



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

**STRATEGIE PER LO SVILUPPO DI UN SISTEMA INDUSTRIALE
CIRCOLARE, PULITO ED EFFICIENTE**

**STRATEGIES FOR THE DEVELOPMENT OF A CIRCULAR, CLEAN AND
EFFICIENT INDUSTRIAL SYSTEM**

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. **Maurizio Bevilacqua**

Correlatore: Ing. **Sara Antomarioni**

Tesi di Laurea di:

Cristina Rossetti

A.A. 2020 / 2021

Indice

Introduzione	3
1. L'economia circolare	4
1.1. Supply Chain Management	10
1.2. Sharing Economy e Product-Service System (PSS)	15
1.3. Progettazione di prodotti circolari	18
2. Il ruolo della digitalizzazione	20
2.1. Metodologia di ricerca.....	20
2.2. Le tecnologie digitali.....	20
2.3. Internet of Things	23
2.4. Big Data and Analytics.....	24
2.5. Applicazioni delle tecnologie digitali.....	26
2.6. Additive Manufacturing	31
3. Analisi letteraria	33
3.1. Limitazioni	36
Conclusioni	38
Bibliografia	40

Introduzione

La crescente preoccupazione per l'ambiente ha consentito all'Economia Circolare di assumere una grande importanza nelle strategie industriali. La circolarità, tuttavia, non permette esclusivamente un miglioramento della sostenibilità e quindi la diminuzione degli impatti negativi sull'ambiente, ma offre anche l'opportunità di aumentare l'efficienza dei processi produttivi, della catena di approvvigionamento e dell'intero sistema industriale. Sono stati individuati diversi abilitatori che facilitano l'implementazione dell'Economia Circolare ed è risultato evidente come la digitalizzazione stia assumendo un ruolo sempre più importante nella realizzazione di strategie circolari.

Nel capitolo 1 viene presentata nel suo complesso l'Economia Circolare e i suoi benefici in ambito industriale. Successivamente, vengono descritti gli abilitatori principali della circolarità, ovvero la gestione della catena di approvvigionamento, la Sharing Economy e il Product-Service System, e la progettazione di prodotti circolari. Sono analizzati anche alcuni casi studio, al fine di evidenziare l'importanza di queste leve per l'Economia Circolare.

Nel capitolo 2 viene effettuato un focus sul ruolo della digitalizzazione nell'implementazione dell'Economia Circolare. In particolare, sono illustrati i vantaggi fondamentali delle tecnologie digitali e quindi il loro legame con gli aspetti di sostenibilità ed efficienza in un sistema industriale; vengono poi descritte le principali tecnologie e le loro possibili applicazioni, prendendo in considerazione le diverse leve precedentemente individuate.

Il capitolo 3 presenta una breve analisi della letteratura utilizzata, mostrando quali sono le leve per l'Economia Circolare maggiormente studiate e le tecnologie digitali che vengono prese più in considerazione. Si sottolineano poi le limitazioni trovate nella letteratura, con vari spunti per le ricerche future.

1. L'economia circolare

L'economia circolare (CE) ha acquisito slancio dalla fine degli anni '70 e molti autori contribuiscono ancora ad oggi alla definizione e alle caratteristiche di questo concetto. La definizione tutt'oggi più nota è quella fornita dalla Ellen MacArthur Foundation, la quale sostiene che la CE è un'economia riparatrice e rigeneratrice, che mira a mantenere prodotti, componenti e materiali alla loro massima utilità e valore in ogni momento, distinguendo tra cicli tecnici e cicli biologici. I materiali di origine biologica sono destinati ad essere reintegrati nella biosfera, e quelli tecnici devono essere progettati per essere rivalorizzati senza entrare nella biosfera.

L'economia circolare si contrappone alla tradizionale economia **lineare**, la quale segue il principio di “take-make-dispose”, basandosi sull'accessibilità di grandi quantità di risorse ed energia e sulla produzione finalizzata al consumo di massa. Questo modello porta ad un'ingente mole di rifiuti ed emissioni sia nella catena di approvvigionamento che a fine vita del prodotto, con conseguente erosione degli ecosistemi. Si pone quindi necessaria la transizione da un modello di economia lineare ad un modello circolare che, nella considerazione di tutte le fasi – dalla progettazione, alla produzione, al consumo, fino alla destinazione a fine vita – sappia cogliere ogni opportunità di limitare l'apporto di materia ed energia in ingresso e di minimizzare scarti e perdite, ponendo attenzione alla prevenzione delle esternalità ambientali negative e alla realizzazione di nuovo valore sociale e territoriale. Si tratta pertanto di un ripensamento complessivo e radicale rispetto al modello produttivo classico, basato sull'iper-sfruttamento delle risorse naturali e orientato all'unico obiettivo della massimizzazione dei profitti tramite la riduzione dei costi di produzione. In sostanza, l'economia circolare può essere definita come un modello economico finalizzato all'uso efficiente delle risorse attraverso la minimizzazione dei rifiuti, la conservazione del valore a lungo termine, la riduzione delle risorse primarie e circuiti chiusi di prodotti, parti di prodotti e materiali [1]. La CE è un modello di produzione e consumo che implica condivisione, prestito, riutilizzo, riparazione, ricondizionamento e riciclo dei materiali e prodotti esistenti

il più a lungo possibile. In questo modo si estende il ciclo di vita dei prodotti, contribuendo a ridurre i rifiuti al minimo. Una volta che il prodotto ha terminato la sua funzione, i materiali di cui è composto vengono infatti reintrodotti, laddove possibile, nel ciclo economico. Così si possono continuamente riutilizzare all'interno del ciclo produttivo generando ulteriore valore.

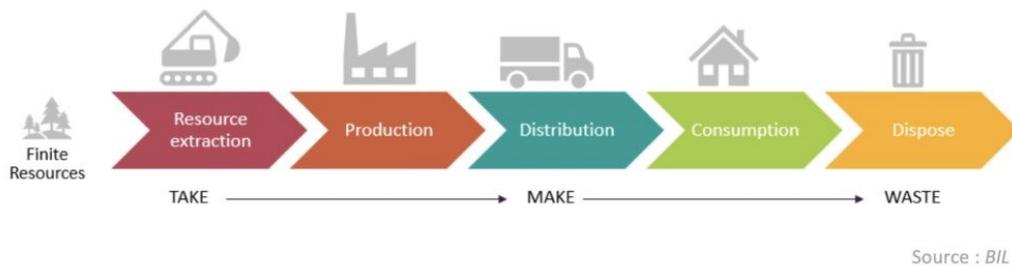


Figura 1, Economia lineare, <https://my-life.lu/en/towards-a-circular-economy-30514/>



Figura 2, Economia Circolare, <https://my-life.lu/en/towards-a-circular-economy-30514/>

Il concetto di Economia Circolare è strettamente legato al concetto di **sostenibilità**. La sostenibilità è descritta dalla Commissione mondiale per l'ambiente e lo sviluppo come "sviluppo che soddisfa i desideri della generazione presente senza compromettere le generazioni future per soddisfare i loro bisogni conoscendo la scarsità di risorse naturali". Lo scopo principale dell'economia circolare è raggiungere livelli di consumo e di produzione sostenibili attraverso una produzione più pulita e una gestione del ciclo di vita del prodotto, al fine di creare armonia tra sviluppo economico e protezione ambientale. Il Lowell Center for Sustainable Production (LCSP) definisce la produzione sostenibile come “la creazione di beni e servizi utilizzando processi e sistemi non inquinanti, che conservano energia e risorse naturali, economicamente fattibili, sicuri e salubri per i lavoratori, le comunità e i consumatori; e, socialmente e creativamente gratificante per tutti i lavoratori” [2].

In sintesi, quindi, l'economia circolare non garantisce solo benefici ambientali, ma permette anche di gestire in maniera efficiente ed efficace tutto il sistema industriale, compresi perciò anche i processi produttivi e le risorse. Puntare ad una maggiore efficienza nel modo in cui vengono utilizzate le risorse può ridurre il contributo climatico complessivo di un'azienda e migliora la sostenibilità e la longevità dell'attività. Il consumo di materiali grezzi, infatti, genera inquinamento, esaurisce lo stock naturale di risorse nel mondo ed è la principale fonte di emissioni di gas serra. Il concetto di **efficienza delle risorse** è definito come la riduzione della quantità di input necessari per produrre un'unità di output. Il consumo ridotto di input (come materie prime, energia, acqua) non solo porta a minori sottoprodotti (come rifiuti, acque reflue, inquinamento atmosferico e gas a effetto serra per unità di prodotto), ma riduce anche la domanda di fornitura di tali input insieme ai loro costi ambientali. La progettazione del consumo e dei sistemi di produzione sono centrali per i risultati di efficienza delle risorse; dalla scelta delle risorse di input, allo scambio di materiale di scarto che diventa materia prima, al recupero dei materiali alla fine della loro vita. L'idea di creare un'economia circolare promuove la trasformazione dei sottoprodotti finali in input utili altrove, riutilizzandoli o

riciclandoli. Nell'acquisizione di materie prime il miglioramento nell'efficienza riguarda i processi di estrazione. La scelta di nuove risorse, a scapito di altre più dannose per l'ambiente, può generare nuove opportunità e riduce i costi di produzione. Anche l'utilizzo di energia rinnovabile è sempre più economico ed efficiente. Nella produzione l'efficienza può essere implementata anche riconsiderando la catena di valore esistente, creando nuove alternative nei processi produttivi e ripensando alle procedure di produzione. Inoltre, il riuso e l'incorporazione di materiali riciclati promuove la circolarità della catena di valore e la produzione di prodotti più efficienti e di buona qualità.

Una gestione efficiente e circolare delle risorse deve però essere anche implementata attraverso l'utilizzo di **energia pulita**. Infatti, per produrre energia si sfruttano i combustibili fossili, materiali come carbone, petrolio e gas attraverso processi che generano scorie tossiche e altamente inquinanti per l'ambiente. A ciò si aggiunge il fatto che queste risorse energetiche non sono inesauribili e pertanto, a causa dell'intenso sfruttamento a cui sono sottoposte, negli anni tenderanno ad estinguersi e a non poter provvedere più alle necessità di sopravvivenza dell'uomo. Le energie rinnovabili sono fonti di energia alternativa alle fonti fossili e si caratterizzano soprattutto per essere forme di energia pulita, ovvero non inquinano l'ambiente con emissioni nocive. Tra le principali fonti rinnovabili, l'energia più pulita è quella proveniente dalla luce del sole o dalla forza del vento (energia solare ed energia eolica). L'energia rinnovabile è generata da una fonte che può essere costantemente rifornita. In teoria, questo tipo di energia non dovrebbe mai esaurirsi, rendendosi una scelta molto più efficiente delle fonti non rinnovabili come i combustibili fossili e i gas, che danneggiano l'atmosfera. In una prospettiva di sostenibilità ambientale, è preferibile scegliere energie rinnovabili green, ovvero generate da fonti naturali come il vento, l'acqua e la luce del sole.

Ad ogni modo, in generale, è necessaria una gestione più efficiente delle risorse lungo il loro intero ciclo di vita, dall'estrazione, il trasporto e il consumo, fino allo smaltimento dei rifiuti. Ciò è possibile attraverso strategie e modelli circolari che, nella letteratura, sono stati utilizzati e analizzati per l'implementazione

dell'economia circolare nei sistemi industriali. Vengono qui mostrati quelli citati e studiati più frequentemente negli articoli presi in considerazione.

Il **modello ReSOLVE** è stato sviluppato dalla Ellen MacArthur Foundation ed è “una lista di controllo di requisiti CE che consiste in sei azioni: regenerate, share, optimise, loop, virtualise, and exchange, ognuna delle quali rappresenta un'opportunità per l'implementazione CE. Ogni azione è conforme a tre principi di base che definiscono la CE: preservare e valorizzare il capitale naturale; ottimizzare i rendimenti delle risorse facendo circolare prodotti, componenti e materiali con la massima utilità e valore in ogni momento all'interno dei cicli tecnici e biologici; e promuovere l'efficacia del sistema rivelando e progettando esternalità negative.” [3]. Questo modello può aiutare nella progettazione, nel ripensamento e nell'analisi del prodotto, del sistema produttivo ma anche dell'intera catena di approvvigionamento nell'ottica della sostenibilità ambientale. Sono qui elencate le sei azioni circolari:

- 1) *Regenerate* (Rigenerazione) comprende il passaggio a energie e materiali rinnovabili; il recupero, la conservazione e il ripristino della salute degli ecosistemi; la restituzione delle risorse biologiche alla biosfera.
- 2) *Share* (Condivisione) consiste nella condivisione di risorse, nel riutilizzo/seconda mano, nel prolungare la vita attraverso la manutenzione, il design per durata, l'aggiornabilità, ecc.
- 3) *Optimise* (Ottimizzare) comprende l'aumento delle prestazioni/efficienza del prodotto, la rimozione dei rifiuti nella produzione e nella catena di fornitura, lo sfruttamento dei big data, dell'automazione, del rilevamento remoto.
- 4) *Loop* (Ciclo) include la rigenerazione di prodotti o componenti, il riciclo di materiali, l'estrazione di sostanze biochimiche dai rifiuti organici.
- 5) *Virtualize* (Virtualizzare) significa effettuare una dematerializzazione diretta o indiretta.

6) *Exchange* (Scambio) comprende la sostituzione del vecchio con materiali avanzati, l'applicazione di nuove tecnologie (ad es. Stampa 3D) e la scelta di un nuovo prodotto/servizio.

Un altro modello preso in considerazione è il **framework di Potting et al.** [4], il quale è stato utilizzato come importante riferimento in molti lavori e articoli, in quanto ordina le strategie circolari chiave in termini di potere crescente per raggiungere la circolarità (da R9 a R0). Le 10R sono strutturate in tre gruppi: a) Applicazione utile dei materiali; b) Prolungare la durata di vita dei prodotti e delle loro parti; c) Produzione e utilizzo più intelligenti del prodotto [4].

Smarter product use and manufacture	R0	Refuse	Make product redundant by abandoning its function or by offering the same function with a radically different product
	R1	Rethink	Make product use more intensive (e.g. through sharing products or by putting multi-functional products on market).
	R2	Reduce	Increase efficiency in product manufacture or use by consuming fewer natural resources
Extend lifespan of product and its parts	R3	Reuse	Re-use by another consumer of discarded product which is still in good condition and fulfils its original function
	R4	Repair	Repair and maintenance of defective product so it can be used with its original function
	R5	Refurbish	Restore an old product and bring it up to date
	R6	Remanufacture	Use parts of discarded product in a new product with the same function
	R7	Repurpose	Use discarded products or its part in a new product with a different function
Useful application of materials	R8	Recycle	Process materials to obtain the same (high grade) or lower (low grade) quality
	R9	Recovery	Incineration of material with energy recovery

Figura 3 Framework di Potting et al. [4]

1.1. Supply Chain Management

Per una gestione efficiente di risorse e processi lungo tutto il ciclo di vita di un prodotto, è fondamentale porre attenzione a tutta la catena di approvvigionamento. Infatti, le aziende possono fare leva sulla **Supply Chain Management (SCM)** ottimizzando la logistica, creando partnership e strette collaborazioni nella catena di fornitura e introducendo la logistica inversa [5]. La SCM cioè, è stata identificata come una vera e propria leva per l'economia circolare, ovvero come strumento o pratica fondamentale per implementare la CE. Pertanto, anche la catena di approvvigionamento necessita di una transizione da un modello lineare ad uno circolare. La catena del valore o di approvvigionamento lineare è quella in cui i rifiuti generati in ogni fase, vale a dire l'approvvigionamento di materie prime, la produzione, la distribuzione, la vendita al dettaglio e il consumo da parte degli utenti finali, non vengono elaborati per il riutilizzo o la rigenerazione, causando quindi perdite alla catena del valore in termini di risorse. La catena del valore o di approvvigionamento circolare, d'altra parte, è quella in cui i rifiuti generati in ogni fase vengono raccolti e instradati per l'estrazione, il riutilizzo e la rigenerazione, garantendo così la minimizzazione degli sprechi e l'utilizzo ottimale delle risorse [2]. Nella Figura 4 viene rappresentato un esempio di catena di approvvigionamento lineare di un'azienda di fabbricazione della carta presente in un caso di studio analizzato [6].



Figura 4. Un esempio di catena di approvvigionamento lineare [6]

È possibile osservare che dall'estrazione delle materie prime (in questo caso principalmente la bagassa) fino alla vendita ai clienti, viene eseguito un percorso esclusivamente sequenziale esente, quindi, dalla presenza di cicli che potrebbero portare alla rigenerazione o alla condivisione di eventuali rifiuti o scarti e all'ottimizzazione dei diversi processi. Con l'analisi e l'applicazione delle 6R (Reuse, Recycle, Reduce, Recover, Remanufacture, Redesign) è stata implementata nel caso di studio dell'articolo una catena di approvvigionamento circolare (vedi Figura 5). Nella catena di fornitura, una volta che uno dei materiali grezzi utilizzati, la bagassa, viene recuperato come sottoprodotto da una fabbrica di zucchero, essa viene trasportata all'impianto di produzione e qui, assieme alle altre materie prime, viene lavorata per produrre la polpa. La polpa viene fermentata, bollita e sbiancata e segue poi un processo di calandratura; il risultato di quest'ultimo è il prodotto finito (carta da lettere, carta da giornale o cartoni). I prodotti finiti vengono trasportati dal centro di distribuzione e vengono forniti ai rivenditori in base all'ordine ricevuto. Infine, i prodotti vengono rivenduti ai consumatori. Tutti questi processi sono stati analizzati e ripensati in un'ottica circolare e sono state quindi implementate varie strategie per permettere il riutilizzo, il riciclo, la riduzione, il recupero, la rigenerazione e la riprogettazione. Infatti, quando la polpa è fermentata si forma un residuo che può essere usato come ingrediente nei processi di produzione di spirito (attualmente il residuo viene fornito ai produttori di liquori locali). Successivamente, la polpa viene bollita ad alte temperature; la carta straccia raccolta dalla fabbrica di riciclaggio viene utilizzata come materia prima così come nel processo di ebollizione. Viene usato il carbone per bollire la polpa. Il risultato dell'ebollizione è la carta semilavorata. Durante il processo di ebollizione, viene generato eccessivo vapore e questo può essere utilizzato per produrre elettricità, che può essere utilizzata all'interno dell'impianto per il consumo di energia, ma anche per cucinare cibo ai dipendenti. La grande quantità di carbone utilizzata si traduce in un certo volume di ceneri volanti, che possono essere fornite all'industria del cemento. Una volta completata l'ebollizione della polpa, si procede allo sbiancamento e durante questo processo viene utilizzata un'enorme quantità di

acqua, costituita da fanghi e materiale di scarto. Le acque reflue possono essere trattate e utilizzate per l'irrigazione delle fattorie vicine. Eseguito il processo di calandratura, il risultato è il prodotto finito. Durante il processo di ispezione, la carta di scarsa qualità viene scartata: essa può essere classificata in base alla percentuale di danno e rispedita alla produzione per il riciclaggio, eventualmente può essere immessa come materia prima per l'ebollizione.

La trasformazione della catena di approvvigionamento da lineare a circolare non ha portato solo benefici a livello ambientale, ma ha anche contribuito all'efficienza complessiva del sistema produttivo, in quanto, grazie all'implementazione di strategie circolari, è stato possibile ottimizzare i processi lungo tutta la catena soprattutto in termini di recupero di energia e materiali. Laddove non sia possibile reintrodurre le risorse nel ciclo produttivo dell'azienda, queste vengono fornite ad organizzazioni esterne sia come input del processo di riciclo che come input di altri processi produttivi. Quindi, ciò che prima veniva inteso come “rifiuto” o “spreco”, adesso viene recuperato e riutilizzato in modo tale da acquisire un nuovo valore.

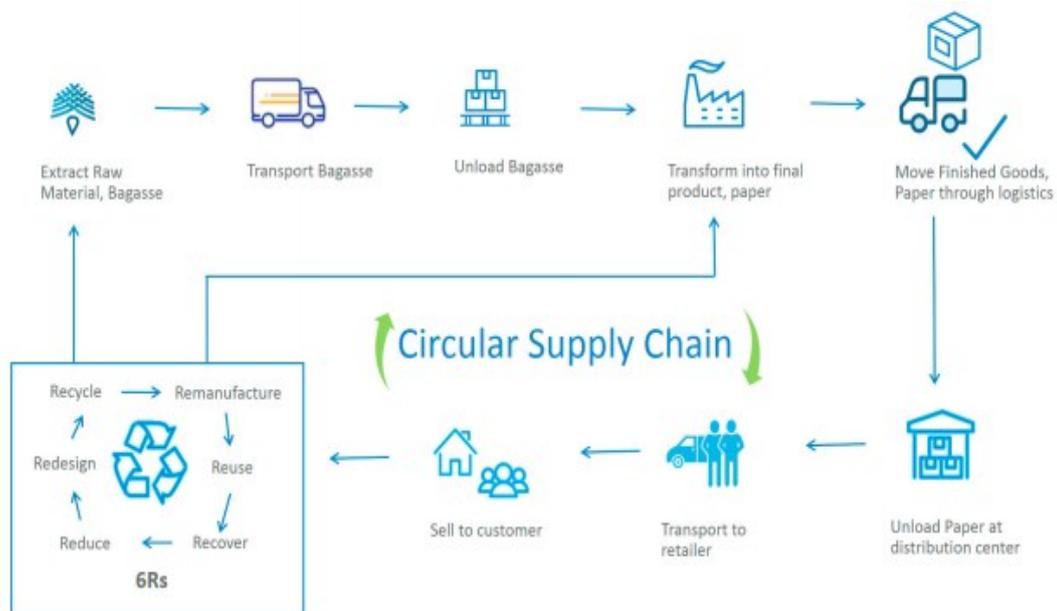


Figura 5. Catena di approvvigionamento circolare [6]

È importante far presente che, oltre a questo caso di studio, sono molti in letteratura i riferimenti ai benefici ambientali, economici e sociali della gestione di una catena di approvvigionamento circolare. In dettaglio, nell'ultimo decennio, la gestione sostenibile della catena di approvvigionamento (Sustainable Supply Chain Management-SSCM) è stata sviluppata per consentire “la gestione di materiali, informazioni e flussi di capitale così come la cooperazione tra aziende lungo la catena di fornitura tenendo conto degli obiettivi di tutte e tre le dimensioni dello sviluppo sostenibile, ovvero economica, ambientale e sociale”. Con la combinazione di SSCM ed economia circolare, è stato sviluppato il concetto di Circular Supply Chain Management (CSCM) [7]. Il concetto di gestione circolare della catena di approvvigionamento è stato costruito anche grazie alla logistica inversa, la quale include i processi di pianificazione, implementazione e controllo dei flussi di materiali, merci e relative informazioni dal punto di consumo al punto originale in modo efficiente ed economico e allo scopo di recuperare valore [5]. Al fine quindi di rendere la catena di approvvigionamento sostenibile, con la CSCM vengono implementate strategie circolari -come il riciclo, il recupero, la rigenerazione, la chiusura di cicli, la condivisione- non solo internamente all'azienda e non solo nei processi produttivi, ma in tutte le operazioni che coinvolgono il prodotto in tutto il suo ciclo di vita e tra tutti gli agenti esterni a contatto con l'azienda (fornitori, rivenditori o altre imprese). Risulta a questo punto necessaria una rete in tutta la catena di approvvigionamento che permetta lo scambio e la condivisione efficiente di informazioni, in maniera tale da permettere l'ottimizzazione e la virtualizzazione di tutti i processi (vedi azioni ReSOLVE). Questo aspetto verrà analizzato in modo più approfondito successivamente con l'aiuto delle nuove tecnologie di digitalizzazione.

È fondamentale comunque sottolineare che l'implementazione di strategie circolari nella catena di approvvigionamento genera notevoli vantaggi anche nella prospettiva economica dell'azienda. Ad esempio, in una revisione letteraria analizzata riguardante la catena di fornitura di EEE (Electrical and Electronic Equipment), risulta che un'ampia quota di articoli ha evidenziato come la CE può

fornire benefici economici alla catena di approvvigionamento, come un risparmio sui costi ottenuto utilizzando materiali secondari o componenti recuperati nella produzione di nuovi prodotti; ricavi generati dalla vendita di materiali riciclati o componenti recuperati; ricavi generati dalla vendita di prodotti usati o rigenerati; ricavi generati dalla vendita di servizi aggiuntivi come riparazione e manutenzione; la possibilità di ottenere margini più elevati, grazie all'offerta di prodotti di alta qualità ed efficienti; il raggiungimento di un vantaggio competitivo grazie a un'immagine più verde e al riconoscimento del marchio; la possibilità di ottimizzare ulteriormente l'utilizzo grazie a informazioni più ricche sulle prestazioni del prodotto [5].

1.2. Sharing Economy e Product-Service System (PSS)

Dall'economia circolare si può risalire ad un importante modello di business: la **Sharing Economy** (SE). Sebbene non esista ancora una definizione canonica di SE, Lessig afferma che rappresenta "il consumo collaborativo fatto dalle attività di condivisione, scambio e affitto di risorse senza possedere i beni". Per Mair e Reischauer, la SE si manifesta quando le persone accedono alle risorse mediate da una piattaforma digitale progettata e gestita da un'azienda. Inoltre, la SE consente di allontanarsi da una cultura in cui i consumatori possiedono le risorse, spostandosi verso una in cui i consumatori condividono invece l'accesso alle risorse. I vantaggi ambientali della SE includono una minore distribuzione complessiva delle risorse, una maggiore durata del prodotto, un utilizzo massimizzato e la redistribuzione delle merci, che consentono la riduzione dei rifiuti e delle emissioni di carbonio. Lo sviluppo di prodotti per la Sharing Economy può essere associato alla preoccupazione per lo sviluppo di prodotti sostenibili, poiché mira ad estendere il ciclo di vita del prodotto condividendo l'utilizzo del prodotto e aumentando la tendenza dei clienti alla dematerializzazione [8]. È immediato notare come nel modello ReSOLVE proposto dalla Ellen MacArthur Foundation è presente, tra le 6 azioni circolari, quella della 'condivisione' (*share*) che si dimostra quindi come uno dei concetti chiave per l'implementazione di un'economia circolare in un sistema industriale.

Uno strumento per stimolare l'adozione di un'economia di condivisione è il **Product-Service System** (PSS) definito come la combinazione integrata di prodotti tangibili e servizi immateriali progettata per soddisfare le esigenze dei clienti. Il PSS considera la "vendita d'uso" piuttosto che la "vendita di prodotti". Il servizio fornito dall'azienda consiste nel dare al consumatore l'accesso a un prodotto, mentre l'azienda ne mantiene la proprietà. Dall'articolo analizzato emerge che la condivisione del prodotto attraverso il PSS consente un input di risorse ridotto [8]. Risulta quindi evidente come l'adozione di un nuovo modello di business come quello della Sharing Economy, accompagnato ad un sistema di servizio del

prodotto, aiuti ad aumentare l'efficienza dell'intero sistema industriale. È inoltre importante evidenziare che ci sono tre tipi di PSS: product-oriented, use-oriented, result-oriented. Nel modello orientato al prodotto, si mira ancora alla vendita di prodotti ma vengono aggiunti alcuni servizi aggiuntivi; nel modello orientato all'uso, la proprietà del prodotto rimane del fornitore il quale lo rende disponibile in varie forme (es. leasing, noleggio, ...); nel modello orientato al risultato, il cliente e il fornitore concordano in linea di principio su un risultato, senza che sia coinvolto un prodotto predeterminato (es. pay-per-use). Secondo Tukker, il PSS orientato ai risultati è la categoria più efficace per passare all'economia circolare [9]. In generale, comunque, i Product-Service Systems garantiscono un processo di aggiunta di valore da parte dei produttori attraverso la fornitura di servizi. Le offerte servite forniscono valore al cliente attraverso una maggiore personalizzazione e una migliore capacità di soddisfare le esigenze specifiche. I fornitori traggono vantaggio dalla creazione di relazioni con i clienti più stabili e a lungo termine, nonché dall'introduzione di nuovi flussi di entrate derivanti dalla fornitura di servizi. Rispetto ai modelli di business tradizionali che ruotano attorno alla vendita di prodotti, i PSS sono considerati meno dispendiosi in termini di risorse, perché permettono di incontrare la stessa domanda con meno prodotti [10]. Mantenendo la proprietà del prodotto, è il produttore che si occupa di manutenzione ed eventuali riparazioni, così da allungare il più possibile la vita del prodotto; inoltre, com'è stato già evidenziato, migliora l'efficienza nella gestione di risorse e processi e fornisce maggior valore al prodotto. Pertanto, i PSS sono importanti leve per l'implementazione di strategie circolari. È stato analizzato inoltre un caso di studio che coinvolge due aziende manifatturiere tradizionali ad alta intensità di risorse naturali metalliche [8]. L'azienda A è una filiale di un'impresa multinazionale di sistemi di illuminazione a LED che inizialmente era incentrata esclusivamente sulla produzione, ma recentemente ha spostato il suo core business verso un approccio di servizio. Da un lato, per i consumatori, è stato aggiunto valore ai prodotti tradizionali integrando sistemi automatizzati, come i sistemi di illuminazione wireless collegati ad applicazioni controllate dal cliente. D'altra parte, una soluzione

prodotto-servizio viene ora offerta anche ai clienti professionali, basata su tecnologie dell'Industria 4.0. È possibile notare che le pratiche di eco-design, come la minimizzazione del consumo di materiale ed energia e la riduzione dell'uso di materiali pericolosi, sono tra le più evidenti. Inoltre, l'azienda ha considerato aspetti come il design per la modularità, lo smontaggio, la durata estesa del prodotto e anche la riparabilità e la manutenzione. L'azienda, inoltre, ha espresso come l'adozione di un approccio di Sharing Economy accompagnato al PSS, la sta guidando nel raggiungimento di obiettivi sostenibili a lungo termine, come le emissioni zero di carbonio. Ad ogni modo, anche nell'azienda B sono stati implementati sistemi di servizio ed è stata sottolineata l'importanza di investimenti in nuove tecnologie. In generale, l'aumento di valore verso il cliente è stato riscontrato soprattutto nell'aggiunta di nuove funzionalità al prodotto.

1.3. Progettazione di prodotti circolari

La *progettazione di prodotti circolari* permette di mantenere prodotti, componenti e materiali alla loro massima utilità e valore per tutto il loro ciclo di vita. Esiste il design per attaccamento e fiducia, design per la durata e l'estensione della vita; design per la facilità di manutenzione e riparazione; design per lo smontaggio, il rimontaggio e riciclaggio [5]. È importante, pertanto, non solo applicare strategie circolari lungo la catena di fornitura e adottare nuovi modelli di business sostenibili, ma anche eventualmente ripensare il prodotto sviluppando nuovi progetti. Ciò facilita l'implementazione della CE lungo tutti i processi aziendali in quanto il prodotto è stato già pensato in un'ottica sostenibile. Si può parlare anche di *eco-design*, ovvero la progettazione di un prodotto realizzata in modo tale da minimizzare gli impatti negativi sull'ambiente in tutto il suo ciclo di vita. In quest'ottica, viene progettato il prodotto non solo ponendo attenzione alle eventuali emissioni nocive durante la produzione e lo smaltimento, ma anche cercando di rendere il processo di estrazione delle materie prime non dannoso per l'ecosistema e cercando di utilizzare il più possibile fonti di energia pulita e rinnovabile. Nel design sostenibile si guarda anche all'imballaggio del prodotto: un packaging sostenibile è caratterizzato dalla minor quantità di materiale possibile e dall'uso di materiali non inquinanti. In sede di progettazione, è opportuno considerare, nel momento in cui il prodotto verrà smaltito, i componenti del prodotto stesso, i quali devono essere reintrodotti, se possibile, nei diversi cicli produttivi del sistema industriale. Le parti recuperate possono essere utilizzate come materie prime per la produzione dello stesso prodotto, ma possono anche essere reinserite in cicli produttivi diversi (es. prodotti di natura diversa rispetto a quello originale). A questo proposito, è utile progettare il prodotto per facilità di smontaggio: un prodotto che non può essere facilmente diviso nelle sue parti, dovrà essere smaltito interamente, con una conseguente difficoltà di riciclaggio e uno spreco di materiale che poteva essere riutilizzato in maniera efficiente. La facilità di rimontaggio, invece, permette di riusare parti del prodotto durante la produzione oppure nel caso in cui componenti del prodotto sono soggette a guasti e vanno quindi sostituite. Ad

ogni modo, per i vari tipi di design, si vedrà successivamente che la produzione additiva giocherà un ruolo fondamentale.

Verrà ora, nel capitolo 2, posta particolare attenzione ad un'altra leva abilitante per l'economia circolare: la **digitalizzazione**.

2. Il ruolo della digitalizzazione

2.1. Metodologia di ricerca

È stata eseguita una revisione sistematica della letteratura attraverso la banca dati *Elsevier ScienceDirect*. Sono state inserite diverse parole chiave, tra cui “circular economy”, “industrial”, “green”, “energy efficiency”, “resource efficiency”, “ICT”, “digitalization”. Le combinazioni tra queste parole chiave che hanno portato maggiori risultati sono state: “circular economy AND industrial AND green AND energy efficiency AND digitalization” e “circular economy AND industrial AND green AND resource efficiency AND digitalization”, alternando a “digitalization” la parola “ICT”. Sono stati estratti un totale di 15 articoli, di cui 10 particolarmente rilevanti.

2.2. Le tecnologie digitali

Il collegamento tra Industria 4.0 ed economia circolare ha chiaramente e costantemente consentito l'esplorazione di vari modi attraverso i quali è possibile raggiungere gli obiettivi di sostenibilità ecologica. L'Industria 4.0 ha accelerato il processo di superamento delle barriere per il raggiungimento della circolarità e la digitalizzazione è sempre più emersa come facilitatore per la progettazione e l'adozione di una produzione più pulita [2]. È possibile quindi mostrare come le tecnologie digitali possono aiutare e ottimizzare notevolmente l'implementazione delle strategie circolari; in alcuni casi queste tecnologie emergono addirittura come fattori fondamentali. Il termine “**tecnologie digitali**” (DT) comprende diverse tendenze tecnologiche correlate come IoT, big data e analisi dei dati. Le DT, note anche come Industria 4.0, stanno trasformando la gestione delle operazioni in campi come l'automazione e la produzione industriale, la gestione della supply chain, l'agilità e produzione snella e gestione della qualità totale. Ad esempio, le DT hanno la capacità di fornire ai sistemi di produzione la capacità di utilizzare i dati storici per migliorare la qualità rilevando comportamenti anomali e adeguando di conseguenza le soglie di prestazione. Inoltre, la migliore condivisione delle informazioni lungo tutta la catena del valore aiuta a controllare e ad effettuare

adeguamenti in tempo reale delle operazioni in base alla domanda variabile [11]. A questo punto, è possibile definire il termine “digitalizzazione”, ovvero l’integrazione delle tecnologie digitali nella vita di tutti i giorni. Quindi, nel contesto aziendale, la digitalizzazione industriale consiste nell’applicazione delle DT a tutti i processi produttivi, organizzativi, gestionali che l’organizzazione deve monitorare e ottimizzare. Grazie alla digitalizzazione, è stato coniato il concetto di “**Smart factory**”, ovvero singole aziende o gruppi aziendali che utilizzano l’ICT (Information and communication technology) per lo sviluppo del prodotto, la produzione, la logistica e il coordinamento dell’interfaccia con i clienti al fine di rispondere in modo più flessibile alle richieste in entrata. Una fabbrica intelligente domina la complessità, è meno dirompente e consente una produzione più efficiente. La comunicazione tra persone, macchine e risorse è evidente e paragonabile a un social network [12].

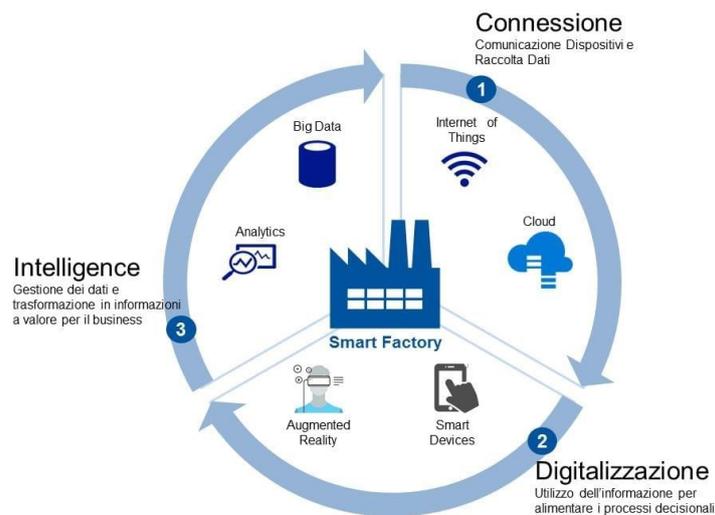


Figura 6, Smart factory <<https://www.minifaber.it/blog/la-smart-factory-o-industry-4-0>>

In qualità di abilitatore CE, la digitalizzazione facilita l’accesso ai dati che supportano la gestione del prodotto durante l’intero ciclo di vita, l’estensione e l’ottimizzazione della durata, la fornitura di pezzi di ricambio, una migliore comprensione del comportamento degli utenti, e così via [5]. Risulta critico il

contributo delle tecnologie digitali per il monitoraggio del flusso di prodotti, componenti e materiali per rendere poi disponibili i dati al fine di avere una migliore gestione delle risorse e dei processi decisionali. Inoltre, l'analisi dei dati può servire come strumento per prevedere la salute e l'usura del prodotto, ridurre i tempi di fermo della produzione, programmare la manutenzione, ordinare pezzi di ricambio e ottimizzare il consumo di energia [11]. In particolare, anche la manutenzione può essere definita come un importante fattore abilitante per l'economia circolare. Se si ragiona in un'ottica sostenibile, il ruolo della manutenzione riguarda, tra le tante sue possibilità di applicazione, anche l'opportunità di estendere il ciclo di vita di un prodotto e di monitorare costantemente i processi produttivi per una raccolta dati, la quale può essere utilizzata per la valutazione dei flussi e per il miglioramento degli aspetti sostenibili. Anche l'aspetto di manutenzione, tuttavia, necessita dell'intervento della digitalizzazione al fine di renderlo il più possibile efficace ed efficiente. In generale, comunque, anche per la gestione della catena di approvvigionamento, per l'adozione della Sharing Economy e per altre strategie che abilitano l'economia circolare, risulta essenziale l'utilizzo delle tecnologie digitali. Le tecnologie digitali più diffuse e analizzate maggiormente come contributi per l'economia circolare sono l'IoT e i Big Data.

2.3. Internet of Things

L'**Internet of Things** (IoT) si riferisce alla fusione di varie macchine e dispositivi intelligenti che usano sensori e dispositivi di attuazione per l'acquisizione e la trasmissione in tempo reale di dati [2]. Ogni oggetto fisico deve disporre di un indirizzo IP per la connettività alla rete e ad altri dispositivi anch'essi abilitati all'accesso ad Internet. Quando ad un oggetto fisico viene incorporata la tecnologia IoT, questo viene rappresentato digitalmente: può essere, cioè, monitorato e controllato da ogni luogo e ciò facilita di gran lunga la gestione di prodotti o processi collegati. L'IoT, pertanto, permette di ottenere l'esternalizzazione del controllo, ovvero una forma di ottimizzazione di un processo che ha luogo a distanza [1]. I dispositivi connessi con tale tecnologia sono in grado di rilevare dati di ogni tipologia. All'interno del sistema industriale, possono dare informazioni sullo stato e il tempo di produzione, sull'utilizzo delle risorse e quindi anche sul consumo energetico: si ha quindi un miglior monitoraggio di tutti i processi, il quale consente poi di effettuare valutazioni ed eventuali ottimizzazioni. Inoltre, la raccolta di dati permette di migliorare l'aspetto della manutenzione dei macchinari e degli impianti industriali utilizzati: con il controllo in tempo reale è possibile non solo rilevare immediatamente eventuali guasti, ma anche prevederli prima che essi si verificano. È possibile, nel momento in cui i dati raccolti segnalano delle anomalie, agire prontamente sul problema rilevato, evitando così rotture spesso molto costose. La manutenzione può anche riguardare, com'è stato già introdotto, la valutazione degli aspetti sostenibili lungo tutta la catena del valore. In quest'ottica, vengono quindi raccolti dati riguardanti le prestazioni di sostenibilità e circolarità, e questo diventa fondamentale per implementare l'economia circolare in maniera più efficiente ed efficace. Senza la digitalizzazione, infatti, sarebbe difficile raccogliere dati su tutti i processi che dobbiamo controllare e identificare prontamente dove e qual è il problema (ad es. qual è la fonte di un eventuale spreco energetico nel sistema industriale). La tecnologia IoT può essere estesa a tutta la catena di approvvigionamento, e quindi non esclusivamente nell'ambito produttivo. Il rilevamento dei dati può essere utile, come si vedrà successivamente, per la

previsione della domanda e dell'offerta, per un efficiente tracciamento dei trasporti, per l'ottimizzazione dello smaltimento dei rifiuti e anche per il cliente finale. Difatti, se vengono progettati prodotti IoT, è possibile monitorare l'utilizzo da parte del consumatore. Ciò permette di raccogliere dati preziosi per un eventuale miglioramento futuro del prodotto, ma anche per tracciarne le prestazioni sostenibili. Risulta chiaro, pertanto, che l'implementazione della tecnologia IoT è fondamentale per raccogliere l'ingente quantità di dati che processi e prodotti possono fornire. È necessaria, tuttavia, un'altra tecnologia che permetta di analizzare e porre nel giusto contesto tutte le informazioni che si hanno a disposizione, così da utilizzarle nel modo corretto. Viene presentata nel paragrafo successivo questa tecnologia.

2.4. Big Data and Analytics

I big data sono un set di dati ad alto volume, alta velocità e alta varietà che richiedono tecniche avanzate di elaborazione, archiviazione, distribuzione e gestione per trasformare i dati in informazioni [11]. Questa tecnologia è strettamente legata ai Relational Database Management System (DBMS), cioè sistemi di memorizzazione basati sul modello relazionale, in cui i dati sono organizzati in tabelle. I DBMS integrano la ricchezza di informazioni prodotte da sistemi di raccolta di dati eterogenei e consentono, quindi, un'organizzazione efficiente dei dati [13]. L'analisi dei big data risulta fondamentale per gestire tutti i dati raccolti tramite sensori: il dato in sé, se non viene opportunamente studiato, non ci fornisce conoscenza e rischia quindi di diventare obsoleto. Se, invece, i dati vengono organizzati, divisi e messi insieme nel giusto contesto, essi diventano informazione. Ed è proprio l'insieme delle informazioni relative ad un determinato processo che si sta analizzando, che ci offre gli strumenti adatti per effettuare valutazioni.

La letteratura prende in considerazione anche altre tecnologie il cui contributo sostenibile però è stato ancora poco approfondito, come l'*additive manufacturing* (che verrà successivamente analizzata) e il *cloud manufacturing*. Quest'ultima

tecnologia consiste in una piattaforma, ovvero un sistema cyber-fisico integrato che fornisce servizi digitali e fisici su richiesta dove tutti i dati possono essere conservati in modo integrato e condiviso [5]. Il cloud manufacturing nelle fabbriche intelligenti consente il networking e la condivisione di tutte le informazioni attraverso i confini dell'organizzazione. I dati raccolti dai sistemi intelligenti possono essere condivisi tra varie organizzazioni e strutture logistiche, migliorando così le prestazioni del sistema, riducendo i costi e gli sprechi e migliorando la flessibilità e l'agilità dei sistemi [2].

Complessivamente, l'apporto delle tecnologie digitali all'economia circolare è stato ancora poco esplorato. Infatti, in un'analisi letteraria risulta che su 115 articoli, solo 19 (17%) indagano sul ruolo della digitalizzazione per favorire la transizione verso la CE, e la IoT è stata la tecnologia più approfondita [5]. In questo capitolo si cercherà di riassumere ed analizzare tutte le applicazioni che hanno portato un contributo reale e significativo all'implementazione della CE, con un tentativo di evidenziare quanti benefici un sistema industriale può ottenere grazie all'Industria 4.0.

2.5. Applicazione delle tecnologie digitali

È già emersa la possibilità dell'Industria 4.0 di migliorare l'implementazione delle strategie circolari in un sistema industriale. Si può ora analizzare più nel dettaglio come ciò accade e quali sono le principali applicazioni delle tecnologie digitali nell'ottica sostenibile. In primo luogo, sapendo che la gestione della catena di approvvigionamento è fondamentale per la CE, è possibile capire in che modo l'Industria 4.0 aiuta a rendere tale gestione più efficiente. Riprendendo il caso di studio dell'azienda produttrice di carta, emergono alcune applicazioni [6]. La fornitura di bagassa dipende dalla fornitura di canna da zucchero e la sua offerta varia in base alla domanda stagionale e, di conseguenza, l'offerta di bagassa varia. L'analisi dei Big Data può aiutare lo stakeholder a prendere le decisioni giuste. Infatti, la raccolta e l'analisi di grandi quantità di dati per quanto riguarda il modo con cui può variare la domanda, indirizza l'azienda nell'acquisto delle materie prime e nella pianificazione della produzione, ottimizzando l'utilizzo di risorse ed evitando, per quanto possibile, gli sprechi. Successivamente, nel processo di bollitura è importante conoscere la qualità del carbone, in quanto una bassa qualità può portare ad una combustione impropria e più ceneri volanti. Inoltre, la durata della fermentazione varia in base al contenuto di umidità nella bagassa. L'IoT può essere utilizzato per monitorare questi aspetti al fine di migliorare questi processi e ridurre il tempo complessivo di produzione. Attraverso l'IoT può essere garantita anche la sicurezza della produzione mediante il monitoraggio da remoto degli indicatori chiave come variazioni di temperatura o forti vibrazioni. Al di fuori dell'impianto di produzione, i dispositivi IoT possono essere integrati presso il cliente per avvisare in anticipo della carenza di prodotti e possono essere utilizzati per individuare l'esatta posizione di stoccaggio del materiale nel magazzino e monitorare le condizioni del materiale da qualsiasi punto del magazzino. Infine, con l'aiuto dell'IoT e del GPS, i veicoli possono essere tracciati in tempo reale e il responsabile della logistica può controllare lo stato della spedizione da remoto.

In un altro caso di studio, vengono analizzate delle aziende che fanno parte di una filiera di rifiuti di legno [7]. Per aumentare l'efficienza nella gestione dei rifiuti, la soluzione proposta fornisce un ecosistema online per negoziazioni automatizzate nelle diverse fasi del ciclo e un'applicazione blockchain per la visibilità della catena di approvvigionamento tra i produttori di rifiuti di legno, la gestione dei rifiuti e le aziende di bioenergia. La prima soluzione, ovvero il meccanismo di processo di offerta online, consente il matchmaking automatico di richiedenti e fornitori e l'invio e la valutazione delle offerte in tempo reale. La seconda, un'applicazione Blockchain, è progettata per supportare il tracciamento delle risorse in questa catena di approvvigionamento al fine di fornire piena visibilità, fiducia e trasparenza e digitalizzazione delle procedure. Nell'articolo analizzato vengono enfatizzate le azioni del modello ReSOLVE e come queste vengono rispettate attraverso l'adozione di tecnologie dell'Industria 4.0. In particolare, il principio di *condivisione* si rispecchia nella condivisione delle informazioni tra gli utenti della catena di approvvigionamento; il principio di *ottimizzazione* è garantito mediante le due soluzioni proposte (in quanto viene migliorata in efficienza la gestione dei diversi impianti) così come quello di *virtualizzazione*. In questo caso di studio si evince l'importanza delle tecnologie specialmente nel tracciamento dei dati lungo tutta la catena e nella condivisione delle informazioni. Infatti, risulta fondamentale in una catena di approvvigionamento raccogliere ogni tipo di dato e trasformare l'insieme di dati di un certo tipo in informazione, per poi renderla disponibile a tutti in modo che sia utilizzata per il miglioramento dei diversi processi. Per far ciò, tuttavia, è necessario che sia possibile innanzitutto ricavare questi dati: la tracciabilità della catena di fornitura ci permette di avere la disponibilità di informazioni relative alla produzione e al consumo effettivi di ogni parte/prodotto realizzato lungo la catena di fornitura, e anche in riferimento alla quantità di rifiuti generati in ogni fase [2].

L'applicazione delle tecnologie digitali è in grado di ovviare anche al problema della sovrapproduzione, del consumo eccessivo o dello smaltimento anticipato dei prodotti, attraverso la messa a disposizione di una piattaforma online di scambio di

prodotti usati o in eccedenza. La piattaforma è utile anche nella gestione del PSS (Product-Service System) per monitorare in maniera efficiente l'utilizzo in comune dei prodotti offerti come servizi. L'utilizzo di piattaforme può anche aiutare la gestione delle materie prime nella catena di approvvigionamento, così da permettere uno scambio di risorse più facile e veloce tra le aziende coinvolte nella fornitura. Muovendoci tra i diversi settori industriali, l'implementazione dell'Industria 4.0 si rivela molto efficiente anche nel settore elettrico ed elettronico: è possibile progettare prodotti intelligenti, in grado non solo di migliorare l'esperienza dell'utente, ma anche di aumentare l'efficienza energetica monitorando l'utilizzo del prodotto. La progettazione di prodotti intelligenti risulta essenziale anche nella produzione di macchinari pesanti. Le tecnologie digitali, infatti, permettono di gestire al meglio la manutenzione dei macchinari attraverso il costante monitoraggio dei processi e offrono anche la possibilità di gestire le performance di produttività e sostenibilità delle operazioni supportate dai macchinari stessi [14]. Pertanto, risulta evidente che la digitalizzazione necessita di essere applicata anche nella progettazione del prodotto. È stato già evidenziato come la *progettazione di prodotti circolari* sia un importante abilitatore per la CE. È possibile trovare una congiunzione tra questa leva e il concetto di digitalizzazione: la progettazione di prodotti intelligenti. Un prodotto di questo tipo può aiutare con il tracciamento e il monitoraggio dei dati lungo tutta la catena di approvvigionamento e con l'adozione della Sharing Economy. È possibile non solo ideare e ripensare prodotti al fine di renderli intelligenti e adatti, quindi, a un'efficiente raccolta di dati, ma anche acquistare per il proprio sistema industriale macchinari e impianti dotati di sensori per ottimizzare la gestione della produzione e della manutenzione. Necessarie, in questo contesto, due tecnologie principali. La prima è la "Radio Frequency Identification" (RFID), la quale utilizza i campi elettromagnetici per identificare e tracciare automaticamente i tag attaccati all'oggetto e, nell'economia circolare, aiuta a tracciare i flussi di materiali per consentire il recupero del valore attraverso strategie come il riutilizzo, la riparazione e la rigenerazione; inoltre, i sistemi RFID in rete aiutano a collegare i

prodotti contrassegnati con un chip RFID ad una rete di informazioni, fornendo informazioni complete sul ciclo di vita del prodotto a tutti i partner in rete. La seconda tecnologia è l'IoT, dove sensori e attuatori sono connessi in modo da monitorare o gestire lo stato di salute e le azioni di macchine e da raccogliere informazioni generate dai sensori per connettere le parte interessate lungo la catena del valore [13]. In secondo luogo, sono poi anche fondamentali tecnologie come i database, in grado di raccogliere un'ingente quantità di dati, e l'analisi dei Big Data, che permette la contestualizzazione delle informazioni raccolte.

Ad ogni modo, nell'articolo di riferimento [14], si evince come le tecnologie digitali siano in grado di supportare l'implementazione della Sharing Economy la quale, com'è stato già sottolineato nel capitolo precedente, risulta una leva fondamentale per l'economia circolare. Il concetto di *condivisione* viene rispettato dall'applicazione della digitalizzazione non solo perché quest'ultima permette un costante accesso alle informazioni in tutta la catena di approvvigionamento. L'Industria 4.0, infatti, permette di adottare il Product-Service System in maniera più agile ed efficiente. Un primo focus viene effettuato su un caso di studio di una micro-azienda ICT nel Regno Unito, la quale ad oggi offre una gamma di servizi sia alle aziende che al pubblico (es. installazione di servizi informatici, accesso a server sicuri, riparazione, manutenzione, ...) [3]. È stato utilizzato il modello ReSOLVE al fine di associare ad ogni azione delle possibili soluzioni CE e vengono qui elencate tutte le soluzioni inerenti all'opportunità di implementazione dell'Industria 4.0. L'*ottimizzazione* può essere raggiunta attraverso il monitoraggio e analisi dei dati tra i clienti per fornire un supporto migliore al fine di migliorare l'efficienza energetica. Questa soluzione può ridurre la domanda di energia, riducendo così il consumo di risorse naturali e gli impatti ambientali associati alla generazione di elettricità. Per l'azione di *virtualizzazione* viene invece proposto un software/hardware di webcam remota per risolvere i problemi da remoto e ridurre i viaggi del veicolo. Le due soluzioni individuate sono risultate quelle con il più alto potenziale di business, superando anche quelle soluzioni circolari che non riguardavano l'implementazione di tecnologie digitali.

Nel capitolo precedente, per presentare un esempio esplicativo di implementazione della Sharing Economy, è stato preso come riferimento un caso di studio di due aziende manifatturiere tradizionali (azienda A e B) [8]. Anche in questo studio, l'ottimizzazione viene garantita grazie al monitoraggio e l'analisi di dati tra i clienti [3]. Infatti, nell'azienda A, per i consumatori, è stato aggiunto valore ai prodotti tradizionali integrando sistemi di illuminazione wireless collegati ad applicazioni controllate dal cliente; ai clienti professionali, vengono introdotti sensori incorporati e IoT, consentendo la raccolta dei dati per il controllo intelligente dell'illuminazione. L'azienda A, per effettuare il passaggio verso la Sharing Economy, ha avuto necessità di ripensare il prodotto per aggiungere valore e rendersi più competitiva sul mercato. Per rendere l'illuminazione un vero e proprio servizio, tuttavia, l'azienda ha espresso il bisogno di includere nuove tecnologie e software. Difatti, attraverso l'implementazione della digitalizzazione, il cliente gode di funzionalità aggiuntive e gli vengono pertanto offerti servizi incorporati nel prodotto. Oltretutto tali servizi permettono un miglioramento sostenibile: il controllo intelligente dell'illuminazione può ridurre notevolmente il consumo di energia, e il monitoraggio del flusso di dati proveniente dai sensori inglobati nel prodotto è capace di fornire informazioni importanti sull'utilizzo del prodotto e su eventuali miglioramenti futuri. Anche nell'azienda B, per ottenere una svolta decisiva verso la Sharing Economy, ha avuto la necessità di implementare la digitalizzazione. I clienti di questa azienda avevano già espresso la volontà di non acquistare più i prodotti in modo permanente, ma di utilizzarli come servizio. Al fine di monitorare l'uso del prodotto a distanza e di migliorare l'esperienza del cliente, anche l'azienda B ha implementato sensori e dispositivi IoT nei suoi prodotti.

2.6.Additive Manufacturing

Fino ad ora, sono state esplorate tecnologie come l'IoT e l'analisi dei Big Data ed è stata sottolineata l'importanza che la loro applicazione ha sul monitoraggio dei prodotti, dei macchinari e di tutta la catena di approvvigionamento e sull'analisi e la condivisione di informazioni al fine di raggiungere ottimizzazione ed efficienza. È interessante, tuttavia, definire e analizzare un'altra tecnologia emergente nel campo industriale: l'**Additive Manufacturing** (produzione additiva, AM). Questa tecnologia ha come punto di partenza la realizzazione di un modello 3D dell'oggetto da produrre, che viene poi convertito, tramite software appositi, in un file in formato STL. Successivamente, un software dedicato consentirà di produrre il file macchina necessario per la produzione. La caratteristica principale della stampa 3D è proprio la produzione del pezzo utilizzando materiali diversi che vengono depositati strato su strato, per arrivare a comporre l'oggetto finito. Nell'AM, quindi, i prodotti sono fabbricati attraverso un processo digitale e additivo in contrasto con i metodi di produzione convenzionali: la natura di questi prodotti offre l'opportunità di risparmiare risorse. La produzione additiva è in grado di supportare l'economia circolare per diversi motivi. Innanzitutto, grazie all'AM è possibile progettare prodotti per l'attaccamento, al fine di migliorare il legame con il cliente ed estendere la vita del prodotto stesso. Infatti, tale tecnologia permette di creare prodotti unici e personalizzabili, e questo è un aspetto importante se si considera come i prodotti vengono scartati anche per motivi psicologici. L'additive manufacturing, inoltre, è capace di implementare un'alta *riparabilità* dei prodotti, in quanto le parti rotte possono essere facilmente imitate e sostituite e, a tal proposito, il prodotto può essere progettato per facilità di riparazione, manutenzione, smontaggio e rimontaggio [15]. Ciò ci consente di avere minori sprechi e, soprattutto, di estendere la vita del prodotto il quale, a seguito di eventuali guasti, può essere facilmente riparato. Inoltre, se il prodotto viene progettato per facilità di smontaggio e rimontaggio, i diversi componenti possono essere utilizzati per la produzione di un altro oggetto, anche con diverse funzionalità. Può accadere, infatti, che ci sia un ripensamento complessivo del prodotto oppure che si voglia

semplicemente scartarlo: anziché trasformare i vari pezzi del prodotto in rifiuto, è possibile reintrodurli nel ciclo produttivo. La stampa 3D, pertanto, ci permette di avere una progettazione e una produzione più versatili e orientati verso l'economia circolare. Se la produzione tradizionale consiste nel prelevare le risorse e "consumarle" per ottenere il prodotto finale, l'AM fa sì che i materiali necessari vengano aggiunti e modellati secondo geometrie ben precise, così da ridurre notevolmente gli sprechi e, di conseguenza, i costi di produzione. Un'altra peculiarità dell'AM è che il suo file digitale, mediante cui viene creato il prodotto finale, può essere inviato tra vari stabilimenti e impianti per essere prodotto localmente e ciò è vista come un'alternativa potenzialmente sostenibile per la produzione di massa centralizzata [15]. Purtroppo, attualmente, si sa poco sulla riciclabilità delle parti e dei prodotti stampati in 3D, a causa della piccola scala su cui viene applicata l'AM. Inoltre, la disponibilità di materiali AM riciclati è limitata; esistono alcuni filamenti riciclati per la stampa FDM (Modellazione a deposizione fusa) come PET e ABS, ma nella stampa SLS (Sinterizzazione laser selettiva), ad esempio, la riciclabilità è riferita solo al riutilizzo della polvere residua dopo la stampa. Un'altra opzione sostenibile è quella di scegliere materiali a base biologica: il filamento PLA è popolare per la stampa FDM, ma è limitato in termini di durata e funzionalità. Generalmente, è chiaro che l'Additive manufacturing porta numerosi benefici per la produzione e, in particolare, crea importanti opportunità per l'implementazione dell'economia circolare. L'AM consente un notevole risparmio di materiale e risorse, permette di creare geometrie complesse, facilita i diversi tipi di progettazione circolare di prodotti. Tuttavia, per supportare pienamente la progettazione per un'economia circolare con l'AM, bisogna superare una serie di sfide. È necessario sviluppare materiali che consentano un uso durevole, nonché un riutilizzo di alto valore. Inoltre, parti monolitiche strutturalmente complesse che supportano la progettazione per la riciclabilità possono ostacolare il recupero di prodotti di alto valore. È quindi essenziale che le opportunità sostenibili offerte dall'AM supportino più cicli di vita del prodotto quando si progetta per un'economia circolare [15].

3. ANALISI LETTERARIA

Nella revisione effettuata della letteratura c'è stato un particolare focus sul ruolo della digitalizzazione nei sistemi industriali nell'implementazione dell'Economia Circolare. Sono state individuate diverse parole chiave caratterizzanti il contenuto delle ricerche all'interno degli articoli e, tra queste, una delle più importanti è sicuramente il termine 'digitalizzazione', il quale viene richiamato anche con i termini 'Digital Technologies' e 'Industry 4.0'. Questo termine viene enfatizzato nella maggior parte degli articoli, nei quali ne viene data una breve definizione e ne vengono descritte le diverse possibilità di applicazione. I diversi articoli poi, si concentrano in svariati ambiti di implementazione delle tecnologie digitali, sempre comunque nel contesto aziendale. Sono state presentate nel primo capitolo varie leve con cui l'economia circolare può essere efficientemente implementata, ovvero la gestione della supply chain, la Sharing Economy con particolare enfasi sul PSS (Product-Service System) e la progettazione di prodotti circolari. È stato poi spiegato, nel secondo capitolo, come la digitalizzazione è in grado di facilitare l'implementazione di queste leve. Tra tutti gli articoli analizzati, solo 4 prestano particolare attenzione verso il legame tra Supply Chain Management e Industria 4.0 e solamente in 2 articoli vi sono dei reali casi di studio. Sono 5 gli articoli presi maggiormente in considerazione che prestano attenzione al PSS (trovato anche con il termine 'Servitised Business Models, SBM') come abilitatore per la CE, ma di questi sono 3 quelli che cercano di stabilire una congiunzione tra PSS e tecnologie digitali con casi di studio e soluzioni proposte. Infine, per quanto riguarda la progettazione circolare dei prodotti, 4 sono gli articoli che enfatizzano

maggiormente questa strategia anche insieme all'implementazione della digitalizzazione, ma nessuno di essi presenta esempi di reali applicazioni.

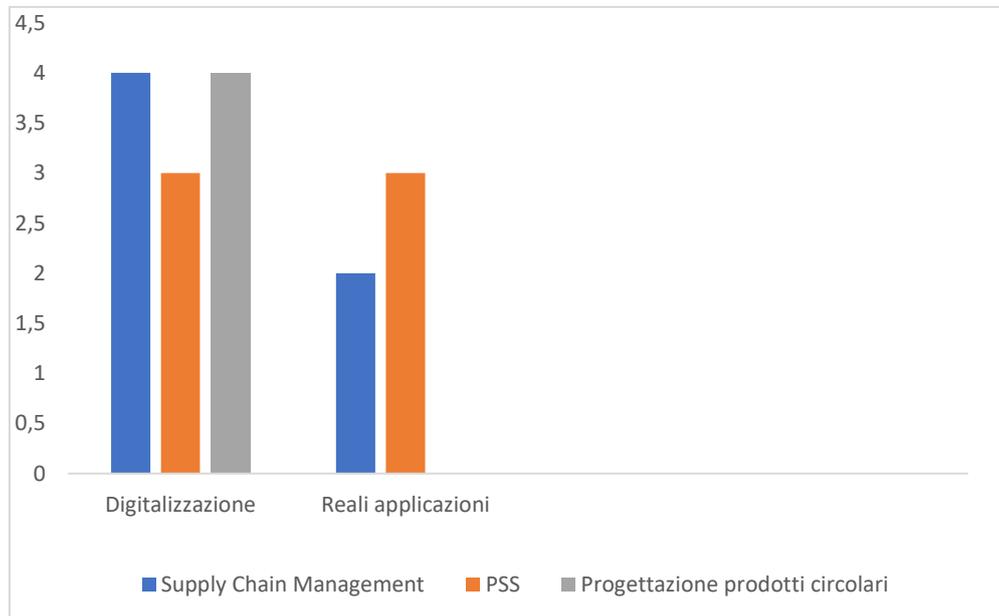


Grafico 1. L'istogramma più a sinistra indica il numero di articoli che evidenziano il legame tra abilitatore e digitalizzazione; l'istogramma alla destra indica per ogni abilitatore il numero di casi studio individuati in letteratura.

Risulta pertanto evidente che la letteratura analizzata è carente sia nello stabilire un legame tra l'Industria 4.0 e le diverse leve che abilitano la CE, sia nella presentazione di reali applicazioni delle soluzioni teoriche proposte.

Si procede ora ad analizzare quali sono le tecnologie maggiormente citate ed evidenziate in letteratura. L'IoT e i Big Data sono le due tecnologie più presenti: sono ben 8 gli articoli che prestano particolare attenzione alla loro importanza nel mondo dell'Industria 4.0 e dell'Economia Circolare. Sono poi 2 gli articoli che citano il Cloud Manufacturing e la Blockchain, mentre sono 3 quelli che prendono in considerazione l'Additive Manufacturing (un articolo è completamente dedicato all'importanza di questa tecnologia).

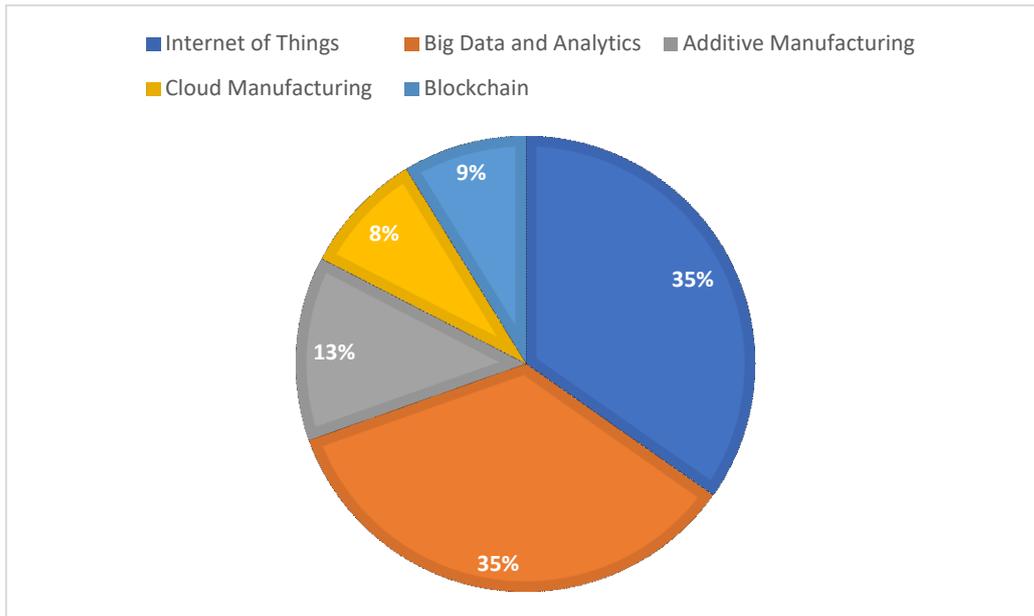


Grafico 2. Tecnologie più analizzate nella letteratura studiata.

È stato possibile esplorare, inoltre, i legami diretti tra una determinata tecnologia e gli abilitatori CE. In particolare, l'IoT e i Big Data sono ben collegati con tutte le strategie presentate: la raccolta e l'analisi di dati consente il tracciamento e un controllo efficiente della catena di approvvigionamento, la progettazione di prodotti intelligenti e il miglioramento dei PSS. L'Additive Manufacturing, invece, trova un legame diretto solo con la progettazione di prodotti circolari. Le tecnologie Cloud e Blockchain, infine, sono presentate nell'ambito della condivisione delle informazioni e della gestione dei processi lungo la supply chain.

Supply Chain Management	Internet of Things, Big Data and Analytics, Cloud Manufacturing, Blockchain.
Product-Service System	Internet of Things, Big Data and Analytics.
Progettazione di prodotti circolari	Internet of Things, Big Data and Analytics, Additive Manufacturing.

Tabella 1. Vengono indicate le tecnologie digitali individuate in letteratura per una data strategia circolare.

In conclusione, la Supply Chain Management risulta essere la strategia più esplorata in ambito digitale: negli articoli si sottolinea più volte l'importanza del tracciamento e dell'analisi dei processi di tutta la catena e della condivisione di informazioni mediante le diverse tecnologie. Il Product-Service System è anch'esso analizzato nell'ottica della condivisione di dati ed è, inoltre, strettamente legato alla progettazione intelligente di prodotti. La progettazione circolare di prodotti, infine, è l'unica strategia che viene considerata assieme alla produzione additiva; tuttavia, com'è stato già evidenziato, è un abilitatore CE poco esplorato in ambito pratico.

3.1. Limitazioni

La letteratura analizzata fornisce diversi spunti sull'implementazione delle tecnologie digitali e il loro contributo verso l'Economia Circolare. Viene molto spesso evidenziata l'importanza dell'IoT e dei Big Data per la raccolta e l'analisi di dati, e come ciò può migliorare l'efficienza e l'efficacia di un sistema industriale circolare. Diversi articoli cercano di fornire definizioni sulle varie tecnologie disponibili assieme alle loro possibili implementazioni. Ci sono alcuni casi di studio significativi e interessanti, che mostrano realmente come sia possibile, attraverso la digitalizzazione, implementare al meglio la circolarità. Tuttavia, in generale, la letteratura è carente di reali applicazioni e si concentra maggiormente sul definire concetti ed esporre diversi modelli di business. Risulta sicuramente importante fornire un corretto contesto e presentare strategie e soluzioni possibili, ma è anche fondamentale verificare con dati empirici i risultati delle applicazioni. È necessario, pertanto, per le ricerche future, presentare un numero maggiore di casi di studio in cui vengono evidenziati i benefici economici, ambientali e sociali della digitalizzazione. Nello specifico, la letteratura risulta povera di applicazioni sulla progettazione circolare di prodotti. È stato mostrato nei capitoli precedenti quanto sia importante non solo gestire al meglio tutti i processi, ma anche eventualmente ripensare il prodotto in ottica circolare. La digitalizzazione consente la progettazione di prodotti intelligenti, ma anche la produzione additiva. L'invito per le ricerche future non è solo quello di presentare casi pratici sull'utilizzo e la

produzione di dispositivi smart, ma anche quello di approfondire maggiormente il ruolo dell'Additive Manufacturing. Difatti, quest'ultima tecnologia risulta molto utile per i diversi tipi di design di prodotto (facilità di riparazione, di manutenzione, di smontaggio e rimontaggio, ...), i quali offrono l'opportunità di implementare in modo efficiente l'economia circolare. È necessario, pertanto, esplorare più nello specifico il legame tra la produzione additiva e la circolarità dei prodotti. Inoltre, ulteriori ricerche sull'Additive Manufacturing vanno effettuate sulla riciclabilità dei materiali utilizzati in questa tecnologia, così da limitare anche in quest'ottica gli impatti ambientali. Infine, è necessario ragionare maggiormente in una prospettiva olistica. Le diverse tecnologie e gli ambiti di applicazione sono considerati molto spesso separati. Bisognerebbe analizzare un sistema industriale nel suo complesso e da questo punto di vista presentare uno o diversi modelli di implementazione digitale con lo scopo di garantire la circolarità.

In conclusione, gli inviti per le ricerche future sono:

- Presentare un numero maggiore di casi di studio e applicazioni reali delle tecnologie digitali nell'implementazione della CE.
- Stabilire legami più solidi tra le diverse tecnologie e le leve CE, indagando più approfonditamente sui ruoli che le DTs possono svolgere. In quest'ottica, è opportuno anche possedere una visione olistica.
- Effettuare maggiori ricerche sulla progettazione di prodotti circolari, insieme al ruolo dell'Additive Manufacturing. Quest'ultima tecnologia, infatti, ha bisogno di essere analizzata e inserita nel contesto dell'Economia Circolare.

CONCLUSIONI

Lo scopo principale di questo elaborato era quello di fornire diverse strategie per l'Economia Circolare, in particolare utilizzando le tecnologie digitali ad oggi più diffuse. Sono state innanzitutto analizzate le principali leve abilitanti della CE ed è stato evidenziato come l'implementazione di queste consente di ottenere un sistema industriale circolare e pulito. Viene anche mostrato come le strategie circolari consentono di ottimizzare al meglio tutti i processi che un sistema industriale deve gestire e quindi in che modo queste strategie ne migliorano l'efficienza complessiva. Si mostra poi come la digitalizzazione sia importante per garantire un'implementazione delle strategie circolari in maniera più efficace, attraverso tecnologie come l'Internet of Things e l'analisi dei Big Data. Le tecnologie digitali permettono di raccogliere una grande quantità di dati riguardanti la produzione, la catena di approvvigionamento, la condivisione dei prodotti e l'esperienza dell'utente finale. Questi dati permettono un costante monitoraggio di tutti i processi, in modo tale da ottimizzare al meglio il sistema industriale e prendere le giuste decisioni. La digitalizzazione consente inoltre la progettazione di prodotti e macchinari intelligenti, i quali offrono la possibilità di esternalizzare il controllo e quindi di attuare un'ottimizzazione a distanza; fanno sì, oltretutto, di migliorare l'esperienza dell'utente finale e di implementare ottimamente le strategie circolari. La progettazione di prodotti circolari viene anche migliorata attraverso l'Additive Manufacturing, tecnologia digitale che, tuttavia, non risulta essere analizzata come dovrebbe. In generale, il contributo delle tecnologie digitali per l'implementazione dell'Economia Circolare riguarda tutte le principali strategie individuate in letteratura (Supply Chain Management, PSS, progettazione di prodotti circolari) e appare chiaro come la digitalizzazione consenta di ottenere benefici ambientali, economici e sociali. Non è stato purtroppo possibile, tuttavia, esprimere al meglio il potenziale che le tecnologie digitali e le diverse strategie hanno sullo sviluppo di un sistema industriale circolare. La letteratura, infatti, non offre ancora numerose documentazioni di applicazioni reali e, inoltre,

alcune tecnologie ad alto potenziale come l'Additive Manufacturing non sono state esplorate in maniera sufficiente. C'è quindi l'invito per le ricerche future di approfondire maggiormente il legame tra digitalizzazione ed economia circolare, in quanto risulta chiaro come questo legame consenta di progettare un sistema industriale efficiente e sostenibile.

Bibliografia

- [1] C. V. Townsend JH, «Digital Acceleration of Sustainability Transition: The Paradox of Push Impacts,» *Sustainability*, vol. 10, 2018.
- [2] G. Himanshu, K. Ashwani e W. Pratibha, «Industry 4.0, cleaner production and circular economy: An integrative framework for evaluating ethical and sustainable business performance of manufacturing organizations,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 295, 2021.
- [3] H. Graeme, S. Maria, F. Joan Manuel, G.-S. Alejandro e A. Azapagic, «Developing and implementing circular economy business models in service-oriented technology companies,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 177, pp. 621-632, 2018.
- [4] P. Morseletto, «Targets for a circular economy,» *Resources. Conservation and Recycling*, vol. 153, 2020.
- [5] B. Gianmarco, C. P. Daniela, S. Nicola e P. Marco, «Enablers, levers and benefits of Circular Economy in the Electrical and Electronic Equipment supply chain: a literature review,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 298, 2021.
- [6] E. Manavalan e K. Jayakrishna, «An Analysis on Sustainable Supply Chain for Circular Economy,» *Procedia Manufacturing*, vol. 33, pp. 477-484, 2019.
- [7] T. D.Mastos, A. Nizamis, S. Terzi, D. Gkortzis, A. Papadopoulos, N. Tsagkalidis, D. Ioannidis, K. Votis e D. Tzovaras, «Introducing an application of an industry 4.0 solution for circular supply chain management,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 300, 2021.
- [8] C. J. Charbel Jose, D. C. F. Paula, W. Christina, J. Daniel, D. S. J. Ana Beatriz Lopes, R. P. S. Bruno Michel, P. P. Marco Antonio e M. R. d. S. Hermes, «First-mover firms in the transition towards the sharing economy in metallic natural resource-intensive industries: Implications for the circular economy and emerging industry 4.0 technologies,» *Resources Policy*, vol. 66, 2020.
- [9] G. Bressanelli, M. Perona e N. Sacconi, «Reshaping the Washing Machine Industry through Circular Economy and Product-Service System Business Models,» *Procedia CIRP*, vol. 64, pp. 43-48, 2017.
- [10] C. Kühn, B. Tjahjono, M. Bourlakis e E. Aktas, «Implementation of Circular Economy principles in PSS operations,» *Procedia CIRP*, vol. 73, pp. 124-129, 2018.

- [11] E. Kristoffersen, F. Blomsma, P. Mikalef e J. Li, «The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies,» *Journal of Business Research*, vol. 120, pp. 241-261, 2020.
- [12] A. Curtis, L. Kandlbauer, K. Khodier, K. E. Lorber, R. Pomberger, R. Sarc, «Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management – A review,» *Waste Management*, vol. 95, pp. 476-492, 2019.
- [13] D. C. A. Pigosso, T. C. McAloone, A. Pagoropoulos, «The Emergent Role of Digital Technologies in the Circular Economy: A Review,» *Procedia CIRP*, vol. 64, pp. 19-24, 2017.
- [14] M. Pieroni P.P., T. McAloone C. e D. C. A. Pigosso, «Circular economy business model innovation: Sectorial patterns within manufacturing companies,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 286, 2021.
- [15] M. Sauerwein, E. Doubrovski, R. Balkenende e C. Bakker, «Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 226, pp. 1138-1149, 2019.