dipendere più dai singoli subassemblati provenienti da più nodi della catena di approvvigionamento. Ciò porta inevitabilmente ad un accorciamento della supply chain e alla diminuzione delle scorte di sicurezza, che rappresentano un costo da sostenere per fronteggiare l'incertezza relativa alla domanda finale quando si vogliono avere dei livelli di servizio molto alti, come quelli presentati nei due casi di studio analizzati.

I benefici del presente lavoro di tesi, oltre ad una conferma di quanto già teorizzato, basata su due casi di studio reali, riguardano il fatto che l'analisi è stata supportata da esempi numerici sui tempi di trasporto ed i livelli di scorte di sicurezza nei tre scenari individuati, ovvero la supply chain tradizionale, la supply chain con Additive Manufacturing centralizzato e la supply chain con Additive Manufacturing distribuito. Sia per il condotto di aerazione degli F-18 Super Hornet, sia per i fanali anteriori della Peugeot 206 è stato evidenziato come i tempi di trasporto fossero minori nel caso di

manifattura additiva distribuita tra i nodi immediatamente a monte del cliente finale e le scorte di sicurezza totali all'interno della filiera logistica fossero notevolmente diminuite, raggiungendo valori mediamente pari al 50% in meno rispetto alla supply chain tradizionale. Un ulteriore beneficio di questo elaborato è il contributo dato alla letteratura riguardante gli assiemi meccanici in materiale polimerico, tema ancora poco dibattuto. L'importanza di questo tipo di prodotti riguarda il fatto che, grazie all'Additive Manufacturing, potrebbero cambiare radicalmente i metodi di produzione, in quanto alcuni subassemblati attuali potrebbero essere accorpati in un unico prodotto grazie ai nuovi metodi di produzione. Inoltre, i materiali utilizzati nella manifattura additiva potrebbero essere più performanti rispetto a quelli utilizzati attualmente.

4.2 Limiti del lavoro di tesi

Oltre a quanto approfondito rispetto allo stato dell'arte della letteratura attuale sugli impatti dell'Additive Manufacturing sulla supply chain degli assiemi meccanici in materiale polimerico, ci sono degli aspetti che non stati completamente analizzati in questo lavoro di tesi e che meriterebbero ulteriori approfondimenti.

In particolare, sia nel caso del condotto di aerazione degli F-18 Super Hornet presentato nel capitolo 2, sia nel caso del fanale anteriore della Peugeot 206 presentato nel capitolo 3, non sono stati mai presi in considerazione i tempi di produzione dei prodotti finali né i tempi necessari all'evasione di un ordine diversi dal mero tempo di trasporto. In base a quanto detto nel capitolo 1, non si ha una chiara evidenza che i tempi di produzione diminuiscano con l'adozione dell'Additive Manufacturing in sostituzione della manifattura tradizionale, così come non è chiaro e non è stato approfondito nel corso di questo elaborato se questi tempi possano essere al limite uguali o addirittura superiori a quelli attuali. Ciò che è certo è che non devono essere più prodotti gli utensili necessari alla produzione tradizionale ma le fasi successive di manifattura non sono state quantificate in termini di tempi necessari.

A riguardo dei due casi di studio presentati, inoltre, è necessario sottolineare che sono state fatte delle assunzioni molto restrittive sia sui tempi di trasporto sia sulla domanda di prodotto finale, entrambi supposti distribuiti tramite una funzione normale, con deviazione standard pari al 20% del valore medio. Anche per quanto riguarda i livelli di servizio desiderati sono state fatte delle ipotesi derivanti da un'analisi della letteratura attuale e questo potrebbe essere un fattore limitante per la generalità dei risultati ottenuti.

Un altro aspetto che non è stato approfondito, sia a livello di introduzione sia a livello di casi di studio reali, è la conversione degli attuali fornitori di materie prime. Con la manifattura tradizionale si è visto che fluivano verso il nodo in cui avveniva la produzione del prodotto finale i subassemblati e le materie prime necessarie alla manifattura tradizionale. Quando nella supply chain viene adottato l'Additive Manufacturing, però, generalmente questi subassemblati non sono più necessari e le materie prime diventano materiali polimerici distribuiti sotto forma di bobine o di blocchi uniformi che dovranno essere poi fusi nel processo di manifattura. La domanda a cui si dovrebbe cercare di rispondere, quindi, è se gli attuali fornitori possano essere in grado di cambiare la propria produzione e fornire a valle quanto richiesto in ambito di manifattura additiva o se sia necessario cambiare completamente fornitori e includere nella supply chain altri tipi di imprese, in sostituzione di quelle già presenti nei nodi a monte.

Infine, nonostante sia presente nel paragrafo 1.2.9 una prima introduzione al concetto di supply chain ibrida, cioè una filiera logistica in cui l'Additive Manufacturing non sostituisce completamente la manifattura tradizionale, questo concetto deve essere sviluppato più approfonditamente, in quanto al momento non esiste in letteratura un vero e proprio studio di questo nuovo possibile fenomeno, bensì si è trattata sempre la manifattura additiva in sostituzione di quella tradizionale.

4.3 Passi futuri per la ricerca

In primo luogo, come passo futuro per la ricerca sarebbe necessario generalizzare i risultati ottenuti dal presente lavoro di tesi, superando le ipotesi restrittive riguardanti la distribuzione dei tempi di trasporto da un nodo all'altro delle due supply chain presentate e della domanda finale di prodotto. Ciò porterebbe a comprendere meglio, anche a livello quantitativo, gli effetti dell'Additive Manufacturing sulla filiera logistica di assemblati in materiale polimerico.

Inoltre, come già evidenziato nel paragrafo precedente a proposito dei limiti del presente lavoro di tesi, esistono dei concetti e degli argomenti che non sono stati poco approfonditi in letteratura e che dunque rappresentano delle zone d'ombra da analizzare per comprendere appieno gli impatti dell'Additive Manufacturing sulla supply chain.

In particolare, sono due gli argomenti che devono essere analizzati più nel dettaglio: il primo è la conversione degli attuali fornitori di materie prime, che con l'adozione della nuova tecnologia di produzione non sono più necessari se si considerano i subassemblati che forniscono nell'ambito della manifattura tradizionale ma che devono far evolvere i propri prodotti e renderli adeguati alla manifattura additiva oppure devono essere sostituiti con fornitori di materiali polimerici da

immettere nel processo di produzione tramite Additive Manufacturing. Il secondo aspetto che deve essere indagato ulteriormente per un'analisi completa degli effetti della manifattura additiva sulle filiere logistiche attuali è quello riguardante i costi iniziali da sostenere per implementare la nuova tecnologia ed il possibile trade-off con i risparmi che si otterrebbero in termini di tempi di trasporto e scorte di sicurezza. Generalmente, almeno attualmente, questi costi sono così ingenti da scoraggiare le imprese a passare alla nuova tecnologia di produzione. Le domande a cui rispondere sono quindi: qual è il livello di investimenti iniziali da sostenere per rendere conveniente il passaggio alla manifattura additiva? Come può essere raggiunto con la tecnologia attuale in commercio? Cosa deve essere migliorato?

Bibliografia

- APICS.** Supply-chain Operations Reference model. 2017. <http://www.apics.org/apics-for-business/frameworks/scor>.
- S. Chopra, P. Meindl.** Supply Chain Management. Strategy, Planning and Operation: Pearson, 2013, p. 15, 44.
- C. de Leona, Q. Chena Napolabel, B. Palaganas, J. O. Palaganas, J. Manapat, R. C. Advincula.** High performance polymer nanocomposites for Additive Manufacturing applications. *Reactive and Functional Polymers*, 103. 2016, p. 141-155.
- A. Emelogu, S. Chowdhury, M. Marufuzzaman, L. Bian.** Distributed or centralized? A novel supply chain configuration of additively manufactured biomedical implants for southeastern US States. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018, p. 2-19.
- D. R. Eyers, A. T. Potter.** Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective. *Computers in Industry*, 92-93. 2017, p. 208-218.
- S. Ford, M. Despeisse.** Additive Manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*. 2016, p. 1-15.
- I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker.** Additive Manufacturing Technologies. 3D printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies. 3D printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*. s.l. : Springer, 2015, p. 32-35.
- J. Holmström, T. Gutowski.** Additive Manufacturing in Operations and Supply Chain Management. *Journal of Industrial Ecology*, 21. 2017, p. 21-25.
- J. Holmström, J. Tuomi, J. Partanen.** Rapid Manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 12. 2010, p. 687-697.
- N. Hopkinson, P. M. Dickens.** Analysis of Rapid Manufacturing - using layer manufacturing processes for production. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 217. 2003, p. 31-39.
- S. Khajavi, J. Partanen, J. Holmström.** Additive Manufacturing in the spare parts supply chain. *Computer in Industry*, 65. 2014, p. 50-63.

- J. Kilpi, J. Töyli, A. Vepsäläinen.** Cooperative strategies for the availability service of repairable aircraft components. *International Journal of Production Economics*, 117. 2009, p. 360-370.
- S. Li, P. Daie.** Configuration of assembly supply chain using hierarchical cluster analysis. *CIRP*, 17. 2014, p. 622-627.
- C. Lindemann, U. Jahnke, M. Moi, R. Koch.** The impact of Additive Manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: Supply Chain Operation Reference (SCOR) model based analysis. *Production Planning & Control*, 25. 2014, p. 1169-1181.
- J. T. Mentzer, W. DeWitt, J. S. Keebler, S. Min, N. W. Nix, C. D. Smith, Z. G. Zacharia.** Defining Supply Chain Management. *Journal of Business Logistics*, 22. 2001, p. 1-25.
- J. Minguella-Canela, A. Muguruza, D. R. Lumbierres, F.-Javier Heredia, R. Gimeno, P. Guod, M. Hamilton, K. Shastry, S. Webb.** Comparison of production strategies and degree of postponement when incorporating Additive Manufacturing to product supply chains. *Procedia Manufacturing*, 13. 2017, p. 754-761.
- J. Minguella-Canela, A. Muguruza, D. R. Lumbierres, F.-Javier Heredia, R. Gimeno, P. Guo, M. Hamilton, K. Shastry, S. Webb.** Impact of Additive Manufacturing technology adoption on supply chain management processes and components. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 46. 2016, p. 886-917.
- E. Ottimo, R. Vona.** L'evoluzione nella dimensione organizzativa della supply chain. 2006, p. 63-76.
- F. Pérès, D. Noyes.** Envisioning e-logistics developments: Making spare parts in situ and on demand. State of the art and guidelines for future developments. *Computers in Industry*, 57. 2006, p. 490-503.
- D. Pooya, S. Li.** Hierarchical clustering for structuring supply chain network in case of product variety. *Journal of Manufacturing Systems*, 38. 2016, p. 77-86.
- M. Ruffo, C. Tuck, R. J. M. Hague.** Cost estimation for Rapid Manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes. *Journal of Engineering Manufacture*, 220. 2006, p. 1117-1127.

- D. Strong, M. Kay, B. Conner, T. Wakefield, G. Manogharan.** Hybrid manufacturing—integrating traditional manufacturers with additivemanufacturing (AM) supply chain. *Additive Manufacturing*. 2018, 21.
- H. L. Tekinalp, V. Kunc, G. M. Velez-Garcia, C. E. Duty, L. J. Love, A. K. Naskar, C. A. Blue, S. Ozcan.** Highly oriented carbon fiber–polymer composites via Additive Manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105. 2014, p. 144-150.
- S. Tornincasa, E. Chirone.** Disegno Tecnico Industriale. s.l. : Il Capitello, 2014, p. 23-43.
- C. Tuck, R. J. M. Hague, N. D. Burns.** Rapid Manufacturing - impact in supply chain methodologies and practice. *International Journal of Services and Operations Management*, 3. 2007, p. 1-22.
- H. Wang, K. Jeonghan, Z. Xiaowei Zhu, S. Jack Hu.** A complexity model for assembly supply chains and its application to configuration design. 2009.
- H. Wang, J. Ko, Z. Xiaowei Zhu, S. Jack Hu.** Modeling and analysis of the on-demand spare parts supply using Additive Manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*. 2018.
- S. Yang, Y. Tang, Y. F. Zhao.** A new part consolidation method to embrace the design freedom of Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 20. 2015, p. 444-449.
- L. Yao, G. Jia, Y. Cheng, Y. Hu.** Additive Manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study. *International Journal of Production Research*, 5. 2017, p. 1498-1515.

Sitografia

AirFramer. 2019. [Online] http://www.airframer.com/aircraft_detail.html?model=F/A-18%20Super%20Hornet.

Bucap. 2019. [Online] www.bucap.it.

Diam, INFN. 2019. [Online] <http://diam.pd.infn.it/index.php/blog/18-addivearticle>.

R. Lester. 2016. [Online] <https://slideplayer.com/slide/6199058/>.

M. Manca. 2017. [Online] <https://www.logisticaefficiente.it/le/network-e-trasporti/gestione-trasporti/la-riorganizzazione-logistica-dei-ricambi-auto.html>.

W. Nesci. 2016. [Online] <https://appuntiturismo.it/aeroporto-hub-and-spoke-point-to-point/>.

Renishaw. 2019. [Online] www.resources.reniswhaw.com.

M. Rouse. 2018. [Online] <https://searcherp.techtarget.com/definition/supply-chain-management-SCM>.

O. Wyman. 2017. [Online] <https://www.oliverwyman.com/2017-2027-fleet-mro-forecast.html>.

P. Zumbo. 2016. [Online] <https://www.slideshare.net/logisticaefficiente/la-logistica-distributiva-dei-ricambi-auto-il-caso-gruppo-psa-italia>.

Ringraziamenti

Sarebbe troppo facile dire che sembra ieri quel giorno di poco più di sei anni fa in cui stavo salendo per la prima volta sul treno da Roma a Torino per iniziare la lunghissima avventura che mi ha portato fin qui, a raccogliere buona parte di quello che ho seminato in questi anni. No, non sembra ieri perché di tempo ne è passato e di acqua sotto i ponti anche di più.

Quel giorno di settembre ricordo benissimo che persi la coincidenza tra l'autobus da Avezzano a Roma ed il Frecciarossa per Torino, come se il destino volesse farmi capire fin da subito che non sarebbe andato sempre tutto bene e che non sarebbe stato tutto facile e immediato come un ragazzo di poco più di diciotto anni avesse potuto pensare. Ripensando a quel periodo mi tornano in mente molti ricordi e tante risate, immagini, non sempre molto nitide effettivamente, di serate passate in Piazza Vittorio Veneto, l'impatto con il Politecnico, con i professori, con gli esami in cui sei poco più di un numero e fino a quando non studi seriamente non arrivi nemmeno a quella sufficienza che fino a poco tempo prima sembrava quasi una sconfitta.

A ripensarci oggi, quante cose sono cambiate in questi sei anni! In questi mesi a Torino ho guadagnato tanto, sotto tutti i punti di vista, ho imparato lezioni di vita che mi hanno cambiato profondamente e ho acquisito una fiducia in me che indubbiamente prima non avevo. Non sono mancate le sconfitte, le perdite dolorose, i momenti in cui la voglia di mettere tutto in una valigia e tornare a casa è stata quasi più forte di qualsiasi altra cosa mi trattenesse in quella città che fino a poco tempo prima custodiva solo ed esclusivamente i colori della mia squadra del cuore.

Nelle aule del Politecnico ho imparato molto, sono stato formato da professori per cui nutro una stima profonda e sincera e non smetterò mai di essere grato a tutte le persone che ho incontrato nel mio percorso per quello che mi hanno dato. Volendo scegliere, tra le tante, la lezione più importante che ho imparato in questi anni è che i minuti, i giorni, i mesi e addirittura gli anni non si accumulano uno sull'altro, scorrendo inesorabilmente. Il tempo che viviamo è il frutto di quello che abbiamo già vissuto, delle scelte che abbiamo fatto e delle porte che abbiamo aperto o chiuso durante il nostro viaggio. Il tempo non è una lancetta che scorre sempre e comunque, ogni istante è il risultato di quello precedente e ciò che siamo è frutto solo ed esclusivamente di quello che abbiamo scelto di essere.

Non è il mondo, o il destino, o chi per lui, a darci ciò che pensiamo di meritare, siamo noi a dovercelo prendere, con le unghie e con i denti quando necessario.

In questi sei anni a Torino sono molte le persone che mi hanno accompagnato, per un tratto più o meno lungo del mio cammino, fino a qui e alla fine del mio percorso voglio ringraziarle dal profondo del cuore perché è anche merito loro se sono arrivato al traguardo.

Innanzitutto, ringrazio la gentilissima professoressa Anna Corinna Cagliano, che mi ha seguito durante tutta la stesura della tesi di laurea, dimostrando una professionalità ed una disponibilità non comuni. Questo lavoro è frutto anche e soprattutto dei preziosi consigli ricevuti in questi mesi.

Ho dedicato la conclusione del mio percorso universitario a tutte quelle persone che hanno sempre creduto in me, perché credo fermamente che ognuno di noi abbia bisogno di tanto in tanto di un incoraggiamento e di una parola dolce per continuare la sua corsa. Nella mia vita ho avuto la fortuna di avere persone al mio fianco che mi hanno sempre sostenuto, in ogni mia scelta, e mi hanno fatto sentire in ogni istante la loro vicinanza. Non mi stancherò mai di ringraziare a questo proposito i miei genitori, che mi appoggiano sempre e incondizionatamente. Siete la mia forza, i piedi con cui percorro ogni passo del mio lungo cammino e gli occhi con cui guardo l'orizzonte quando sento di essere vicino al traguardo prima di partire per una nuova sfida. Ci sono stati momenti in cui non sapevo bene dove stessi andando e quale fosse il mio obiettivo. In quei momenti è bastata una chiamata o un weekend a casa per tornare ad avere tutto chiaro e di questo non vi ringrazierò mai abbastanza.

Un ringraziamento speciale va a mia sorella Angela. In questi anni ho imparato che nella vita bisogna avere un complice, una persona a cui si può dire tutto senza farsi troppi problemi, una persona con cui basta uno sguardo per capirsi, con cui festeggiare le vittorie e farsi sostenere nei momenti difficili. Per me tu sei tutto questo e, anche se non siamo più a poche fermate di autobus, aspetto sempre con ansia la tua crostata al cioccolato di Carrefour ogni volta che c'è qualcosa da festeggiare.

Ultimi, ma solo su queste pagine, vengono i ringraziamenti per tutti i miei amici. Innanzitutto, voglio ringraziare i compagni di mille progetti universitari Edoardo, Gianluca e Riccardo, con cui abbiamo riso (non quello in bianco della mensa, fortunatamente), scherzato, discusso e portato a termine contro ogni pronostico tutti i lavori di gruppo.

Un ringraziamento speciale va a tutte le persone che ho conosciuto durante il mio tirocinio in Iveco, a Eleonora, a Erica, a Donato, a Michela, a Sergio e a Samuel (hai cagnat mestier, si?). Grazie a voi ho imparato per la prima volta cosa significhi lavorare in una grande azienda e odiare il proprio capo! Voglio ringraziare poi tutta la grande famiglia del Barracuda, che porterò per sempre nel mio cuore. Grazie al presidente Tortorelli, che mi ha accolto come un figlio e mi ha concesso la splendida

opportunità di lavorare con bambini che spero arrivino presto almeno in Serie A per poter dire “Sono stato io il loro primo allenatore!”.

Un ringraziamento speciale va a tutti i miei amici “di giù”, che mi aspettano ogni volta a braccia aperte e con un sorriso enorme sulle labbra, facendomi sentire subito veramente a casa. Grazie a tutti i ragazzacci di Celano, ad Adriano, a Francesco, a Mario, a Silvia, a Serena, ai due super coinquilini Pietro e Simone, a Guido e tutti gli Avezzano’s boys. Sapere di poter contare sempre su amici come voi è una fortuna che pochi hanno e non smetterò mai di ringraziarvi per tutto quello che avete fatto per me.

Ogni sorriso che ho ricevuto in questi anni è stato un piccolo mattoncino su cui ho costruito il mio arrivo al traguardo...

... e questo è solo l’inizio!