

Catene di fornitura basate sulla produzione additiva

Silvana Gallinaro*

Sommario: *Abstract* - 1. Introduzione - 2. Metodologia - 3. Le catene di fornitura basate sulla produzione additiva - 3.1. La produzione additiva - 3.2. *Postponement* e *customer order decoupling point* nella prospettiva della produzione additiva - 3.3. *AM-based supply chain* centralizzate e decentrate - 3.4. Vantaggi e svantaggi della produzione additiva - 3.4.1. Vantaggi a livello di prodotto e processo di produzione - 3.4.2. Vantaggi a livello di *supply chain* - 3.4.3. Svantaggi a livello di prodotto e processo di produzione - 3.4.4. Svantaggi a livello di *supply chain* - 4. Valutazione degli effetti dell'implementazione della produzione additiva. 4.1 Simulazione e comparazione di configurazioni di *supply chain* - 4.2. Il processo decisionale per la scelta delle tecnologie di manufacturing - 4.3. Produzione additiva ed economie di scala - 5. Conclusioni: implicazioni teoriche e manageriali - Bibliografia

Abstract

This article deals with the implementation of additive technologies in supply chains and addresses two open issues: the first one concerns the approaches and methods of evaluating the implementation of additive technologies in supply chains; the second one the relationship between the cost advantages allowed by additive technologies and the demand of additive products. In agreement with some scholars, the quantitative approach to the analysis of manufacturing technologies is recommended, and System Dynamics (SD) method is advised in order to measure the effects produced by the implementation of additive manufacturing in supply chains. SD models, simulates and, therefore, helps to understand the dynamics of conventional and additive manufacturing based supply chains. Cost structures can be built on basis of supply chains dynamic models, each of which refers to a different production technology, and used in comparative assessments. The supply chain modeling and simulation is an extension of Virtual Manufacturing to the entire value creation system.

In this article, no mathematical formalization of supply chain models is suggested, but rather a method of 'capturing' the variables for value chain modeling is proposed and a decision-making process for choosing the AM option is advised.

* **Silvana Gallinaro**, Professore Ordinario di Economia e Gestione delle Imprese, Dipartimento di Economia e Statistica "Cognetti de Martiis", Università di Torino; e-mail: silvana.gallinaro@unito.it.

The aim of this article is twofold, seeking to weaken two hypotheses concerning additive manufacturing-based supply chains advanced by several scholars and found in literature. Firstly, the hypothesis of additive supply chain superiority compared to conventional supply chain based on qualitative evidence of the advantages that additive technologies generate in business and supply chains; secondly, the hypothesis of non-reachability of economies of scale by means of additive machines. According to the latter, the additive machines would be efficient only at a low volume of demand and production, and the convenience to use them would decrease with increasing demand. This article otherwise argues that additive machines are potentially able to achieve economies of scale; furthermore, that they can be implemented only after the quantitative measurement of the possible effects they can generate to the level of business and supply chain. In the future the advancement in technological development will lead to an improvement of additive machine technical characteristics on which economies of scale themselves depend - such as production time and qualitative standardization of products. This will likely allow implementing additive technologies for large-scale production.

Key words: additive manufacturing, supply chain, simulation.

1. Introduzione

Numerosi articoli scientifici trattano dell'implementazione delle tecnologie additive nelle imprese e nelle *supply chain* in modo approfondito. Dal loro esame emergono, tuttavia, due *open issue*, che vengono affrontate in questo articolo. La prima concerne la valutazione degli effetti dell'implementazione delle tecnologie additive nelle *supply chain* a tecnologia convenzionale; la seconda riguarda la relazione tra i vantaggi di costo consentiti dalle tecnologie additive e la domanda dei prodotti additivi.

In particolare, in questo articolo si è cercato di dar risposta alle seguenti *research question*.

- Con quale approccio e metodo di analisi l'impresa focale può opportunamente valutare la convenienza ad implementare una tecnologia additiva nella *supply chain* convenzionale?
- Le macchine additive raggiungono economie di scala? Ovvero, i vantaggi di costo, consentiti dalle tecnologie additive a bassi volumi produttivi, sono difendibili dall'impresa all'aumento della domanda dei prodotti?

L'implementazione delle tecnologie additive nel manufacturing è frutto di una decisione che pertiene all'ambito delle scelte strategiche di *pure postponement* delle imprese. L'implementazione delle tecnologie di produzione additiva consente, infatti, di affidare la differenziazione del prodotto alle attività progettuali di *value creation*, e soddisfare le esigenze di flessibilità di ogni sorta dell'impresa focale non disgiunte da quelle di efficienza. Adottando una siffatta prospettiva di analisi strategica, questo articolo sostiene l'approccio quantitativo alla valutazione degli effetti dell'implementazione della produzione additiva nelle catene di fornitura. In altri

termini, in questo articolo si ritiene che la decisione di implementare le tecnologie additive in una *supply chain* convenzionale non può prescindere dalla *misurazione ex-ante* degli effetti che esse potrebbero determinare in termini di costi, grado di personalizzazione dei prodotti, impatto ambientale, tempi, *performance*, e così via.

L'adozione di un approccio quantitativo all'analisi delle catene di fornitura basate sulla produzione additiva (*AM-based supply chain*) indebolisce la posizione dottrinale di coloro i quali sostengono un'indiscussa superiorità delle tecnologie additive rispetto a quelle convenzionali, descrivendone i vantaggi (tanti) rispetto agli svantaggi (pochi) da un punto di vista qualitativo.

In questo articolo, si ritiene che l'analisi qualitativa delle *AM-based supply chain* debba precedere e preparare all'analisi quantitativa. L'individuazione dei vantaggi e svantaggi della produzione additiva nelle *supply chain* viene considerata, infatti, un metodo di 'cattura' delle variabili per la modellizzazione delle catene del valore, nella fattispecie, fase propedeutica alla focalizzazione dei componenti di modelli dinamici di simulazione di *supply chain*.

Dopo aver descritto vantaggi, svantaggi e *bottleneck* delle tecnologie additive nelle catene di fornitura - così come si rinvencono nella letteratura prevalente sull'argomento - nell'articolo viene evidenziata l'adeguatezza dei metodi di simulazione ai fini della valutazione dell'implementazione dell'*AM* nelle *supply chain* convenzionali. In linea con Li *et al.* (2017), è stato identificato nella *Dinamica dei Sistemi (System Dynamics)* il metodo di modellizzazione e simulazione di configurazioni di *AM supply chain* dalle quali trarre funzioni di variabili quantitative da comparare con quelle associate a *supply chain* convenzionali.

Non è obiettivo di questo articolo la formalizzazione matematica di modelli di *supply chain*, bensì lo è la formulazione di un processo decisionale per la scelta della produzione additiva nelle *supply chain* convenzionali.

L'altra *open issue* affrontata nel presente studio attiene alla presunta assenza di economie di scala delle macchine additive, tesi ampiamente sostenuta in dottrina e in pubblicistica. È noto che nella gran parte della letteratura sull'argomento il dilemma 'economie di scala o di *scope*' nel manufacturing viene risolto dalle tecnologie additive con una 'customizzazione senza penalizzazioni' (Gibson *et al.*, 2010) o 'customizzazione senza extra costi', (Holmström *et al.*, 2017; Weller *et al.*, 2015), ma con un'efficienza decrescente al crescere del volume produttivo. Di frequente, negli studi sull'argomento si rinviene, infatti, l'affermazione che i costi variabili totali della produzione additiva sono superiori a quelli fissi, ragion per cui il costo unitario medio totale del prodotto additivo rimarrebbe pressoché invariato al crescere della produzione. Diffusa è anche l'affermazione che le macchine additive, diversamente da quelle convenzionali, sono efficienti solo a bassi volumi produttivi, e che la convenienza ad impiegarle nei processi di manufacturing diminuisce al crescere della domanda per assenza di economie di scala. Eppure la macchina additiva è un investimento durevole dell'impresa e, in quanto tale, i costi sostenuti per acquistarla sono da considerare fissi, da suddividere perciò nello spazio e nel tempo tra le unità di prodotto ottenute ai fini del computo dei costi unitari di produzione. Da qui è sorto il quesito se i vantaggi di costo, consentiti dalle tecnologie additive quando i volumi

produttivi sono bassi, diminuiscono davvero quando la domanda dei prodotti additivi aumenta.

È inconfutabile che la manifattura additiva dispensi la customizzazione dei prodotti da *extra* costi, perché essa non necessita di attrezzature e stampi *product-unique*, e la riprogettazione digitale è pressoché non onerosa. Numerosi studi empirici provano che la liquidità investita a lungo termine nelle produzioni additive sarebbe tendenzialmente minore rispetto a quella richiesta dalle produzioni convenzionali. Tutto quanto precede non significa, però, che la produzione additiva non necessiti di investimenti fissi da ammortizzare. Tali sono, come suddetto, le macchine additive, il cui costo va pur sempre contabilmente suddiviso tra le unità di prodotto nello spazio e nel tempo. Il costo unitario delle macchine additive è, al presente, elevato, e il costo totale delle macchine additive a livello di intera catena di fornitura tende a crescere in ipotesi di decentramento produttivo.

L'analisi contenuta in questo articolo comprova che il costo unitario del prodotto additivo è una funzione decrescente delle quantità prodotte, anche se con un basso valore di coefficiente angolare, che, tuttavia, potrebbe facilmente aumentare con il progredire dell'evoluzione tecnologica. Diversamente dalle argomentazioni sostenute da una buona parte degli studiosi dell'argomento, in questo articolo si afferma, infatti, che le macchine *AM-based* sono in grado di raggiungere economie di scala, anche se con bassi tassi di decrescita del costo medio unitario rispetto a quanto verifica la produzione sottrattiva, e ciò a causa degli attuali limiti della produzione additiva, quali sono un elevato *throughput time*¹ e la scarsa standardizzazione qualitativa dei prodotti². Questi limiti rallentano il raggiungimento delle economie di scala, ma non le escludono; inoltre, ultimamente assistiamo al loro progressivo superamento, grazie al rapido progredire dello sviluppo tecnologico, che sta portando ad un continuo miglioramento delle prestazioni tecniche delle macchine additive – quelle, per intendersi, da cui dipendono le economie di scala stesse. La possibilità di far leva sulle economie di scala, unitamente alle riduzioni dei prezzi delle macchine e dei materiali per la produzione additiva - realisticamente ipotizzabili nel prossimo futuro, sempre per effetto del progresso tecnologico - rappresentano considerazioni importanti su cui costruire l'ipotesi di una rapida diffusione a breve e su ampia scala delle tecnologie additive negli ecosistemi di *business*.

2. Metodologia

La ricerca contenuta in questo articolo è sia descrittiva che esplicativa del fenomeno in oggetto; delinea, altresì, ipotesi circa i futuri scenari riguardanti le *AM-based supply chain*.

Per sviluppare gli argomenti *focus* di questo articolo e rispondere alle *question research* presentate nel paragrafo precedente, abbiamo selezionato e analizzato i

¹ Il *throughput time* è il tempo che intercorre tra l'emissione di un ordine di produzione e il ricevimento del prodotto in magazzino o la spedizione del prodotto ad un cliente.

² Già Ruffo *et al.* (2006) indicavano, tra i limiti ostanti alla diffusione della produzione additiva, la scarsa velocità e ripetibilità dei processi.

principali studi sull'argomento, condotti con approccio sia quantitativo (pochi) che qualitativo (la maggior parte). Abbiamo scelto di procedere utilizzando il software della biblioteca dell'Università di Torino, per mezzo del quale abbiamo avuto accesso alle principali piattaforme *online* e a motori di ricerca, quali i *database EBSCO Business Source Ultimate*, *Science Direct (Elsevier)*, *Web of Science*; nonché utilizzato la piattaforma *Google Scholar* e varie riviste *open access*.

Gli articoli sono stati selezionati in base ad una precisa scelta metodologica: dovevano contenere nel titolo parole e locuzioni quali *additive manufacturing*, *3D printing*, *supply chain* e *spare part*. Le analisi condotte sulle *spare part supply chain* (catene di fornitura di parti di ricambio) sono state considerate perché di grande interesse ed estendibili alle *supply chain* di prodotti *end use* (Khajavi *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2014; Fawcett e Waller, 2014; Weller *et al.*, 2015; Holmström *et al.*, 2010; Holmström and Partanen, 2014; Liu *et al.*, 2014).

I settori tecnologici principalmente presi in considerazione per la stesura di questo articolo - dovevano essere citati nel titolo degli articoli - sono stati quello *healthcare*, aeronautico ed aerospaziale, dal momento che si tratta dei settori che, negli ultimi anni, hanno registrato il maggior impatto sulle proprie strutture dall'implementazione dell'AM.

3. Le catene di fornitura basate sulla produzione additiva

3.1. La produzione additiva

La produzione additiva (*Additive Manufacturing, AM*) genera prodotti *end-use* o *spare part*, partendo dai loro modelli tridimensionali contenuti in *file* di progetto, e procedendo per sovrapposizione in sequenza di strati (*layer*) di materiali (come ceramiche, metalli, plastiche, *etc.*). Di recente, i processi produttivi additivi impiegano compositi alimentari, quali pasta e cioccolato, e metalloceramici, ma anche materiali di difficile lavorabilità con i processi tradizionali della produzione sottrattiva, come le leghe di carbonio per alte temperature. Nel prossimo futuro, si prevede che la produzione additiva utilizzerà anche materiali biologici "viventi", come cellule e tessuti biologici.

Per poter essere processati dalle macchine additive, i *file 3D* devono essere trasformati (salvati) in *file STL* (acronimo di *Standard Triangulation Language*). Per mezzo di un programma di *slicing*, le informazioni contenute nei *file STL* vengono convertite in *G-code* (linguaggio macchina). Ogni *slice* di un *file STL* rappresenta uno strato di un prodotto da realizzare per sovrapposizione con la macchina additiva, utilizzando differenti metodi di estrusione dei materiali e di solidificazione degli strati. Il tempo richiesto dal processo additivo può variare da ore a giorni, in funzione della dimensione del prodotto e del grado di precisione richiesto nella realizzazione del prodotto (Khajavi *et al.*, 2014).

Le tecnologie additive abilitano alla trasformazione digitale della manifattura. Le macchine additive richiedono esiguo lavoro manuale e scarse conoscenze ed abilità

operative, ma postulano nuove competenze ed abilità lavorative (ad esempio, quelle progettuali), generando nuovi ruoli e responsabilità organizzative.

Molteplici sono le tecnologie additive; inoltre, l'*Additive Manufacturing* e il *3D-printing* (stampa 3D) vengono spesso considerati sinonimi, ma, in realtà, la stampa 3D è soltanto uno dei processi produttivi additivi.

In funzione della specifica tecnologia additiva impiegata nel processo produttivo, i materiali grezzi possono trovarsi nella forma di polveri, filamenti, liquidi o solidi.

Le tecnologie additive producono effetti distruttivi sugli assetti delle *supply chain*, favorendo la disintermediazione e il decentramento produttivo, rendendole di conseguenza più coincise (Holmström e Partanen, 2014; Cohen *et al.*, 2014; Holmström *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017; Verboeket e Krikke, 2019). In un prossimo futuro, le tecnologie additive potranno sostituirsi a quelle convenzionali; allo stato attuale del processo evolutivo cui sono pervenute, esse affiancano, supportano e convivono con le tecnologie convenzionali nelle imprese e nelle catene di fornitura (Holmström *et al.*, 2017), essendo impiegate in produzioni ad alta personalizzazione del prodotto (ad esempio, nel settore *healthcare*), ovvero caratterizzate da *low demand* o domanda non controllabile (*big spikes and drops in demand product*) (Sirichakwal e Conner, 2016; Ford e Despeisse, 2016; Liu *et al.*, 2014).

3.2. Grado di postponement e customer order penetration point nella prospettiva della produzione additiva

Olhger (2003) e Verboeket e Krikke (2019) affermano che, quando in una *supply chain* l'AM sostituisce la produzione convenzionale, il punto di penetrazione degli ordini dei clienti (*order penetration point, OPP*) nella *value chain* - che è lo stadio del processo di creazione del valore in cui si inserisce l'ordine del cliente - tende a spostarsi *upstream*, generando in parallelo lo *shift* della logica di produzione *make-to-stock (MtS)* verso quelle *make-to-order (MtO)* o *engineer-to-order (EtO)*. In altri termini, la produzione additiva rende concreta l'*internalizzazione* dei clienti nel *business process* di creazione del valore, che diviene processo di *co-creation with customer* (Gallinaro, 2019).

Il punto di penetrazione dell'ordine del cliente (*order penetration point, OPP*) nella *value chain* - anche denominato punto di disaccoppiamento dell'ordine (*customer order decoupling point, CODP*), per sottolineare, come affermano Ahmadi e Teimuouri, (2008), il coinvolgimento del cliente nella customizzazione del prodotto - è lo stadio della *value chain* o *supply chain* in cui avviene la differenziazione del prodotto.

La differenziazione di un prodotto postula il rinvio di una o più attività di creazione del valore al momento del ricevimento dell'ordine dal cliente (*postponement*): il fine è la customizzazione del prodotto medesimo (Van Hoek, 2001).

L'impresa che posticipa le attività di creazione del valore resta, dunque, in attesa di conoscere ciò che il cliente davvero vuole (*form*), dove lo vuole (*place*) e quando lo vuole (*time*), prima di dar avvio alla progettazione, realizzazione e consegna del prodotto, in modo che quest'ultimo sia così come è stato richiesto e/o consegnato dove e quando richiesto. A tal riguardo, alcuni autori descrivono varie tipologie di

strategie di *postponement*, ciascuna delle quali in funzione dell'attività specifica che viene posticipata. Si parla, allora, di strategia di *form postponement*, se si ritarda il *manufacturing* e/o il *design*, di *place e time postponement strategy*, se si ritarda il *delivery* (Zinn e Bowersox, 1988; Lee, 1998; Waller *et al.*, 2000).

Il grado di *postponement* aumenta quanto più a monte è la fase del processo di creazione del valore che viene differita. Maggiore è il grado di *postponement*, maggiore è il grado di customizzazione del prodotto, sino ad arrivare alla *pure o tailored customization* del prodotto se si posticipa la progettazione. Anche l'assemblaggio di moduli sulla base delle richieste del cliente è una declinazione del grado di *postponement*.

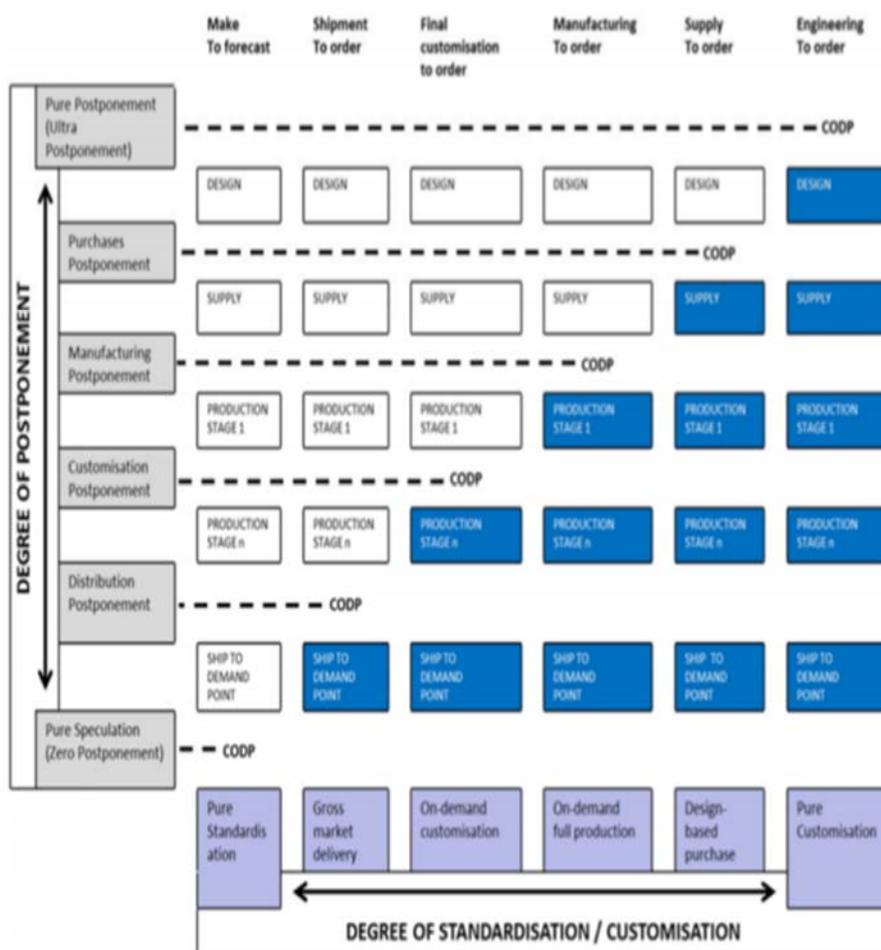
Le strategie di *postponement* rendono le *supply chain* efficienti nell'affrontare l'incertezza della domanda (Yang *et al.* 2004, Naylor *et al.*, 1999; Van Hoek, 2001): informazioni più precise in merito alla forma, al tempo e al luogo di consegna del prodotto, e anche alle quantità da realizzare, possono essere, infatti, ottenute durante il periodo di differimento, rendendo l'intera *supply chain* in grado di soddisfare la domanda nella forma/ nel tempo e/o nel luogo richiesti, dunque flessibile.

Si può perciò affermare che le *supply chain* efficienti in situazioni di incertezza ambientale sono quelle orientate ad una strategia di *postponement*, e che l'efficienza passa attraverso la flessibilità. Il grado di *postponement* adottato dall'impresa focale è funzione del livello d'incertezza esterna da affrontare.

Il *postponement* è, in conclusione, la 'chiave di volta' della *mass customization* e strumento di gestione dell'incertezza ambientale (Yang *et al.*, 2004). L'impresa che adotta il *postponement* nel processo di creazione del valore dimostra di possedere *capacità strategiche* di realizzazione della differenziazione del prodotto in uno degli stadi di creazione del valore a valle o a monte della manifattura.

Sulla base del modello di Yang *et al.* (2004), Minguella-Canela *et al.* (2017) hanno elaborato una matrice che rappresenta la relazione tra *CODP*, gradi di *postponement* e gradi di customizzazione (figura 1).

Figura n. 1 - CODP, gradi di *postponement* e gradi di customizzazione.



Fonte: Minguella-Canela et al., 2017

L'implementazione delle tecnologie di AM in una *supply chain* consente di affidare la differenziazione del prodotto alle attività progettuali di *value creation*, e soddisfare le esigenze di flessibilità di ogni sorta dell'impresa focale non disgiunte da quelle di efficienza (*pure postponement*). Le tecnologie additive consentono, infatti, una '*customization without extra cost*' (Holmström et al., 2017; Weller et al., 2015). Esse abilitano l'impresa alla *pure customization*, spostando il CODP alla fase della progettazione.

Realizzando le richieste dei clienti, la produzione additiva *concretizza* la piena partecipazione dei clienti al processo di creazione del valore dell'impresa focale di una *supply chain* che ha luogo per mezzo di piattaforme di progettazione condivisa. In sintesi: le tecnologie additive rivelano le potenzialità di *pure customization* se sono attive piattaforme di *co-design*.

3.3. AM-based supply chain centralizzate e decentrate

L'implementazione delle tecnologie additive nelle *supply chain* produce effetti strutturali diversi a seconda del livello (*tier*) logistico interessato: le configurazioni di *AM-based supply chain* dipendono, in altre parole, dai *loci* della catena di fornitura in cui vengono implementate le tecnologie additive. Esistono perciò diverse configurazioni di *AM-based supply chain*: centralizzate, se le tecnologie additive sono implementate nel *main plant*; completamente decentrate o distribuite, se le tecnologie additive sono implementate nei *production plant* vicini ai clienti; ma anche soluzioni intermedie, come l'*hub configuration*, che è una configurazione intermedia tra una totalmente centralizzata e una totalmente distribuita, con localizzazioni intermedie delle tecnologie additive, cioè tra il *main plant* e i centri di produzione (o di servizio, nel caso delle *spare part supply chain*) vicini ai clienti (Kalajavi *et al.*, 2017).

Se le tecnologie additive vengono implementate in una *supply chain* a livello centrale, l'*Original Equipment Manufacturer (OEM)* viene a dotarsi di macchine additive, in genere per affiancare la produzione convenzionale con produzioni di piccole serie o personalizzate, quelle a *low-demand* o a domanda oscillante (*big spikes and drops in demand product*, Liu *et al.*, 2014), che non necessitano di tempi brevi di risposta; oppure per testare progetti innovativi. Nelle *supply chain* delle *spare part*, le tecnologie additive localizzate a livello centrale sono quelle che implementano i produttori nei centri regionali di distribuzione gestiti dalle società con le quali firmano contratti di manutenzione e riparazione. Questi contratti regolamentano, tra l'altro, il rifornimento di *spare part* dei centri di servizio (*service location*), la cui richiesta da parte dell'utilizzatore finale (ad esempio, gli aeroporti nel caso del settore aeronautico) non richiede immediata risposta (Gadge *et al.*, 2017, pg. 851; Pérès e Noyes, 2006; Holmström *et al.*, 2010; Khajavi *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2014; Fawcett e Waller, 2014; Holmström e Partanen, 2014; Weller *et al.*, 2015; Meisel *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2016; Singamneni *et al.*, 2019).

Le macchine *AM* posizionate a livello centrale di una *supply chain* sostituiscono, perciò, il magazzino dei prodotti *end use* o delle *spare part*, che non sono frequentemente richiesti (*low demand product* o *big spikes and drops in demand product*), e il cui tempo di risposta alla domanda non è critico (Walter *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2016).

Le tecnologie additive localizzate in una *supply chain* a livello decentrato sono quelle posizionate in strutture produttive prossime ai luoghi di utilizzo del prodotto *end use* o della *spare part*, cioè vicino al cliente interno o esterno. Se implementate a livello decentrato, le tecnologie additive favoriscono e supportano la riduzione del numero dei *tier* delle *supply chain*, in quanto consentono di eludere i fornitori di componenti e i distributori dei prodotti finiti o delle *spare part*. In altri termini, le tecnologie additive possono determinare la compiuta disintermediazione delle catene di fornitura (Mills e Camek, 2004).

La localizzazione delle macchine additive vicino agli *user* del prodotto o della *spare part* genera la moltiplicazione degli investimenti dell'impresa focale di una catena di fornitura che deve essere giustificata da domande locali capienti e da soddisfare in tempi brevi. L'investimento in macchine additive decentrate prende il posto dei costi

di trasporto dei prodotti finiti, e dei costi strutturali e di amministrazione dei magazzini dei prodotti finiti dell'intera filiera (del produttore e dei distributori). Analoghe conseguenze si generano nelle *supply chain* decentrate delle *spare part* che verificano l'implementazione delle tecnologie additive nei centri di servizio vicini ai clienti.

Le *supply chain* decentrate basate su tecnologie additive garantiscono, in genere, minori *lead time* e *delivery time* dei manufatti rispetto a configurazioni di *supply chain* centralizzate.

In sintesi estrema: le tecnologie additive localizzate a livello centrale annullano i costi del magazzino centrale di prodotti finiti o delle *spare part* i cui tempi di risposta alla domanda non sono critici, e li sostituiscono con investimenti fissi di tipo produttivo; le tecnologie additive decentrate riducono il numero dei *tier* delle *supply chain*, dunque tutti i costi che da quel numero dipendono (costi di trasporto e i costi di magazzino dell'intera filiera). Verboeket e Krikke (2019) precisano, a tal proposito, che la sostituzione del magazzino centrale con configurazioni di *AM* centralizzate può rappresentare un primo passo nel processo di implementazione delle tecnologie additive nelle *supply chain*, e che, nel corso del tempo, una configurazione di *AM-based supply chain* centralizzata può evolversi in una di tipo distribuito.

Le *supply chain* distribuite incarnano, dunque, il decentramento produttivo. La produzione decentrata o distribuita (*distributed manufacturing*) prende la forma organizzativa delle reti di *mini-factory*. Trattasi di network di strutture produttive decentrate (*production plant*) assai vicine ai clienti o localizzate nei vari mercati locali in cui l'impresa opera. La prossimità della *mini-factory* al cliente o ad un mercato locale agevola l'accesso dell'impresa focale di un *business model* alla *customer knowledge* che è di elevata strategicità ai fini della creazione del prodotto personalizzato o altamente specifico per il cliente, ma anche ai fini del processo innovativo. Ciascuna mini-fabbrica è dotata di tecnologie della produzione additiva per contenere i costi della personalizzazione. Oltre alle attività di produzione, ogni mini-fabbrica svolge vendita ed assistenza al cliente, spesso anche attività di progettazione digitale di prodotto (Reichwald *et al.*, 2003; Rauch *et al.*, 2017; Gallinaro, 2019). Siffatte strutture incarnano i principi della *leanagile factory*, in quanto favoriscono tempi brevi e costi contenuti di produzione e consegna di prodotti personalizzati o unici, o di piccole serie di prodotti *on demand*. Le reti di mini-fabbriche sono imprese della *tailored customization* (Amaro e Handry, 1999).

Le mini-fabbriche consentono, dunque, la produzione di prodotti o *spare part* vicina al punto di utilizzo. Come anticipavamo più sopra, la decisione di investire in macchine *AM* distribuite - che sono costose nell'attuale stadio di sviluppo cui sono pervenute le tecnologie additive - deve essere giustificata economicamente dall'esistenza di domande locali, anche se basse ed oscillanti, che devono essere soddisfatte in modo personalizzato e in tempi brevi, come nel caso delle domande di *spare part* nell'aeronautica o nei settori del biomedicale (valvole cardiache, protesi, impianti dentali) (Emelogu *et al.*, 2016; Holmström *et al.*, 2016); ovvero motivata da una domanda proveniente da luoghi difficili da raggiungere con i mezzi di trasporto convenzionale (Holmström *et al.*, 2016; Holmström *et al.*, 2017; Ryan *et al.*, 2017).

La produzione distribuita può essere considerata uno stadio intermedio del processo evolutivo del manufacturing verso la pura produzione personalizzata, realizzata direttamente dal consumatore, utilizzando *file* di progetti scaricati da piattaforme di progettazione aperte, e stampanti domestiche o di negozi *3D printing* vicini (Rayna e Striukova, 2016).

L'implementazione delle tecnologie digitali della produzione additiva in una *supply chain*, indipendentemente dalla configurazione accentrata o decentrata che viene a manifestarsi, implica la sostituzione (*in toto* o in parte) dei magazzini di componenti (*sub-assembly system*), parti di ricambio e prodotti finiti, con magazzini di materiali grezzi (ceramiche, plastiche, etc.) e con 'magazzini virtuali' di *file* digitali di progetto. Materiali grezzi e *file* di progetto viaggiano più velocemente ed efficientemente dei prodotti fisici lungo i *tier* della *supply chain* – questi ultimi altresì ridotti di numero (Verboeket e Krikke, 2019). L'implementazione delle tecnologie additive nelle *supply chain* richiede, dunque, la presenza di infrastrutture *IT* dell'*OEM* e dei partner in grado di supportare la circolazione della conoscenza incorporata nei progetti. Come già preannunciato e come diremo ancora più avanti, la carenza o la debolezza delle infrastrutture informatiche di una catena di fornitura sono, infatti, da considerare *bottleneck*, che ostacolano l'implementazione delle tecnologie additive (Verboeket e Krikke, 2019).

3.4. Vantaggi e svantaggi della produzione additiva

Come anticipato in pagine addietro, il processo logico di scelta dell'opzione tecnologica additiva nel *manufacturing*, che viene proposto in questo articolo, prende avvio con l'individuazione degli aspetti qualitativi dell'implementazione delle tecnologie additive in una *supply chain*, cioè con la focalizzazione dei vantaggi e degli svantaggi (e delle loro interazioni) che potrebbero manifestarsi in una *supply chain* convenzionale in seguito all'adozione della produzione additiva³.

Numerosi studi in dottrina e in pubblicistica trattano la tematica dei vantaggi e degli svantaggi della produzione additiva rispetto a quella convenzionale : taluni con l'intento di stabilire la superiorità ora dell'una ora dell'altra catena di fornitura (Holmström *et al.*, 2010, Holmström e Partanen, 2014); tal'altri, per suggerire l'utilità della coesistenza di tipologie additive e sottrattive di *manufacturing* negli stessi impianti di produzione (Holmström *et al.*, 2017, Wagner e Walton, 2016; Chiu e Lin, 2016). Molti di questi studi, tuttavia, non forniscono indicazioni metodologiche per la valutazione e la scelta dell'opzione additiva nel manufacturing. Questo articolo si inserisce proprio nel novero dei contributi volti a segnalare il gap esistente in dottrina su tale tematica.

Qui di seguito viene presentata una sintesi dei vantaggi e degli svantaggi delle configurazioni di *AM-based supply chain* rispetto alle *supply chain* convenzionali, così

³ Vedi il paragrafo 4.2 di questo articolo.

come si rinvengono nei numerosi studi che trattano l'argomento e che sono stati selezionati ed analizzati per la stesura di questo articolo.

3.4.1. Vantaggi a livello di prodotto e processo di produzione

I vantaggi della produzione additiva a livello di processo e di prodotto sono sintetizzati ai seguenti punti:

- *fixture-less layered manufacturing*: la produzione additiva avviene senza attrezzature, bensì semplicemente inviando ad una macchina AM un *file* digitale di progetto 3D, generato usando il sistema di progettazione CAD o scannerizzando in 3D un oggetto già esistente (*reverse engineering*);
- *pure customization*: la digitalizzazione della produzione e della progettazione rendono la produzione additiva altamente flessibile. I *file* di progetto sono, infatti, agevolmente modificabili sulla base delle indicazioni dei clienti e la macchina additiva realizza quanto richiesto;
- *'customization without extra cost'*: ogni singolo prodotto può essere realizzato esattamente secondo le specifiche fornite dal cliente, senza penalizzazioni dal lato dei costi perché la riprogettazione digitale non è onerosa, e nessuna attrezzatura *product unique* è richiesta. Ne consegue una produzione efficiente di singole unità o di piccoli *batch* di prodotti (Gibson *et al.*, 2010; Holmström *et al.*, 2017; Weller *et al.*, 2015);
- ampia libertà ed elevata complessità delle *feature* geometriche dei prodotti, difficilmente realizzabili con le tecnologie convenzionali;
- *time saving* nella customizzazione del prodotto ovvero ridotti *lead time* dei prodotti *tailored customized*, grazie alla velocità di riprogettazione consentita dal *design* digitale e al contenimento delle tempistiche di realizzazione del prodotto (assenza di tempi di *set up* delle macchine);
- prodotti o componenti leggeri per la possibilità di realizzarli cavi: le conseguenze positive vanno dai minor consumi di materiali per unità di prodotto o componente, ai minor consumi di carburanti ed energia dei prodotti con componenti alleggeriti (vedi settore aeronautico);
- nessun costo di assemblaggio;
- affidabilità dei prodotti con geometrie complesse che potrebbe essere, invece, compromessa dagli assemblaggi dei componenti della produzione convenzionale;
- minore lavoro manuale nei processi produttivi e, dunque, minori costi del personale di fabbrica (Emelogu *et al.*, 2016; Khajavi *et al.*, 2014; Weller *et al.*, 2015); ruoli, abilità e responsabilità vanno ridefiniti, e nuove conoscenze e capacità lavorative sono richieste (Verboeket e Krikke pg.98);
- contrazione drastica - sino all'annullamento - dei magazzini prodotti finiti;
- minor consumo di materiali per unità di prodotto, grazie ai minori sprechi di materiali e alla possibilità di riuso degli scarti;

- possibilità di processare materiali non lavorabili con le tecnologie convenzionali (quali, leghe di carbonio per alte temperature, compositi metalloceramici e alimentari), e, nel prossimo futuro, opportunità di utilizzare materiali di natura inconsueta per il manifatturiero, come cellule e tessuti;
- ridotti *time to market* dell'innovazione radicale di prodotto, grazie sia alla prototipizzazione virtuale dei prodotti, (modelli *3D* dei prodotti su cui effettuare test di simulazione), sia ai ridotti tempi di produzione degli *early product*, con cui testare e convalidare rapidamente le idee di prodotto;
- brevi *time to market* dell'innovazione incrementale di prodotto: modifiche e iterazioni nella progettazione digitale sono rapide, e veloci le realizzazioni degli *upgrading* (Lipson e Kurman, 2013);
- maggior durata del ciclo di vita del prodotto additivo rispetto a quello del prodotto convenzionale, grazie ai più semplici *upgrading* progettuali e alla velocità realizzativa delle innovazioni incrementali.

3.4.2. Vantaggi a livello di supply chain

I vantaggi della produzione additiva a livello di catena di fornitura sono riepilogati come segue:

- riduzione dei costi di trasporto per disintermediazione delle *supply chain* (riduzione del numero dei *tier*) e per l'oggetto stesso del trasporto (*raw material* in luogo di componenti e prodotti finiti);
- brevi *delivery time* al cliente per riduzioni dei *tier* delle *supply chain* o per la vicinanza delle macchine *AM* agli *end user* dei prodotti o delle *spare part*;
- annullamento delle esigenze di *stock keeping* di componenti, prodotti finiti e *spare part* di sicurezza per fronteggiare la domanda imprevedibile ed occasionale, quindi minori costi di *warehousing* e di *packaging* a livello di intera *supply chain*;
- nessuna o bassa dipendenza della *supply chain* dai fornitori di componenti;
- possibilità di produrre in posti difficili da raggiungere con trasporti convenzionali;
- nessuna specifica conoscenza locale richiesta per la produzione *in situ*: i progetti inviati tramite le infrastrutture *IT* alle strutture decentrate di produzione incorporano la conoscenza necessaria per la realizzazione del prodotto;
- bassi rischi di *transportation damage* dei prodotti;
- minor impatto ambientale della produzione additiva rispetto a quella sottrattiva, grazie alle minori emissioni di anidride carbonica di veicoli con componenti cave e alleggerite, e ai minori consumi di combustibili fossili garantiti dalla contrazione dei trasporti, quale conseguenza della disintermediazione delle catene di fornitura. Il saldo globale in termini di sostenibilità delle *AM-based supply chain* è tendenzialmente positivo, nonostante le macchine additive consumino energia elettrica in elevata misura;

- maggior valore creato per il cliente e, pertanto, maggior *willingness to pay* un *premium price* per ottenere il prodotto altamente customizzato (Franke e Piller, 2004; Franke *et al.*, 2009);
- supporto al *reshoring* manifatturiero, verificando una minor dipendenza dal lavoro manuale nei processi di lavorazione (Berman, 2012, Fratocchi *et al.*, 2016; Fratocchi, 2017).

3.4.3. Svantaggi a livello di prodotto e processo produttivo

Qui di seguito il compendio degli svantaggi della produzione additiva a livello di processo e di prodotto – così come rinvenuti nella prevalente letteratura sull'argomento:

- limitata disponibilità ed elevata onerosità dei materiali di base (per unità di prodotto o di peso unitario di prodotto) e difficoltà di integrazione tecnica dei medesimi (Berman, 2012; Li *et al.*, 2017);
- prezzi a tutt'oggi elevati delle macchine additive da impiegare nei cicli produttivi;
- costo orario del lavoro tendenzialmente elevato, in genere determinato da nuovi ruoli organizzativi e da nuove responsabilità richieste (Li *et al.*, 2017);
- scarsa chiarezza della proprietà intellettuale e industriale dei progetti di prodotto;
- qualità non sempre standardizzabile dei prodotti e delle *spare part* per quanto riguarda resistenza, durabilità, consistenza, sicurezza, accuratezza, e conseguente scarsa certezza di riproducibilità dei prodotti e delle *spare part* (Verboeket e Krikke, 2019; Petrovic *et al.*, 2010; Lott *et al.*, 2011);
- costi di *post-processing* (ad esempio: costi di levigatura della superficie dei prodotti) (Chekurov *et al.*, 2018)⁴;
- elevato consumo di energia nella produzione e nella preparazione dei materiali;
- basso *throughput time*;
- supposta assenza di economie di scala;
- limiti dimensionali dei componenti o prodotti finiti additivi causati dai limiti dimensionali delle macchine AM (Gebhardt, 2003).

3.4.4. Svantaggi a livello di supply chain

Gli svantaggi della produzione additiva a livello di catena di fornitura sono prevalentemente:

⁴ Di recente, impiegando la tecnologia di stampa *3D printing FFF (Fused Filament Fabrication)* di Roboze SpA nel proprio processo di produzione, Leonardo SpA ha eliminato le porosità e rugosità superficiali dei componenti aerospaziali. La stampa *3D FFF* di Roboze utilizza tecnopolimeri per applicazioni ad alta temperatura: l'elevato grado di stabilità termica annulla le rilavorazioni superficiali dei manufatti.

- elevati costi fissi a livello di *supply chain* in ipotesi di decentramento produttivo (moltiplicazione delle macchine additive);
- dipendenza dai fornitori dei materiali per la produzione additiva.

Alcuni studi individuano *bottleneck* che ostacolano l'implementazione delle tecnologie additive in una *supply chain*. Questi sono:

- insufficiente *design-for-AM knowledge and capability* nella *supply chain*: la manifattura additiva richiede conoscenze ed abilità di *digital design* condivise tra i partecipanti alla *supply chain*. Per essere realizzati *on demand*, cioè secondo richieste specifiche dei clienti, i prodotti additivi devono essere progettati sulla base di piattaforme di *co-design* che realizzano la co-creazione del valore con il cliente e la trasmissione e circolazione di *file* di progetto. In altre parole, per poter esplicitare tutte le proprie potenzialità di *pure customization*, le tecnologie additive richiedono la piena partecipazione dei clienti alla creazione del valore, che avviene per mezzo di piattaforme di progettazione condivisa. Riferendosi alla manifattura additiva, Verboeket e Krikke (2019) affermano a tal proposito che "*design-for-AM knowledge' is a key enabling component, and a lack of this knowledge is considered to be a potential bottleneck*" per l'implementazione di una tecnologia additiva in una *supply chain*, e aggiungono che "*customer co-creation platform is also an enabling component. These platforms may require an online tool and should enable the sharing and retention of digital files*";
- insufficienza di standard qualitativi condivisi e difficoltà nell'iter della certificazione di qualità e garanzia dei prodotti additivi;
- reperibilità e disponibilità dei materiali non sempre garantita;
- materiali disponibili non sempre in grado di generare prodotti con caratteristiche qualitative confrontabili con quelle dei prodotti convenzionali;
- scarsità di lavoro qualificato per la gestione delle macchine additive;
- accettazione da parte del consumatore del prodotto additivo.

4. Valutazione degli effetti dell'implementazione della produzione additiva nelle supply chain

4.1. Simulazione e comparazione di configurazioni di supply chain

Sulla base di quanto descritto nel paragrafo precedente, si evince che la produzione additiva presenta molti vantaggi rispetto alla produzione convenzionale, sebbene ciò non sia sufficiente per sostenere la superiorità delle *AM-based supply chain* in qualsiasi situazione di business e di contesto ambientale. Già dalla semplice lettura dei vantaggi e degli svantaggi delle tecnologie additive si constata, infatti, che esistono tra loro interazioni e connessioni causali negative, e che possono sussistere condizioni di ostacolo che rendono le *AM-based supply chain* non realizzabili.

Diversamente dalla gran parte degli studi sull'argomento, un ridotto numero di articoli tratta la valutazione degli effetti dell'implementazione delle tecnologie

additive da un punto di vista quantitativo, colmando così un gap presente negli studi sulle *AM-based supply chain*. Tra questi l'articolo di Li *et al.* (2017), che dimostra che la superiorità di una configurazione di *supply chain* rispetto ad altre può essere accertata ricorrendo a modelli matematici di simulazione da cui trarre funzioni di variabili quantitative da comparare.

Com'è ormai noto, l'implementazione delle tecnologie additive produce effetti diversi sulle *supply chain* a seconda del *tier* in cui essa ha luogo, e che esistono perciò diverse configurazioni di *AM-based supply chain* in funzione della 'localizzazione' delle tecnologie additive nelle *supply chain* medesime. Nell'articolo succitato vengono, infatti, confrontate quantitativamente tre *spare part supply chain*, di cui una basata su tecnologie convenzionali (che è necessariamente centralizzata), mentre le altre due sono *AM-based supply chain*, l'una centralizzata (la macchina *AM* è posta a livello dei centri di distribuzione che servono i centri di servizio vicini agli impianti di produzione), l'altra decentrata (pluralità di macchine *AM* in postazioni locali di servizio vicine agli impianti di produzione) (Holmström *et al.*, 2010, Liu *et al.*, 2017). Li *et al.* (2017) ricorrono al metodo di modellizzazione e simulazione della *System Dynamics (SD)*. Le analisi e le conclusioni contenute nell'articolo sono estendibili alle *supply chain* dei prodotti *end use*.

La dinamica dei sistemi (*System Dynamics, SD*) è un metodo di modellazione matematica con cui è possibile studiare e comprendere il comportamento di sistemi complessi (Forrester, 1961; Radzicki e Taylor, 2008). La struttura di un sistema è costituito dalle relazioni circolari ed interconnesse tra i suoi componenti. Il concetto di feedback è alla base dell'approccio *SD*, che riconosce che le relazioni tra i componenti di un sistema sono importanti tanto quanto i suoi stessi componenti. Con l'adozione del metodo *SD*, la struttura di un sistema viene rappresentato con un *diagramma ad anello* o *circuito causale*, che è una mappa dei componenti di un sistema e delle relazioni causali ed interconnesse tra loro esistenti. In un diagramma a circuito causale, un collegamento tra i componenti è contraddistinto positivo se indica una relazione positiva tra i componenti (due componenti cambiano nella stessa direzione), mentre un collegamento contraddistinto come negativo indica una relazione negativa (due componenti cambiano in direzioni opposte). Gli effetti delle relazioni tra i componenti del sistema sono talvolta ritardate. Rappresentando le relazioni (interazioni e retroazioni) tra i componenti di un sistema, il diagramma a circuito causale consente la simulazione del comportamento del sistema medesimo con riferimento ad un determinato periodo di tempo.

Il ricorso alla *SD*, quale metodo di modellizzazione e simulazione delle catene di fornitura in diverse ipotesi tecnologiche, è giustificato dall'esistenza di interazioni e retroazioni causali, anche ritardate, tra i componenti delle *supply chain*, quali sono principalmente: *domanda, produzione, trasporti, magazzini, macchine e attrezzature, lavoro, materiali, amministrazione, energia*. Le misure che questi componenti assumono sono espresse in termini di volumi di prodotto, costi, tempi, emissioni di anidride carbonica, etc. Esse possono essere esaminate come variabili correlate e dipendenti dalle tecnologie di *manufacturing* implementate e dai *loci* dell'implementazione nelle catene di fornitura. In sintesi estrema, le misure dei

componenti e la struttura stessa di una *supply chain* possono essere analizzate come funzioni delle tecnologie di manufacturing implementate.

Come già anticipato, Li *et al.* (2017) pervengono alla formalizzazione di tre modelli dinamici di *supply chain*, una convenzionale e due additive (l'una centralizzata, l'altra decentrata), e alla formulazione matematica di tre funzioni di costo (con dati tuttavia tratti da altri studi sull'argomento). Due delle tre funzioni di costo oggetto di valutazione comparativa sono dunque riferite ad altrettante *AM-based supply chain*; la terza funzione di costo è riferita alla *supply chain* convenzionale. Gli studiosi si focalizzano su quattro componenti e correlate categorie costo di una catena di approvvigionamento modellizzata come sistema dinamico. Tali sono: i costi di trasporto, i costi di amministrazione, i costi di magazzino e i costi di produzione. I costi di trasporto, amministrativi e di magazzino sono precisati come costi variabili, in quanto essi aumentano al crescere del numero dei prodotti. I costi di produzione sono articolati in costi fissi e costi variabili, e suddivisi in costi delle macchine, dei materiali e del lavoro.

Nonostante i limiti dell'analisi contenuta nell'articolo in questione – taluni dei quali, peraltro, dagli stessi studiosi riconosciuti (dati desunti da altre analisi, scelta di una tra le pur numerose tecnologie additive, qual è il *laser sintering (LS)*) – dal confronto tra le funzioni di costo delle tre catene di fornitura si desume che le *supply chain* che adottano tecnologie di *AM* sono più efficienti di quelle convenzionali in termini di *costi variabili totali*, perché molti di questi ultimi (i costi di trasporti, i costi di magazzino, i costi amministrativi) dipendono dal numero dei *tier* di una *supply chain*. In linea con la prevalente letteratura sull'argomento (Holmström *et al.*, 2010), Li *et al.* (2017) sostengono che le tecnologie digitali di progettazione e produzione favoriscono sempre la riduzione del numero di *tier* di una *supply chain*, operando in ogni caso in direzione della disintermediazione delle catene di fornitura. L'implementazione di tecnologie additive in una *supply chain* a livello centrale modifica la configurazione di *supply chain* (numero di *tier*) rispetto a quella tipica a tecnologia convenzionale (*supplier-manufacturer-distributor-customer*), perché riduce l'intervento di fornitori di componenti nella realizzazione di prodotti e delle *spare part* a domanda oscillante o bassa. Ne derivano minori costi di magazzino, in quanto le macchine additive riducono i rischi di *stock-out* dei prodotti e delle *spare part* a domanda oscillante o bassa. In una *AM-based supply chain* centralizzata, i costi di magazzino sono, dunque, verosimilmente inferiori rispetto a quelli di una *supply chain* convenzionale, benché, in parte, rimpiazzati dai costi di macchine *AM*. Minore è il numero di *tier*, minori sono, altresì, i costi (variabili) di trasporto e di amministrazione.

Le *supply chain* additive distribuite o decentrate sono senza dubbio più coincise di quelle convenzionali e delle *AM-based supply chain* centralizzate: annullano i fornitori di componenti e i distributori, ma diventano in maggior misura dipendenti dai fornitori di *raw material*. I *raw material* per la produzione additiva sono costosi, ma generano minori costi di magazzino rispetto ai magazzini di componenti e prodotti finiti. I costi dei *raw material* sono costi variabili di produzione.

Essendo minore il numero dei *tier* delle *AM-based supply chain* decentrate rispetto a quelle centralizzate, minori sono i costi di trasporto delle prime rispetto alle seconde.

I costi di produzione variabili sono, *coeteris paribus*, più elevati per le *AM-based supply chain* rispetto a quelle convenzionali a causa dei costi dei materiali e del lavoro, valutati da Li *et alii* (2017) più elevati rispetto a quelli impiegati nella produzione sottrattiva. Come anticipato in pagine addietro, le tecnologie additive generano, infatti, un cambiamento dei ruoli lavorativi richiesti: meno lavoro manuale, meno conoscenze applicative riferite alle macchine, ma nuovi ruoli progettuali e operativi di fabbrica, in genere più costosi del lavoro manuale ed esecutivo della produzione sottrattiva.

Se si considerano poi i costi fissi di produzione, Li *et alii* (2017) sottolineano che le *supply chain* basate su tecnologie additive possono non essere convenienti rispetto a quelle basate su tecnologia convenzionale: i costi delle macchine *AM* sono a tutt'oggi elevati e si moltiplicano in caso di produzione distribuita. Altresì, a nostro avviso, andrebbe considerato il fatto che le macchine additive vanno incontro a rapida obsolescenza a causa dell'accelerazione dell'innovazione tecnologia in questo campo di applicazione, per cui l'incidenza dei costi fissi sul costo unitario di prodotto additivo tende *a fortiori* ad essere elevata. A tal proposito, Rayna e Strikova (2016) sostengono che lo sviluppo delle tecnologie della produzione additive si sta avviando verso la fase della maturità, per cui è da attendersi una sempre più rapida sostituzione delle macchine *AM-based*, accompagnata comunque da una progressiva decrescita dei loro prezzi unitari.

4.2. Il processo decisionale per la scelta delle tecnologie di manufacturing

Tutto quanto premesso ed in sintesi estrema, le fasi del processo decisionale per l'implementazione delle tecnologie additive nelle *supply chain* convenzionali sono:

- analisi qualitativa dei vantaggi e degli svantaggi (ed eventuali *bottleneck*) delle tecnologie additive nell'impresa e nella *supply chain* convenzionale, ai fini della 'cattura' dei componenti 'sensibili' alle tecnologie di produzione e ai *loci* dell'implementazione, sulla cui base costruire modelli dinamici di *supply chain*;
- costruzione di modelli dinamici di *supply chain AM-based* e convenzionale;
- traduzione dei modelli dinamici di *supply chain* in funzioni di costo (e/o di altre variabili quantitative) da impiegare in valutazioni comparative;
- scelta dell'opzione tecnologica e strutturale di *supply chain* che ottimizza le funzioni di costo e/o di altre variabili quantitative impiegate nella valutazione comparativa.

Per misurare *ex-ante* gli effetti dell'implementazione delle tecnologie additive nelle *supply chain* convenzionali, anche le *supply chain* convenzionali, oggetto di valutazione comparativa, devono, dunque, esser tradotte in modelli *SD*, da cui desumere funzioni di costo (e/o di altre variabili quantitative) di confronto.

Sulla base di siffatte analisi quantitative, l'impresa focale di un *business model* può decidere di optare (o meno) per le tecnologie additive, definendo altresì il *tier* di implementazione; o, altrimenti, scegliere di affiancare la produzione additiva a quella convenzionale.

La simulazione di *supply chain* basate su differenti tecnologie di produzione amplia la logica del *Virtual Manufacturing*,⁵ estendendola all'intero sistema di creazione del valore. I modelli di simulazione delle *supply chain* sono i *digital twin* delle catene di fornitura di imprese focali di *business model*.

Oltre ai casi di *additive manufacturing based supply chain* contenuti negli studi analizzati e citati in questo articolo, sviluppati dagli autori con approccio *SD* (tra i quali, oltre Li *et al.*, 2017, Jayant *et al.*, 2015; Chiu *et al.*, 2016; Liu, *et al.*, 2014; Özceylan *et al.*, 2018), o semplicemente descritti (vedi, tra gli altri, Holmström *et al.*, 2010; Holmström *et al.*, 2016; Holmström *et al.*, 2017; Khajavi *et al.*, 2018; Ryan *et al.*, 2017), altri noti casi aziendali e di catene di fornitura sono stati esaminati, dai quali è stato agevolmente dedotto che l'opzione *AM* viene implementata nelle imprese e nelle *supply chain* sempre sulla base di metodi di comparazione e di ottimizzazione di funzioni di costo o di altre variabili quantitative decisive per il conseguimento e mantenimento del vantaggio competitivo - quali sono, generalmente, le tempistiche di produzione e di distribuzione e le *performance* delle componenti *core* di prodotto⁶.

⁵ "Virtual Manufacturing system (VM system) is an integrated computer based model which represents the physical and logical schema and the behavior of real manufacturing systems" (Lee, 1997). Il VM è, in altri termini, la trasposizione della progettazione e della produzione in ambiente virtuale, cioè è la modellizzazione e la simulazione di tutte le attività e processi necessari per realizzare il prodotto. La produzione virtuale si fonda, infatti, su un insieme di tecnologie basate su computer per la modellizzazione e la simulazione del processo di produzione, sin dalla fase di progettazione, per rilevare e risolvere problemi relativi alla produzione prima della strutturazione effettiva della fabbrica e la realizzazione del prodotto. Con il VM è possibile stimare i costi e i tempi di produzione, che rappresentano determinanti importanti del costo del prodotto.

⁶ Tra i molti casi aziendali analizzati, citiamo Matra BAE Dynamics Alenia (MBDA), *joint venture* tra Airbus Group, BAE Systems e Alenia-Finmeccanica. La società è leader europeo nella costruzione di missili e sistemi missilistici. I principali vantaggi derivanti dall'impiego del *3D printing* nello stabilimento campano di Fusano sono stati individuati: nella riduzione dei tempi di realizzazione dei prototipi e di immissione sul mercato dei prodotti finiti; nella riduzione dei costi di componenti particolarmente complessi; nella possibilità di utilizzare materiali difficilmente lavorabili con le tecnologie tradizionali (titanio, superpolimeri ad alte temperature, compositi con fibre di carbonio altamente performanti grazie alle loro caratteristiche meccaniche, termiche e chimiche, quali ad esempio la resistenza alla corrosione, basso coefficiente di attrito, isolamento elettrico, maggiore lavorabilità); nell'accresciuta leggerezza dei componenti nel rispetto della sostenibilità ambientale. Inoltre, l'implementazione delle tecnologie additive ha garantito il definitivo superamento di vincoli di progettazione, dunque una maggiore creatività in fase di progetto. In base a stime pubblicate, il costo totale unitario di un componente stampato in *3D* da MBDA risulta inferiore sino al 25-30% rispetto a quello dello stesso componente ottenuto con metodi di produzione tradizionali, e inoltre più piccola e complessa è la componente, maggiore è il risparmio di costo in termini percentuali.

Altro caso aziendale analizzato è quello della Divisione Aereostrutture di Leonardo Spa, che ha adottato la tecnologia additiva *3D printing* di Roboze Spa (la *FFF, Fused Filament Fabrication*) nel processo di produzione di materiali compositi (tecnopolimeri con fibre di carbonio) per componenti aerospaziali, al fine di ridurre costi e tempi di produzione e aumentarne la leggerezza e le *performance* fisico-chimiche, nonché per verificare una maggiore libertà e flessibilità progettuale dei medesimi. Attualmente, nel settore della difesa, l'implementazione della stampa digitale tridimensionale è guidata da valutazioni di ottimizzazione dei *lead time* e di riduzioni di complessità della *supply chain*, rendendo

Un interessante esempio di effetti distruttivi generati dalle tecnologie additive sugli assetti delle *supply chain*, e di impiego di metodi di comparazione quantitativa nella scelta dell'opzione additiva ci viene offerto dal settore aereospaziale. *Made In Space (MIS)* è un'impresa americana specializzata nella progettazione e produzione di stampanti 3D da impiegare in condizioni di microgravità. La stampante *Zero-G* realizzata da *MIS* è nota essere stata la prima macchina additiva in grado di funzionare nello spazio. *MIS* collabora con la *NASA* nel progetto *In-Space Manufacturing (ISM)*, il cui obiettivo è "sviluppare le tecnologie e i processi che consentiranno la produzione su richiesta durante le missioni spaziali di lunga durata". Le tecnologie *AM* sono, dunque, alla base del progetto spaziale *ISM* della *NASA*, che, in altri termini, si propone, come obiettivo, di predisporre capacità di produzione e di riciclaggio dei pezzi di ricambio direttamente sul suolo lunare o marziano o nelle stazioni orbitanti. Con il progetto *ISM* si vuol realizzare un modello logistico "indipendente dalla Terra", diametralmente opposto a quello ancora in uso, che prevede invece forniture e stoccaggio sulle orbite terrestri basse (*Low Earth Orbit, LEO*) di pezzi di ricambio fabbricate sulla Terra, generando ingenti costi logistici, anche perché gran parte delle *spare part* (si stima circa il 95% di queste) non viene utilizzata nelle missioni spaziali, ma deve essere mantenuta prontamente disponibile per evitare rischi di *stock-out*, che potrebbero inficiare il successo delle missioni stesse. In luogo dell'invio delle *spare part* dalla Terra, il progetto *ISM* prevede l'invio di materiali da lavorare con stampanti 3D direttamente sul suolo lunare o marziano. Il numero dei magazzini di *spare part* in orbita si ridurrà drasticamente, e migliorerà il *lead time* dei pezzi di ricambio. I costi di trasporto dei materiali grezzi sul suolo lunare o marziano sono stimati nettamente inferiori rispetto a quelli di trasporto dei componenti finiti necessari per il successo delle missioni spaziali. Il progetto include anche uno studio di fattibilità dell'utilizzo della regolite (materiale del suolo lunare o marziano) per la costruzione nello spazio di strutture di ricovero per l'uomo e gli attrezzi. Con l'implementazione delle tecnologie additive nella *supply chain* aereospaziale statunitense, la *NASA* si propone, dunque, di ottenere l'ottimizzazione dei costi e dei tempi delle future missioni spaziali, prospettando di realizzare in futuro anche la colonizzazione di satelliti e pianeti. Ciò che verrà, di conseguenza, a delinearci è un sistema di produzione distribuita a livello extra-planetario, con possibilità di produrre *on demand* ed in modo efficiente *spare part* complesse *in situ*, cioè vicino alle strutture presenti su corpi celesti o sulle orbite terrestri.

4.3. Produzione additiva ed economie di scala

Le tecnologie additive risolvono il dilemma 'economia di scala o di *scope*' nel manufacturing, in quanto non generano penalità di costo associate alla varietà produttiva, principalmente per assenza di costi di *set-up* e di *re-design*, rendendo così

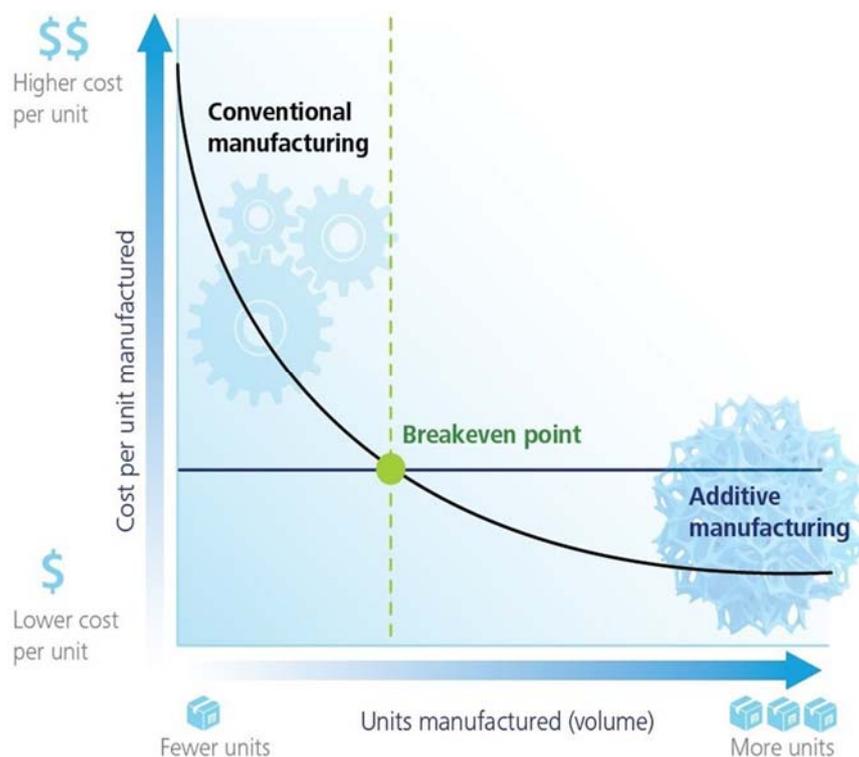
al contempo possibile la produzione di parti alleggerite e più performanti grazie ai materiali utilizzabili con le nuove tecnologie, nonché la personalizzazione dei prodotti *in situ* (*supply chain* decentrate).

efficiente la produzione anche di una sola unità di prodotto o di piccoli *batch* di prodotti (Berman, 2012; Gibson *et al.*, 2010).

Secondo Cotteleer e Joyce (2015), le tecnologie additive riducono il livello di capitale fisso necessario per raggiungere le economie di scala. È noto che la minima scala efficiente è alta quando è elevato il livello di capitale fisso necessario alla produzione. Più alta è la minima scala efficiente, minore è il numero delle strutture produttive esistenti. Secondo i due studiosi, le tecnologie additive consentono di raggiungere la minima scala efficiente in corrispondenza di un numero molto basso di unità prodotte. Di conseguenza, le tecnologie additive riescono ad ampliare il numero delle strutture produttive efficienti. Diversamente vale per le macchine a tecnologia convenzionale, la cui minima scala efficiente si raggiunge a numeri elevati di prodotti.

Cotteleer e Joyce (2015) hanno elaborato la seguente figura 2, in cui confrontano processi produttivi additivi e convenzionali.

Figura n.2. Analisi di *break-even* sulla base di comparazioni di processi di produzione convenzionale e additiva



Fonte: Cotteleer e Joyce (2015)

Nella figura 2 il punto di *breakeven* è dato dall'intersezione tra le due curve di costo unitario, l'una supposta costante al volume produttivo (tecnologie additive), l'altra decrescente al crescere della produzione (tecnologie convenzionali). A destra del punto di *breakeven* c'è convenienza all'utilizzo delle tecnologie convenzionali, le quali fanno leva sulle economie di scala; a sinistra risultano, invece, più efficienti le tecnologie additive. Tutto ciò a conferma che le tecnologie additive rendono basso il livello di capitale da investire per fare impresa.

La figura 2 sembrerebbe escludere il raggiungimento di economie di scala da parte delle macchine additive, quasi a voler sottintendere l'assenza di costi fissi di produzione additiva. Eppure le macchine additive sono investimenti fissi.

Sulla stessa linea di pensiero di Cottleer e Joyce (2015) è Berman (2012), il quale afferma che i costi unitari dei prodotti additivi sono pressoché costanti e non diminuiscono con l'aumentare della produzione. Questa affermazione equivarrebbe alla spiegazione, data da diversi studiosi, che le macchine additive non raggiungono economie di scala perché la parte maggiore del costo unitario di un prodotto additivo è costituita da costi variabili.

Com'è noto, i costi variabili di produzione della produzione additiva (materie e lavoro) sono, allo stato attuale, tendenzialmente più elevati di quelli della produzione convenzionale, sebbene a bassi livelli di produzione i costi variabili totali ed unitari della produzione additiva siano solitamente minori di quelli generati dalle tecnologie convenzionali⁷. La situazione sembra invertirsi – come affermano Li *et alii* (2017) - se si prendono in considerazione i costi fissi delle macchine - nonostante la produzione additiva non generi costi fissi per attrezzature e settaggi delle macchine. Ne consegue che la produzione additiva è tendenzialmente efficiente per produzioni unitarie o di piccoli lotti di produzione, e che la produzione convenzionale sottrattiva diviene tendenzialmente efficiente per lotti grandi di produzione, quando cioè è possibile far leva sulle economie di scala.

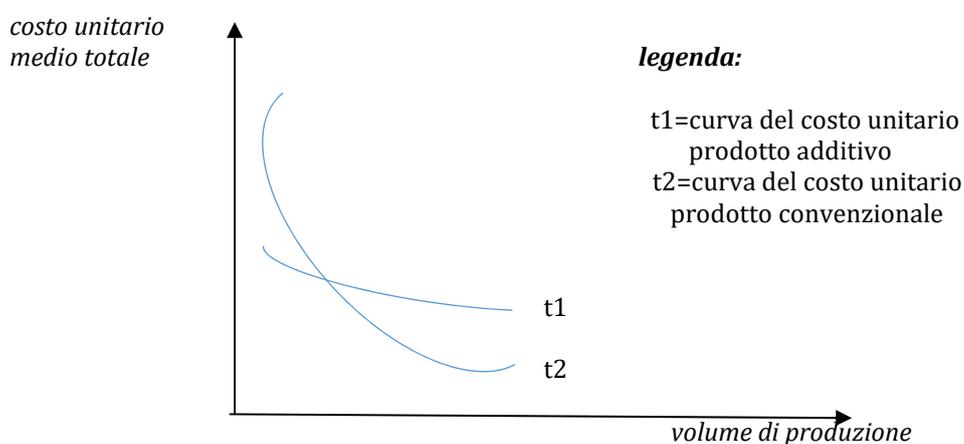
Come dimostrano Ruffo *et alii* (2016), i costi unitari dei prodotti additivi diminuiscono al crescere della produzione, sebbene lentamente – cioè con un basso tasso di decrescita. La curva dei costi unitari medi del prodotto additivo non va, dunque, descritta – come, invece, in figura 2 - con una retta parallela all'asse delle ascisse-volume produttivo, bensì con una curva, il cui tasso di decrescita al crescere della produzione è basso ed inferiore rispetto al coefficiente angolare della curva del costo unitario medio associato alla manifattura convenzionale. La spiegazione a questa difformità dei tassi di decrescita del costo medio unitario del prodotto è nel diverso tasso di *throughput* delle macchine, attualmente assai più basso per le macchine additive rispetto a quelle convenzionali, e, altresì, nei costi e tempi di rilavorazione del prodotto additivo a causa della difficile standardizzazione qualitativa (figura 3).

Quanto suddetto mette in discussione l'affermazione, contenuta in molti studi sull'argomento, che le macchine additive non consentono economie di scala, per cui

⁷ "It is also found that the AM-based supply chains have much higher material and labour costs than the conventional supply chains, which accordingly leads to their higher manufacturing cost. This finding is also consistent with some of the existing studies indicating that material costs constitute a significant portion of an additive manufactured product." (Thomas 2015).

esse sarebbero efficienti solo a bassi volumi produttivi, e la convenienza ad utilizzarle diminuirebbe al crescere della domanda. Le macchine additive raggiungono economie di scala, in quanto generano costi fissi per l'impresa che le acquista e le utilizza. Tuttavia, le economie di scala su cui le macchine additive possono far leva sono di scarsa entità, e ciò a causa dei limiti tecnici delle medesime macchine - tra i quali, lo ribadiamo, il basso valore del *throughput time*. In presenza di elevati livelli di domanda, occorre accelerare la produzione, per cui, allo stato attuale dello sviluppo tecnologico, la scelta delle tecnologie convenzionali da parte delle imprese è spesso obbligata.

Figura n. 3. Curve dei costi unitari del prodotto additivo e convenzionale



Fonte: ns elaborazione

I futuri progressi in campo tecnologico dovrebbe verosimilmente accelerare il *throughput time* delle macchine additive, standardizzare la qualità del prodotto additivo, eliminarne costi e tempi di rilavorazione. Come risultato, la curva del costo unitario del prodotto additivo potrebbe inclinarsi ulteriormente, accelerando il raggiungimento delle economie di scala, così da rendere competitive le tecnologie additive su più fronti, e non solo su quello delle produzioni unitarie e di piccoli *batch* di prodotti.

5. Conclusioni: implicazioni teoriche e manageriali

Rispetto alla prevalente letteratura esistente sull'argomento, gli elementi di originalità contenuti in questo articolo consistono nella formulazione di un approccio integrato quali-quantitativo all'analisi e alla valutazione comparativa delle catene di fornitura in diverse ipotesi tecnologiche, e, correlatamente, nella focalizzazione di un processo logico per la scelta dell'opzione additiva nelle *supply chain* convenzionali.

Altresì, l'articolo fornisce argomentazioni a sostegno della tesi del raggiungimento delle economie di scala da parte delle macchine a tecnologia additiva.

In conclusione, affermiamo che l'analisi svolta in questo articolo ha permesso di dare opportune risposte alle *research question* da cui essa ha preso avvio. Le sintetizziamo qui di seguito, precisandole come implicazioni teoriche e manageriali della medesima analisi:

- non è possibile sostenere la superiorità delle *AM-based supply chain* rispetto a quelle convenzionali sulla base di una semplice enucleazione e descrizione qualitativa dei possibili benefici connessi con l'implementazione delle tecnologie additive nelle catene di fornitura convenzionali. La convenienza ad implementare una tecnologia additiva va, invece, valutata dall'impresa focale di una *supply chain quantizzandone* gli effetti in termini di costi, tempi, sostenibilità, etc., non solo a livello di prodotto e di processo produttivo, ma estendendo l'analisi all'intera *supply chain*;
- le macchine additive raggiungono economie di scala. Il miglioramento delle loro caratteristiche tecniche nel prossimo futuro – tra cui, il *throughput time* e la standardizzazione della qualità dei prodotti – porterà verosimilmente ad un'accelerazione del tasso di decrescita del costo unitario del prodotto additivo al crescere della produzione, risolvendo così, definitivamente, il dilemma 'economia di scala o di *scope*' che le imprese ancora oggi si pongono. Ne conseguirà un'ampia diffusione delle tecnologie additive negli ecosistemi di business, diventando esse fonti del vantaggio competitivo anche per piccoli batch di prodotto.

In questo articolo, abbiamo fatto principalmente riferimento alle variabili di costo da impiegare in valutazioni comparative di configurazioni di *supply chain* tecnologicamente diverse. Ai fini della scelta della tecnologia di manufacturing da impiegare in una catena di creazione del valore, l'analisi dovrebbe essere tuttavia ampliata, sì da includere sia le variabili di tempo, quali i *lead time* e i *delivery time*, poiché in talune condizioni di *supply chain setting* – si pensi all'*healthcare* e all'aeronautica (*spare part supply chain*) – le tempistiche possono essere strategicamente rilevanti e determinanti il vantaggio competitivo; sia le variabili di consumo energetico e di sostenibilità ambientale delle produzioni. A tal proposito, va sottolineato che l'impatto ambientale delle tecnologie additive non è sempre a loro favore, poiché il bilancio energetico relativo alle macchine *AM* non è sempre positivo, in considerazione del fatto che queste ultime consumano molta energia, e che anche la preparazione del materiale per la manifattura additiva ne richiede in elevata quantità. La diminuzione delle emissioni di anidride carbonica abilitata dalla riduzione dei trasporti e dalle componenti alleggerite di prodotto, non sempre è in grado di compensare l'elevato consumo di energia della manifattura additiva, ed avere sempre e comunque un ruolo prevalente nella valutazione della sostenibilità ambientale delle tecnologie additive.

L'analisi quantitativa della produzione additiva andrebbe poi reiterata per ogni possibile tecnologia additiva adottabile, in considerazione del fatto che ciascuna delle numerose tecnologie additive esistenti produce, *coeteris paribus*, conseguenze

differenti sulle *supply chain*. Altresì, le valutazioni andrebbero ripetute nel tempo, poiché l'evoluzione tecnologica in questo ambito di applicazione è molto accelerata.

Nel prossimo futuro, con il progredire della ricerca tecnologica, gli elementi deboli della produzione additiva saranno realisticamente superati, per cui nulla esclude che l'analisi sin qui svolta debba essere riformulata in direzione di un più deciso e convinto sostegno a favore delle *AM-based supply chain*.

Bibliografia

- Ahmadi, M., Teimuoru, E. (2008). Determining the order penetration point in auto export supply chain by the use of dynamic programming, *Journal of Applied Sciences*, 8, 3214-3220.
- Amaro, G., Hendry, L. (1999). Competitive advantage, customization and a new taxonomy for non make-to-stock companies, *Journal of Operations and Production Management*, 19(4), 349-371.
- Ashby A. (2016), From global to local: reshoring for sustainability, *Operations Management Research*, 9(3), 75-88.
- Baldwin, C.Y., Clark, K.B., (1997). Managing in an age of modularity, *Harvard Business Review*, 75(5), 84-93.
- Berman B. (2012), 3-D printing: The new industrial revolution, *Business Horizons*, 55(2), 155-162;
- Bogers, M., Hadar, R., Bilberg, A. (2016). Additive manufacturing for consumer centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing, *Technological Forecasting & Social Change*, 102, 225-239.
- Chekurov S, Metsä-Kortelainen S., Salmia M., Rodac I., Jussila A., (2018). The perceived value of additively manufactured digital spare parts in industry: An empirical investigation, *International Journal of Production Economics*, 205, 87-97.
- Chesbrough, H. (2003). *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*, Harvard Business School Press, Boston, MA.
- Chiu, M.C., Lin, Y.H., (2016). Simulation based method considering design for additive manufacturing and supply chain an empirical study of lamp industry, *Industrial Management & Data Systems*, 116(2), 322-348.
- Cohen, D., Sargeant, M., Somers, K. (2014). 3-D printing takes shape. *McKinsey Quarterly*, January.
- Cotteleer, M., Joyce, J. (2014), 3D Opportunity: additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth, *Deloitte Review*, Issue 4.
- De Backer K, Menon C, Desnoyers-James I, Moussiégt L. (2016), Reshoring: myth or reality?, *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, 27 OECD Publishing, Paris, France
- Emelogu, A., Marufuzzaman, M., Thompson, S.M., Shamsaei, N., Bian, L. (2016). Additive manufacturing of biomedical implants: a feasibility assessment via supply-chain cost analysis, *Additive Manufacturing*, 11, 97-113.

- Fawcett, S.E., Waller, M.A., (2014). Supply chain game changers—mega, Nano, and virtual trends—and forces that impede supply chain design (i.e., building a winning team), *Journal of Business Logistics*, 35(3), 157-164.
- Forrester J. W. (1961). *Industrial Dynamics*, M.I.T. Press, Cambridge, Mass.
- Fratocchi L., Ancarani A., Barbieri P., Di Mauro C., Nassimbeni G., Sartor M., Vignoli M., e Zanoni A. (2016), Motivations of manufacturing reshoring: an interpretative framework, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 46(2), 98-127.
- Fratocchi L. (2017), Is 3D printing an enabling technology for manufacturing reshoring? in Vecchi A. (a cura di), *Reshoring of manufacturing: Drivers, opportunities, and challenges*, Springer, Berlino.
- Gallinaro, S. (2019). Dai modelli lineari di business alla piattaforma di progettazione e manifattura. Gli effetti delle tecnologie additive sulla logica di creazione del valore delle imprese manifatturiere, *ImpresaProgetto - Electronic Journal of Management*, (2).
- Gebhardt A., (2003). *Rapid prototyping*, Hanser Gardner Publications Inc., Cincinnati.
- Ghadge, A., Karantoni, G. (2018). Impact of additive manufacturing on aircraft supply chain performance. A system dynamics approach, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(5), 846-865.
- Holmström, J., Holweg, M., Khajavi, S.H., Partanen, J. (2016). The direct digital manufacturing (r)evolution: definition of a research agenda, *Operations Management*, 9(1-2), 1-10.
- Holmström, J., Liotta, G., Chaudhuri, A., (2017). Sustainability outcomes through direct digital manufacturing-based operational practices: a design theory approach. *Journal of Cleaner Production*, 167, 951-961.
- Holmström, J., Partanen, J. (2014). Digital manufacturing-driven transformations of service supply chains for complex products, *Supply Chain Management*, 19(4), 421-430.
- Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., Walter, M. (2010). Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: alternative approaches to capacity deployment, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(6), 687-697.
- Jayant A., Gupta P., Garg S.K. (2015), Simulation modelling and analysis of network design for closed-loop supply chain: A case study of battery industry. *Procedia Engineering*. 97, 2213-2221.
- Khajavi, S.H., J. Holmström, J. Partanen, J. (2018). Additive manufacturing in the spare parts supply chain: hub configuration and technology maturity, *Rapid Prototyping Journal*, 24(7), 1178-119.
- Khajavi, S.H., Partanen, J., Holmstrom, J. (2014). Additive manufacturing in the spare parts supply chain, *Computer Industry*, 65(1), 50-63.
- Lee, H.L. (1998). *Postponement for Mass Customization: Satisfying Customer Demands for Tailor-Made Products. Strategic Supply Chain Alignment*, Gower, Brookfield, VT.
- Li, Y., Jia, G., Cheng, Y., Hud, Y. (2017). Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study, *International Journal of Production Research*, 55(5), 1498-1515.
- Lipson, H., Kurman, M. (2013). *Fabricated: the new world of 3D Printing*, Wiley.

- Liu, P., Huang, S.H., Mokasdarb, A., Zhou, H., Houc, L. (2014). The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: Supply chain operation reference (Scor) model based analysis, *Production Planning and Control*, 25(13-14), 1169-1181,
- Meisel, N.A., Williams, C.B., Ellis, K.P., Taylor, D., (2016). Decision support for additive manufacturing deployment in remote or austere environments, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27(7), 898-914.
- Mills, J.F., Camek, V., (2004). The risks, threats and opportunities of disintermediation: a distributor's view, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(9), 714-727.
- Minguella-Canela, J., Muguruza, A., Lumbierres, D.R., Heredia, F.J., Gimeno, R., Guo, P., Hamilton, H., Shastry, K., Webb, S. (2017). Comparison of production strategies and degree of postponement when incorporating additive manufacturing to product supply chains, *Manufacturing Engineering Society International Conference, 28-30 June, Vigo (Pontevedra), Spain*.
- Naylor, J.B., Naim, M.M., Berry, D. (1999). Leagility: integrating the lean and agile manufacturing paradigm in the total supply chain, *International Journal of Production Economics*, 62(1-2), 107-118.
- Olhager, J. (2003). Strategic positioning of the order penetration point, *International Journal of Production Economics*, 85(3), 319-329.
- Özceylan E., Çetinkaya C., Demirel N., Sabirlio O. (2018), Impacts of additive manufacturing on supply chain flow: a simulation approach in healthcare industry, *Logistics*, 2(1), 1-20.
- Pérès, F., Noyes, D. (2006). Envisioning e-logistics developments: making spare parts in situ and on demand: state of the art and guidelines for future developments, *Computer Industry*, 57(6), 490-503.
- Radzicki, M. J., Robert, A. T. (2008). Origin of System Dynamics: Jay W. Forrester and the History of System Dynamics In: *U.S. Department of Energy's Introduction to System Dynamics*.
- Rauch, E., Dallasega, P. (2017). Distributed manufacturing network models of smart and agile mini-factories, *International Journal of Agile Systems and Management*, 10(3/4), 185-205.
- Rayna, T., & Striukova, L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation, *Technological Forecasting & Social Change*, 102, 214-224.
- Reichwald, R., Piller, F.T., Jager, S., Zanner, S. (2003). Economic evaluation of mini-plants for mass customization, in Piller F.T. (ed.), *The Customer Centric Enterprise. Advances in Mass Customization and Personalization*, Springer, Berlin.
- Ruffo, M., Tuck, C., Hague, R. (2006). Cost estimation for rapid manufacturing-laser sintering production, for low to medium volumes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 220(9), 1417-1427.
- Ryan, M.J., Eysers, D.R., Potter, A.T., Purvis, L., Gosling, J., (2017). 3D printing the future: scenarios for supply chains reviewed, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 47(10), 992-1014.

- Singamneni, S., Lu, Y., Hewitt, A., Chalk, R., Thomas, W., Jordison D. (2019). Additive manufacturing for the aircraft industry: a review, *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, 8(214), 2.
- Sirichakwal, I., Conner, B. (2016). Implications of additive manufacturing for spare parts inventory. 3D Printing, *Additive Manufacturing*, 3(1), 56–63.
- Standard terminology for additive manufacturing — Coordinate systems and test methodologies ISO/ASTM 52921, 2013.
- Steenhuis, H.-J., Pretorius, L. (2016). Consumer additive manufacturing or 3D printing adoption: an exploratory study, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27(7), 990–1012.
- Steenhuis, H.-J., Pretorius, L. (2017). The additive manufacturing innovation: a range of implications, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28(1), 122-143.
- Thomas, D. (2015). Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: A supply chain perspective, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 1857–1876.
- Van Hoek, R.I. (2001). The rediscovery of postponement: a literature review and directions for research, *Journal of Operations Management*, 19(2), 161-184.
- Verboeket, V., Krikke, H., (2019). The disruptive impact of additive manufacturing on supply chains: A literature study, conceptual framework and research agenda, *Computers in Industry*, 111, 91-107.
- Wagner, S.M., Walton, R.O., (2016). Additive manufacturing's impact and future in the aviation industry, *Production Planning & Control*, 27(13), 1124–1130.
- Waller, M.A., Dabholker, P.A., Gentry, J.J. (2000). Postponement, production customization, and market-oriented supply chain management, *Journal of Business Logistics*, 21(2), 133–160.
- Weller, C., Kleer, R., Piller, F. T. (2015). Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited, *International Journal of Production Economics*, 164, 43-56.
- Yang, B. Burns, N. D. (2003). The implications of postponement for the supply chain, *International Journal of Production Research*, 41(9), 2075-2090.
- Yang, B., Burns, N.D., Backhouse, C.J. (2004). Management of uncertainty through postponement. *International Journal of Production Research*, 42(6), 1049–1064.
- Yang, B., Burns, N.D., Backhouse, C.J. (2004). Postponement: a review and an integrated framework, *International Journal of Operations & Production Management*, 24(5), 468–487.
- Zinn, W., Bowersox, D.J. (1988). Planning physical distribution with the principle of postponement, *Journal of Business Logistics*, 9(2), 117–136.