

Ecosistemi di manifattura additiva: le supply chain digitali

Silvana Gallinaro*

Sommario: 1. Introduzione. Le *supply chain* convenzionali – 2. Modelli di *value creation network* - 3. Il *Digital Thread* - 4. Sintesi conclusiva - Bibliografia.

Abstract:

In questo articolo, vengono analizzati gli ecosistemi di manifattura additiva le cui strutture tecnologiche abilitanti sono le piattaforme di progettazione digitale, proprietarie o *open source*, connesse a macchine di produzione additiva.

Gli ecosistemi di manifattura additiva vengono qui presentati come catene di fornitura digitali (*digital supply chain*), non convenzionali e circolari, che creano valore per gli utenti finali di piattaforme di progettazione digitale.

La catena di fornitura digitale prevede sequenze multiple di fasi non lineari e non obbligate del processo di creazione del valore digitale - che vanno dalla progettazione del prodotto alla versione personalizzata del progetto, dalla progettazione di *slice* per la macchina additiva ai dati digitali di post-produzione, utilizzo, modifica, miglioramento e riprogettazione del prodotto - gestite dai partecipanti con approccio dinamico, iterativo e circolare, tipico delle reti collaborative e paritarie.

L'obiettivo di questo articolo è quello di evidenziare le similitudini e le dissimilitudini esistenti tra la catena di creazione del valore digitale e la catena di fornitura convenzionale, al fine di comprovare l'ipotesi in base alla quale gli ecosistemi della produzione additiva amplino il concetto stesso di catena di fornitura, che andrebbe così ad includere anche le reti a valore aggiunto in cui scorrono *file* di progetto, anziché semplicemente informazioni e materiali.

L'approccio di ricerca adottato in questo articolo è quello dell'analisi della letteratura in tema di catene di fornitura e di ecosistemi digitali. Sono stati esaminati articoli di riviste e di atti di convegni sottoposti a *peer review*, nonché *white paper* industriali, dal 1980 al 2025.

Key words: additive manufacturing, supply chain, digital ecosystem, digital technology; digital value

* **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

1. Introduzione. Le *supply chain* convenzionali

Per affrontare la tematica delle *supply chain* digitali (*Digital Supply Chain, DSC*) rammentiamo i tratti caratteristici delle reti inter-organizzative (*network*) e, in particolare, di quelle di creazione del valore per il cliente finale quali sono le catene di fornitura convenzionali (*Supply Chain, SC*).

Le reti sono sistemi organizzati di relazioni sociali, professionali e di scambio tra organizzazioni indipendenti e, al contempo, interdipendenti: beni, denaro e altresì conoscenze e competenze circolano al loro interno [Gulati *et al*, 1999]. Le reti sono sistemi aperti, basati principalmente sulla condivisione del sapere e delle competenze possedute dai partecipanti, dunque, strutture flessibili e sempre reversibili.

In letteratura le reti sono state definite forme organizzative ibride, intermedie tra la burocrazia e il mercato, idonee al confronto delle imprese con contesti ambientali complessi e dinamici. Al pari della burocrazia la rete può prevedere meccanismi di controllo e di coordinamento delle organizzazioni partecipanti basati su regole formali e relazioni gerarchiche centrate su un'impresa focale che ispira la rete medesima e ne garantisce certezza e stabilità; al pari del mercato la rete garantisce sempre l'indipendenza dei suoi membri e la reversibilità relazionale. Le reti sono la forma organizzativa tipica del capitalismo cognitivo (Rullani, 2004).

Il modello di *governance* di una rete è il sistema adottato di regolazione delle connessioni, ovvero sia delle interazioni tra i partner, cioè la sua struttura decisionale, i meccanismi di coordinamento e controllo, in breve, la sua struttura connettiva (fiducia vs. controllo).

Il modello di *governance* di una rete può essere distribuito (*shared governance*) o centrato su un'impresa focale (*lead governance*). Nel primo caso, i rapporti tra i partner sono relazionali, cioè paritari, esclusivamente *trust-based*, costruiti su competenze possedute e condivise. Le connessioni relazionali sono di *partnership*, cioè cooperative, dunque non competitive. Nel secondo caso, le connessioni tra le organizzazioni sono prevalentemente gerarchiche, dunque verticali, basate su regole contrattuali e di controllo stabilite dall'impresa focale, più di rado fondate esclusivamente sulla reputazione di quest'ultima.

Pertanto, il potere decisionale entro le reti si distribuisce tra i partecipanti o in modo paritario, o secondo la linea gerarchica delineata dall'impresa focale.

A nostro avviso, una connessione gerarchica di rete presuppone sempre la fiducia e stima reciproche, fondate sul mutuo riconoscimento delle competenze possedute dalle parti coinvolte nella relazione. Con riferimento alle reti basate su relazioni formali, si potrebbe allora anche ipotizzare il configurarsi di soluzioni di *governance* "ibrida", basate su fiducia e controllo allo stesso tempo.

La *governance* di una rete è invece tecnologica se le relazioni tra i partner sono regolate da una piattaforma digitale (protocolli di interfaccia, regole di accesso, etc.)

La partecipazione di un'organizzazione a una rete relazionale è sempre un mezzo per accedere alle conoscenze, risorse e competenze specialistiche possedute dai partecipanti, valorizzare le proprie, e, allo stesso tempo, per attivare processi di apprendimento inter-organizzativo. Le reti, infatti, sono *loci* in cui si genera nuova conoscenza attraverso l'interazione e la contaminazione reciproca. La rete è quindi,

di per sé, una *risorsa* su cui tutte le aziende che vi partecipano, indistintamente, possono fare leva per ottenere un differenziale positivo di reddito rispetto ai concorrenti. L'appartenenza a una rete, quindi, potenzia sempre le capacità delle imprese di raggiungere e sostenere il vantaggio competitivo.

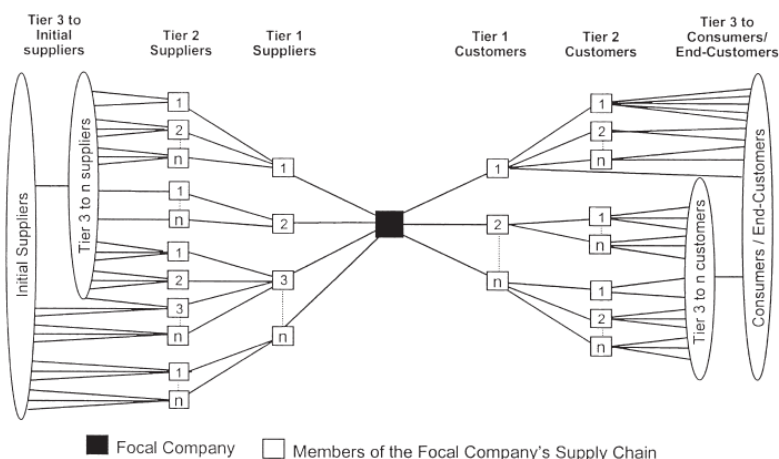
In letteratura, ogni partecipante a una rete è descritto come un *nodo* autonomo della rete stessa, interagente con gli altri nodi (Goyal, 2007). Il potere associato a ciascun nodo è funzione del tipo di *governance* adottato dalla rete, cioè – come noto – della struttura del potere e dei meccanismi di coordinamento e controllo in essa prevalenti, nonché, logicamente, della posizione gerarchica del nodo all'interno della struttura inter-organizzativa.

La *governance* di una rete ne influenza non solo la struttura del potere e le dinamiche relazionali inter-organizzative, ma anche le sue strutture operative. Come verrà dimostrato nel prosieguo di questo articolo, le strutture di produzione delle reti di fornitura assumono configurazioni centralizzate o decentrate anche in funzione della *governance* di rete adottata.

Le catene di fornitura (*Supply Chain, SC*) sono reti di organizzazioni produttive coinvolte nei diversi processi di business, a monte (ad esempio, i fornitori) e a valle (ad esempio, i distributori) di imprese focali, attraverso le quali si genera il valore per il cliente finale nella forma di prodotti (beni e servizi) che ne soddisfano le esigenze (Christopher, 2017). L'inclusione nelle *SC* dei consumatori finali dipende dal grado di coinvolgimento nei processi di creazione del valore.

Definiamo le *SC* reti centrate su imprese focali che ne regolano e governano i processi di creazione del valore per il cliente finale, a cui partecipano attori, ciascuno con il proprio sapere e con un'intensità relazionale che dipende dal tipo di apertura *upstream* e *downstream* della rete medesima (Gallinaro, 2015) (Figura 1).

Figura n. 1. Supply chain (Lambert&Cooper, 2000)



I nodi di una catena di fornitura (fornitori, produttori-assemblatori, distributori, venditori) rappresentano i *punti chiave* del flusso dei materiali e delle informazioni: ogni nodo svolge, infatti, un ruolo ben preciso nella catena di creazione del valore, facendo leva su competenze acquisite e gestite in condivisione.

Secondo Lambert e Cooper (2000), le tre dimensioni di una *SC* essenziali quando la si descrive, analizza e gestisce sono la sua *struttura orizzontale*, la sua *struttura verticale* e la *posizione orizzontale* dell'azienda focale all'interno della *SC* medesima.

La prima dimensione, la struttura orizzontale, si riferisce al numero di livelli della catena di fornitura. La catena di fornitura può essere lunga, con numerosi livelli, o corta, con pochi livelli. La seconda dimensione, la struttura verticale, si riferisce al numero di partecipanti (fornitori, distributori) presenti a ciascun livello: la catena di fornitura può avere una struttura verticale ristretta, con poche aziende a ciascun livello, o una struttura verticale ampia, con molti fornitori e/o clienti intermedi a ciascun livello. La terza dimensione strutturale è la posizione orizzontale dell'azienda focale all'interno della catena. Un'azienda focale può essere situata in prossimità della fonte di approvvigionamento iniziale, o più vicino al cliente finale, o in un punto intermedio tra gli estremi della catena.

È importante considerare che la struttura della *SC* che realmente emerge non è, tuttavia, solo il risultato della progettazione inter-organizzativa effettuata dall'azienda focale, strumentale all'implementazione della strategia di profitto da questa adottata, ma anche il risultato di contingenze organizzative, nonché di continue aggregazioni e fuoriuscite di partner.

Le *SC* tradizionali o convenzionali sono definite lineari in quanto basate su flussi fisici ed informativi sequenziali e coerenti tra i nodi. Come già affermato in letteratura, il concetto di *SC* tradizionale, che collega sequenzialmente tutti i partecipanti alla generazione del valore, dai fornitori al cliente finale, è tuttavia un'astrazione teorica (Delfmann e Albers, 2001). Le *SC* tradizionali sono, infatti, reti complesse di aziende e clienti finali, la cui organizzazione e gestione (*Supply Chain Management, SCM*) coinvolge solamente le connessioni principali e strategiche per il successo competitivo delle reti stesse. Tan *et alii* (1998) affermano che, se da un punto di vista teorico il *SCM* dovrebbe prevedere l'integrazione di tutti i partecipanti alla *SC*, nella realtà le *SC* sono talmente complesse che l'integrazione è riservata solo ai partner definiti strategici. Gli altri partecipanti sono infatti considerati di 'supporto' alla *SC*. A tal proposito, Lambert e Cooper (2000) affermano che "per la maggior parte dei produttori, la *supply chain* assomiglia più a un albero sradicato che a una conduttura o a una catena, i cui rami e radici sono la vasta rete di fornitori e clienti".

Nella progettazione del *SCM*, i nodi da coordinare e integrare dipendono pertanto da tutta una serie di circostanze, quali le capacità possedute dall'impresa focale e dai suoi partner, l'importanza e il potere detenuto da ciascun partner all'interno della catena di fornitura, le strategie competitive e le scelte relative al sistema di produzione effettuate dal management dell'impresa focale.

La linearità delle fasi della catena di approvvigionamento e fornitura è, quindi, desunta sostanzialmente in base ad un'interpolazione di tipo logico tra i suoi nodi.

In sintesi: non tutti i collegamenti lungo la *supply chain* devono essere considerati nella progettazione del *SCM*, perché non tutti i collegamenti devono essere coordinati

e integrati in quanto non tutti sono strategici. Lambert e Cooper (2000) osservano che, in sede di progettazione del *SCM*, la domanda a cui l'azienda focale deve rispondere riguarda quali e quanti dei rami e delle radici che costituiscono la *SC* devono essere organizzati e gestiti.

Determinare quali parti della catena del valore richiedano una focalizzazione da parte del management che organizza e gestisce la *SC* dipende da una molteplicità di variabili strutturali e strategiche.

Un *SCM* efficace ed efficiente postula l'integrazione delle attività funzionali dei singoli nodi nei *processi chiave* della *SC*, cioè in quei processi da cui dipende prioritariamente la creazione di valore per il cliente finale (Lamber&Cooper, 2000)¹. I processi chiave della *SC* possono funzionare come meccanismi di connessione strutturale e gestionale dei suoi nodi, ottimizzando i flussi dei materiali e delle informazioni, e realizzare così un valore superiore per il cliente finale - e subordinatamente per tutti i partecipanti alla *SC*. A tal riguardo Mentzer *et alii* (2001) affermano che nelle *SC* "la cooperazione si riferisce ad attività simili o complementari, coordinate, svolte dalle imprese in una relazione commerciale per produrre risultati reciproci superiori o risultati singolari che sono reciprocamente attesi nel tempo". La cooperazione - continuano Mentzer *et alii* (2001) - "non si limita alle esigenze della transazione in corso e viene implementata a diversi livelli di gestione (ad esempio, sia a livello di alta dirigenza che di gestione operativa), coinvolgendo il coordinamento interfunzionale tra i membri della catena di fornitura".

Tutto quanto suddetto, affermiamo che le *SC* tradizionali sono lineari nella logica delle fasi del processo di creazione del valore, che va dall'approvvigionamento dei materiali alla fornitura al cliente finale, non nell'organizzazione e gestione della attività. Nei processi chiave delle *SC* si abbandonano le dinamiche sequenziali di svolgimento delle attività a favore di approcci inter-funzionali e concomitanti: le iterazioni e la circolarità dei flussi informativi 'ricchi' che così si generano attivano la creazione di nuova conoscenza che si rimette nelle strutture e nei processi organizzativi, ottimizzando il flusso dei materiali e, dunque, creando un valore superiore per il cliente finale². I processi chiave della *SC* si integrano poi tra loro secondo combinazioni non obbligate e molteplici, in funzione di specifiche esigenze ed obiettivi di gestione della *SC* medesima.

Definiamo l'approccio al management e all'organizzazione della *SC* 'per processi *loosely coupled*'.

Il *SCM* organizzato e gestito con ottica processuale trasforma la catena dei partecipanti in un'unica entità virtuale di business che ha come obiettivo il vantaggio competitivo della *SC* medesima nei mercati complessi e turbolenti dei prodotti: come

¹ The key supply chain processes identified by members of The GSCF (Global Supply Chain Forum, ndr) are: • Customer relationship management • Customer service management • Demand management • Order fulfillment • Manufacturing flow management • Procurement • Product development and commercialization • Returns. (Lambert e Cooper, 2000).

² Christopher (2007) definisce sinteticamente il *SCM* 'the management of upstream and downstream relationships with suppliers and customers to deliver superior customer value at less cost to the supply chain as a whole.'

è oramai noto, il confronto competitivo nei mercati non è tra imprese *single*, bensì tra catene di fornitura.

Lambert e Cooper (2000) affermano che l'integrazione delle attività aziendali funzionali nei processi chiave della catena di fornitura può essere realizzata, oltre che per mezzo del personale interno del produttore e dei fornitori di servizi terzi, dai *team* interfunzionali responsabili dei processi chiave della *SC*.

L'approccio per processi al *SCM* diviene dunque strumento efficace di coordinamento inter-organizzativo.

2. Modelli di value creation network

Sebbene presentino sempre configurazioni centrate sulle organizzazioni aziendali che le hanno ispirate e le governano (le imprese focali), le *SC* lineari mostrano soluzioni produttive diverse a seconda delle strategie competitive adottate e del contesto ambientale in cui esse operano (Gallinaro, 2024).

Tra i modelli strutturali e relazionali lineari di network di creazione del valore ci sono le *SC* della produzione centralizzata, le *SC* della produzione diffusa e quelle della produzione localizzata.

L'ecosistema della produzione additiva è un *network value added*, cioè un sistema composto da un'infrastruttura tecnologica (le piattaforme di progettazione e manifattura) che connette e supporta partner collaborativi nel processo di co-creazione di un *valore condiviso*, quale può essere un progetto aperto e personalizzabile. Il valore per l'utente finale di una piattaforma di progettazione e manifattura additiva (*Additive Manufacturing, AM*) è il manufatto che soddisfa le sue specifiche esigenze, realizzato sulla base del predetto valore condiviso.

Questo articolo suggerisce che tale ultima tipologia di *network value added* sia una *supply chain di tipo digitale*, la cui logica di collegamento delle fasi di creazione del valore non è lineare, ma circolare ed interattiva.

A tal fine si procede con una descrizione dei seguenti modelli di *SC*:

- *Supply chain* lineari della produzione centralizzata
- *Supply chain* lineari della produzione distribuita e diffusa
- *Supply chain* della produzione localizzata
- *Supply chain* digitali della produzione decentrata.

Le prime tre tipologie di *SC* su elencate sono convenzionali, dunque lineari; nel passaggio dalla prima alla terza tipologia di *SC* cresce progressivamente il grado di internalizzazione del cliente finale nelle catene di fornitura e, parallelamente, cambia la tipologia di *customer knowledge* necessaria ai fini della creazione del valore (Gallinaro, 2015; Gibbert *et al.*, 2002). Le *DSC* sono gli ecosistemi della manifattura additiva abilitati dalle piattaforme di progettazione digitale, proprietarie o *open source*, collegate a macchine di produzione a tecnologia additiva. Trattasi di network ad elevata circolazione del sapere; l'utente finale ha un ruolo paritario e collaborativo

rispetto agli altri nodi del network e il *customer knowledge* socializzato ha un'elevata valenza strategica ai fini della creazione del valore condiviso.

• **Supply chain della produzione centralizzata.** Sono le *SC* che si rivolgono ai mercati di massa in cui il cliente finale chiede beni standardizzati a un prezzo conveniente. In questo caso la manifattura è centralizzata nell'impresa focale per sfruttare le economie di scala generate dai grandi volumi di produzione. Questa tipologia di *SC* prevede un'articolazione della medesima in unità organizzative a monte (fornitori di materiali) e a valle (clienti intermedi-distributori) di quella manifatturiera in base alle specializzazioni funzionali. Ogni impresa che partecipa ad una *SC* centralizzata è, infatti, focalizzata su una delle attività di creazione di valore, quali l'approvvigionamento dei materiali, la produzione dei prodotti, la distribuzione e la vendita, e i servizi post-vendita. In sintesi, le *SC* con produzione centralizzata fanno leva sulla capitalizzazione delle *core competence* dei partner, al fine ridurre i tempi di fornitura e i costi unitari dei prodotti.

Nella fattispecie specifica, i clienti finali sono meri destinatori del valore creato dal produttore, e la loro appartenenza alla catena di fornitura non dovrebbe essere contemplata³. La conoscenza che matura a valle della catena della fornitura (*customer related knowledge*) è acquisita dall'impresa generalmente attraverso le transazioni e si focalizza sui lineamenti del consumatori e sui loro comportamenti di acquisto. Precisamente trattasi di *knowledge about the customer* che rientra nel dominio del *Customer related Management (CRM)*, processo chiave del *SCM*.

Le imprese focali delle *SC* che operano nei mercati di massa ispirano, progettano e controllano le catene del valore.

Nelle *SC* centralizzate, la logistica armonizza le varie attività del progetto aziendale condiviso con le imprese partner, mirando a rendere fluidi i flussi dei materiali e delle informazioni.

• **Supply chain della produzione distribuita e diffusa.** In questo caso, le *SC* sono articolate in imprese che condividono progetti complessi di produzione. Ciascuna impresa progetta e realizza *parti importanti* o *moduli* di prodotto che le imprese focali assemblano. Ogni unità d'impresa che si focalizza sulla produzione di un modulo standard lo replica in grandi volumi, realizzando economie di costo. Le imprese focali assemblatrici ricercano invece economie di varietà per mezzo del *mix* e *matching* dei moduli (Gallinaro, 2024).

All'interno delle *SC* che adottano la modularità nel *manufacturing*, la produzione del prodotto è distribuita e diffusa tra i partner. Le *SC* della produzione distribuita e diffusa fanno leva sulle regole contrattuali di alleanze strategiche e, al contempo, sulla fiducia reciproca dei partner, generata dalle competenze possedute e mutuamente riconosciute, necessarie per sviluppare progetti di prodotto complessi.

Alla base della disintegrazione verticale dei produttori e della creazione di reti modulari vi è la focalizzazione di unità aziendali su competenze *core* nella

³ Nell'ottica delle *SC* centralizzate, il cliente ha un ruolo passivo nel processo di creazione del valore.

realizzazioni di moduli di prodotto, e la presenza nei mercati di clienti finali propensi al consumo di prodotti customizzati realizzati sulla base di combinazioni di moduli standardizzati.

Le SC modulari sono *imprese diffuse* in cui la conoscenza circola incessantemente ed è generata anche per interazione inter-organizzativa.

Nelle SC della produzione diffusa il cliente finale è internalizzato e partecipa alla attività progettuale della *configurazione del prodotto*, cioè al *mix and matching* di moduli standard. La conoscenza che matura a valle della catena di fornitura è dunque necessaria per realizzare il prodotto customizzato ed è apportata dal cliente (*knowledge from the customer*) attraverso le interazioni con l'impresa focale in sede progettuale (Gallinaro, 2015).

- **Supply chain della produzione localizzata.** Le SC in grado di soddisfare esigenze specifiche di singoli clienti o di mercati locali, riducendo costi e tempi di produzione e consegna, incarnano i principi della rete *leanagile* (Gulati, *et al.*, 1999; Gallinaro, 2024). Le reti *leanagile* abbandonano la logica della divisione di un progetto aziendale complesso tra imprese specializzate nelle diverse funzioni aziendali o nella realizzazione di moduli, per concentrare, moltiplicandole, le attività di creazione del valore in piccole unità aziendali situate nei mercati regionali o vicine ai clienti finali.

Le reti inter-organizzative della produzione localizzata e *leanagile* sono *reti di reti* centrate su mini fabbriche (Reichwald, 2003). Queste ultime adottano generalmente tecnologie di manifattura additiva per ridurre i costi della personalizzazione di piccoli lotti o di unità singole di prodotto, progettate e fabbricate *on demand*, e possono svolgere tutte le attività di creazione del valore su base locale, garantendo tempi di consegna brevi in forza della loro vicinanza ai clienti finali o ai mercati locali. Le reti di mini fabbriche sono, dunque, reti *real time*.

Ogni rete centrata su un mini fabbrica è indipendente ma, al contempo, interdipendente con le altre reti localizzate: le reti centrate su mini fabbriche si scambiano, infatti, tra di loro informazioni e *file* di progetto.

La vicinanza dell'impresa al cliente finale e ai luoghi del consumo si pone come necessaria laddove la domanda riguarda prodotti altamente specifici: la prossimità della mini fabbrica al cliente finale agevola infatti l'accesso alla *customer knowledge* (nella fattispecie, *knowledge from the customer*), specialmente alla sua componente *sticky*, difficile da trasferire con linguaggio formale, ma fondamentale per realizzare il prodotto altamente specifico (Gallinaro 2024).

La logistica delle reti *leanagile* è notevolmente semplificata e le medesime reti si mostrano assai resilienti nei confronti di turbolenze ambientali imprevedibili e improvvise. Allo stesso tempo, le reti *leanagile* sono altamente sostenibili, riducendo i trasporti e gli sprechi di materiali di lavorazione.

La SC della produzione localizzata coordina ed integra le reti centrate su singoli clienti o singoli mercati. La *governance* delle SC della produzione localizzata è del tipo *lead*: le unità organizzative centrali esercitano il controllo sul lavoro di ciascuna delle mini fabbriche, fornendo loro supporto e assistenza (Gallinaro, 2015).

- **Digital supply chain della produzione decentrata.** Gli ecosistemi digitali della produzione additiva sono sistemi integrati di strumenti e tecnologie digitali che

consentono a una varietà di attori di interagire e cooperare in ambienti digitali e reali al contempo, al fine di creare valore per gli utenti finali delle piattaforme di progettazione e manifattura additiva. Negli ecosistemi digitali di *AM* si svolgono perlappunto processi collaborativi di progettazione, produzione, distribuzione e gestione dei prodotti. Gli attori degli ecosistemi di *AM* sono progettisti, ingegneri, utenti (*maker* e aziende), fornitori di tecnologie digitali e di macchine additive, fornitori di materiali e di sistemi di controllo, etc. Gli strumenti che gli attori degli ecosistemi di *AM* utilizzano per creare valore all'interno di un ambiente digitale sono software, hardware e interfacce *web/cloud*: questi strumenti costituiscono le componenti delle strutture abilitanti gli ecosistemi medesimi, cioè le piattaforme di progettazione e manifattura digitali. Alla base degli strumenti software e hardware che supportano l'intero flusso di creazione del valore nell'ambiente digitale ci sono le tecnologie abilitanti ai più recenti modelli di produzione e di business (quali, ad esempio, le tecnologie *CAD*, le tecnologie di manifattura additiva, *Internet of Things*, la Realtà Aumentata, *Digital Twin*, *Cloud Computing*, la Manutenzione Predittiva, ecc.).

Definiamo questi ecosistemi di *AM* catene di fornitura digitali perché tra i loro nodi fluiscono principalmente dati digitali, cioè dati **creati, memorizzati, elaborati e trasmessi** da sistemi informatici.

La produzione dell'ecosistema di *AM* avviene in modalità decentrata, tramite macchine additive vicine ai luoghi di consumo, spesso indicate dalla stessa piattaforma di progettazione digitale, proprietaria o *open source*.

Sebbene le relazioni tra gli attori siano formalmente regolamentate dalla piattaforma, la *governance* di questi ecosistemi è nella sostanza relazionale e paritaria. L'utente finale della piattaforma è in grado di apportare conoscenza (*knowledge contributed by the customer*) di elevata qualità, al pari degli altri attori coinvolti nel network circolare di co-creazione del valore. L'utente finale viene pertanto riconosciuto come un *peer* all'interno dell'ecosistema digitale.

Al fine di meglio precisare la tipologia di network che qui viene definita catena di fornitura digitale, citiamo, quale esempio, *Thingiverse*, che è una piattaforma di progettazione digitale *open source* che consente agli utenti di scaricare gratuitamente progetti *3D* di manufatti (accessori, utensili, ricambi, supporti, parti meccaniche, ingranaggi, persino giocattoli e molto altro ancora) e *file STL* compatibili con macchine additive e contenenti progetti di *slice* di manufatti⁴; di caricare e condividere i propri progetti; di personalizzare i modelli esistenti nella memoria della piattaforma. *Thingiverse* consente a hobbisti, *maker*⁵, educatori, ingegneri di condividere il proprio sapere, di collaborare e gestire progetti, indicando anche servizi di stampa o reti di produttori indipendenti nell'ottica della produzione decentrata.

⁴ Il formato di file "*STL*" usa un algoritmo generico per descrivere le superfici da costruire *layer-by-layer* sulle macchine a tecnologia additiva.

⁵ Secondo la definizione di Anderson (2013), *maker* sono persone che usano strumenti digitali per creare nuovi prodotti; che condividono i progetti *on line* e collaborano in *community on line*; che utilizzano *file* standard di progetto per inviare i propri progetti ai *service* di produzione, riducendo il percorso dall'idea all'imprenditorialità.

⁶ Altri esempi sono contenuti in Gallinaro (2015).

Un altro esempio significativo è la piattaforma di progettazione e manifattura additiva di *Wikispeed*, produttore di automobili modulari con progettazione in *crowdsourcing*. La piattaforma di sviluppo collaborativo di veicoli modulari che *Wikispeed* mette a disposizione di una comunità globale di progettisti volontari, usando licenze *open source*, coniuga la progettazione digitale modulare con la produzione additiva. Ogni due settimane, gli utenti della piattaforma tecnologica *di Wikispeed* contribuiscono spontaneamente il proprio lavoro da varie posizioni sparse nel mondo, al fine di migliorare o personalizzare i progetti di vettura in modo iterativo. *Wikispeed* adotta la manifattura additiva per la produzione di prototipi e componenti, ma ogni utente della piattaforma può scaricare il progetto e produrlo in piena autonomia nei *Fablab* o utilizzando la propria strumentazione additiva⁶.

3. Il Digital Thread

Il *Digital Thread (DT)* è il 'filo conduttore' delle fasi attraverso cui un progetto digitale si crea e si trasforma in manufatto, il *framework* delle connessioni digitali tra i partecipanti ad una piattaforma di progettazione e manifattura additiva (progettisti, utenti, fornitori di *AM*, *Original Equipment Manufacturer (OEM)*) propensi a socializzare dati e informazioni di *feed-forward* e di *feed-back* su materiali, progettazione, produzione, manutenzione, verifiche ed altro ancora (Figura 2).

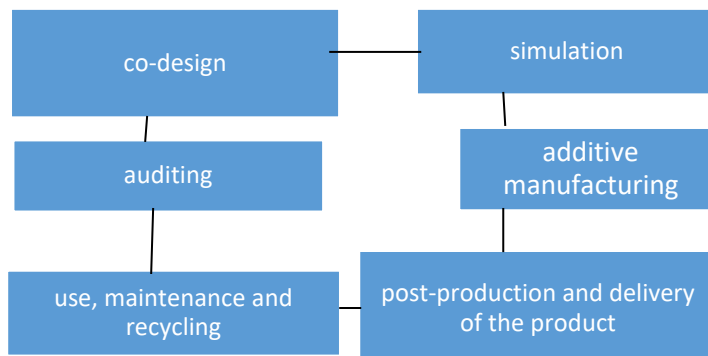
Il *DT* descrive la *sequenza logica circolare* delle fasi di co-creazione del valore negli ecosistemi di *AM*: in sostanza, è il *ciclo di vita* del progetto digitale.

Le piattaforme di progettazione e produzione, proprietarie o *open source*, memorizzano i cicli di vita dei progetti digitali, incorporando flussi continui ed integrati di dati digitali che accompagnano i progetti medesimi, dalla loro ideazione alla produzione del manufatto, dall'utilizzo dei manufatti alla manutenzione e al riciclo. Le piattaforme di progettazione e produzione additiva funzionano, dunque come "memorie digitali" di progetti.

Ogni fase del *DT* prevede l'utilizzo di software propri e specifici, generando dati e informazioni che alimentano incessantemente il *DT* medesimo (Abdel-Aty & Negri, 2024; Bonnard et al., 2018 e 2019; Bonham et al., 2020; Hedberg et al., 2020; Kwon et al., 2020; Liu et al., 2023).

Le fasi logiche del *DT* sono i processi *core*, digitali e fisici, dell'ecosistema di produzione additiva attraverso cui si genera il valore per l'utente finale: il *DT* descrive dunque l'ecosistema di *AM* come una *catena digitale di fornitura*, delineandone la trama circolare delle fasi attraverso cui si genera e rigenera il valore per l'utente finale di una piattaforma di progettazione e manifattura additiva.

Figura n. 2. Il Digital Thread



In sintesi estrema: le piattaforme di progettazione e produzione additiva, *open source* o proprietarie, funzionano come *hub* digitali contenenti *file* di progetto (essenzialmente *directory* di *file* di progetto). Gli utenti vi accedono in base alle regole della piattaforma con il fine di collaborare alla progettazione o contribuire al miglioramento e all'aggiornamento dei progetti, oppure per creare versioni personalizzate dei progetti in base alle proprie esigenze. Infatti, i *file* di progetto digitali possono essere modificati sulla piattaforma tramite software specifici, scaricati e tradotti in manufatti customizzati per mezzo di macchine additive.

Come già affermato, la manifattura degli ecosistemi additivi è decentrata: le piattaforme di progettazione digitale sono, infatti, integrate con reti industriali certificate di manifattura additiva, fabbriche selezionate e fornitori di servizi di stampa *3D*, indicati o suggeriti dalle piattaforme stesse, generalmente in base al criterio di prossimità al luogo di consumo – in questo caso, le piattaforme gestiscono anche la consegna dei prodotti - oppure connesse con macchine additive di *maker* indipendenti o di micro-unità di produzione localizzate. Le versioni personalizzate dei progetti create sulle piattaforme di progettazione e produzione additiva rimangono pertanto nelle memorie digitali.

Analizzati in una prospettiva strutturale, gli ecosistemi della produzione additiva si mostrano come reticoli di organizzazioni e persone (nodi) che cooperano per la creazione del valore secondo i principi dell'economia circolare e della produzione sostenibile.

La co-creazione del valore sulla piattaforma di progettazione e manifattura additiva prevede sequenze multiple di *fasi logiche non obbligate, loosely coupled*, dunque un'ampia gamma di possibili combinazioni di processi per la generazione di un manufatto - quali sono la co-progettazione, la simulazione, il *download* dei *file* di progetto digitali, la co-progettazione delle *slice* per la produzione additiva localizzata di prodotti personalizzati, la manutenzione predittiva dei macchinari, la consegna dei

manufatti, e altri ancora.⁷ Al pari della *SC* convenzionale, la creazione del valore sulla piattaforma di *AM* avviene, dunque, adottando l'approccio processuale all'organizzazione e gestione delle attività.

I processi di co-creazione del valore si svolgono sempre nell'ottica della simultaneità e dell'iteratività delle attività dei partecipanti alla piattaforma di *AM*, generando flussi informativi ricchi, tipici dei sistemi dinamici e collaborativi (Hammer e Champy, 2001).

4. Sintesi conclusiva

In questo articolo, sono state esaminate analogie e differenze tra quelle che in sintesi definiamo le due macro-tipologie di *SC*: ecosistema della manifattura additiva e catena convenzionale di fornitura. Tali analogie e differenze vengono richiamate nella seguente tabella di sintesi (Tabella 1); in particolare:

- la catena di fornitura tradizionale ha una *governance* generalmente centrata sull'azienda di riferimento che l'ha ispirata e la governa principalmente con regole e controllo gerarchico, mentre nell'ecosistema di *AM* il coordinamento tra partecipanti è paritario e non gerarchico, ed è affidato al sistema tecnologico digitale su cui esso stesso si erige e funziona;
- la logica delle fasi di creazione del valore nelle *SC* tradizionali ha un carattere sequenziale lineare, mentre nelle *DSC* si presenta come prettamente circolare e a fasi non obbligate;
- per entrambe le due 'macro-tipologie' di *SC*, l'approccio all'organizzazione e gestione delle attività di creazione del valore è tendenzialmente *per processi loosely coupled*, e tale approccio opera come fattore addizionale d'integrazione interfunzionale.
- nelle *SC* lineari con produzione diffusa o localizzata il valore per il cliente finale nasce, a differenza che in quelle a produzione centralizzata, con la partecipazione *attiva* del cliente finale medesimo, customizzandolo (nella modularità) o personalizzandolo secondo le specifiche esigenze (nelle reti di reti di mini fabbriche) (Gallinaro, 2015). Nelle *DSC* invece è il frutto di un *DT*, cioè di una sequenza logica circolare di fasi attraverso cui si genera e rigenera il valore per l'utente finale (*maker* o produttore) di una piattaforma di progettazione e produzione additiva. Il valore nella fattispecie si esprime nel manufatto generato sulla base di un progetto digitale aperto cui l'utente medesimo ha accesso per personalizzarlo a proprio piacimento. L'ecosistema digitale della manifattura additiva è altresì un ambiente altamente collaborativo che, democratizzando progettazione, innovazione e manifattura, abilita il modello della produzione decentrata.

⁷ Sulla piattaforma la creazione del valore può partire dal *co-design* oppure dal download di un file di progetto; prevedere la consegna del manufatto prodotto con tecnologia additiva da un centro di servizio indicato dalla piattaforma, oppure la realizzazione del manufatto con la stampante *3D* di un *maker*.

Tabella n.1 - Somiglianze e dissimiglianze tra le SC e le DSC

Tipologie di <i>supply chain</i>	SC della produzione centralizzata	SC della produzione distribuita e diffusa	SC della produzione localizzata	DSC della produzione decentrata
Governance	<i>lead</i>	<i>lead</i>	<i>lead</i>	<i>shared</i>
Logica delle fasi di creazione del valore	<i>lineare</i>	<i>lineare</i>	<i>lineare</i>	<i>circolare</i>
Approcci all'organizzazione e gestione della SC	<i>per processi loosely coupled</i>	<i>per processi loosely coupled</i>	<i>per processi loosely coupled</i>	<i>per processi loosely coupled</i>
Customer related knowledge	<i>knowledge about the customer</i>	<i>knowledge from the customer</i>	<i>knowledge from the customer</i>	<i>knowledge contributed by the customer</i>

Fonte: nostra elaborazione

L'attuale fase cognitiva del capitalismo, che sollecita una sempre maggiore socializzazione e circolazione del sapere, generando sempre nuove forme di produzione del valore, lascia intravedere contesti socio-economici prossimi in cui gli ecosistemi di progettazione e produzione digitale saranno sempre più diffusi e pervasivi. In questa prospettiva, l'articolo evidenzia come l'ecosistema di AM sia un ambiente digitale, virtuale e, al contempo, reale che, combinando strettamente progettazione e produzione, crea un nuovo modo di concepire la catena di creazione del valore: non più dal fornitore al consumatore, ma da un progetto aperto e personalizzabile a una produzione di un manufatto adattato di volta in volta alle specifiche esigenze di un utente finale.

Bibliografia

- Bonham, E., McMaster, K., Thomson, E., Panarotto, M., Müller, J. R., Isaksson, O., & Johansson, E. (2020). Designing and integrating a digital thread system for customized additive manufacturing in multi-partner kayak production, *Systems*, 8(4), 1–17.
- Bonnard, R., Hascoët, J. Y., Mognol, P., & Stroud, I. (2018). STEP-NC digital thread for additive manufacturing: Data model, implementation and validation, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(11), 1141–1160.
- Bonnard, R., Hascoët, J. Y., Mognol, P., Zancul, E., & Alvares, A. J. (2019). Hierarchical object-oriented model (HOOM) for additive manufacturing digital thread, *Journal of Manufacturing Systems*, 50, 36–52.

- Christopher M. (2017). Relationships and alliances. Embracing the era of network competition, in Gattorna J., *Strategic Supply Chain Alignment Best Practice in Supply Chain Management*, Routledge, London, p.66.
- Delfmann W., Albers (2000), Supply chain management in the global context, WP, University of Cologne, Department of Business Policy and Logistics, 102
- Ellram L.M., Cooper M.C., (1990) Supply Chain Management, Partnership, and the Shipper - Third Party Relationship, *The International Journal of Logistics Management*, 1, 2,1-10
- Gallinaro S. (2021). Catene di fornitura basate sulla produzione additiva, *ImpresaProgetto – Electronic Journal of Management*, (1).
- 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).
- Gallinaro, S. (2015), Produzione, Giappichelli, Torino.
- Gallinaro, S. (2024). *Economia d'impresa*, Giappichelli, Torino.
- Gibbert M., Leibold M., Probst G., (2002). Five styles of customer knowledge of customer management and how smart companies use them to create value, *European Management Journal*, Vol. 20, n.5.
- Gulati, R., Puranam, P., Tushman, M., (2012), Meta-organization design: Rethinking design in interorganizational and community contexts, *Strategic Management Journal*, Vol. 33, Issue 6, 571–5
- Hammer J., Champy M. (2001), *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*, John Murray Press, 272
- Hedberg, T. D., Bajaj, M., & Camelio, J. A. (2020). Using graphs to link data across the product lifecycle for enabling smart manufacturing digital threads, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 20(1), 011011.
- Hein A., Schreieck M., Riasanow T., Soto SetzkeD., WiescheM., Böhm M., Helmut Krcmar H., (2020), *Digital platform ecosystems*, *Electronic Markets* (2020) 30, 87–98
- Holmström, J., Holweg, M., Khajavi, S.H., Partanen, J. (2016). The direct digital manufacturing (r)evolution: definition of a research agenda, *Operations Management*, 9, 1–10.
- Kapetaniou, C., Rieple, A., (2017), January. The role of business ecosystems in the building of disruptive innovations, *Academy of Management Proceedings*. 2017, 1, 15200.
- Kwon, S., Monnier, L. V., Barbau, R., & Bernstein, W. Z. (2020). Enriching standards-based digital thread by fusing as-designed and asinspected data using knowledge graphs, *Advanced Engineering Informatics*, 46.
- Lambert D.M., Cooper M.C., Issue in Supply Chain Management (2000), *Industrial Marketing Management*, 29, 65-83
- Lambert D.M., Cooper M.C., Pagh J.D, (1998), Supply Chain Management, *The International Journal of Logistics Management*, 9, 2, 1-19

- Liu, S., Lu, Y., Shen, X., & Bao, J. (2023). A digital thread-driven distributed collaboration mechanism between digital twin manufacturing units, *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 145–159.
- Mentzer J.T., DeWitt W.M Keebler J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.C., (2001), Defining Supply Chain Management, *Journal of Business Logistics*, 22, 2, 1-25
- Morar D., Hiller S. Patrick D. (2023). How additive manufacturing platforms are digitizing the manufacturing value proposition, *Thirty-first European Conference on Information Systems*, Norway
- 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, 107–118.
- 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 MiniPlants for Mass Customization. In: F.T. Piller (ed.), *The Customer Centric Enterprise. Advances in Mass Customization and Personalization*, Berlin, Springer.
- Rullani E. (2004), *Economia della conoscenza. Creatività e valore nel capitalismo delle reti*, Carocci, Roma,
- 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.
- Tziantopoulou K., Tsolakis N., Vlachos D., Loukas T. (2019), Supply Chain Reconfiguration Opportunities Arising from Additive Manufacturing Technologies in the Digital Era, *Production Planning e Control, The Management of Operations*, 30, 7.