

# **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria Gestionale

## **Tesi di Laurea Magistrale**

Sostenibilità in ambito produttivo: stato dell'arte, relazioni col  
Sistema Qualità e riflessioni sulle prospettive future



Relatore:

Maurizio Galetto

Candidato:

Federico Terrile

Anno Accademico 2020/2021

## Sommario

1. Introduzione .....	5
2. Analisi bibliografica.....	7
2.1 Introduzione .....	7
2.2 Metodo d'indagine .....	8
2.3 Analisi degli articoli.....	9
2.3.1 Pubblicazioni per argomento .....	9
2.3.2 Pubblicazioni per anno .....	10
2.3.3 Pubblicazioni per fonte.....	10
2.3.4 Pubblicazioni per approccio .....	11
2.3.5 Pubblicazioni per citazioni .....	12
2.3.6 Pubblicazioni per provenienza geografica.....	13
3. Analisi degli argomenti .....	15
3.1. Sustainable manufacturing.....	15
3.1.1. Introduzione .....	15
3.1.2. Definizione .....	16
3.1.3. Storia del sustainable manufacturing.....	19
3.1.4. Approccio e vantaggi .....	19
3.1.5. Ostacoli e barriere .....	21
3.2 Green Supply Chain .....	22
3.2.1. Introduzione e contesto .....	22
3.2.2. Definizione e confronto con la Logistica Inversa .....	26
3.2.3. Vantaggi.....	27
3.2.4. Barriere all'implementazione .....	28
3.2.5. Gestione dei rischi nell'ambito del SSCM.....	29
3.3 Industria 4.0.....	32
3.3.1. Introduzione e contesto .....	32
3.3.2. Definizione di Industria 4.0.....	33
3.3.3. Caratteristiche del paradigma Industria4.0.....	34
3.3.4. Tecnologie base dell'Industria 4.0.....	35
3.3.5. Vantaggi.....	37
3.3.6. Fattori abilitanti l'Industria4.0.....	38
3.3.7. Barriere all'adozione.....	39
3.3.8. Critiche all'Industria 4.0.....	40
3.3.9. Economia Circolare ed Industria4.0 per lo Sviluppo Sostenibile.....	41
3.4. Economia Circolare.....	45

3.4.1. Introduzione .....	45
3.4.2. Storia.....	46
3.4.3. Definizione.....	48
3.4.4. Caratteristiche .....	49
3.4.5. Vantaggi.....	53
3.4.6. Esempi .....	55
3.4.7. Problematiche e critiche.....	56
3.4.8. Importanza delle politiche.....	59
3.5. Politiche .....	60
3.5.1. Introduzione e contesto .....	60
3.5.2. Ruolo delle politiche .....	61
3.5.3. Tipologie di politiche .....	62
3.5.4. Esempi di politiche.....	65
3.5.5. Effetti dell'implementazione delle politiche .....	66
3.6. Sviluppo prodotto.....	69
3.6.1. Introduzione, contesto e vantaggi.....	69
3.6.2. Fasi del ciclo di vita .....	71
3.6.3. Strumenti di progettazione e sviluppo prodotto eco-compatibile.....	74
3.6.4. Barriere e ostacoli.....	80
3.6.5. Esempi di prodotti .....	82
3.7. Strategie .....	83
3.7.1. Introduzione .....	83
3.7.2. Trade-off e vantaggi .....	85
3.7.3. Tipi di strategie .....	87
3.7.4. Marketing .....	90
3.7.5. Manutenzione .....	92
3.7.6. PMI.....	93
3.8. Persone .....	96
3.8.1. Introduzione .....	96
3.8.2. Importanza e ruolo dell'istruzione .....	97
3.8.3. Comportamento dei clienti.....	100
3.9. Indicatori.....	103
3.9.1. Introduzione .....	103
3.9.2. Tipologie ed esempi di indicatori .....	104
3.9.3. Problematiche e limitazioni .....	106
3.9.4. Indicatori di sostenibilità sociale .....	107

3.10. Tecnologie .....	109
3.10.1. Introduzione .....	109
3.10.2. Additive Manufacturing.....	109
3.10.3. Produzione digitale diretta .....	114
3.10.4. Blockchain.....	116
3.10.5. Carbon Capture and Storage .....	117
3.10.6. Ulteriori tecnologie.....	119
4. Sistema Qualità ed EcoSistema .....	122
4.1. Storia della Qualità .....	122
4.2. Ricerche esistenti sul parallelismo Sistema Qualità-EcoSistema .....	124
4.3. Conclusioni e spunti ulteriori.....	126
5. Conclusioni .....	128
6. Ringraziamenti.....	131
7. Appendice.....	132
8. Bibliografia.....	152
<i>Fonti primarie (articoli analizzati)</i> .....	152
<i>Fonti secondarie (tratte dagli articoli analizzati)</i> .....	157

## 1. Introduzione

Oggi, la discussione globale a livello politico ma anche tecnologico è fortemente interessata dal concetto di sostenibilità. Sostenibilità dal punto di vista sociale, ossia di salvaguardia delle comunità e dei loro diritti, ma anche e soprattutto ambientale, ovvero tutela delle risorse naturali e delle condizioni dell'ecosistema attorno a noi. Tali concetti sono stati ampiamente bistrattati nei decenni passati, indicativamente a partire dalla prima rivoluzione industriale con una decisa impennata dovuta al dilagare della teoria consumistica, nella vana convinzione da parte di manager ma anche politici e dei clienti stessi di vivere in un sistema con risorse e capacità di rigenerazione infinite. Tale situazione è stata considerata insostenibile e da migliorare anche da parte dell'ONU, che a partire dal 2015 ha predisposto i cosiddetti 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile come una strategia comune per tutte le nazioni partecipanti per la creazione di un mondo più equo e pulito entro il 2030.

Infatti, vi è una necessità di maggiore sostenibilità ambientale per via delle conseguenze del riscaldamento globale e del cambiamento climatico che, causati ed accelerati dalle emissioni nocive antropogeniche, rischiano di alterare irreversibilmente le condizioni di vita del nostro pianeta e di tutti i suoi abitanti, umanità compresa. Bisogna altresì ricercare una maggiore sostenibilità sociale poiché, a causa della fine della schiavitù e del lavoro minorile nei paesi avanzati, si è avuto un aumento delle condizioni di sfruttamento dei lavoratori nonché di una sempre maggiore appropriazione delle terre delle comunità per una conversione a finalità produttive, restituendo in cambio solo inquinamento dei terreni e distruzione degli ecosistemi sotto la mirabolante promessa della crescita economica. Crescita che poi si è rivelata a vantaggio solamente di una ristretta maggioranza della popolazione, dato che è stato stimato che l'1% della popolazione mondiale detiene il doppio della ricchezza dei restanti 6,9 miliardi di persone (Oxfam, 2019), la quale in cambio riceve solo una demolizione dell'ambiente in cui vive e nel migliore dei casi una condizione di benessere fittizio.

Ovviamente, questa tesi non ha le potenzialità né tantomeno l'obiettivo di cambiare questa situazione, nasce semplicemente dall'idea di apportare un proprio contributo alla comunità sulle tematiche e le possibilità offerte da una produzione che sia più sostenibile, sia a livello ambientale che sociale, senza ovviamente andare contro alla condizione di economicità, ossia uno dei principi base dell'impresa. Inizialmente nasce infatti dall'idea di studiare la storia della Qualità industriale per identificarne i passaggi e soprattutto gli insegnamenti chiave da carpire per agevolare una transizione verso un nuovo paradigma di sostenibilità, noto anche come *sustainable manufacturing*. Grazie all'intervento dei Prof. Galetto e Verna, essa è stata tramutata in un'analisi della letteratura sulla Sostenibilità industriale, a cui viene affiancata in un secondo momento un paragone col Sistema Qualità, per ricavarne i fattori di successo utilizzabili per aumentare la diffusione della cultura della Sostenibilità ambientale all'interno dell'ambito produttivo.

Essa prevede infatti, dopo la presente introduzione, una survey sulla Sostenibilità in ambito industriale, includendo un'analisi bibliografica nel secondo capitolo della letteratura di settore presa in esame, ossia un totale di 141 articoli sui circa 700 analizzati. In pratica, vengono discussi i paper accademici più recenti o più citati sulle tematiche della Sostenibilità per ricavarne gli argomenti, i risultati e le tendenze principali in questo campo, corredati da analisi più specifiche volte a identificare ad esempio le fonti e gli autori maggiori.

Questa parte poi procede con l'analisi della letteratura stessa all'interno dei singoli capitoli

(Sustainable Manufacturing, Green Supply Chain, Industria 4.0, Economia Circolare, Politiche, Sviluppo prodotto, Strategie, Persone, Indicatori, Tecnologie) in cui vengono presentati tutti gli argomenti trovati in letteratura, andandoli a suddividere nei singoli sotto-argomenti con fine esplicativo, ovvero discutere più nel dettaglio gli stessi, oppure suddivisivo, ossia presentare le varie componenti del macro-argomento affrontato.

La terza sezione prevede invece un paragone col Sistema Qualità, ovvero il sistema di gestione per dirigere o controllare un'organizzazione con riferimento alla Qualità. Infatti, si vuole presentare ed analizzare la storia della Qualità industriale per paragonarla con quella, ancora in fase embrionale, della Sostenibilità per trovarne le analogie e gli insegnamenti da sfruttare. Tutto ciò al fine di consentire alla cultura della Sostenibilità una diffusione e permeazione pari a quella della Qualità, portando alla creazione di un EcoSistema, inteso come un sistema di gestione per dirigere o controllare un'organizzazione con riferimento alla Sostenibilità.

Infine, nella parte conclusiva vengono presentati i risultati ricavati dalle due parti precedenti al fine di mettere in evidenza le principali conclusioni della ricerca bibliografica e di confrontarli con gli spunti del Sistema Qualità. Ma anche dei filoni di ricerca futuri, ovvero degli argomenti più interessanti in ottica futura per la promozione della Sostenibilità industriale, ma anche delle aree scoperte, cioè quelle zone di sicuro interesse prossimo ma che sono ancora poco analizzate o trascurate dalla letteratura scientifica, così da "guidare" gli accademici negli argomenti su cui svolgere maggiori ricerche.

## 2. Analisi bibliografica

### 2.1 Introduzione

La seguente analisi bibliografica si pone l'obiettivo di presentare una rassegna dei principali paper accademici riguardanti la sostenibilità ambientale nell'ambito produttivo, senza focalizzarsi necessariamente solo su essa, il cosiddetto "sustainable manufacturing". In tale campo infatti il riferimento attuale per completezza e per data di pubblicazione è (Bhatt et al., 2020) e quindi si cerca di andare ad analizzare anche tutto l'ecosistema che ruota attorno alle imprese, sulla base del modello delle traiettorie tecnologiche.

Si affrontano infatti tematiche inerenti al rapporto coi fornitori, ossia la "Green Supply Chain", coi paradigmi sociali e tecnologici, cioè l'Industria 4.0 e l'Economia Circolare, con le istituzioni e gli enti regolatori, raccolti sotto la categoria "Politiche", e con gli stakeholders ed i clienti, raggruppati nell'ambito delle "Persone" che contiene anche al suo interno l'Università in quanto formatori dei futuri ingegneri e manager.

A queste categorie extra-impresa si aggiungono quelle intra-impresa, ovvero quelle su cui i futuri managers avranno maggiore possibilità di azione, ossia le "Strategie" aziendali, nel senso della selezione degli approcci manageriali con cui perseguire la sostenibilità della propria produzione, come ad esempio il Lean&Green, lo "Sviluppo Prodotto", gli "Indicatori" per rilevare la sostenibilità della propria produzione ma anche per la scelta dei fornitori più green e le "Tecnologie" da adottare ed implementare nel proprio processo produttivo in base alla loro prospettiva di eco-sostenibilità. Tale approccio può essere schematizzato come di seguito:

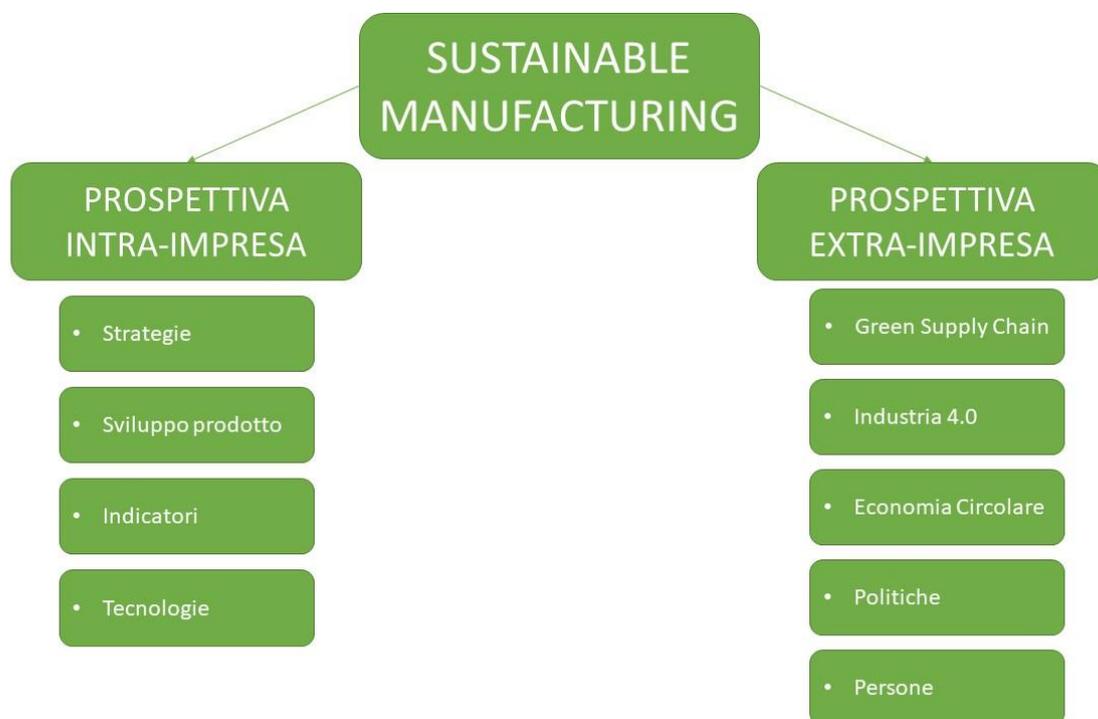


Figura 1. Schema delle prospettive dell'analisi

Le domande di ricerca che hanno quindi mosso tale analisi sono:

- 1) Quali sono gli argomenti principali di cui si compone la ricerca sulla sostenibilità nella produzione, qual è lo stato dell'arte del *sustainable manufacturing*?
- 2) Quali sono gli argomenti più discussi e con più spunti futuri e quelli che meritano ulteriore approfondimento?
- 3) Quali sono le possibili lezioni che la Sostenibilità può apprendere dalla Qualità?

## 2.2 Metodo d'indagine

In quest'analisi, la fonte principale dell'indagine è stata Scopus, con pochi altri articoli trovati grazie a ResearchGate e Springer. Su queste piattaforme è stato applicato un metodo in due passi tutto sommato piuttosto semplice e lineare: una prima analisi della letteratura molto generale usando parole chiave generiche per individuare i filoni principali della ricerca e gli articoli più rilevanti, mentre una seconda analisi più approfondita sui singoli argomenti permetteva di andare ad indagare nel dettaglio gli stessi.

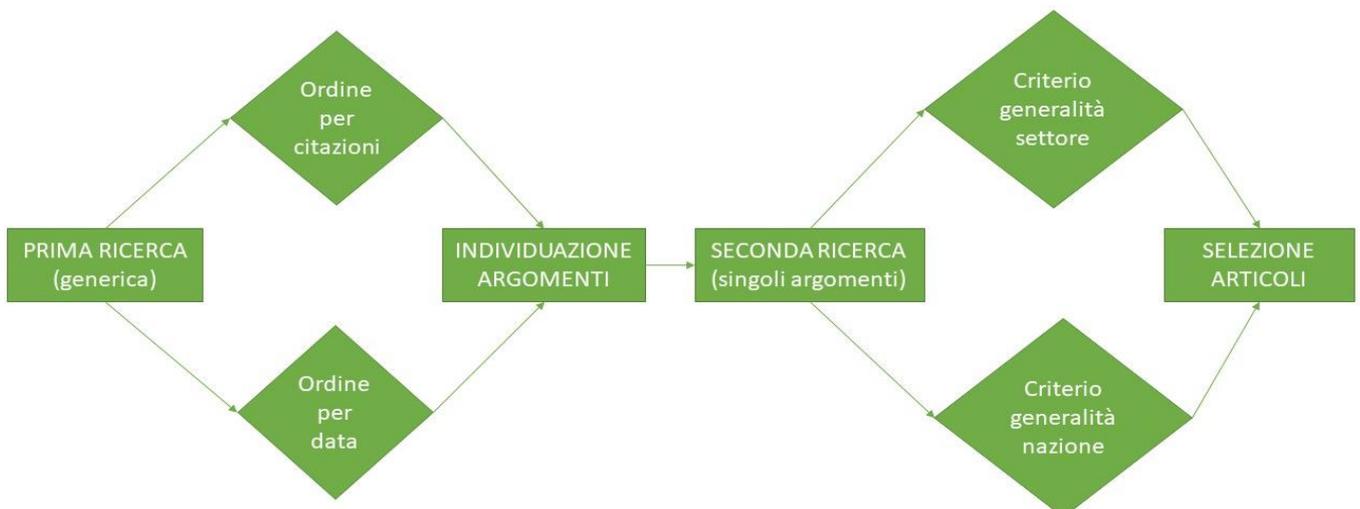


Figura 2. Metodologia d'indagine

Per quanto riguarda i criteri di selezione degli articoli, essi sono stati prima ordinati in base alle citazioni e successivamente, data l'innovatività del tema e dato che generalmente i più citati erano più indietro nel tempo, come dimostrato dal grafico in Figura 8, sono stati ordinati a partire da quelli più recenti, come si avrà modo di notare dal grafico in Figura 4. Essi sono stati poi selezionati in base alla loro rilevanza sul tema ed alla loro ampiezza sia a livello di settore di applicazione, andando quindi a non selezionare paper che riguardano solo un settore specifico, che di contesto geografico, tendendo quindi a selezionare papers riguardanti un solo paese solo in caso di rilevanza del paese preso in esame, come (Jiao et al., 2020), o dell'argomento trattato, come (Ibrahim et al., 2019). Per quanto riguarda le parole chiave usate, nella prima analisi esse sono state "SUSTAINABILITY IN MANUFACTURING", "SUSTAINABLE MANUFACTURING", "ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY IN PRODUCTION", "SUSTAINABILITY SURVEY", proprio nell'ottica di riuscire a comprendere quali fossero gli argomenti più toccati, dato il mio primo approccio alla materia, e le fonti principali. Nella seconda analisi invece, sono state scelte keyword più mirate sul singolo argomento, come "GREEN SUPPLY CHAIN", "INDUSTRY 4.0 AND SUSTAINABILITY", "CIRCULAR ECONOMY", "SUSTAINABLE MANUFACTURING POLICIES", "GREEN CUSTOMER BEHAVIOUR", "SUSTAINABILITY INTO HIGHER EDUCATION", "ECO-DESIGN", "GREEN PRODUCT DEVELOPMENT", "SUSTAINABILITY ASSESSMENT INDICATORS" e "INNOVATIVE

TECHNOLOGIES AND SUSTAINABILITY”’. Solo nel caso delle tecnologie è stato fatto un ulteriore focus su particolari tecnologie, come la produzione additiva o il Carbon Capture and Storage.

### 2.3 Analisi degli articoli

Una volta terminato il processo di selezione dei documenti, che in conclusione ammontano ad un totale di 141 sui circa 700 analizzati, ho provveduto ad una loro classificazione nella tabella, che per motivi di spazio è presente in Appendice 1, andando ad evidenziarne titolo, argomento, anno di pubblicazione, fonte, autori ed inserendo anche una breve descrizione. Successivamente, ho analizzato gli articoli in base alla loro provenienza, ossia secondo le date, le fonti, l’argomento, l’approccio e le citazioni, come riportato nei paragrafi seguenti.

#### 2.3.1 Pubblicazioni per argomento

Si parte dal discutere gli argomenti, ovvero le 10 prospettive d’indagine degli articoli, che verranno poi dettagliatamente approfonditi singolarmente negli appositi paragrafi. Dopo un’introduzione generale del tema del sustainable manufacturing, che quindi ha richiesto un numero tutto sommato contenuto di articoli, i filoni di ricerca maggiormente discussi sono indubbiamente l’Economia circolare, che fornisce il contesto socio-economico ideale dentro a cui si va ad inserire il sustainable manufacturing, e la Green Supply Chain, che si concentra soprattutto sull’analisi e la scelta degli attori lungo la catena di fornitura.

I secondi argomenti più discussi sono l’Industria 4.0, che fornisce invece il contesto tecnologico di supporto al sustainable manufacturing, quali ad esempio *IoT*, robotica e *smart grids*, e soprattutto le Strategie aziendali, che quindi vanno ad indicare tutte le possibili strategie produttive sul modello del *Lean&Green* ed i risultati ottenuti dall’implementazione delle stesse, includendo anche i diversi aspetti aziendali non descritti in altri capitoli. Seguono poi le Tecnologie, ovvero un’indagine sulle principali tecnologie innovative in ambito ecosostenibilità, con un focus sulla stampa 3D e sul *digital manufacturing* ma anche sul Carbon Capture&Storage, e lo Sviluppo prodotto, ovvero tutte le pratiche di progettazione, selezione dei componenti e dei materiali in ottica di una maggiore sostenibilità dei prodotti.

Infine, vengono presentati anche gli Indicatori di valutazione della sostenibilità della produzione, che comprendono anche le tematiche di selezione dei fornitori e delle tecnologie presenti negli argomenti precedenti, e le Politiche e le Persone, che secondo questa indagine rappresentano forse un argomento ancora poco trattato mentre potrebbe contribuire fortemente allo sviluppo della sostenibilità da parte del *policy-maker*, di uno sviluppo prodotto *demand-pull* e della formazione di ingegneri, manager e tecnici specializzati in queste tematiche per il mercato del lavoro del futuro.



Categorie	Dati	%
Economia circolare	23	16,3%
Green supply chain	21	14,9%
Strategie	18	12,8%
Industria 4.0	16	11,3%
Tecnologie	15	10,6%
Sustainable manufacturing	14	9,9%
Sviluppo prodotto	12	8,5%
Indicatori	9	6,4%
Politiche	7	5,0%
Persone	6	4,3%

Figura 3. Pubblicazioni per argomento

### 2.3.2 Pubblicazioni per anno

Successivamente è stata svolta un'analisi delle pubblicazioni per anno, come illustrato nel grafico in Figura 3. Come accennato nei criteri di selezione degli articoli, essi sono stati inizialmente ordinati per numero di citazioni, tuttavia, visto che ciò portava a penalizzare articoli molto recenti, in un successivo round di selezione si è adottato un criterio basato sulla data di pubblicazione a partire dai paper più recenti. È così che, al di là dell'obiettivo fiorire di articoli pubblicati nell'ultimo anno, si può spiegare l'impennata delle pubblicazioni nel 2020, sebbene complessivamente si evidenzia una tendenza crescente degli stessi nel corso degli anni per via della maggiore attenzione alle tematiche ambientali dell'opinione pubblica e dei governi, dello sviluppo delle tecnologie di supporto alle stesse ed alla sempre maggiore attenzione riposta al tema dell'Economia circolare. Ad ogni modo, è doveroso far notare la visionarietà e la meritata rilevanza degli articoli più addietro nel tempo, che affrontavano già venti anni fa argomenti quali la selezione dei fornitori in base alla sostenibilità (Noci, 1997), l'importanza degli scenari regolatori per lo sviluppo della stessa (Zofío and Prieto, 2001), e la presentazione delle principali strategie e tematiche ambientali (Sarkis, 2001).

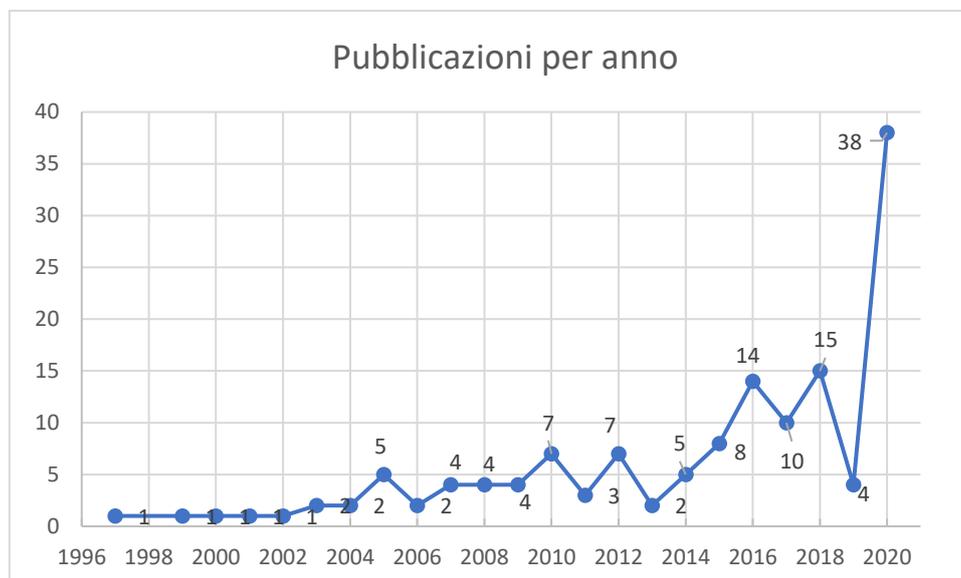


Figura 4. Pubblicazioni per anno

### 2.3.3 Pubblicazioni per fonte

Successivamente, sono state analizzate le fonti di provenienza degli articoli e, come si può notare a prima vista, la più usata è il "Journal of Cleaner Production", che rappresenta complessivamente il 22,5% degli articoli, su un totale di 70 fonti. Tale risultato risulta piuttosto scontato data l'autorità della testata e soprattutto la trasversalità degli argomenti affrontati.

Dopo di essi si trovano "Resources, Conservation and Recycling" e "Sustainability", che rappresenta anche il primo giornale non pubblicato da Elsevier, i quali si confermano essere riviste ad ampio spettro e quindi che comprendono un set di articoli trasversale rispetto agli argomenti presentati. Seguono poi "International Journal of Production Economics", "International Journal of Production Research" e "International Journal of Advanced Manufacturing Technologies", ovvero le prime riviste non prettamente incentrate sulla sostenibilità. Infine, le altre fonti con più di tre articoli a testa sono "Global conference on sustainable manufacturing", "CIRP Annals-Manufacturing Technologies" e "Journal of Industrial Ecology", che evidenziano come presentino ottimi spunti anche annali, trascrizioni di conferenze e paragrafi di libri di testo. In conclusione,

sono presenti anche riviste quali *“Harvard Business Review”* o *“Science”*, per indicare l’interesse dell’ambiente accademico per l’argomento, ed altre come *“Energy Policy”*, *“Technology Forecasting and Social Change”* e *“Journal of Mechanical Design”*, per sottolineare l’ampiezza dei campi di applicazione di questo argomento.

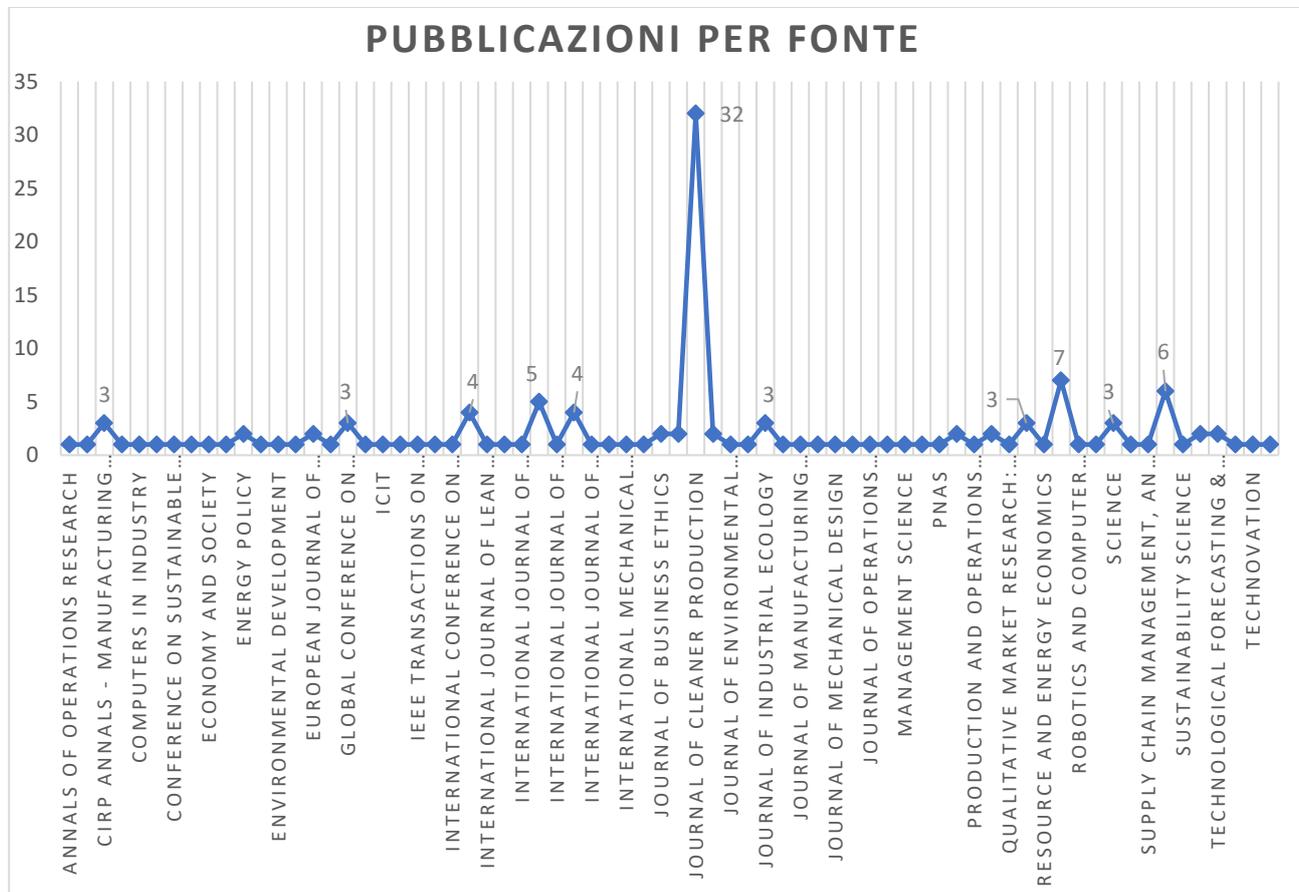


Figura 5. Pubblicazioni per fonte

### 2.3.4 Pubblicazioni per approccio

Una delle criticità di quest’analisi è l’essere focalizzata unicamente sugli argomenti, senza alcuna “fidelizzazione” verso gli autori o le fonti. Questo è il motivo per cui in questa sezione non è presentato alcun grafico sul modello di quelli precedenti, dato che solo quattro autori ricorrevano più di una volta. Si è deciso invece di proporre il diagramma di Eulero-Venn in Figura 6, che permette di evidenziare le affinità tra i vari articoli nell’affrontare gli argomenti dell’analisi, secondo le tre metodologie proposte, ovvero revisioni della letteratura o survey, analisi di scenari o di ipotesi e proposte di modelli o framework.

Come si può notare dal diagramma in Figura 7, la maggior parte degli articoli (43,5%) sono riconducibili ad una analisi di scenario o di utilità di una pratica, di una strategia o di un processo, andando quindi a presentare un determinato argomento ed analizzare l’applicazione. Successivamente, circa il 25% degli articoli sono rappresentabili con la proposta di un modello, di un framework, una roadmap, un approccio o di concetti chiave di una delle tematiche affrontate per poi andarli a verificare tramite dei casi di studio.

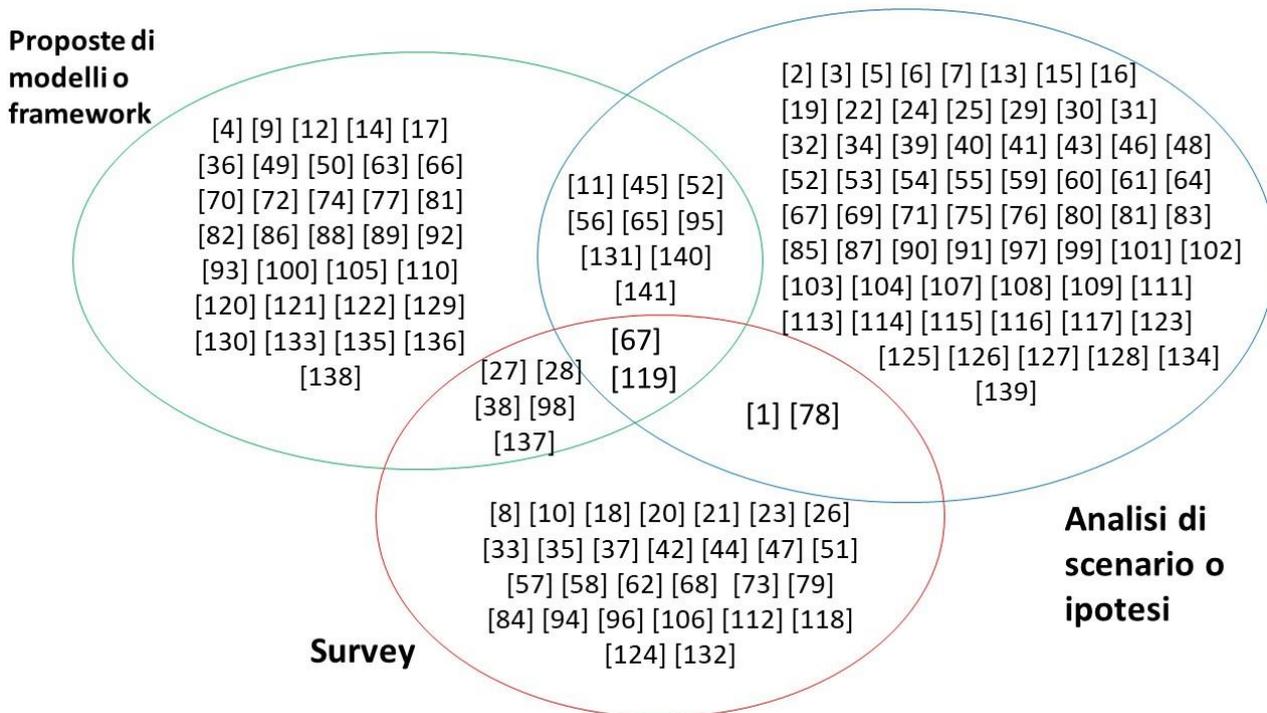
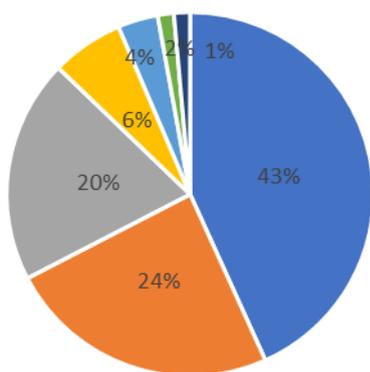


Figura 6. Diagrammi di Eulero-Venn

Infine, nel 20% dei casi si ha un'analisi bibliografica vera o propria, ovvero un'analisi della letteratura per presentare dettagliatamente un determinato argomento al fine di verificarne stato dell'arte, barriere, sfide future e filoni di ricerca.

Il restante 8% rappresenta, come si può notare dall'aerogramma seguente, casi riconducibili contemporaneamente a due o tutte e tre le macrocategorie presentate (Kalmykova et al., 2018; Tanaka, 2011).

Pubblicazioni per approccio



Approccio	Dati	%
Analisi di scenario	61	43,3%
Proposta di modelli	34	24,1%
Survey	28	19,9%
Analisi&Proposta	9	6,4%
Proposta&Survey	5	3,5%
Analisi&Survey	2	1,4%
Survey&Proposta&Analisi	2	1,4%

Figura 7. Pubblicazioni per approccio

- Analisi di scenario
- Proposta di modelli
- Survey
- Analisi&Proposta
- Proposta&Survey
- Analisi&Survey
- Survey&Proposta&Analisi

### 2.3.5 Pubblicazioni per citazioni

In questo paragrafo vengono analizzati gli articoli in ordine di citazione, mentre nel grafico in Figura 8 vengono rappresentati quelli con più di 200 citazioni, che coincidono con la top-50.

In particolare, è stata scelta questa soglia in quanto, a causa della scala pesantemente condizionata da (Ragauskas et al., 2006), essa rappresenta il valore che permette di avere valori ben distinguibili ma al contempo di presentarne una buona percentuale. Dall'analisi delle citazioni, si evince come più del 60% degli articoli abbiano almeno 100 citazioni e 5 un valore superiore alle 1000. Ciò permette di dedurre che complessivamente l'analisi si avvale di articoli molto competenti nei vari argomenti e diffusi nella comunità accademica, e che è presente allo stesso tempo un'ampia casistica sotto questo aspetto. Infine, è corretto fare notare che nessun articolo oltre il 2018 ha più di 200 citazioni e che solo un paper del 2020, ossia (Ahmadi et al., 2020), ne raggiunge 100, a riprova della correttezza della doppia scelta dei criteri di ricerca dei documenti, ossia citazioni e data di pubblicazione, permettendo di analizzare articoli più recenti che altrimenti sarebbero stati esclusi dall'analisi, penalizzandone la completezza.

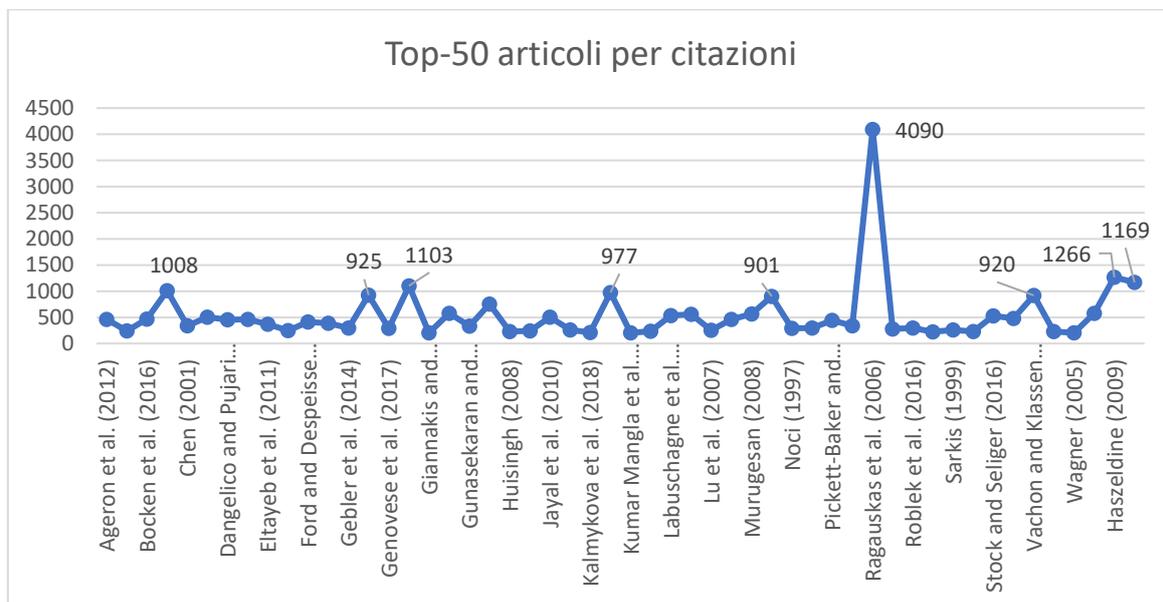


Figura 8. Top-50 Articoli per citazioni

### 2.3.6 Pubblicazioni per provenienza geografica

In conclusione, in quest'ultimo paragrafo ho deciso di analizzare le pubblicazioni in base alla provenienza. Prima di illustrare i risultati, rappresentati graficamente nella Figura 9, ci terrei a presentare anche il criterio di assegnazione degli stati agli articoli, date diverse casistiche fonti di ambiguità. Il criterio primo era l'università di provenienza del primo autore, che in alcuni casi coincideva con gli altri autori, mentre in altri si venivano a trovare autori di università diverse ma dello stesso stato, in altri ancora vi erano autori di università e nazionalità diversi. Tale criterio veniva poi confrontato con la fonte finanziatrice: se essa fosse stata dello stesso paese dell'autore allora si sarebbe assegnato di conseguenza, nei tre casi in cui essa invece era di un paese diverso, seppur riferibile ad un altro autore dell'articolo, allora si assegnava la "paternità" al paese mecenate. Solo in due casi è stata assegnata una "paternità condivisa" per via del fatto che si trattava di progetti internazionali finanziati da due stati diversi (Leong et al., 2020; McDowall et al., 2017).

Presentati i criteri, procediamo ad un'analisi dei risultati da cui si può notare come vi sia una contrapposizione tra il mondo occidentale, rappresentato da USA-UK-UE, e quello orientale, in particolare Cina ed India. In tutto ciò stona però l'assenza della Russia, unica dei paesi BRIC non presente, anche se le cause non si sa se siano attribuibili a criteri di selezione che hanno lasciato in secondo piano articoli di questo paese o ad una voluta trascuratezza degli argomenti da parte della nazione stessa. Al di là di ciò, era

lecito attendersi un primato americano, che doppia quasi il secondo, ossia il Regno Unito, mentre solo in quarta posizione si trova la Cina. A tal proposito è doveroso far presente come i paper provenienti da Hong Kong e Taiwan siano stati scorporati e che, se inclusi, porterebbero la Cina ad un valore pari a 17 paper, posizionandosi in seconda posizione. Al terzo posto si trova l'India, che ha avuto in particolare un ottimo risultato grazie agli articoli più recenti, seguita, oltre alla Cina, da Italia e Svezia. È giusto far notare l'attenzione dei paesi nordici verso la sostenibilità, tanto che se messi assieme Svezia-Norvegia-Finlandia-Danimarca raggiungono un risultato (16) quasi pari alla Cina "riunita", pur presentando un'estensione ed una popolazione ben inferiori. Infine, è molto lodevole il grande impegno del Sud-Est asiatico, che, oltre a HK e Taiwan, viene rappresentato in particolare dalla Malesia, ma anche da Bangladesh e Corea del Sud. Un ultimo commento sull'assenza, oltre alla Russia, dell'Africa, presente solo con Marocco e Sud Africa, del medio-oriente, in particolare di Israele, oltre che dell'America Latina, con solo Messico e Brasile presenti. Considerando invece le tematiche, si nota una prevalenza europea (Olanda, Svezia, Italia) nel campo dell'Economia Circolare, un *ex aequo* tra Cina e USA nell'ambito della GSC, mentre l'Industria4.0 è affrontata specialmente da articoli indiani e tedeschi. Gli USA dominano infine nella categoria "sustainable manufacturing", mentre in tutti gli altri casi si ha sostanzialmente una distribuzione tra i diversi Stati.

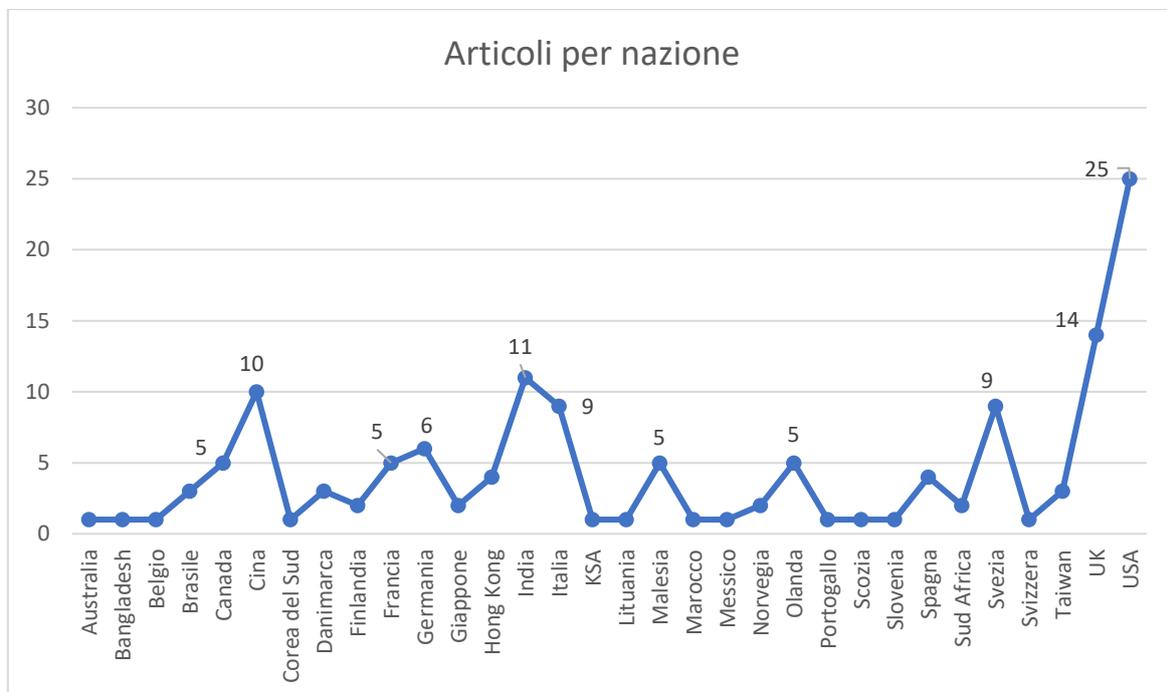


Figura 9. Articoli per nazione

### 3. Analisi degli argomenti

In questo capitolo si analizzano nel dettaglio i singoli argomenti presentati nel paragrafo 2.3.1., andando quindi ad approfondire la letteratura di ogni settore e presentando direttamente estratti dei singoli articoli presenti nell'analisi, rielaborati secondo i principali filoni degli argomenti.

#### 3.1. Sustainable manufacturing

##### 3.1.1. Introduzione

La necessità di rendere più ecologicamente sostenibile la produzione deriva dall'eccessivo sviluppo e sfruttamento delle risorse naturali in tutto il mondo, in seguito alla convinzione, fomentata da un capitalismo sempre più estremizzato, che le risorse sul nostro pianeta siano illimitate e autorigeneranti all'infinito.

Infatti, il settore produttivo, che rappresenta la base delle economie industriali moderne (circa il 35% del PIL mondiale), deve essere reso più sostenibile per permettere di mantenere l'elevato stile di vita delle società industrializzate, appurato che esse non siano disposte a fare un passo indietro, ma anche di permettere a quelle in via di sviluppo di raggiungere lo stesso standard (Jayal et al., 2010). A titolo di esempio, secondo quanto riportato dal report dell'IEA (2015), il settore secondario è responsabile del 36% delle emissioni di CO<sub>2</sub> e di circa un terzo del consumo globale di energia, oltre che essere il primo per il consumo di materie prime e la conseguente generazione di rifiuti (Govindan and Hasanagic, 2018). Bisogna tuttavia considerare l'impatto della produzione sull'inquinamento e sul cambiamento climatico a tutto tondo, considerando le emissioni climoalteranti, la generazione di rifiuti pericolosi e tossici, il consumo idrico, il rilascio di plastica nei corsi d'acqua e tutte le implicazioni di smaltimento e fine-vita.

Tale esigenza si sta rafforzando per merito della sempre maggiore consapevolezza dell'opinione pubblica e dei legislatori e, come si vedrà lungo la tesi, sta portando a grandi cambiamenti nel comportamento dei clienti e delle strategie aziendali, ma anche delle priorità legislative. A riprova di ciò, nel progetto globale IMS 2020 sono presentate le cinque aree di ricerca future per la produzione e, tra queste, al primo posto a livello di priorità si trova la produzione sostenibile di prodotti e servizi (IMS 2020, 2010).

Le principali economie del mondo sono riuscite a generare guadagni finanziari attraverso il loro settore manifatturiero, ma è importante notare che queste nazioni sono ben lontane dal raggiungere la sostenibilità all'interno di esso (Yadav et al., 2020), come rappresentato in Tabella 1. Tra le prime dieci economie, in base al PIL, ci sono solo tre paesi in via di sviluppo, vale a dire Cina, India e Brasile, ed è interessante notare come il 35% delle emissioni globali di gas serra siano generate da questi 3 paesi collettivamente. Allo stesso modo, si può notare come in queste nazioni, il contributo del settore manifatturiero al PIL sia significativo e quindi, è fortemente necessario un cambio di paradigma per raggiungere la sostenibilità tra i paesi in via di sviluppo attraverso il settore manifatturiero.

Stato (classifica)	PIL [mld\$]	EPI (classifica)	Uso energie rinnovabili	GHGE [% globali]	MCG	HDI (classifica)
(1) USA	20.494	71,19 (27)	14,7 %	14,75 %	18,9 %	0,924 (13)
(2) Cina	13.407	50,74 (120)	24,5 %	27,5 %	39,5 %	0,752 (86)
(3) Giappone	4971	74,69 (20)	15.0 %	2,99 %	29,7 %	0,909 (19)
(4) Germania	4000	78,37 (13)	29.0 %	1,98 %	30,1 %	0,936 (5)
(5) UK	2828	79,89 (6)	27.9 %	1,20 %	19,4 %	0,922 (14)
(6) Francia	2775	83,95 (2)	17.5 %	0,97 %	28,9 %	0,901 (24)
(7) India	2716	30,57 (177)	16.98 %	6,43 %	19,0 %	0,640 (130)
(8) Italia	2072	76,96 (16)	37.3 %	0,93 %	24,0 %	0,880 (28)
(9) Brasile	1868	60,70 (69)	80.4 %	2,25 %	21,0 %	0,759 (79)
(10) Canada	1711	72,18 (25)	65.0 %	1,63 %	28,1 %	0,926 (12)

Note: EPI- Environmental Performance Index, GHGE- Green House Gas Emission, MCG- Manufacturing Contribution to GDP, HDI- Human Development Index.

Tabella 1. Parametri di sostenibilità del G10, tratto da Yadav et al. (2020)

A ciò si deve aggiungere che il livello di competizione globale sempre maggiore per via delle economie emergenti asiatiche ed americane ha portato ad un incremento del lancio di nuovi prodotti, ed una loro maggiore obsolescenza, con conseguente consumo di risorse naturali e materie prime (Garetti and Taisch, 2012). Questa competizione offre quindi da un lato un'ottima occasione per le imprese europee di ricostruire il loro vantaggio mettendo in atto pratiche di sostenibilità ma le espone anche a pericoli logistici di carenza di risorse rare, come ad esempio quelle necessarie ai prodotti tecnologici (ovvero litio, gallio, platino), non presenti nel nostro continente. Da tutto ciò si evince come si faccia sempre più necessario lo sviluppo di un nuovo paradigma produttivo focalizzato sulla sostenibilità ambientale, ma anche sociale ed economica, cioè i tre pilastri della sostenibilità produttiva, ovvero il sustainable manufacturing. Tale paradigma deve mirare alla creazione e distribuzione di beni innovativi che minimizzino l'utilizzo di risorse e gli output di processo non necessari, ovvero scarti, materiali tossici ed emissioni di CO2 nell'intero ciclo di vita (Rachuri et al., 2011).

### 3.1.2. Definizione

Prima di presentare le molteplici definizioni di sustainable manufacturing fornite, viene proposta, tramite la Figura 10, la distinzione di Dornfeld (2012) che illustra le differenze tra i quattro paradigmi produttivi odierni, ovvero la produzione di massa, il *lean manufacturing*, il *green manufacturing* ed il sustainable manufacturing, distinguendone gli aspetti di sostenibilità interessati. In particolare, si può notare come solo quest'ultimo sia l'unico omnicomprensivo, mentre ad esempio l'approccio *lean* difetta sotto l'aspetto sociale, mentre quello *green* trascura quello economico, tanto è vero che una delle possibili strategie proposte nel paragrafo 3.6 sarà quella *Lean&Green*, in modo che comprenda tutti e tre gli aspetti della cosiddetta *Triple Bottom Line*, ovvero sostenibilità ambientale, sociale ed economica.

	Aspetti coperti		
	Ambientale	Sociale	Economica
Green manuf.	X	X	
Lean manuf.	X		X
Mass manuf.		X	X
Sustainable manuf.	X	X	X

Figura 10. Confronto tra gli attuali paradigmi produttivi, adattata da Dornfeld (2012)

Sempre a tal riguardo, è doveroso far notare l'altra differenza metodologica base tra sustainable e green manufacturing, ovvero il basarsi sull'approccio 3R (Green) e 6R (Sustainable), mentre il lean si basa unicamente sulla Riduzione degli scarti.

In particolare, il green manufacturing ha sempre trovato le sue fondamenta metodologiche nelle 3R, ossia Ridurre/Riutilizzare/Riciclare, mentre il Sustainable ad esso aggiunge Recuperare/Riprogettare/Rilavorare, per permettere una migliore trasformazione del ciclo di vita da lineare ad un cerchio chiuso, in cui le risorse naturali entrano nel loop solo nella produzione originaria e non vi escono mai perché sempre riutilizzati per produrre nuovi beni, come illustrato nella Figura 11b tratta da (Jayal et al., 2010). La figura 11a denota invece come tali strategie abbiano prospettive di crescita del valore nel lungo termine ben superiori rispetto a quelle tradizionali e lean, soprattutto alla luce di teorie come quella di Starik (1995).

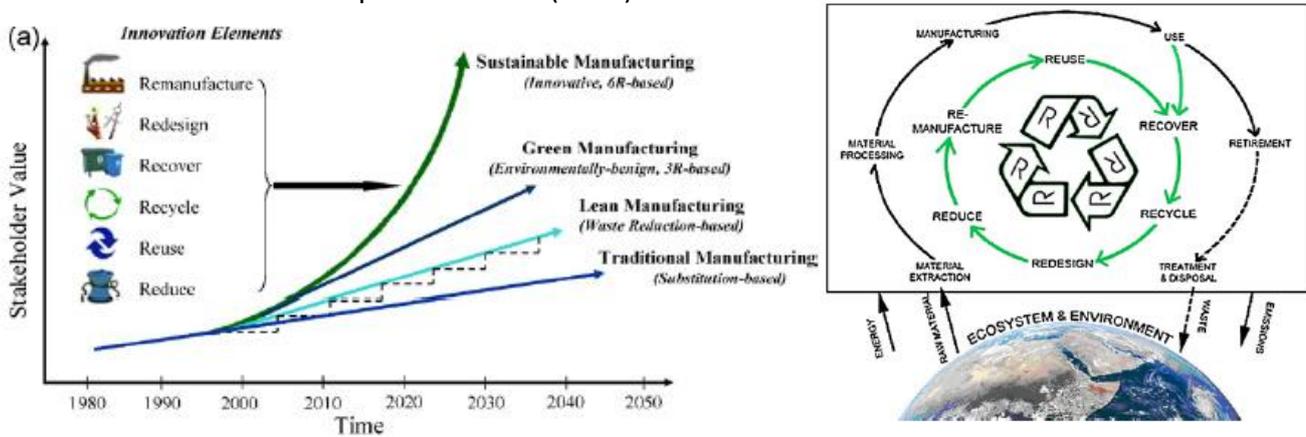


Figura 11a-b. Presentazione dell'approccio 6R e del valore per gli stakeholder dei vari paradigmi (Jayal et al., 2010)

Inoltre, l'approccio delle 6R proposto da (Jayal et al., 2010) è quello che permette di massimizzare il recupero di valore dal fine-vita dei prodotti, riducendo al contempo l'impatto ambientale e permettendo di risparmiare energia, materie prime e costi di trasporto, con conseguente riduzione di costi ed aumento del valore nel ciclo di vita del prodotto, come illustrato in Figura 12 (Badurdeen and Jawahir, 2017).

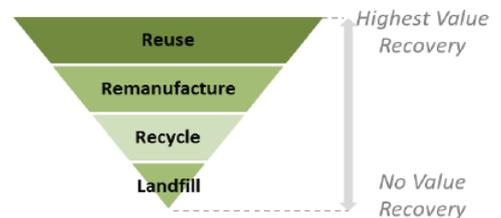


Figura 12. Recupero del valore nei diversi paradigmi, tratta da Badurdeen and Jawair (2017)

Per quanto riguarda la definizione del sustainable manufacturing, ne sono fornite diverse, elencate nella Tabella 2, ma quella maggiormente riconosciuta è senza dubbio quella del Rapporto Brundtland delle Nazioni Unite (Brutland Commission, 1987), ossia " produzione che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri". Nella tabella di seguito sono presentate diverse definizioni con le relative fonti:

FONTE (ANNO)	DEFINIZIONE
International Union for Conservation of Nature (1969)	Raggiungimento di crescita economica ed industrializzazione senza danneggiare l'ambiente.
WCED (1987)	Sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare le proprie richieste.

Brundtland Commission (1987)	Produzione che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri.
Madu (2001)	Trasformazione di materie prime in prodotti finiti focalizzata sulla protezione dell'ambiente tramite la conservazione delle risorse limitate della Terra ed una pianificazione efficace per l'utilizzo ottimale delle risorse ed uno smaltimento sicuro dei rifiuti.
De Roon (1998)	Riorganizzazione delle risorse tecnologiche, scientifiche, ambientali, economiche e sociali così che i sistemi eterogenei risultanti possano essere mantenuti in equilibrio spaziale e temporale.
US Department of Commerce (2011)	Creazione di beni e servizi utilizzando processi e sistemi che conservino energia e risorse naturali, siano non inquinanti, economicamente fattibili, sicuri e salutari per lavoratori, comunità e clienti, socialmente e creativamente premianti per tutte le persone che vi lavorano.
Feng and Young (2009)	Produzione che implica l'abilità di avanzare il proprio status economico senza compromettere l'ambiente naturale e l'equità sociale, aumentando la qualità di vita delle comunità presenti e future.
Garetti and Taisch (2011)	Abilità di usare intelligentemente le risorse naturali nella produzione per la creazione di prodotti e soluzioni che, grazie a nuove tecnologie, misure regolatorie e comportamenti sociali coerenti, soddisfino gli obiettivi economici, ambientali e sociali, preservando l'ambiente e continuando a migliorare la qualità di vita delle persone.
Jawahir et al. (2013)	Produzione che, a livello di prodotto, processo e sistema, dimostri un ridotto impatto ambientale, offra una migliore efficienza energetica e delle risorse, generi una quantità di rifiuti minima, fornisca sicurezza operativa e maggiore salute del personale, mantenendo e/o aumentando la qualità del prodotto e del processo con benefici di costi complessivamente nel ciclo di vita.
Commerce Sustainable Manufacturing Initiative (2017)	Creazione di prodotti che utilizzino processi che minimizzano gli impatti ambientali negativi, conservino energia e risorse naturali, siano sicuri per lavoratori, comunità e clienti ma anche economicamente solidi.

Tabella 2. Definizioni di Sustainable Manufacturing

È altresì doveroso riportare la definizione di Ray Anderson della cosiddetta "Impresa Prototipo del 21esimo Secolo", che fornisce i 7 passi per trasformare una qualsiasi impresa in una sostenibile, riportati nella Tabella 3 di seguito:

<b>Caratteristiche di un'impresa sostenibile</b>	
1) <i>Zero Waste</i>	Zero scarti nella biosfera terrestre (inclusi i rifiuti e le rilavorazioni)
2) <i>Benign Emissions</i>	Eliminazione di ogni estrazione organica ed inorganica dalla litosfera Terrestre, ossia prevenire l'entrata di sostanze tossiche nel flusso produttivo
3) <i>Renewable Energies</i>	Energia da fonti rinnovabili, incluse solare, eolica, idrogeno, biomasse e geotermica
4) <i>Closing the loop</i>	Uso di materiali riciclati piuttosto che vergini e differenti opzioni di fine vita come riutilizzo, rilavorazione, riciclo e riqualificazione
5) <i>Efficient Transportation</i>	Logistica efficiente

6) <i>Investment</i>	Investimenti nella società, ad esempio nell'educazione
7) <i>Redesign</i>	Riprogettazione del business con nuove linee di business, ad esempio vendere servizi piuttosto che prodotti

Tabella 3. Caratteristiche di un'impresa sostenibile, adattata da Anderson (1998)

### 3.1.3. Storia del sustainable manufacturing

Storicamente, il Sustainable manufacturing deriva dal concetto di sviluppo sostenibile, introdotto dalle Nazioni Unite nel 1980, per via della convinzione globale di utilizzare la sostenibilità ambientale quale mezzo per aprire nuovi business e migliorare le economie e la qualità di vita delle persone. Il sustainable manufacturing è stato poi introdotto ufficialmente dalla Conferenza di Rio nel 1992 come una linea guida per aiutare le imprese ed i governi nella transizione verso lo sviluppo sostenibile. Già a partire dai primi anni '90 sono state sviluppate teorie manageriali in tale ambito, di cui viene presentata una summa qui di seguito, rimanendo però a cavallo del nuovo millennio, per via del fiorire di numerose teorie che renderebbe impossibile presentarle tutte:

- Ayres (1989): introduce il concetto di riconversione degli scarti da un settore "produttore" ad uno che li riutilizzi per generare valore, sul modello dei parchi eco-industriali;
- Jelinski et al. (1992): descrizione dell'ecologia industriale come ecosistema su tre livelli;
- Lowe (1993): "ecologia industriale", come framework organizzativo per gestire un'impresa con l'obiettivo di raggiungere performance ambientali sostenibili;
- Starik (1995): "stakeholders' theory", ovvero incorporare prospettive ambientali all'interno delle questioni degli stakeholders;
- Hart (1995): "natural resource-based theory", ovvero raggiungere un vantaggio competitivo per l'impresa sulla base delle dinamiche con l'ambiente naturale sotto i vincoli delle risorse;
- Shrivastava (1995): "ecocentric management", strategie di gestione basate su DFE, packaging minimale, efficienza energetica, ambientale e nell'uso di risorse, sistemi non-lineari;
- Klassen (2000): suggerisce strategie di miglioramento continuo per migliorare le performance ambientali;
- King and Lenox (2001): osservano la relazione diretta tra possedere sistemi di gestione della qualità ed adottare sistemi di gestione ambientale;
- Rao (2002): osserva l'impatto positivo della ISO 14000 sulle performance e sulla ricerca di fornitori più green per aumentare la competitività e le performance economiche;
- Madu et al. (2002): studio di un approccio sostenibile di gestione del ciclo di vita del prodotto (riciclo, selezione dei materiali, progettazione, gestione dei rifiuti, fine vita).

### 3.1.4. Approccio e vantaggi

Come si può ricavare dalle teorie qui presentate, in passato gli aspetti di sostenibilità dell'impresa erano considerati separatamente come elementi di logistica green o al contrario, rilavorazione, riduzione dell'impronta ecologica, salvaguardia dei lavoratori e dell'ambiente. Tuttavia, come fa notare (Sarkis, 2001) nella tabella in Figura 13, essi necessitano un approccio a tutto tondo sia all'interno dell'impresa che di tutto l'ecosistema che vi ruota attorno:

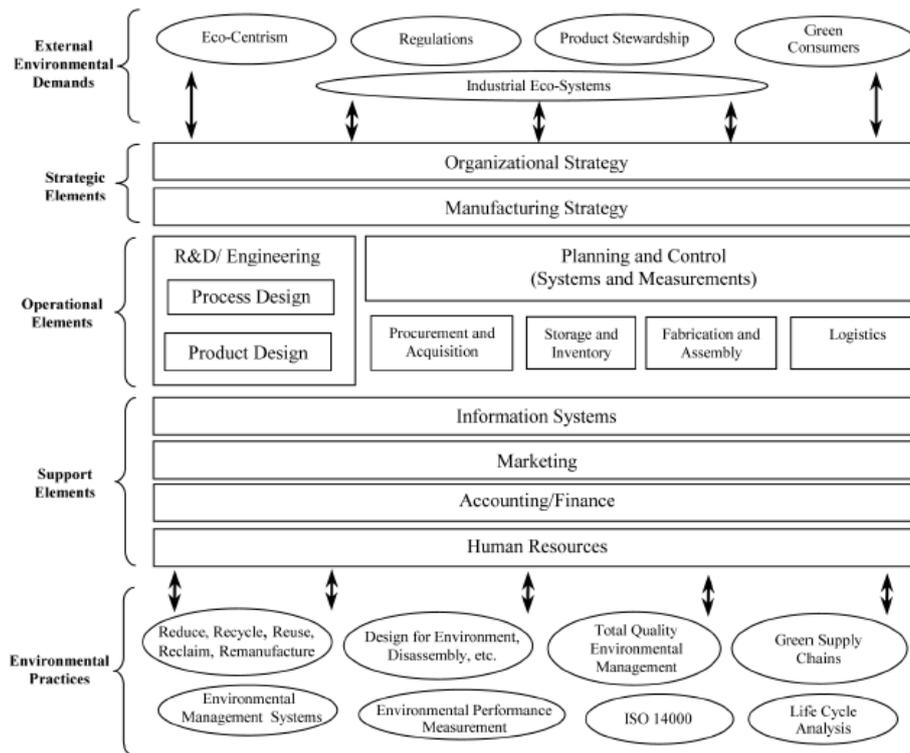


Figura 13. Sostenibilità a livello d'impresa e di ecosistema, tratta da Sarkis (2001)

A completamento di ciò, secondo quanto proposto da Jawahir (2008), il sustainable manufacturing può venire rappresentato su tre livelli:

- 1) livello di **prodotto**: l'utilizzo di tecniche progettuali, come l'eco-design ed il Design For the Environment (DFE), ma anche di valutazione, come il LifeCycle Assessment (LCA), consente il passaggio ad un approccio 6R, permettendo quindi un nuovo paradigma a ciclo chiuso e basato su cicli-di-vita multipli;
- 2) livello di **processo**: l'utilizzo di nuove tecnologie e processi di pianificazione efficiente permettono la riduzione del consumo di energia, risorse e scarti, ma anche di migliorare la qualità di vita dei lavoratori e delle persone coinvolte;
- 3) livello di **sistema**: la pianificazione a livello integrato di tutti le attività lungo il ciclo di vita del prodotto ed i suoi stadi, ossia preproduzione, produzione, uso e fine-vita, consente di considerare tutti gli aspetti relativi all'impronta del prodotto e di ridurla di conseguenza.

Prima di concludere, viene presentato quello che da molti, tra cui (Badurdeen and Jawahir, 2017; Sarkis, 2001), viene riconosciuto come la futura evoluzione della produzione al fine di migliorarne le prestazioni di sostenibilità, ovvero un insieme di sistemi flessibili e scalabili che producano prodotti nel luogo più vantaggioso, utilizzando le migliori risorse, metodi e attrezzature disponibili per fornire personalizzazione, reattività, affidabilità, riduzione dei costi e prodotti e servizi di alta qualità (Esmaeilian et al., 2016). La flessibilità della tecnologia di produzione all'interno dell'organizzazione dovrà includere anche la capacità di utilizzare diversi tipi di materiale, le apparecchiature all'interno dell'ambiente di produzione dovranno essere in grado di gestire le variazioni e i cambiamenti in questo flusso di materiale, permettendo alle organizzazioni di mantenere la competitività, pur adottando pratiche sostenibili.

Sotto questa prospettiva, assumono anche una certa rilevanza le decisioni relative all'ubicazione e

all'espansione degli impianti di produzione, influenzabili da questioni ambientali in quanto limitabili da processi di autorizzazione che pongano determinate soglie alla generazione dei rifiuti degli impianti in aria ed acqua. I parchi eco-industriali così realizzati potranno anche portare alla creazione della situazione in cui i rifiuti di un impianto di produzione possono essere materiale utile per un altro impianto di produzione (Dwortzan, 1998) per ridurre al minimo i costi e gli impatti ambientali del trasporto di rifiuti e materiale riciclabile.

### 3.1.5. Ostacoli e barriere

Infine, una volta presentate le caratteristiche fondamentali, il contesto ed i benefici del sustainable manufacturing, è giusto riportare anche i principali ostacoli che le imprese devono affrontare nell'ottica di una tale trasformazione, seguendo (Pathak et al., 2020):

1) <i>Impegno manageriale</i>	Senza l'impegno del top-management, supportato da strumenti di decision-making e valutazione nell'ottica della sostenibilità, la spinta della sostenibilità degli altri attori sarebbe completamente inutile (Luthraet et al., 2016)
2) <i>Spinta della domanda</i>	Vi è la necessità di una maggiore domanda di sostenibilità produttiva da parte di una vasta massa di clienti per creare una pressione ed avere una completa diffusione del nuovo paradigma in tutti i settori produttivi (Bhanot et al., 2016)
3) <i>Pressione legislativa</i>	La mancanza o il ridotto <i>enforcement</i> di leggi sull'ambiente comporta un minore rispetto delle linee guida sulla sostenibilità (Pati et al., 2016)
4) <i>ROI indefinito</i>	Data la novità del paradigma, non sono ancora chiari i costi esatti d'adattamento né l'effettivo successo degli investimenti (Bhanot et al., 2016)
5) <i>Incoerenza politica</i>	Un'ambiguità nella linea politica a livello nazionale o internazionale può portare ad un rilassamento settoriale temporaneo nel rispetto delle leggi
6) <i>Mancanza di risorse</i>	La mancanza di risorse economiche ed umane per l'implementazione della sostenibilità può portare ad una sua interruzione (Koho et al., 2011)
7) <i>Difficoltà tecnologiche</i>	Un settore può impiegare molto tempo ad adattarsi ad un nuovo paradigma tecnologico, richiedendo fondi, formazione e tempo (Bhanot et al., 2017)
8) <i>Soddisfazione della domanda</i>	Se i settori non riescono tempestivamente a soddisfare la domanda di prodotti green ed a fidelizzarla, si rischia di perderla (Mathiyazhagam et al., 2013)
9) <i>Qualità dei prodotti</i>	L'offerta di prodotti sostenibili non può risparmiare sulla qualità, e quindi sul prezzo, con rischio di non venir apprezzata e perdere potenziali clienti
10) <i>Mancanza di apprendimento</i>	Sono necessarie le giuste conoscenze al giusto tempo, per evitare che la mancanza di apprendimento ne ostacoli la diffusione (Bhanot et al., 2016)
11) <i>Interesse sull'argomento</i>	La mancanza di interesse da parte dei manager o degli altri membri della supply chain, per via della competizione, determina un fallimento del SM

Tabella 4. Ostacoli allo sviluppo del sustainable manufacturing, adattato da Pathak et al. (2020)

Il reale successo del sustainable manufacturing dipenderà quindi dalla creazione di modelli di business che estraggano quanto più valore possibile è permesso dalle nuove tecnologie in ogni fase del ciclo di vita. Quindi sarà necessario sviluppare una metodologia globale di analisi del ciclo di vita, che ottimizzi l'utilizzo non solo in tutta la vita del prodotto, ma anche nel suo fine-vita (Esmaeilian et al., 2016). Inoltre, l'ottimizzazione dei processi di rilavorazione porterà ad una maggiore efficienza lavorativa, che permetterà il riutilizzo dei prodotti, soddisfacendo i requisiti di qualità ma anche portando a riduzioni di costi. Tutto ciò permetterà quindi una forte

ottimizzazione dell'utilizzo delle risorse materiali e naturali, ossia il principale obiettivo del sustainable manufacturing.

### 3.2 Green Supply Chain

Il primo argomento discusso, per via della rilevanza e diffusione, dopo l'introduzione nel capitolo precedente, è quello della Green (o Sustainable) Supply Chain (GSC o SSC), ovvero un sistema di gestione della catena di fornitura che incorpori al proprio interno principi ambientali e sociali, soprattutto alla luce del fatto che anche la produzione è diventata sempre più un servizio in cui varie risorse vengono scambiate come merci (Ageron et al., 2012).

#### 3.2.1. Introduzione e contesto

Tutto ciò è dovuto al fatto che esiste una forte richiesta per le aziende di lavorare insieme in catene di fornitura sostenibili considerando fattori sociali, economici e ambientali (Mangla et al., 2014; Pieroni et al., 2019). Per via della rapida crescita delle industrie manifatturiere a livello globale e in particolare nei paesi in via di sviluppo, le attività economiche transfrontaliere sono diventate una componente importante della produzione globale. Ad esempio, il rapporto tra commercio internazionale e PIL globale ha raggiunto circa il 30% nel 2011 (WTO, 2015) e si prevede che questa tendenza continuerà (Wang, Wei, Yu & Zhu, 2017b).

Tutto ciò ha portato al fatto che le varie attività economiche lungo una catena di approvvigionamento generano una varietà di impatti sociali ed esternalità ambientali, ad es. rifiuti solidi ed emissioni nell'aria e che la gestione impropria delle attività logistiche può aumentare gli sprechi e il consumo di energia e l'emissione di gas serra portando a un inquinamento eccessivo (Chien e Shih, 2007; Demir et al., 2015). C'è stato infatti un aumento significativo delle emissioni globali di carbonio del 90% dagli anni '70 (Herold e Lee, 2017; Khan et al., 2019), con circa il 78% delle emissioni associate alla combustione di petrolio fossile e all'industrializzazione (IPCC, 2014). È stato stimato che ci sono 4,7 trilioni di \$ di costi ambientali esternalizzati ogni anno dai sistemi di produzione globali, 6,4 miliardi di tonnellate di anidride carbonica emesse, oltre il 20% delle emissioni globali, attraverso la produzione di beni da commerciare e 567 km<sup>3</sup> all'anno di acqua associati al solo commercio alimentare mondiale. Inoltre, gli attuali livelli di produzione e consumo globali utilizzano il 50% in più di risorse e servizi naturali rispetto a quelli rigenerati dagli ecosistemi (O'Rourke, 2014).

Perciò si capisce come mai, dato che le materie prime ed i componenti base vengono forniti alle aziende dai fornitori, le performance dei fornitori svolgano un ruolo chiave in qualsiasi catena di fornitura sostenibile, oltre ad avere un effetto considerevole sulle performance del cliente (Bai et al., 2019), come presentato più avanti nel capitolo. In altre parole, queste richieste non solo richiedono alle aziende stesse di bilanciare le performance sociali, economiche e ambientali, ma richiedono anche ai loro partner della catena di approvvigionamento di esaminare le loro prestazioni in termini di efficienza energetica, protezione ambientale e responsabilità sociale d'impresa (*Corporate Social Responsibility* o CSR) mentre perseguono obiettivi economici (Kannan, 2018; Banaeian et al., 2018). Pertanto, la selezione dei partner è diventata una questione critica per il rispetto della gestione sostenibile della catena di approvvigionamento (Govindan et al.,

2015; Oelze, 2017) e la valutazione e selezione dei partner appropriati è una delle sfide più cruciali affrontate dai managers nelle supply chain sostenibili (Lima Junior et al., 2014). Un errore nella scelta dei partner e nel processo decisionale di loro classificazione può provocare molte problematiche per le imprese a livello ambientale e di CSR lungo le catene di approvvigionamento. Ad esempio, diversi altri marchi di moda (come Zara, H&M e Forever 21) sono stati interrogati su problematiche ambientali e questioni lavorative che coinvolgono i loro partner della catena di fornitura nel documentario del 2015 "The True Cost" (Morgan, 2015).

Ciò ha portato, come presentato da (Giannakis and Papadopoulos, 2016), ad uno sviluppo di metriche di sostenibilità più accurate per quanto riguarda condizioni di lavoro, incidenti, impronta carboniosa e indici di corruzione, per tenere conto di questi costi e dei rischi associati. Ciò è comprensibile in quanto la maggior parte dell'impronta e della responsabilità sociale di un'azienda esula dal suo controllo diretto nella produzione, nell'imballaggio e nel trasporto. I recenti scandali lungo la catena di fornitura, come lo scandalo della carne di cavallo dei supermercati europei, il disastro del Rana Plaza nell'industria tessile e le condizioni di lavoro nei fornitori Apple sottolineano come questi rischi legati alla sostenibilità influenzino le aziende e pertanto un'ottica di risk management lungo la supply chain verrà presentata più avanti nel capitolo.

Per migliorare l'impronta di carbonio complessiva di un prodotto, è necessario innanzitutto assegnare l'impronta carboniosa ai singoli materiali utilizzati, all'energia, alla produzione, all'uso e al trasporto. Rispetto all'ecosostenibilità, il trasporto è l'aspetto più visibile delle catene di approvvigionamento. Le emissioni di  $CO_2$  dei trasporti ammontano a circa il 14% delle emissioni totali, sia a livello globale che dell'UE (Stern, 2006; EEA, 2011), oltre che rappresentare una delle principali fonti di emissioni di  $NO_x$ ,  $SO_2$  e PM. Nella tabella di seguito, tratta da (Dekker et al., 2012), sono presentati le emissioni ed i consumi specifici di energia per tonnellata/km. Si nota che, sebbene i dati siano aggiornati al 2013 e siano stati fatti progressi sia in ambito produzione di elettricità (per quanto riguarda i treni elettrici) che di normative inquinanti (come ad esempio l'Euro 6), le grandi navi portacontainer convengano a livello di emissioni rispetto a tutti gli altri mezzi, soprattutto se vengono utilizzati algoritmi di ottimizzazione della velocità, e quindi un abbinamento nave per le lunghe distanze, treno sulle brevi e camion solo nell'ultra-corto raggio, favorito da nodi d'interscambio nei principali scali mondiali, rappresenti la combinazione migliore da questo punto di vista.

Emissioni e consumo	Portacontainer di tipo PS (11.000 TEU)	Portacontainer di tipo S (6.600 TEU)	Treno elettrico	Treno diesel	TIR	Aereo (Boeing 747-400)
kWh/tonn/km	0,014	0,018	0,043	0,067	0.18	2
$CO_2$	7,48	8,36	18	17	50	552
$SO_x$	0,19	0,21	0,44	0,35	0,31	5,69
$NO_x$	0,12	0,162	0,10	0,00005	0,00006	0,17
PM	0,008	0,009	n/a	0,008	0,005	n/a

Tabella 5. Emissioni e consumi specifici dei trasporti, adattato da Dekker et al. (2012)

Oltre alle considerazioni sui mezzi di trasporto bisogna considerare però anche che alcuni prodotti sono più rispettosi dell'ambiente rispetto ad altri, a seconda di tre variabili (Dekker et al., 2012): in

primo luogo, il modo in cui sono stati prodotti (la loro impronta di carbonio), in secondo luogo, il modo in cui sono stati trasportati ed immagazzinati e infine se il loro valore può essere recuperato dopo l'utilizzo (logistica inversa).

Del trasporto abbiamo già parlato, ma anche lo stoccaggio dei prodotti ha un impatto ambientale sebbene questo sia meno visibile rispetto al trasporto dei prodotti, i costi di mantenimento dell'inventario giocano un ruolo importante nella progettazione della catena di approvvigionamento e più lo stoccaggio è centralizzato, minori sono i costi di stoccaggio, mentre l'impronta ambientale di stoccaggio consiste nello stoccaggio refrigerato, nella conservazione riscaldata e nell'evaporazione durante lo stoccaggio, oltre alla costruzione dell'impianto ed alle sue emissioni. Infine, secondo alcuni rapporti (Palanivelu e Dhawan, 2011) gli imballaggi rappresentano circa il 23% del peso dei rifiuti, e quindi, poiché tutti gli imballaggi devono essere trasportati al rivenditore e smaltiti, è chiaro che ridurre gli imballaggi salvaguarda l'ambiente.

Da un punto di vista teorico, già nel 1995, Wu e Dunn (1995) hanno indicato che ogni elemento nella catena del valore aziendale dovrebbe essere coinvolto nella riduzione al minimo dell'impatto ambientale totale dell'azienda dall'inizio alla fine della SC ma anche dall'inizio alla fine della vita del prodotto ciclo. La Figura 14 mostra la relazione tra la conversione delle risorse e la generazione di inquinanti. Poiché le risorse vengono utilizzate per creare le utilità desiderate, gli inquinanti sono prodotti implicitamente come sottoprodotti durante ogni fase del processo SC integrato.

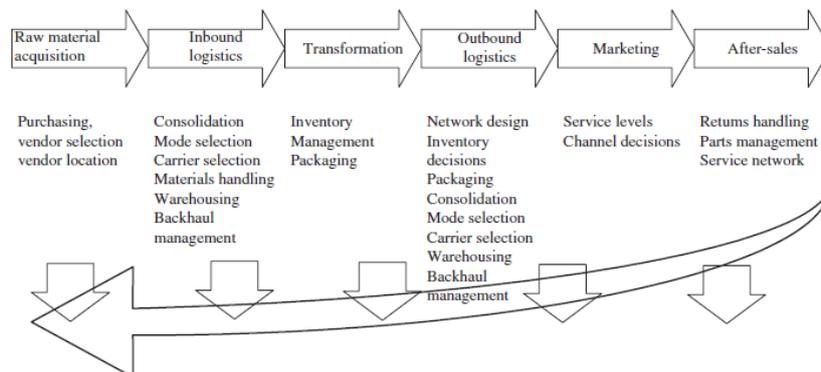


Figura 14. Catena del valore ed inquinanti lungo la stessa, tratto da Lu et al. (2007)

Tuttavia, la maggior parte delle soluzioni verdi adottate di recente, in particolare nei paesi in via di sviluppo, rimangono le tradizionali soluzioni di comando e controllo o "end-of-the-pipe" in cui un'azienda cerca di eliminare o ridurre gli impatti ambientali negativi, dopo che sono stati creati, piuttosto che adottare un approccio proattivo per ridurre le fonti di spreco o inquinamento (Eltayeb et al., 2011). L'approccio end-of-the-pipe non elimina gli inquinanti, ma semplicemente li trasforma da un mezzo all'altro (Sarkis, 2006). Inoltre, concentrare le pratiche verdi all'interno dell'organizzazione può esporre l'organizzazione a performance ambientali negative di altre organizzazioni nella sua catena di fornitura. Per ottenere un vantaggio competitivo duraturo, la sostenibilità organizzativa richiede l'intersezione di superiorità economica, ambientale e sociale. Ciò significa che le imprese dovrebbero concentrarsi sulla redditività a lungo termine che potrebbe ridurre contemporaneamente i rischi ambientali e sociali. Pertanto, la pratica GSCM è in una posizione privilegiata per sfruttare le prestazioni di sostenibilità in termini economici, ambientali e sociali.

In particolare, negli ultimi anni la gestione ambientale si è evoluta per includere attività che abbracciano i confini dell'impresa come il green purchasing (Zsidisin e Siferd, 2001), la logistica inversa (Prahinski e Kocabasoglu, 2006) e la gestione del prodotto in ottica ambientale (Snir, 2001). Esaminando centinaia di articoli sulla sostenibilità, è emerso che le pratiche sostenibili sia nella gestione della catena di fornitura (SC) o in qualsiasi altra attività aziendale siano diretti nell'ottica dei seguenti principi, come riportato da Markman e Krause (2016):

- 1) devono migliorare le performance ambientali, seguire gli standard etici per una maggiore equità sociale ed un miglioramento dell'economia;
- 2) devono prioritizzare l'ambiente in primis, la società poi e l'economia infine.

Alcune aziende hanno iniziato ad istituire incentivi al cambiamento, a vietare pratiche particolarmente problematiche (dal lavoro minorile alle sostanze chimiche pericolose) ed a sviluppare nuovi strumenti per integrare meglio la sostenibilità nel controllo qualità, approvvigionamento e progettazione (O'Rourke, 2014). Tali azioni sono motivate da quattro fattori principali, ovvero pressioni normative (guidate da un mix di politiche degli USA e legislazione dell'Unione europea), pressioni concorrenziali (sia per la riduzione dei costi che per le innovazioni nella catena di fornitura) pressioni degli stakeholders (in particolare per quanto riguarda la reputazione del marchio e le richieste di maggiore trasparenza) e rischi derivanti da interruzioni della catena di approvvigionamento (provocate da carenze regionali di risorse ed eventi meteorologici estremi).

Infatti, la gestione della catena di fornitura in ottica sostenibile (SSCM) ha anche attirato l'attenzione di politici e professionisti di tutto il mondo. Un esempio sono le Nazioni Unite e BSR (2010) che propongono linee guida pratiche per le imprese per migliorare continuamente la sostenibilità delle catene di fornitura, mentre nel sistema di scambio di quote di emissione dell'Unione europea alle aziende viene assegnata una quota iniziale per le emissioni di carbonio, che viene ridotta nel tempo, e le aziende che vogliono emettere di più devono acquistare i diritti di emissione sul mercato da altre imprese più virtuose.

La forte concorrenza tra fornitori e clienti più esigenti non solo promuove salari e diritti umani equi all'interno della società stessa, ma motiva anche le aziende a contribuire maggiormente al benessere della società attraverso il coinvolgimento nelle comunità locali (Vachon and Klassen, 2008). Una visione positiva del top management della SSCM influenza il coinvolgimento dell'azienda in iniziative e pratiche ambientali (Zsidisin e Siferd, 2001), dato che diventando più rispettosi dell'ambiente, ci si aspetta un maggiore vantaggio competitivo (Porter e Van der Linde, 1995), una maggiore immagine del marchio dell'azienda (Bai e Sarkis, 2010) e prestazioni ambientali (Hervani e Helms, 2005). Walker et al. (2008) osservano inoltre che l'impegno del middle management e il coinvolgimento dei dipendenti sono sempre più legati alle performance ambientali ed economiche dell'impresa.

Concludo questa parte introduttiva evidenziando come il SSCM permetta di fornire informazioni e assistenza tecnica alle piccole e medie imprese che non dispongono delle risorse delle grandi imprese e possono monitorare e misurare i progressi per facilitare il miglioramento ambientale (Chin et al., 2015). Nel contesto delle piccole e medie imprese, un SSCM conveniente è fondamentale per la loro sopravvivenza e crescita poiché i costi di acquisto rappresentano la quota

maggiore del fatturato, circa l'80%. Inoltre, Koh et al. (2007) hanno scoperto che l'esecuzione delle pratiche di SSCM potrebbe fornire vantaggi in termini di livello di inventario ridotto, tempi di consegna ridotti nella produzione, maggiore flessibilità, accuratezza delle previsioni, risparmio sui costi e pianificazione accurata delle risorse.

### 3.2.2. Definizione e confronto con la Logistica Inversa

Prima di dare una definizione di SSC, ricordo quella di catena di fornitura, ovvero una rete composta da tutte le parti coinvolte direttamente o indirettamente (ad es. fornitori, produttori, distributori, grossisti, rivenditore, cliente, ecc.), , nella produzione e consegna di prodotti o servizi ai clienti finali, sia a monte che a valle tramite la distribuzione fisica, il flusso di informazioni e di denaro (Chopra and Meindl, 2010). Una catena di fornitura tipica comprende cinque fasi: fornitori di componenti / materie prime, produttori, grossisti / distributori, dettaglianti e clienti, collegate attraverso flussi di prodotti, informazioni e denaro.

L'obiettivo della catena è quello di mettere a disposizione materie prime, componenti e parti, della giusta qualità, nel volume giusto, nel posto giusto e al momento giusto, in modo che il resto delle attività a valore aggiunto possa essere continuato (Eltayeb et al., 2011). Fondamentalmente, i fornitori dovrebbero garantire un supporto completo per la competitività dell'organizzazione in termini di flessibilità, affidabilità, reattività, qualità, prezzo, riciclo e rilavorazione. A tali obiettivi, le operazioni logistiche sostenibili dovrebbero aggiungere un uso ridotto di spazio, energia, persone, inventario e movimentazione dei materiali, nonché una facile tracciabilità dei materiali, una migliore rotazione delle scorte, costi di trasporto ridotti al minimo, uso ridotto di materiali di imballaggio che vengono poi riciclati (Eltayeb et al., 2011).

Pertanto, la gestione sostenibile della catena di fornitura (SSCM) può essere definita come una gestione della catena di fornitura tradizionale che incorpora lo sviluppo sociale e ambientale, ossia come l'integrazione della componente verde in ciascuna attività della catena di approvvigionamento, ovvero approvvigionamento e acquisto verdi, design verde, produzione verde, marketing verde, distribuzione verde, gestione della fine della vita del prodotto, ecc. (Min e Kim, 2012; Tian et al., 2014).

Il SSCM è quindi un termine ampio che descrive una varietà di approcci attraverso i quali le aziende lavorano con i propri fornitori per migliorare le prestazioni ambientali dei prodotti o dei processi di produzione di fornitori e clienti. Esso non è una catena di aziende con relazioni *one-to-one*, *business-to-business*, ma è invece una rete di molteplici relazioni aziendali e collaborative per il miglioramento ambientale (Lu et al., 2007). Richiede corretto coordinamento, integrazione e gestione tra i membri (imprese) della catena di approvvigionamento che include fornitori di materie prime, produttori, distributori, utenti e riciclatori (Geoffrey et al. 2002).

Come evidenziato da (Lu et al., 2007), il SSCM, essendo un sistema integrato di operazioni tra più imprese, differisce dalla logistica inversa, definita come l'insieme delle attività di logistica e rilavorazione a partire dai prodotti usati non più necessari fino a prodotti che siano nuovamente utilizzabili dai clienti. In molti casi, il produttore originale raccoglie, ricondiziona e ricostruisce i propri prodotti usati (Kim et al., 2006). Kim et al. (2006) propongono un modello per la rigenerazione per massimizzare i risparmi sui costi totali decidendo in modo ottimale la quantità di parti da lavorare in ogni impianto di produzione e il numero di parti da acquistare dai fornitori. Per quanto riguarda l'utilità della stessa, (Eltayeb et al., 2011) evidenziano come l'adozione della logistica inversa si rifletta direttamente nella riduzione dei costi dei materiali e degli imballaggi

perché l'azienda utilizza materiali riciclati o riutilizzati invece di quelli vergini. Tuttavia, l'effetto della logistica inversa sui risultati economici è molto ridotto ad indicare che i risparmi sui costi derivanti dalla logistica inversa sono di piccole dimensioni e quindi non si riflettono negli indicatori "macro" delle prestazioni economiche dell'impresa come la redditività e la produttività. Anche se, la quantificazione del risparmio dovrebbe includere anche performance ambientali e sociali a lungo termine.

### 3.2.3. Vantaggi

Una catena di fornitura sostenibile migliora le performance sociali, influenza la competitività di un'impresa e le performance economiche delle sue catene di fornitura (Seuring et al., 2008), ciò perché mentre le SC tradizionali considerano le relazioni lungo la catena e i flussi di materiali solo per massimizzare la redditività e le prestazioni operative, il SSCM valuta ulteriori fattori sociali e ambientali per raggiungere uno sviluppo sostenibile (Papetti et al., 2019; Li et al., 2006).

Le aziende che implementano le pratiche GSCM hanno beneficiato di risparmi sui costi (conservazione dei materiali, riduzione dell'uso di energia e acqua), migliore immagine pubblica e minore responsabilità ambientale (Chin et al., 2015). Ciò permette di ridurre i prezzi di beni e servizi, portando all'attrazione di nuovi clienti ed alla fidelizzazione di quelli esistenti, facendo accrescere le dimensioni del mercato, le vendite, il margine di profitto e il ritorno sull'investimento degli azionisti. Infine, l'implementazione di tali pratiche contribuisce ad una produzione più pulita, che può eliminare i costi associati a multe, battaglie legali, gestione dei rifiuti e danni alla reputazione. Inoltre, secondo Flammer (2013), il comportamento eco-compatibile delle aziende è strettamente correlato a significativi aumenti dei prezzi delle azioni, mentre le aziende con comportamenti eco-nocivi devono affrontare una diminuzione del prezzo delle stesse, per via delle scarse prospettive di lungo periodo delle imprese. Pertanto, le aziende sensibili all'impronta ambientale potrebbero essere in grado di attrarre risorse da sempre maggiori investitori socialmente interessati.

Oltre ai vantaggi derivati direttamente dall'applicazione di iniziative e programmi sostenibili, un ulteriore fattore di vantaggio è dato dalla collaborazione tra i partner lungo la catena, che vedono migliorate le loro prestazioni ambientali, riducendo gli sprechi e consentendo un risparmio sui costi (Linton et al., 2007).

Più specificamente, due risultati diretti della collaborazione ambientale sono lo sviluppo di routine di condivisione della conoscenza e lo sviluppo della capacità di integrare risorse esterne (Dyer e Singh, 1998). Una tale combinazione di risorse può portare ad un vantaggio competitivo, dato che la condivisione e l'integrazione delle informazioni migliorano l'efficienza della catena di approvvigionamento attraverso scorte inferiori e migliori prestazioni di consegna (Vachon and Klassen, 2008) ma anche permette un ciclo di innovazione più veloce ed una maggiore qualità del prodotto (Dyer, 1996). La collaborazione coi fornitori sulle questioni ambientali è stata collegata al miglioramento di tre dimensioni tradizionali delle performance produttive, ovvero qualità, consegna e flessibilità, oltre alle performance ambientali, dato che la collaborazione ambientale con i fornitori primari viene prevalentemente collegata a prestazioni di consegna e flessibilità superiori mentre quella coi clienti è prevalentemente collegata ad una migliore qualità (Vachon and Klassen, 2008).

Oltre a ciò, (Noci, 1997) ne evidenzia i seguenti benefici per le imprese:

- 1) Riduzione della quantità di componenti forniti con basse prestazioni ambientali e, quindi, evitare implicazioni gestionali negative sulla catena del valore del cliente;
- 2) Controllo efficiente del costo dei prodotti "verdi", che permette di ridurre la differenza di prezzo tra prodotti ecocompatibili e non, a causa dei maggiori costi di produzione e dei costi delle materie prime;
- 3) Riduzione dei tempi di risposta dell'azienda al mercato e quindi favorire frequenti modifiche delle performance ambientali chiave del prodotto;
- 4) Evitare i problemi associati all'immagine "verde" dell'azienda che dipende anche dall'efficienza ambientale dei fornitori.

In conclusione, i risultati di vari studi implicano che le iniziative di filiera verde orientate all'esterno, come gli acquisti verdi e la logistica inversa, hanno scarso effetto sulle performance interne dell'azienda. Ciò può indicare che i vantaggi di queste iniziative possono riflettersi su parti esterne piuttosto che sull'azienda. Sebbene il vantaggio di tale iniziativa possa riflettersi indirettamente sull'azienda, attraverso l'ottenimento di materiali verdi e altri input, l'effetto diretto va ai fornitori. L'ecodesign invece è un tipo di iniziative di filiera verde focalizzate internamente, ciò significa che l'impresa cerca di far migliorare internamente le caratteristiche ambientali dei propri prodotti, con poca cooperazione o interazione con parti esterne come fornitori e clienti, così che l'impatto di tale miglioramento può essere direttamente collegato alla performance interna dell'azienda.

Infine, come evidenziato da (Seuring et al., 2008), sebbene i vantaggi che si otterrebbero dall'attuazione di una qualsiasi delle singole azioni nelle catene di approvvigionamento esplorate in questo studio sono individualmente piccoli, i vantaggi cumulativi che potrebbero essere ottenuti tra le catene di fornitura e all'interno dei parchi industriali sono sostanziali, dato il numero di piccole e medie imprese. Ciò significa che a medio termine le aziende possono trarre vantaggio dalle loro pratiche ecologiche, anche se non così elevati nel breve termine, dato che le pratiche verdi sono una potente strategia a lungo termine dal punto di vista finanziario (Agyabeng-Mensah et al., 2020).

#### 3.2.4. Barriere all'implementazione

Come presentato nel capitolo precedente, le organizzazioni affrontano molte barriere quando tentano di innovare per la sostenibilità (Laukkanen e Patala, 2014). Queste barriere devono essere identificate ed affrontate per consentire l'adozione, l'implementazione e il potenziamento delle innovazioni di sostenibilità della catena di fornitura, sebbene sia praticamente impossibile per queste organizzazioni eliminare simultaneamente tutte queste barriere a causa della scarsità di risorse a loro disposizione.

Per superare queste barriere, possono essere adottate diverse strategie, come l'investimento nelle ultime tecnologie e la motivazione dei dipendenti attraverso incentivi a pensare fuori dagli schemi e ad adottare pratiche sostenibili all'interno dell'organizzazione. Inoltre, il supporto normativo è anche molto essenziale sotto forma di politiche di supporto e politiche fiscali per le organizzazioni che adottano pratiche verdi e sostenibili, ma anche nel fornire accesso alle infrastrutture e alle tecnologie disponibili con altri paesi. Infatti, i governi potrebbero sovvenzionare i prodotti verdi e fornire riduzioni fiscali sui progetti di filiera verde per invogliare più aziende ad adottare una cultura più green (Khan et al., 2019). Si potrebbero adottare politiche per costringere tutte le

aziende a incorporare pratiche di logistica sostenibile per contribuire a salvaguardare l'ambiente. Inoltre, le organizzazioni governative, le ONG e altre istituzioni incaricate di garantire la protezione dell'ambiente e la sostenibilità possono anche promulgare campagne di formazione green, riciclo, trasporto sostenibile, stoccaggio ecologico e una corretta gestione dei rifiuti per ridurre i rifiuti, l'energia consumata ed emissioni di gas serra (Agyabeng-Mensah et al., 2020).

Nel recente studio di (Gupta et al., 2020), i risultati mostrano che "mancanza di competenza tecnica e formazione", "mancanza di capacità di ricerca e sviluppo e innovazione", "popolarità della tecnologia tradizionale", "elevato investimento iniziale nella tecnologia più recente" e "paura del carico di lavoro aggiuntivo e perdita di flessibilità" sono i primi cinque ostacoli che devono affrontare le aziende manifatturiere indiane nella loro ricerca per l'adozione e l'attuazione di pratiche di innovazione della catena di fornitura sostenibili. Mentre da (Roy et al., 2020) emergono le quattro strategie che sono rappresentate come le più promettenti per superare tali barriere, ovvero "Risparmio di materiali e migliore utilizzo dei sottoprodotti", "Tecnologie per l'energia rinnovabile", "Migliore utilizzo degli articoli scartati generati dal processo" e "Introduzione dell'applicazione dei big data", con quest'ultima classificata come la strategia numero uno tra tutte le altre, anche in ottica Industria 4.0, mentre le prime tre sono le soluzioni più pratiche ed economicamente realizzabili per la sostenibilità ambientale (Naidoo e Gasparatos, 2018).

### 3.2.5. Gestione dei rischi nell'ambito del SSCM

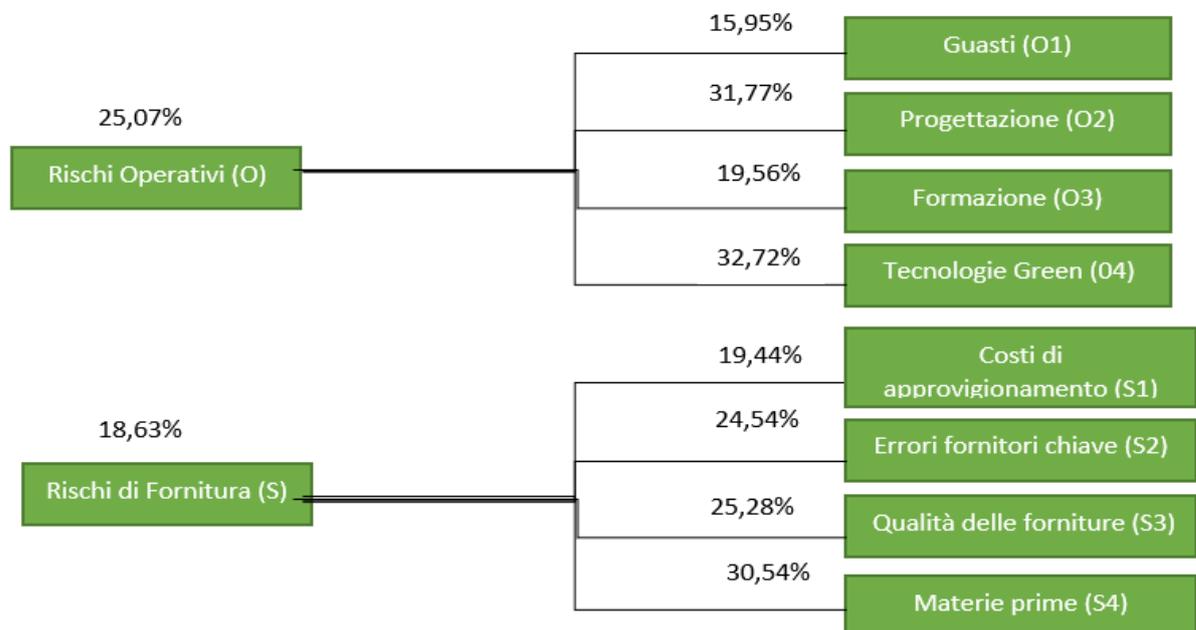
La sostenibilità può essere considerata come il grado in cui le attuali decisioni delle organizzazioni hanno un impatto sulla situazione futura dell'ambiente naturale, delle società e della redditività aziendale (Krysiak, 2009). Pertanto, le strategie di sostenibilità dovrebbero considerare il livello di incertezza futura e quindi i rischi che le decisioni possono imporre all'ambiente naturale e sociale, oltre ai costi di investimento necessari per rendere le filiere più sostenibili (Giannakis and Papadopoulos, 2016).

I risultati del loro studio empirico mostrano che la maggior parte dei rischi più significativi legati alla sostenibilità si riferiscono a rischi endogeni che derivano dalle operazioni delle aziende. Questi rischi sono generalmente controllabili o parzialmente controllabili se vengono messe in atto strategie appropriate. È stato inoltre riscontrato che i principali rischi esogeni correlati alla sostenibilità sono correlati ai rischi endogeni, il che porta alla conclusione che attraverso un processo di gestione del rischio olistico e sistematico, i rischi legati alla sostenibilità potrebbero essere contenuti. Mentre per quanto riguarda la gestione dei rischi, quando si confrontano le risposte per i rischi legati alla sostenibilità e quelli tipici della catena di fornitura, si è visto che sebbene le risposte di controllo e riduzione siano utilizzate da entrambi gli eventi di rischio, la flessibilità, la condivisione ed il trasferimento tramite assicurazione sono generalmente preferite per i rischi tipici.

Qui di seguito riporto le principali categorie di rischio, come ricavate da (Mangla et al., 2015), presentate e priorizzate in Figura 15:

- 1) Rischio operativo (O), definito come il rischio di perdita derivante da processi, operazioni, metodi, forza lavoro, sistemi, ecc. interni inadeguati o guasti. La priorità più alta è rappresentata dalla mancanza della tecnologia green necessaria per l'adozione agevole di pratiche SSC efficienti e quindi le aziende devono sviluppare e aggiornare la tecnologia verde utilizzata nei loro settori specifici (Mudgal et al., 2009; Toke et al., 2012).

- 2) Rischio finanziario (F), suggerisce che le varie attività influenzano il flusso di cassa ed i pagamenti, il che può influenzare di conseguenza le posizioni finanziarie dell'organizzazione (Yang e Li, 2010). Di questa categoria, il rischio di restrizioni finanziarie occupa la massima importanza.
- 3) Rischio di fornitura (S) indica l'importanza della corretta fornitura di materiali e dei fornitori poiché qualsiasi interruzione della fornitura può causare una riduzione dei vantaggi ecologico-economici dell'organizzazione (Qianlei, 2012; Mangla et al., 2014c). Pertanto, i manager dovrebbero interagire con i fornitori e stabilire una collaborazione ambientale tra organizzazione e fornitore per rendere più agevole la fornitura di materiale sostenibile (Diabat e Govindan, 2011).
- 4) Rischio di recupero del prodotto (PR), ossia il considerare le incertezze associate al recupero dei prodotti usati per migliorare l'efficienza del GSC (Mangla et al., 2013b). Dei rischi specifici, quelli di inventario e di progettazione della capacità nei centri di ritrattamento hanno ottenuto la massima priorità.
- 5) Rischio governativo e organizzativo (GO) include le politiche governative fallaci o inadeguate in termini di livello di supporto ambientale governativo, insieme alle incertezze nel comportamento dei diversi legami relativi al SSCM. Il fallimento dei criteri di gestione è al primo posto ed evidenzia il fatto che il coinvolgimento, il supporto e l'impegno a livello manageriale sono molto importanti nell'adozione delle pratiche GSC (Mudgalet al., 2009; Diabat e Govindan, 2011; Mangla et al., 2014).
- 6) Rischio della domanda (D) occupa l'ultimo posto nell'elenco delle priorità. Per massimizzare i guadagni ecologico-economici del SSCM, è fondamentale avere una domanda di prodotti verdi sul mercato. Questa categoria contiene quattro rischi specifici. Il rischio legato alla concorrenza è al primo posto ed indica che le aziende del caso corrono enormi rischi a causa dell'enorme concorrenza nel mercato, anche e soprattutto a livello globale. Pertanto, l'approccio e la strategia dei concorrenti riguardo alle iniziative SSCM influenzerebbero la domanda di prodotti verdi dal punto di vista industriale. Viene anche presentato il rischio di effetto frusta, o *bullwhip effect*, ovvero la distorsione informative sulla domanda lungo la catena, sottolineando quindi la necessità per i managers di sviluppare misure per una previsione accurata della domanda.



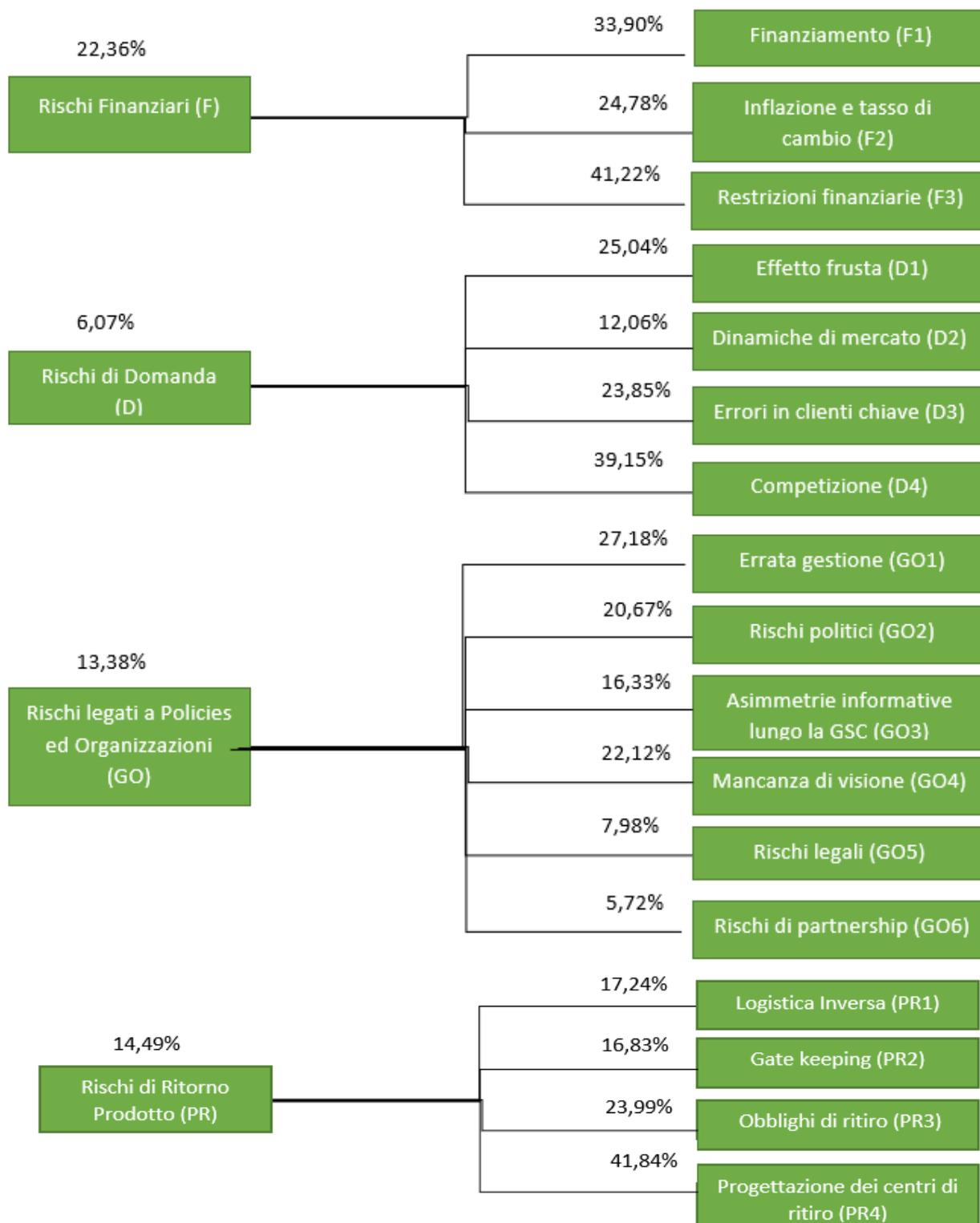


Figura 15. Rischi nel SSCM, tratto da Mangla et al. (2015)

## 3.3 Industria 4.0

### 3.3.1. Introduzione e contesto

In quanto parti interessate essenziali per uno sviluppo sostenibile globale, le organizzazioni industriali devono passare a un nuovo paradigma produttivo che ponga l'accento sulla creazione di valore sostenibile (BMZ, 2016).

Come riportato da (Stock et al., 2018), la creazione di valore industriale ha subito cambiamenti radicali negli ultimi 250 anni che non seguono un andamento lineare ma possono essere determinati da quattro fasi, le cosiddette rivoluzioni industriali, caratterizzate dal passaggio dal lavoro umano a quello meccanico e da un aumento della produttività.

A partire dagli ultimi anni, si può osservare un'ulteriore evoluzione tecnologica dei sistemi di produzione. Questa cosiddetta quarta rivoluzione industriale (Industria 4.0), basata su Cyber Physical Systems (CPS), tecnologie cloud e il concetto di "gemello digitale", è guidata dalla rete digitale di moduli di creazione del valore a livello di fabbriche e dei processi produttivi (Stock and Seliger, 2016).

Una delle principali innovazioni che hanno permesso tutto ciò è, come evidenziato da (Wan et al., 2015), l'introduzione del protocollo Internet IPv6 nel 2012, che permette di disporre di indirizzi sufficienti per consentire il collegamento in rete diretto di oggetti intelligenti tramite Internet. Ciò significa che per la prima volta in assoluto è possibile cercare risorse di rete, informazioni, oggetti e persone per creare l'Internet delle Cose e dei Servizi (Internet of Things and Services - IoTS), così che tutti possano partecipare direttamente al processo produttivo attraverso Internet, ossia la cosiddetta produzione sociale.

Tutto ciò perché, come evidenziato da (Bonilla et al., 2018), l'Industria 4.0 nasce dalla sinergia tra la disponibilità di tecnologie digitali innovative e la domanda da parte dei consumatori di prodotti di alta qualità e personalizzati, con l'obiettivo dell'incremento della produttività, della crescita dei ricavi e della competitività, ma anche della loro sostenibilità.

Per (Nascimento et al., 2019) inoltre, l'idea di Industria 4.0 è sostenuta dal progresso delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (Information and Communication Technologies - ICT) e dall'archiviazione dei dati. In questo senso, è possibile integrare i flussi di lavoro delle tecnologie avanzate in metodologie di miglioramento continuo, incorporando fattori come Internet of Things (IoT), realtà aumentata, produzione additiva (Additive Manufacturing - AM), big data, cloud computing, simulazione, automazione industriale e cybersecurity.

Tuttavia, l'Industria 4.0 ha assunto sempre maggiore importanza, in quanto si prevede che essa trasformerà la produzione industriale e la società, mirando a risultati economici, ecologici e sociali, ovvero alla Triple Bottom Line della sostenibilità. Di conseguenza, le aspettative della società riguardo alla diminuzione degli impatti ambientali della produzione industriale sono aumentate costantemente, aspettandosi che le aziende non si concentrino esclusivamente sulla massimizzazione del profitto, incuranti delle esternalità sociali ed ambientali (Müller et al., 2018). A tal proposito, la principale pressione ambientale che sulle tecnologie digitali è legata alla tendenza all'aumento della domanda di energia e all'urgenza di adottare sistemi energetici a basse emissioni (Bonilla et al., 2018).

(de Sousa Jabbour et al., 2018a) sostiene che i principi e le pratiche dell'Industria 4.0 sbloccheranno il pieno potenziale delle organizzazioni sostenibili, muovendosi verso una società più sostenibile e una produzione sostenibile a livello mondiale.

Infatti, all'interno di questo contesto sociotecnico, il Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente considera la trasformazione della produzione industriale come un "nuovo paradigma

economico in cui la ricchezza materiale non viene fornita necessariamente a scapito dei crescenti rischi ambientali, scarsità ecologiche e disparità sociali" (Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente, 2011).

L'Industria 4.0 potrebbe pertanto offrire un'enorme opportunità per allineare gli obiettivi di uno sviluppo sostenibile con la trasformazione digitale in corso nello sviluppo industriale, che a sua volta ha anche il potenziale per trasformarsi in una minaccia se gli obiettivi di sostenibilità non vengono presi in considerazione durante l'implementazione dell'Industria 4.0 (Beier et al., 2020).

### 3.3.2. Definizione di Industria 4.0

Il termine tecnologico Industria 4.0 è stato plasmato dai ricercatori tedeschi Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas e Wolfgang Wahlster come un cambio di paradigma per mantenere la competitività dell'economia tedesca nel lungo termine (Kagermann and Lukas, 2011), integrando le tecnologie Internet of Things and Services (IoTS) nella creazione di valore industriale (Müller et al., 2018). L'industria 4.0 mira a connettere risorse, servizi e persone in tempo reale durante tutta la produzione sulla base di sistemi cyber-fisici (CPS) e Internet delle Cose (IoT) (Bauernhansl et al., 2016), collegando il mondo digitale e quello fisico. Pertanto, i rigidi concetti di automazione della terza rivoluzione industriale saranno superati per via della crescente complessità e dei nuovi requisiti di flessibilità (Reinhart, 2017). Grazie a questa flessibilità, l'Industria 4.0 mira a superare le sfide contemporanee, come l'intensificazione della concorrenza globale, la volatilità della domanda e la personalizzazione e la riduzione dei cicli di vita dei prodotti (Müller et al., 2018).

Secondo il National Institute of Standards and Technology (NIST), l'Industria 4.0, o *smart manufacturing*, è un sistema di produzione cooperativo completamente integrato che risponde in tempo reale agli stimoli esterni ed interni per soddisfare le mutevoli esigenze e condizioni in fabbrica, nella rete di fornitura e nelle esigenze dei clienti.

Essa integra le risorse produttive con sensori, piattaforme informatiche, tecnologie comunicative, modellazione ad alta intensità di dati, sistemi di controllo, simulazione ed ingegneria predittiva. Ciò viene reso possibile usando tecnologie come sistemi cyber-fisici, Internet delle Cose, cloud computing, elaborazione orientata ai servizi, intelligenza artificiale e *data science* (Kusiak, 2018). L'essenza dell'Industria 4.0 è quindi richiudibile in sei pilastri: tecnologia e processi produttivi, materiali, dati, ingegneria predittiva, sostenibilità e condivisione delle risorse e networking.

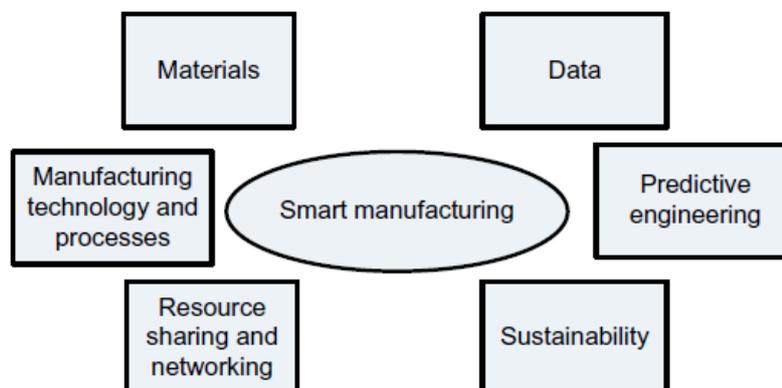


Figura 16. Pilastri dello smart manufacturing, tratto da Kusiak (2018)

Concludo questa sottosezione, citando (Beier et al., 2020), che osserva come l'Industria 4.0 non sembri essere uno sviluppo nettamente definito e omogeneo, quanto piuttosto un termine collettivo di sviluppi diversi, e quindi non univocamente definibile. Una ragione di ciò potrebbe essere l'origine del concetto stesso, spinta da una motivazione politica piuttosto che puramente

scientifico. A ciò si aggiunge il fatto che la maggior parte delle caratteristiche chiave è associata a più di una categoria e livelli di sistema. L'enorme sovrapposizione di caratteristiche chiave tra tutte le categorie sottolinea come l'Industria 4.0 sia uno sviluppo da un punto di vista più ampio, sociotecnico, che non può e non deve essere ridotto a meri aspetti tecnici (Davies et al., 2017).

### 3.3.3. Caratteristiche del paradigma Industria4.0

L'industria 4.0 mira a raggiungere un flusso continuo di informazioni e pianificazione attraverso i diversi livelli ed entità di creazione di valore industriale (Stock et al., 2018):

- L'integrazione orizzontale si riferisce al continuo collegamento in rete e scambio di informazioni tra attori attraverso l'intera rete di creazione di valore collegandone tutti i moduli;
- L'integrazione verticale descrive la connessione tra i diversi livelli di aggregazione e gerarchici di un modulo di creazione di valore: dalle stazioni di produzione fino alle reti di imprese attraverso le celle di produzione, le linee, le fabbriche, le aziende, consentendo, tra le altre cose, la possibilità di sistemi autocontrollanti.
- L'integrazione dell'ingegneria end-to-end descrive la connessione di tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto: dall'acquisizione della materia prima alla produzione, all'uso del prodotto e al fine vita del prodotto, offrendo nuove possibilità e modelli di business.

Nella figura di seguito, tratta da (Stock and Seliger, 2016), sono rappresentate tutte le attività della catena del valore e di fornitura all'interno del contesto 4.0. In particolare, sono evidenziate l'importanza del cloud come elemento trasversale a tutta la catena del valore ma anche la presenza dei moduli del valore (processo, prodotto, organizzazione ed equipaggiamento) a livello produttivo.

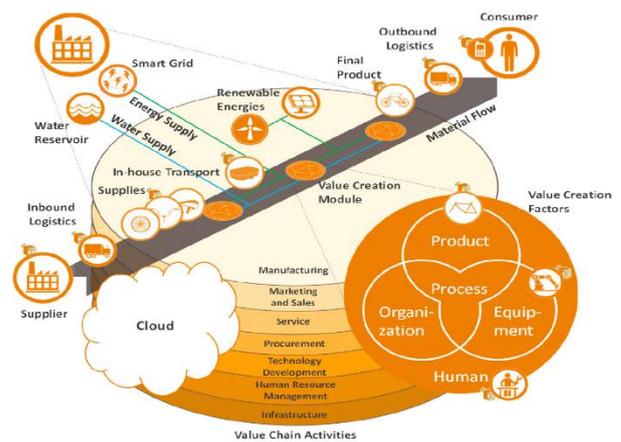


Figura 17. Paradigma 4.0, tratto da Stock and Seliger (2016)

L'approccio tipico per l'Industria 4.0 è la Produzione Sociale, che permette di collegare direttamente le esigenze dei clienti e le industrie, ma deve essere basata su tecnologie abilitanti, come sistemi integrati, rete di sensori wireless, robot industriali, stampa 3D, cloud computing e big data. Soprattutto, dopo che la tecnologia di stampa 3D sarà diventata popolare, verrà modificata la modalità di produzione più tradizionale. Un nuovo modello di produzione sociale diventerà una parte importante dell'industria, in cui i confini dell'industria tradizionale scompariranno ed il grande pubblico parteciperà alla progettazione, alla vendita e al miglioramento dei nostri prodotti (Wan et al., 2015). Si sta andando infatti, come evidenziato da (Roblek et al., 2016), verso l'istituzione di un canale di comunicazione per il continuo scambio di informazioni sui bisogni e sulle singole situazioni in tempo reale tra le macchine stesse (M2M). Le macchine trasmettono dati in streaming tramite sensori wireless e inviano questi dati ai centri dei fornitori di servizi / prodotti intelligenti, dove vengono analizzate grandi quantità di dati, con lo scopo dell'adattamento individuale orientato al cliente di prodotti e servizi che aumenterà il valore aggiunto per organizzazioni e clienti.

Queste tecnologie, quando integrate nella produzione, consentono l'emergere di proprietà specifiche che caratterizzano l'industria4.0. Esse sono automazione, digitalizzazione,

decentralizzazione (prendere decisioni indipendenti e produrre localmente, con conseguente riduzione delle gerarchie organizzative), virtualizzazione (creazione di una copia virtuale di una fabbrica collegando i dati dei sensori con i modelli dell'impianto virtuale e la simulazione modelli), acquisizione ed elaborazione dati e comunicazione dati in tempo reale (creando quindi la capacità di fornire immediatamente le soluzioni derivate) (Bonilla et al., 2018).

In conclusione, l'Industria 4.0 riflette il cambio della produzione dalla modalità centralizzata alla modalità distribuita, rappresentando la relazione interattiva tra il mondo virtuale e il mondo reale tramite il ruolo importante della creazione di CPS. Inoltre, i macchinari di produzione industriale non si limitano a elaborare i prodotti ma comunicano con le macchine per insegnare loro come operare attraverso il sistema di comunicazione, ma addirittura è probabile che la produzione permetterà di condividere attrezzature produttive, software, competenze e, soprattutto, la modellazione collaborativa e lo spazio della creatività (Kusiak, 2018).

Essa imposterà una nuova modalità di produzione, in cui i prodotti e servizi sono altamente flessibili, personalizzati ed economici. In questa modalità di produzione sociale, i confini dell'industria tradizionale scompariranno e nasceranno nuove forme di attività e cooperazione. Inoltre, nell'Industria 4.0, sarà possibile simulare tutte le fasi del processo di produzione e rappresentare la loro influenza sulla produzione, consentendo di calcolare i costi di set-up specifici del prodotto e di ridurre al minimo la riconfigurazione delle risorse di produzione. Sarà inoltre possibile valutare i rischi rilevanti e simulare i diversi costi e margini dei diversi fornitori, compresa la simulazione dell'impatto ambientale associato all'utilizzo di un fornitore (Wan et al., 2015).

#### 3.3.4. Tecnologie base dell'Industria 4.0

Dopo aver presentato nei paragrafi precedenti le caratteristiche principali dell'Industria 4.0, vengono presentate, anche tramite la Figura 9, in questo paragrafo le quattro tecnologie base, che sono i fattori chiave della trasformazione tecnologica. Essi sono i sistemi cyber-fisici (CPS), l'Internet delle Cose (IoT), il Cloud e la produzione additiva (AM).

I sistemi cyber-fisici (CPS) sono sistemi tecnologici che integrano il cyberspazio con processi e oggetti fisici al fine di trasformare macchine e dispositivi produttivi (come un CNC, un tornio, o una stazione di saldatura) in una rete, in modo che i dati in tempo reale siano disponibili per prendere decisioni come la prioritizzazione degli ordini di produzione, l'ottimizzazione delle attività, richieste di manutenzione, ecc. (Lee et al., 2015). Durante il funzionamento in tempo reale, i CPS e la relativa acquisizione ed elaborazione dei dati richiedono una grande quantità di dati che vengono memorizzati e possono essere recuperati in qualsiasi momento. È il CPS che rende adattabile l'intera fabbrica (Ivanov et al., 2016; Wang et al., 2015).

Nel sistema quindi, il computer funge da cervello e gli equipaggiamenti fungono da corpo, ossia, al variare delle modifiche, la rete informatica prende la decisione e la attua attraverso i dati raccolti dalle macchine (Wan et al., 2015).

La seconda parte del sistema è l'Internet delle Cose, che si riferisce all'interazione da macchina a macchina senza intervento umano (Xu et al., 2014). L'IoT è un'infrastruttura della tecnologia dell'informazione che consente la raccolta e la trasmissione di dati tra dispositivi, con conseguente identificazione, localizzazione, tracciamento e monitoraggio di oggetti (Li et al., 2017). Codici a barre, sensori wireless ed identificazione a radiofrequenza (RFID) sono tutti esempi di tecnologie che contribuiscono alla espansione dell'Internet delle Cose (Zhang et al., 2017).

Quindi, una grande varietà di sensori nell'Industria 4.0 monitorano tutti i tipi di dati durante il funzionamento di un processo di produttivo e poi vengono trasmessi alla replica virtuale del

sistema per generare un gemello digitale che mappi l'intero processo di produzione (Strohmeier, 2017). Questo gemello digitale è disponibile per tutte le parti interessate (ingegneri, operatori di linea, gestore dell'impianto) in qualsiasi momento e copre non solo i dati delle apparecchiature di produzione, ma anche il comportamento dei processi e dei componenti del sistema durante le operazioni produttive (Stock et al., 2018).

L'IoT implica l'estensione della connettività Internet a dispositivi come laptop, computer, tablet, telefoni cellulari e così via in qualsiasi punto del mondo per connettersi, interagire, scambiare dati con l'utente e sistemi fisici per consentire il monitoraggio remoto e controllo del sistema fisico. (Jena et al., 2020). Nell'IoT, esiste una rete di dispositivi in cui ogni dispositivo ha un'identificazione univoca attraverso il sistema informatico a cui è connesso, che possono essere controllati a distanza con elevata precisione ed efficienza. Quindi, l'IoT rende il sistema intelligente, e questo è ciò che ha portato alla rivoluzione industriale nota come Industria 4.0 (Kamble et al., 2018).

La produzione cloud si riferisce ad una rete virtuale in cui i fornitori forniscono risorse produttive ed i clienti possono accedere ai loro servizi, come la progettazione, la simulazione e il test del prodotto su richiesta. Le risorse produttive disponibili diventano servizi che vengono visualizzati su una piattaforma online, con lo scopo di condividere le risorse e migliorare la fornitura di servizi di produzione (Liu e Xu, 2017). I vantaggi offerti dal cloud computing sono le economie di funzionamento, la velocità del servizio, l'enorme scala di operazioni e l'accessibilità, poiché è possibile accedervi in qualsiasi parte del mondo, indipendentemente dalla distanza del cloud (Yu et al., 2017).

Essa si è resa necessaria in quanto la maggior parte dei sistemi informatici esistenti negli impianti di produzione non ha i requisiti necessari per gestire i volumi di dati derivati dall'IoT. Pertanto, è necessario fornire hub altamente automatizzati e specializzati, che consentano l'archiviazione di grandi quantità di dati (Bauernhansl et al., 2014b). Il cloud computing è la fornitura di capacità e servizi di elaborazione o capacità di archiviazione per l'archiviazione distribuita dei dati richiesti, ossia un pool condiviso di risorse (computer o server) configurabili per fornire rapidamente servizi di immagazzinamento dati e calcolo con uno sforzo di gestione minimo (Jena et al., 2020).



Figura 18. Tecnologie 4.0, tratto da Russmann et al. (2015)

La produzione additiva (AM), di cui verrà discusso più approfonditamente nel paragrafo 3.10, è la produzione di componenti senza la necessità di strumenti specializzati e capacità produttiva, se non una stampante 3D o simili, rappresentando la prototipazione flessibile e connessa di componenti personalizzati su larga scala (Holmström et al., 2016). In questo contesto, l'AM è rilevante perché rende possibile l'uso di principi di economia circolari utilizzando gli scarti produttivi o i rifiuti stessi per generare nuovi prodotti a valore aggiunto (Nascimento et al., 2019).

### 3.3.5. Vantaggi

Le tecnologie dell'Industria 4.0 possono consentire l'allocazione efficiente di risorse come materiali, energia, acqua e prodotti, utilizzando dati in tempo reale dai sistemi di produzione e dai partner della catena di fornitura. Ciò si traduce in decisioni di produzione più sostenibili (Stock and Seliger, 2016). Pertanto, la raccolta dei dati, gli indicatori di tracciamento e monitoraggio, la condivisione delle informazioni, il processo decisionale, il coordinamento tra le aree organizzative e i partner della catena di fornitura costituiscono tutti fattori tecnici e organizzativi che possono influenzare l'integrazione dell'Industria 4.0 e il processo decisionale di produzione sostenibile dal punto di vista ambientale.

L'industria 4.0 può promuovere la produzione sostenibile dal punto di vista ambientale consentendo lo sviluppo di prodotti verdi, processi di produzione verdi e una gestione della catena di approvvigionamento verde come mai prima d'ora. Tuttavia, la sinergia tra Industria 4.0 e produzione sostenibile dal punto di vista ambientale dipende da fattori critici di successo (de Sousa Jabbour et al., 2018a).

Qui di seguito sono riportati i principali vantaggi ricavati dall'implementazione dell'Industria 4.0 (Bonilla et al., 2018; Müller et al., 2018; Roblek et al., 2016). Essi sono stati raggruppati per maggiore comprensibilità in vantaggi in termine di valore per il cliente (VC), benefici per il processo (P) ed in ottica sostenibilità (S):

- VC1) Maggiore personalizzazione dei prodotti secondo le richieste specifiche dei clienti;
- VC2) Maggiore agilità con conseguente riduzione dei tempi di consegna;
- VC3) Tracciabilità delle materie prime e dei componenti lungo la filiera produttiva;
- VC4) Risposta in tempo reale ai bisogni del cliente con campagne di marketing mirate;
- VC5) Maggiore qualità dei prodotti grazie alla tracciabilità delle materie e del sistema produttivo;
- VC6) Nuovi modelli di business, basati su cloud, servizi e *retrofitting*.
- P1) Maggiore efficienza produttiva grazie al tracciamento ed al monitoraggio in tempo reale;
- P2) Modularità e flessibilità dell'impianto produttivo, permettendone la riconfigurazione;
- P3) Apprendimento delle macchine grazie ai dati storici (*Machine Learning*);
- P4) Test virtuali del layout produttivo grazie ai "gemelli virtuali";
- P5) Migliore integrazione verticale dei reparti produttivi e delle funzioni aziendali;
- P6) Migliore integrazione orizzontale per ottimizzare la catena di fornitura;
- P7) Integrazione digitale end-to-end, ossia dei processi aziendali nella catena del valore;
- P8) Ottimizzazione dei costi grazie ad una migliore trasparenza delle informazioni.
- S1) Manutenzione predittiva per una maggiore durata dei macchinari;
- S2) Produzione dei ricambi in loco tramite AM;
- S3) Riduzione di sprechi e scarti produttivi;
- S4) Riduzione del consumo di energia, ottimizzando i bilanciamenti di carico;
- S5) Progettazione prodotto sostenibile (DFE, DFD, LCA, eco-design);
- S6) Produzione decentralizzata per ridurre i costi logistici e l'impatto ambientale;
- S7) Efficienza logistica, riducendo le consegne errate o difettose ed i tempi di attesa;
- S8) Vantaggi per i dipendenti, migliorandone l'apprendimento e la soddisfazione sul lavoro.

Concludo questa sezione citando (Jena et al., 2020), per cui l'implementazione di pratiche di sostenibilità porta al miglioramento di tutti gli indicatori chiave di prestazione. Si può osservare che la produzione totale è stata aumentata del 13,24%, la percentuale di scarti di processo è diminuita del 12,79%, l'OEE è migliorato del 12,94%, i tempi di fermo totale ridotti del 30,58%,

MTBF aumentato del 24,68%, MTTR ridotto del 25,58%, reclami dei clienti ridotti del 30%, produzione di rifiuti è diminuita del 71,7%, il consumo specifico di energia è diminuito del 9,33%, l'impronta di carbonio specifica è diminuita del 9,33% e il consumo specifico di acqua è diminuito del 3,12% dopo aver implementato il concetto di fabbrica intelligente nell'Industria 4.0. Allo stesso tempo, il periodo di recupero di questo investimento è calcolato in 3 anni e risulta essere molto interessante ed efficace.

### 3.3.6. Fattori abilitanti l'Industria 4.0

L'Industria 4.0 al di là della sua funzione originaria di fattore chiave per la supremazia tecnologica tedesca, è diventata nel tempo il fornitore di tecnologie chiave per una produzione più sostenibile. È pertanto da questi aspetti che bisogna partire per andare a scovare i principali drivers all'adozione. Come riportato da (Müller et al., 2018) infatti, le opportunità ambientali e sociali sono un fattore determinante per una tendenza verso l'implementazione dell'Industria 4.0. Infatti, la possibilità di permettere la riduzione dei rifiuti, dell'energia e del consumo di risorse, nonché il miglioramento delle condizioni di lavoro portano a una tendenza verso l'implementazione dell'Industria 4.0.

Nel loro paper, (Harikannan et al., 2020), di cui di seguito sono riportati i principali risultati anche tramite la Figura 19, affrontano i driver dell'adozione dell'Industria 4.0 di per sé, ossia:

- la pressione sociale e la consapevolezza della domanda (D18);
- le politiche governative di supporto all'Industria 4.0 (D12);
- il coinvolgimento e il supporto del top management (D15);
- il supporto e le regolamentazioni governative (D16).

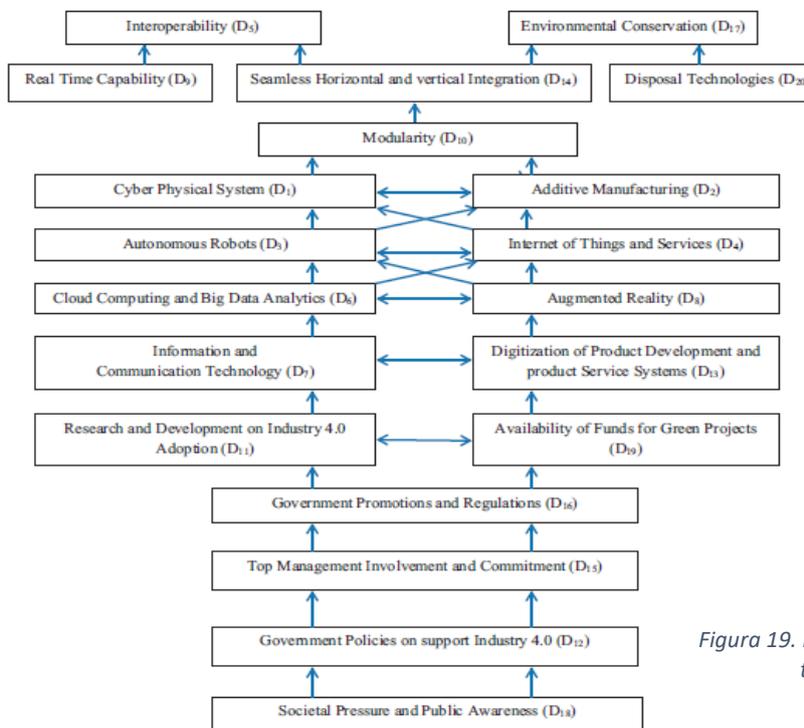


Figura 19. Drivers dell'Industria 4.0 e loro connessione, tratto da Harikannan et al. (2020)

Viene rilevato come i fattori gestionali ed economici siano ritenuti i più critici per l'adozione della sostenibilità, sebbene anche i fattori ambientali abbiano una forte influenza nel raggiungimento della sostenibilità complessiva (Yadav et al., 2020).

Sempre questo studio fa notare come l'adozione di sistemi energetici sostenibili, l'adozione di politiche di supporto alla sostenibilità ed efficaci metriche delle performance di sostenibilità sono stati tra i principali fattori che influenzano l'adozione del sustainable manufacturing.

Di conseguenza, essi suggeriscono come le politiche governative che favoriscono l'adozione della sostenibilità attraverso l'implementazione di nuove tecnologie, fornite dall'Industria 4.0, avranno un impatto positivo sull'economia delle nazioni.

In particolare, essi hanno diviso i drivers secondo i principali filoni ovvero quelli gestionali-economici (EM, 26,3%), quelli ambientali (ME, 23,4%), quelli informativi-tecnologici (IT, 19,1%), quelli organizzativi-sociali (OS, 16,1%) e quelli relativi alla catena di fornitura (SC, 15,2%). Per quanto riguarda i sottolivelli, tra questi i più rilevanti sono l'adozione di un sistema di risorse energetiche sostenibili (EM2) seguita dall'adozione di politiche di supporto alla sostenibilità (ME2), impegno del management verso l'adozione della sostenibilità (ME1), adozione del sistema cyber-fisico (IT2) e metriche delle prestazioni di sostenibilità efficaci (EM3).

### 3.3.7. Barriere all'adozione

Una volta presentati i driver dell'Industria 4.0 ritengo sia utile presentare, un po' come fatto per il capitolo precedente, le barriere che vi si oppongono, proponendo i risultati di (Jena et al., 2020; Müller et al., 2018). Essi consistono principalmente in problematiche economiche, ovvero gli ingenti investimenti necessari a comprare intere linee produttive di ultima generazione, e occupazionali.

Per quanto riguarda (Müller et al., 2018), i principali ostacoli sono i grandi investimenti richiesti e la redditività incerta. Inoltre, i produttori percepiscono la trasformazione dei loro attuali modelli di business verso l'Industria 4.0 come una sfida, così come la richiesta di standardizzazione dei processi all'interno e tra le aziende. Entrambe queste iniziative, ovvero la trasformazione del modello di business e la standardizzazione, possono diventare particolarmente impegnative per le PMI a causa del loro basso grado di standardizzazione dei processi, delle apparecchiature produttive più flessibili ma meno automatizzate e dei limiti delle risorse economiche e umane.

Inoltre, le sfide riguardanti la competitività e la redditività futura hanno un effetto negativo sulla tendenza all'implementazione dell'Industria 4.0, infatti nuovi operatori e concorrenti emergenti minacciano le posizioni di mercato e i vantaggi competitivi delle aziende manifatturiere consolidate. Di conseguenza, e in particolare nel contesto delle tecnologie produttive e delle piattaforme online basate su Internet, la combinazione di mercati altamente competitivi e questioni di sicurezza e trasparenza dei dati impedisce ai produttori industriali di implementare l'Industria 4.0, indipendentemente dalle loro dimensioni.

Infine, è interessante che l'implementazione dell'Industria 4.0 rappresenterebbe la minaccia di esposizione a società IT e software esperte all'interno di ecosistemi di piattaforme da parte delle imprese produttive. Le quali, invece di percepire ciò come un'opportunità per acquisire competenze esterne, potrebbero temere di diventare dipendenti da aziende che possiedono dati, software, virtualizzazione e competenze IT.

(Jena et al., 2020) propone un modello pratico da implementare su una fabbrica ed evidenzia come il principale problema sia che alle fabbriche verrebbe richiesto di investire per l'approvvigionamento e l'installazione delle relative apparecchiature.

Per quanto riguarda invece l'occupazione, ci si possono aspettare resistenze dei sindacati della

fabbrica a causa dell'alto livello di tracciamento delle prestazioni di tutto il sistema e degli operatori oltre che una possibile riduzione del lavoro a causa dell'automazione, ma nel caso di studio si è riscontrato che nessun operaio è stato rimosso dal lavoro dato che la manodopera in eccesso è stata utilizzata in altri lavori essenziali fornendo formazione e assistenza adeguate.

Molto interessante è anche la tematica relativa alla formazione, che nel caso in esame è richiesta per gli operatori di data entry, cioè l'alfabetizzazione informatica di base richiesta per i dipendenti che in alcuni casi hanno bisogno di inserire i dati nel sistema. In generale, è prevista un'ulteriore sostituzione di compiti semplici, mentre compiti come il monitoraggio, la collaborazione e la formazione saranno ancora necessari. Quindi, nuovi profili di lavoro dovrebbero emergere, per lo più riferiti alla diminuzione dell'importanza del lavoro manuale rispetto alle competenze informatiche. D'altra parte, le attività che includono la pianificazione e il monitoraggio, così come il processo decisionale, potrebbero ricadere su sistemi autonomi possibilmente sostituire posti di lavoro in questo settore. I guadagni di produttività ottenuti dall'uso di tecnologie intelligenti possono aiutare a garantire posti di lavoro e aumentare la domanda dei consumatori con un reddito aggiuntivo (effetto di compensazione), ma l'uso di nuove tecnologie e processi di produzione può anche distruggere posti di lavoro (effetti di ridondanza). Si teme che l'effetto di ridondanza dell'Industria 4.0 prevarrà nel lungo periodo, portando a quella che è nota come disoccupazione tecnologica (Hungerland et al., 2015).

Sebbene attraverso questa automazione una parte della manodopera sarà sostituita da macchine con un alto grado di automazione e produzione intelligente, si prevede che il mondo intero adotterà l'Industria 4.0 per far fronte al ritmo di produzione e servizio di uno con l'altro prima o poi. Quindi, sostiene questo lavoro, è meglio essere parte di questo viaggio nella fase iniziale per sostenere il mercato in questa era competitiva e per proteggere l'ambiente per le generazioni a venire (Müller et al., 2018).

### 3.3.8. Critiche all'Industria 4.0

Per quanto riguarda invece l'aspetto relativo alle critiche alla sostenibilità dell'Industria 4.0, la fonte più interessante sotto questo punto di vista è senza dubbio (Bonilla et al., 2018). In particolare, le critiche principali riguardano fondamentalmente tematiche relative al fine vita dei vecchi impianti produttivi, al consumo di energia derivato dalle nuove tecnologie e dalla richiesta di materiali rari.

In primis, la transizione 4.0 comporta una massiccia adozione di tecnologie legate all'Industria 4.0, che richiedono materie prime, acqua e combustibili per la produzione di tutti i nuovi macchinari e dispositivi, nonché risorse (combustibili, territorio e servizi ecologici) per lo smaltimento di apparecchiature obsolete. Si prevede infatti che circa il 40-50% delle apparecchiature esistenti verrà sostituito nel corso dell'Industria 4.0 e pertanto l'adeguamento delle apparecchiature di produzione, ove possibile, dev'essere incoraggiato come un modo per consentire risparmi di materiale ed energia, dando vita a business model di *retrofitting*.

In secundis, la digitalizzazione si basa su hardware che richiedono materie prime scarse, come il litio e le terre rare pesanti, che sono difficili da estrarre, gestire, purificare e riciclare. È previsto quindi un aumento della domanda di materie prime scarse a causa della diffusione delle tecnologie digitali che implica una maggiore attenzione al riciclo delle materie rare per ridurre al minimo la loro estrazione e le conseguenti problematiche ambientali.

Infine, l'aumento del consumo di energia sembra essere il problema più rilevante da affrontare.

Anche con le possibilità offerte dall'ottimizzazione energetica grazie ad algoritmi e analisi dei dati, il consumo di energia è una sfida che deve essere affrontata per contribuire con successo alla sostenibilità ambientale. In questo contesto, la ricerca tecnologica, le iniziative di definizione delle politiche e la promozione di modelli di business innovativi per aggiungere valore sostenibile sono necessari per rafforzare gli aspetti positivi e superare gli aspetti negativi del nuovo paradigma. Tuttavia, bisogna considerare che sebbene l'Internet delle Cose (IoT) consenta l'acquisizione di dati sui consumi energetici in tempo reale e l'analisi a livello di macchina e di linea di produzione per migliorare il processo decisionale attento all'energia, i sistemi di produzione intelligenti richiederanno enormi centri dati per elaborare e supportare le loro esigenze di rete. Pertanto, è previsto un aumento del consumo di energia primaria concentrato sui data center e sull'elaborazione dei big data nel cloud (Bonilla et al., 2018).

In conclusione, sempre (Bonilla et al., 2018) sostengono che a lungo termine il modo in cui l'Industria 4.0 impatterà sulla sostenibilità ambientale non è così semplice come negli scenari precedenti. La reazione della società, delle imprese e dei governi al nuovo paradigma sarà fondamentale nel determinarne l'impatto.

Se la diffusione dell'Industria 4.0 non avverrà in modo geograficamente omogeneo, si verranno a creare nicchie di paesi economicamente e socialmente svantaggiati con conseguente aumento del divario tra paesi sviluppati e in via di sviluppo.

Molti fattori possono influenzare lo sviluppo a lungo termine dell'Industria 4.0, ma il grado di sinergia raggiunto tra SDGs sociali e ambientali e l'omogenea distribuzione geografica della tecnologia saranno determinanti nell'interazione proattiva con la sostenibilità ambientale.

D'altronde, lo scenario a lungo termine dell'Industria 4.0 è strettamente dipendente dalle reazioni della società nonché sulle politiche pubbliche, i quadri giuridici e la diffusione omogenea. L'eterogeneità tra i paesi che adottano l'Industria 4.0 e tra le aziende con diversi livelli di infrastruttura digitalizzata potrebbe creare nicchie di disuguaglianza e modelli di non sostenibilità.

Lo scambio trasparente di informazioni per i consumatori sarà un fattore chiave per consentire un consumo responsabile, poiché, concludono, questa nuova fase pone il consumatore in un ruolo di potere, che sarà rischioso senza la consapevolezza delle preoccupazioni ambientali.

### 3.3.9. Economia Circolare ed Industria 4.0 per lo Sviluppo Sostenibile

Sulla base dei precedenti Obiettivi del Millennio, le Nazioni Unite hanno proposto 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) da raggiungere entro il 2030, che comprendono le questioni relative alla povertà, all'uguaglianza di genere, alle città sostenibili, alla generazione di energia ed alla sostenibilità della produzione (ONU, 2015).

Per affrontare le tematiche legate allo sviluppo sostenibile, il concetto di economia circolare (EC) sta guadagnando terreno ed è sempre più visto come una soluzione completa o parziale a queste sfide (Geissdoerfer et al., 2017). Si spera infatti che un sistema economico che riduce al minimo l'estrazione di risorse e gli sprechi, le emissioni ed il consumo di energia del sistema produttivo ne mitighi gli impatti negativi senza mettere a repentaglio la crescita economica ed il benessere della popolazione (Geissdoerfer et al., 2018).

Inoltre, l'Economia Circolare ha il potenziale per contribuire ai molteplici obiettivi di sviluppo sostenibile (SDG) delle Nazioni Unite per due ragioni (Kristoffersen et al., 2020). In primo luogo, l'EC presuppone che, attraverso l'applicazione di strategie circolari, la capacità delle risorse altrimenti sottoutilizzate può essere applicata per fornire valore (EMF, 2015). In secondo luogo, l'EC promuove l'abbandono dell'utilizzo dell'ambiente naturale come "pozzo" in cui scaricare le risorse usate (Irani and Sharif, 2018), in favore di un loro riutilizzo secondo l'ottica delle 6R.

L'Agenda 2030 è stata creata come strumento per promuovere l'azione a livello mondiale sulle questioni economiche, sociali ed ambientali più importanti. Con l'obiettivo di “non lasciare indietro nessuno”, sono stati creati i 17 SDG, ossia un elenco interconnesso di obiettivi, traguardi e indicatori per guidare i governi, le imprese e la società civile verso lo sviluppo sostenibile, presentati in Figura 20. Allo stesso tempo, sono attualmente in corso due cambiamenti sistemati emergenti: lo sviluppo dell'Industria 4.0 ed il passaggio all'Economia Circolare (Dantas et al., 2020). In questo contesto, si inserisce questo paragrafo seguendo i lavori di (Dantas et al., 2020; Kristoffersen et al., 2020), con lo scopo di collegare questi tre argomenti per indagare se e come la combinazione di EC ed Industria 4.0 (I4.0) può contribuire al raggiungimento degli obiettivi fissati nei SDG.



Figura 20. SDG e loro correlazioni, tratto da Rockstroem and Sukhdev. (2016)

Secondo Bashtannyk et al. (2020), un unico focus sullo sviluppo tecnologico può portare alla crescita industriale, ma allo stesso tempo può aumentare le emissioni di gas serra e diminuire ulteriormente la disponibilità di risorse naturali (Lieder and Rashid, 2016). Pertanto, nuove tecnologie e pratiche dovrebbero essere utilizzate in linea con altre iniziative per raggiungere gli SDG, come ad esempio l'Economia Circolare (Dantas et al., 2020).

Tuttavia, prima di andare ad analizzare meglio i concetti dell'EC, come riportato da (Kristoffersen et al., 2020), riportiamo il ruolo che le tecnologie 4.0 svolgono nell'analisi dei flussi di informazioni, consentendo una maggiore circolarità dei flussi di risorse nel sistema produttivo. Ad esempio, l'Internet of Things (IoT) può consentire il monitoraggio automatico della posizione delle risorse e la salvaguardia del capitale naturale (EMF, 2016). I big data facilitano diversi aspetti delle strategie circolari, come il miglioramento dell'abbinamento rifiuti-risorse nei sistemi di simbiosi industriale tramite la raccolta e l'elaborazione in tempo reale dei flussi di input-output (Bin et al., 2015; Low et al., 2018). 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 parti di ricambio e ottimizzare il consumo di energia (Dantas et al., 2020).

L'EC rappresenta un cambiamento economico con ripercussioni sul mercato del lavoro come nessun altro. Ad esempio, potrebbe generare più di 3 milioni di posti di lavoro solo nell'Unione europea entro il 2030 (WRAP et al., 2015), seppur a scapito dei vecchi lavori. Inoltre, si stima che circa l'8,5% della forza lavoro manifatturiera globale sarà sostituita dalle tecnologie 4.0 entro il 2030, rappresentando 14 milioni di posti di lavoro nel settore manifatturiero persi solo in Cina (Oxford Economics, 2019).

Per mitigare questa problematica, la transizione verso EC ed I4.0 dev'essere supportata da ambienti di apprendimento in grado di promuovere l'adattamento necessario alla forza lavoro in questo nuovo mondo altamente tecnologico e guidato dalla sostenibilità (Kirchherr e Piscicelli, 2019; Quint et al., 2015). Di fronte a questo nuovo contesto in cui i vecchi lavori possono diventare obsoleti e lasciare molti lavoratori disoccupati (in particolare lavoratori a basso reddito e formalmente non istruiti nei paesi in via di sviluppo), le imprese e gli organismi di formazione devono adattarsi rapidamente per sostenere al meglio la classe lavoratrice nel passaggio ad un paradigma circolare ad alta intensità tecnologica (Phung, 2019).

Tuttavia, dato che sia EC che I4.0 propongono nuovi modelli di business con un'ottimizzazione dei mezzi di produzione, rendendo quindi le aziende più competitive, essi influenzano positivamente lo sviluppo economico (Dantas et al., 2020).

Pertanto, al fine di estrarre il massimo valore dal nesso EC-I4.0, i decisori non dovrebbero concentrarsi solo sui vantaggi o svantaggi che i sistemi circolari e le tecnologie I4.0 potrebbero portare. È fondamentale invece seguire il motto "non lasciare nessuno dietro" dell'SDG e creare piattaforme di occupazione e apprendimento per accogliere i lavoratori in questo mondo high-tech, e anche riallocare i molti che, inevitabilmente, saranno sostituiti (Dantas et al., 2020).

Come si può evidenziare dalla Figura 21, gli obiettivi fissati più allineati col paradigma EC-I4.0 sono gli SDG 7-8-9 e 11-12-13 (Dantas et al., 2020).

In particolare, quello più legato all'Industria 4.0 è l'SDG 9 (Industria, Innovazione ed Infrastruttura) poiché mira a costruire la struttura necessaria per promuovere un'industrializzazione inclusiva e sostenibile. L'SDG 9 è anche quello più legato ai progressi tecnologici, che sono il cuore di I4.0. Questi sistemi promuovono il raggiungimento di questo SDG traducendo lo sforzo tecnologico e innovativo nei contesti industriali, ottimizzando i processi produttivi e applicando al meglio le risorse energetiche e materiali a livello industriale (Modgil et al., 2020).

Successivamente, il ruolo di I4.0 verso l'SDG 11 (Città e Comunità Sostenibili) consiste nel fornire gli strumenti tecnologici per migliorare la sostenibilità di città e comunità attraverso l'implementazione di pratiche di EC. Detto ciò, il nesso EC-I4.0 è una risorsa preziosa per il raggiungimento dell'SDG 11, soprattutto per i sotto-obiettivi indicati nella Figura 12, ossia la gestione delle risorse e degli scarti ma anche l'ottimizzazione della gestione energetica. L'ambiente urbano ed i servizi pubblici (ovvero la raccolta e il trattamento dei rifiuti) rappresentano inoltre ottime piattaforme per scalare soluzioni sostenibili basate sul nesso EC-I4.0, sebbene la maggior parte degli studi e delle applicazioni si concentri sul settore industriale (Dantas et al., 2020). Per quanto riguarda l'SDG 12 (Produzione e Consumo Responsabili), le pratiche EC come il riutilizzo, il riciclo, il recupero, la prevenzione dei rifiuti e gli approcci allo smaltimento sicuro sono risorse preziose (Priyadarshini e Abhilash, 2020). Tuttavia, anche l'I4.0 è uno strumento fondamentale verso questo obiettivo, in particolare verso la produzione responsabile e sostenibile (Dantas et al., 2020). Con la crescita degli investimenti nell'ottimizzazione dei sistemi operativi e la trasformazione dell'ambiente industriale ad alta tecnologia con installazioni

interconnesse da dispositivi 4.0, l'eccesso nell'uso di risorse, energia e produzione di rifiuti sarà ridotto al minimo dalla raccolta e dal monitoraggio dei dati, secondo i principi EC di riduzione dell'uso delle materie prime e progettazione di rifiuti e inquinamento (Dantas et al., 2020). Inoltre, l'EC va oltre la produzione sostenibile ed agisce anche sul consumo responsabile per via della tendenza in crescita dei modelli di business circolari strutturati intorno alla digitalizzazione e alla logica del Product as a Service (PaaS) (Geissdoerfer et al., 2018). Attraverso PaaS, i consumatori pagano per i servizi che utilizzano momentaneamente senza dover mai possedere il prodotto, utilizzato poi da più clienti, promuovendo l'economia della condivisione (o *sharing economy*) (Chiappetta Jabour et al., 2020).

L'SDG 13 (Azione Climatica) esorta i governi, le imprese e la società civile ad intraprendere azioni per il clima e ridurre in modo proattivo le emissioni di gas serra al fine di affrontare il cambiamento climatico (Dantas et al., 2020). Non c'è dubbio che una transizione dall'attuale economia lineare all'EC contribuirebbe in modo significativo a un mondo più sostenibile dal punto di vista ambientale (Geissdoerfer et al., 2017; Ghisellini et al., 2016), in cui la società può prosperare riducendo la pressione antropica applicata sui sistemi naturali (Rockström et al., 2009). Oggettivamente, le pratiche di EC hanno il potenziale per stimolare l'azione climatica e contribuire alla mitigazione del cambiamento climatico estraendo il massimo valore da un bene lungo tutto il suo ciclo di vita (Ghisellini et al., 2016). In questo contesto, l'I4.0 offre soluzioni ai problemi dell'EC ottimizzando le sue pratiche attraverso l'uso di tecnologie innovative (Oláh et al., 2020). Sebbene un sistema circolare non sia privo di emissioni, l'implementazione di IoT, CPS, AM o Blockchain può aiutare a ridurre il flusso di energia e materiale necessario ad una certa produzione monitorando al meglio le risorse applicate (Bonilla et al., 2018), riducendo così la generazione di scarti e le emissioni.

SDG	SDG targets directly affected by the combination of CE and I4.0	CE-I4.0 nexus effect
<b>SDG 7</b>	7.1 – Promote global access to affordable and reliable energy. 7.2 – Expand the proportion of renewable energy in the global energy mix. 7. B – Enhance technology and infrastructure to provide modern energy services for all, especially developing and least developed countries, following with their respective programs of support.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimization in energy use</li> <li>• Promotion of renewable energy</li> <li>• Reduction of fossil fuel use</li> <li>• Development of new and more efficient practices and technologies</li> </ul>
<b>SDG 8</b>	8.2 – Secure higher levels of economic productivity through technological upgrading, innovation, diversification, and the inclusion of labor-intensive sectors. 8.4 – Improve worldwide resource efficiency in consumption and production, and seek to decouple economic growth from environmental degradation, in accordance with the 10-year framework of programs, with developed countries taking the lead. 8.5 – Secure decent employment and equal pay for work of equal value for all, including persons with disabilities and young people. 8.6 – Substantially reduce youth unemployment, and increase education and training.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Opportunity of economic growth</li> <li>• New circular business models</li> <li>• Reinsertion of waste as a valuable resource in the economy</li> <li>• Higher and optimized productivity</li> <li>• Job creation and reallocation</li> </ul>
<b>SDG 9</b>	9.1 – Establish quality, reliable, and resilient infrastructure to support economic development and human well-being, with a focus on affordable and equitable access for all. 9.2 – In accordance with national circumstances, promote inclusive industrialization by increasing industrial employment share and gross domestic product, and double its share in developing countries. 9.4 – In consonance with national capabilities, promote sustainable industrial infrastructure sustainable, focusing on resource-use efficiency and environmentally clean technologies and processes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of cutting-edge technologies capable of promoting inclusive, reliable and sustainable production</li> <li>• Higher and optimized productivity</li> <li>• Efficient material and energy use</li> </ul>
<b>SDG 11</b>	11.6 – Reduce the urban negative environmental impact, especially regarding air pollution and waste management. 11. B – Increase the number of cities communities that adopt and implement integrated policies and action plans regarding inclusion, resource efficiency, climate change mitigation and adaptation, and develop comprehensive disaster risk management at all levels.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Innovative technologies to promote inclusive, safer, and smart waste management</li> <li>• Optimization of energy and resource use by the public sector</li> </ul>
<b>SDG 12</b>	12.2 – Achieve the sustainable management and efficient use of natural resources. 12.3 – Halve the per capita global food waste throughout supply chains, including post-harvest losses. 12.5 – Minimize waste generation through recycling, reuse, reduction and waste prevention. 12. A – Support developing countries to strengthen their scientific and technological capacity to move towards more sustainable patterns of consumption and production.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimization of energy and resource use throughout supply chains</li> <li>• New circular business models</li> <li>• Minimization of waste generation</li> <li>• Reinsertion of waste as a valuable resource in the economy</li> <li>• News consumption and behavioral patterns</li> </ul>
<b>SDG 13</b>	13.2 – Introduce climate change initiatives and actions into policies, strategies and planning.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Climate mitigation</li> <li>• Promotion of renewable energy</li> </ul>

Figura 21. SDG ed effetti del paradigma CE-I4.0, tratto da Dantas et al. (2020)

## 3.4. Economia Circolare

### 3.4.1. Introduzione

A causa della crescita della popolazione, ci sarà un aumento della domanda di risorse naturali, che include materie prime, acqua, energia e terra fertile, con conseguenti pressioni sull'ambiente (Franklin-Johnson, Figge e Canning 2016). Anche la classe media sta crescendo, il che significa che i comportamenti

consumistici aumentano e la domanda di prodotti di lusso aumenta. Inoltre, in seguito alla rivoluzione industriale, i prodotti usa e getta con lo scopo esplicito di essere scartati dopo l'uso (obsolescenza pianificata) hanno inaugurato l'era del *fast fashion*, stimolando quindi la mentalità usa e getta che oggi è nota come comportamento di consumo lineare. Ciò ha comportato un aggravarsi dei problemi di inquinamento ambientale e di fine vita, portando i governi di tutto il mondo ad avviare programmi di riduzione e riciclo dei rifiuti (Lieder and Rashid, 2016). Infatti, durante il ventunesimo secolo, il consumo di materiali in tutto il mondo aumenterà di otto volte; entro la fine del 2050, si prevede che la domanda globale di risorse triplicherà, con conseguente utilizzo molto più elevato delle risorse naturali (Kok et al., 2013; Reh 2013). Molti suggeriscono che abbiamo già superato le capacità del nostro pianeta. Visto da questa prospettiva, lo sviluppo sostenibile è percepito da alcuni come un ossimoro, lo "sviluppo" è associato alla crescita continua dal punto di vista dell'industria, dell'economia, dell'agricoltura e del consumo: la crescita eterna non può essere sostenibile (Sauvé et al., 2016). L'unico sviluppo sostenibile possibile è quando la capacità di un ambiente è in equilibrio o in uno stato stazionario, cioè nessuna crescita o solo la crescita che è il risultato di miglioramenti nella capacità di carico del pianeta sono possibili. Di conseguenza, se la capacità della Terra è già stata superata, la sostenibilità richiede una contrazione del consumo di risorse ambientali (Sauvé et al., 2016).

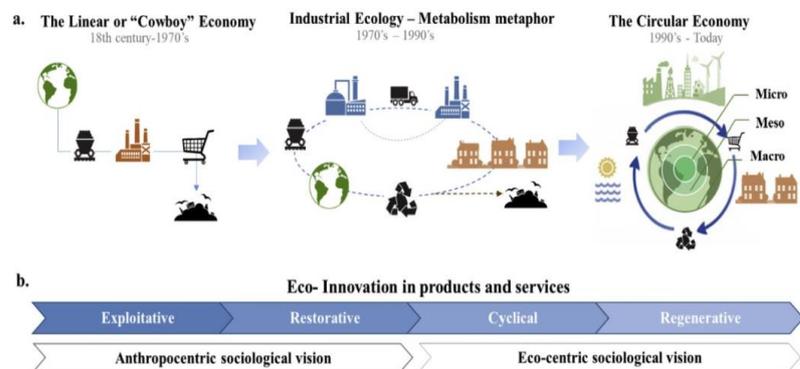


Figura 22. Confronto tra paradigmi economici, tratto da Prieto Sandoval (2020)

L'economia circolare, presentata in Figura 22, si basa sull'idea di mettere l'impresa privata al servizio della transizione verso un sistema più sostenibile. In qualità di singolo attore con maggiori risorse e capacità, le aziende potrebbero far avanzare notevolmente questa transizione creando valore aggiuntivo con una rete di stakeholder estesa e gestita in modo più proattivo (Nidumolu et al., 2009). In questo contesto è decisivo soprattutto il concetto di "Scambi di valore non riusciti", che presuppone che realizzando un valore che viene perso, distrutto, non interiorizzato o non offerto nonostante la domanda esistente sul mercato, le organizzazioni possano potenzialmente avvantaggiare la società e allo stesso tempo ottenere un vantaggio competitivo (Yang et al., 2016). Queste circostanze devono essere affrontate dall'industria manifatturiera per far fronte contemporaneamente alla pressione delle normative ambientali, alle sfide della volatilità dei prezzi delle risorse e ai rischi nell'approvvigionamento delle risorse, oltre alle loro attività quotidiane. La maggiore concorrenza per l'accesso a risorse scarse o critiche è diventata un'altra delle principali preoccupazioni per l'industria manifatturiera (Commissione europea, 2014) oltre a soddisfare gli obblighi sulla legislazione ambientale a costi minimi. Alla luce della discussa serie di sfide e dei limiti sottostanti di un'economia lineare, vale a dire prendere-fare-utilizzare-smaltire, il

concetto di economia circolare (EC) è considerato quindi una soluzione per armonizzare le ambizioni di crescita economica e protezione ambientale (Lieder and Rashid, 2016).

Si consideri anche che i paesi sviluppati (UE, USA etc.) generalmente esternalizzano i loro prodotti a paesi in via di sviluppo e a basso salario, in modo che anche la produzione di rifiuti venga esternalizzata. Pertanto, è fondamentale gestire l'intera catena di fornitura, compresi i fornitori di secondo e terzo livello coinvolti nella catena di fornitura, in cui raramente sono applicate strategie 6R. Inoltre, un solo affidamento sul riciclo non può attuare norme efficaci sull'economia circolare perché le attività di esportazione e importazione svolgono un ruolo importante nell'attuazione della EC (Govindan and Hasanagic, 2018).

€/tonne	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	VOCs
Austria	7,200	6,800	14,000	1,400
Belgium	7,900	4,700	22,000	3,000
Denmark	3,300	3,300	5,400	720
Finland	970	1,500	1,400	490
France	7,400	8,200	15,000	2,000
Germany	6,100	4,100	16,000	2,800
Greece	4,100	6,000	7,800	930
Ireland	2,600	2,800	4,100	1,300
Italy	5,000	7,100	12,000	2,800
Netherlands	7,000	4,000	18,000	2,400
Portugal	3,000	4,100	5,800	1,500
Spain	3,700	4,700	7,900	880
Sweden	1,700	2,600	1,700	680
UK	4,500	2,600	9,700	1,900
EU-15 average	5,200	4,200	14,000	2,100

<sup>a</sup> Values are expressed in µg/m<sup>3</sup>. NO<sub>x</sub>, Nitric oxides; PM<sub>2.5</sub>, particulate matter smaller than 2.5 µm; VOCs, volatile organic carbons

Figura 23. Prezzi delle esternalità, tratto da Andersen (2006)

Per raggiungere tale efficienza delle risorse, i cambiamenti si basano su innovazioni tecniche, sociali e organizzative lungo tutta la catena del valore, che collegano produzione e consumo (CE, 2014). I componenti che realizzano queste trasformazioni includono (CE, 2014):

- 1) Abilità e conoscenze, comprese l'imprenditorialità, il rafforzamento delle capacità e la multidisciplinarietà;
- 2) Innovazione organizzativa, comprese soluzioni e sistemi integrati, logistica, modelli di business e strumenti di supporto delle politiche;
- 3) Innovazione sociale, compresi nuovi modelli di produzione e consumo nell'ottica della condivisione, coinvolgimento dei cittadini, modelli di servizio ai prodotti e servizi di progettazione;
- 4) Innovazione tecnologica, compresa la progettazione di materiali e processi, progettazione di prodotti e gestione delle risorse (rifiuti, acqua, energia e materie prime);
- 5) Strumenti finanziari;
- 6) Consapevolezza, diffusione e internazionalizzazione;
- 7) Coinvolgimento di più stakeholder.

In conclusione, secondo (Prieto-Sandoval et al., 2018), l'EC non è una "panacea della sostenibilità" né l'ultima spiaggia ma rappresenta chiaramente la manifestazione più avanzata e recente del cambio di paradigma. Come sottolinea Stahel (2016), le preoccupazioni per la sicurezza delle risorse, l'etica e la sicurezza, nonché la riduzione dei gas serra, stanno spostando il nostro approccio nel considerare i materiali come beni da preservare, piuttosto che continuamente consumati. In breve, la regolamentazione e le determinanti politiche costituiscono il quadro giuridico EC che supporta le azioni dal lato dell'offerta come una produzione più pulita, lo sviluppo di metabolismi industriali e modelli di business sostenibili. I determinanti dal lato della domanda, rappresentati principalmente dai consumatori, dovrebbero essere in grado di accettare prodotti eco-innovativi sul mercato e acquisire comportamenti sostenibili.

### 3.4.2. Storia

In questa sezione viene presentata una breve storiografia dell'Economia Circolare, principalmente per indicare che, sebbene l'applicazione di questo concetto sia relativamente recente, indicativamente riguarda gli ultimi 15 anni, ha una storia "accademica" ben più lunga, arrivando addirittura al XIX secolo.

Infatti, già nel 1848, Hofman, il primo presidente della Royal Society of Chemistry, affermò "... in una fabbrica chimica ideale non ci sono, in senso stretto, rifiuti ma solo prodotti. Più una fabbrica reale utilizza i propri rifiuti, più si avvicina al suo ideale, maggiore sarà il profitto" (Lancaster 2002). Facendo un salto temporale di quasi un secolo, la nascita della rigenerazione delle materie può essere fatta risalire ai tempi della Seconda guerra mondiale, quando le risorse divennero scarse e l'industria automobilistica fu costretta a eseguire la rigenerazione o rilavorazione dei materiali a disposizione, soprattutto ferrosi (Automotive Parts Remanufacturers Association, 2015).

Arrivando invece ai capostipiti del pensiero circolare, come riportato da (Gregson et al., 2015), la preoccupazione per i limiti alla crescita e la scarsità di risorse nel pensiero economico risale almeno a Malthus e Ricardo, riemergendo nell'economia ecologica degli anni '60, prima in risposta a "Primavera silenziosa" di Rachel Carson (1962) e poi all' "Economia dell'Astronave Terra" di Ken Boulding (1966), che descrive la Terra come un sistema chiuso e circolare con limitata capacità di assimilazione e ne deduce che l'economia e l'ambiente dovrebbero coesistere in equilibrio (Geissdoerfer et al., 2017). In particolare, la fornitura finita di energia, acqua e materiali del pianeta viene utilizzata per sostenere che i futuri sostenibili si basano sul riutilizzo e sul riciclo dei materiali, un argomento poi ripreso dalle leggi della termodinamica di Georgescu-Roegen (1971), che ha sostenuto che i sistemi economici, per via dell'aumento dell'entropia e conseguente degradazione delle risorse, devono quindi comportare il massimo utilizzo del riciclo e delle energie rinnovabili.

Prima di giungere a coloro che sono considerati i veri e propri pionieri dell'economia circolare, ossia Pearce and Turner (1989), vengono proposti ancora tre lavori di autori molto rinomati in questo settore, a partire da Walter Stahel. Stahel e Reday (1976) hanno introdotto alcune caratteristiche dell'economia circolare, con un focus sull'economia industriale. Hanno concettualizzato infatti un'economia circolare per descrivere strategie industriali per la prevenzione dei rifiuti, la creazione di posti di lavoro a livello regionale, l'efficienza delle risorse e la dematerializzazione dell'economia industriale. Molto importante anche il lavoro dell'anno successivo di Daly (1977) che ha suggerito l'impossibilità per un sistema economico di essere completamente circolare con prodotti ed energia che ritornano per sempre alle materie prime, a causa della legge dell'entropia, rendendo praticamente impossibile l'idea del riciclo infinito delle risorse. Altri lavori iniziarono ad applicare il concetto di ciclo di vita ai prodotti finiti, infatti le idee sull'estensione della vita del prodotto, attraverso la riparazione e il ricondizionamento delle merci attraverso la rigenerazione, furono provate per la prima volta da Robert Lund alla fine degli anni '70 e all'inizio degli anni '80 (Bras & McIntosh, 1999), e in un articolo del 1982 di Walter Stahel. Stahel (1982) ha infatti enfatizzato l'utilizzo della vendita di servizi o performance del prodotto anziché la proprietà dei beni come il modello di business sostenibile più rilevante per un'economia a ciclo continuo, che consente alle industrie di trarre profitto senza esternalizzare costi e rischi associati agli sprechi.

Pearce e Turner (1989), seguendo il pensiero di Boulding, descrivono come le risorse naturali influenzano l'economia fornendo input per la produzione e il consumo, oltre a fungere da serbatoio per gli output sotto forma di rifiuti, e studiano quindi le caratteristiche lineari e aperte dei sistemi economici contemporanei. Nel loro quadro teorico, Pearce e Turner spiegano il passaggio dal sistema economico tradizionale aperto al sistema economico circolare come conseguenza della legge della termodinamica (Georgescu-Roegen, 1971) che determina il degrado della materia e dell'energia.

Gli ultimi due pensatori riguardano l'ecologia industriale degli ultimi decenni. In particolare, Erkman (1997) ha introdotto una prospettiva diversa analizzando il sistema industriale e il suo ambiente come un ecosistema comune caratterizzato da flussi di materiale, energia e informazioni, nonché dalla fornitura di risorse e servizi dalla Biosfera.

Mentre Cooper (2005) presenta l'estensione della vita utile dei prodotti vista come un mezzo per prevenire gli sprechi e come la chiave per una transizione verso modalità di produzione e consumo sostenibili. Successivamente soprannominato 'cradle-to-cradle', per distinguere dagli approcci 'cradle-to-grave', questo insieme di argomenti e teorie si concentra sulla progettazione di prodotti finiti, in cui vengono considerati lo smontaggio, l'adattamento e il riutilizzo fin dall'inizio in un'economia basata su ricondizionamento, rigenerazione e riciclo (Gregson et al., 2015).

### 3.4.3. Definizione

Prima di provvedere a dare una definizione esatta dell'Economia Circolare, è molto importante riportare quanto studiato da (Korhonen et al., 2018).

Secondo questo studio, essa potrebbe corrispondere a quello che Gallie (1956) nel suo lavoro principe ha chiamato un Concetto Essenzialmente Contestato (ECC). Secondo Gallie (1956) un concetto viene essenzialmente contestato se vi è accordo sui mezzi e gli obiettivi del concetto ma disaccordo su come definirlo, quali unità di analisi utilizzare per coglierne il dinamismo, quali sono i capisaldi concettuali e quale metodologia di indagine è appropriato. In questo contesto, l'Economia Circolare condivide le caratteristiche di essere un ECC con altri concetti come la Responsabilità Sociale d'Impresa (Okoye, 2009; Choi e Majumdar, 2014), i mercati (Rosenbaum, 2000) o il concetto stesso di Sviluppo Sostenibile (Connelly, 2007).

Detto ciò, data l'impossibilità di identificare una definizione univoca, nella Tabella 6 sono riportati le principali definizioni ricavate nel corso dell'analisi.

Fonte	Definizione
Yuan et al. (2008)	Il nucleo dell'economia circolare è il flusso circolare (chiuso) di materiali e l'uso di materie prime ed energia attraverso più fasi.
Geng et al. (2008)	Un'economia basata su un sistema a spirale che riduce al minimo la materia, il flusso di energia e il deterioramento ambientale senza limitare la crescita economica o il progresso sociale e tecnico.
Repubblica Popolare Cinese (2008)	Termine generale per ridurre, riutilizzare e riciclare le attività condotte nel processo di produzione, circolazione e consumo.
Ellen MacArthur Foundation (EMF) (2012)	Economia industriale in cui i flussi di materiali continuano a circolare a un ritmo elevato senza entrare nella biosfera a meno che non siano nutrienti biologici.
Stahel (2013)	L'EC si concentra sull'ottimizzazione delle scorte. Ha una struttura di tre cicli: riutilizzo e re-marketing per le merci, estensioni della vita del prodotto per le merci e un ciclo di riciclo per le risorse secondarie.
EMF (2013)	Economia industriale riparatrice intenzionalmente, che mira a fare affidamento sulle energie rinnovabili, minimizza, traccia ed elimina l'uso di sostanze chimiche tossiche ed elimina i rifiuti attraverso un'attenta progettazione.
Bastein et al. (2013)	Sistema economico e industriale basato sulla riutilizzabilità dei prodotti e delle materie prime e sulla capacità riparatrice delle risorse naturali, che cerca anche di minimizzare la distruzione del valore nel sistema globale e di massimizzare la creazione di valore in ogni anello del sistema.
World Economic Forum (2014)	Modello industriale che disaccoppia i ricavi dall'input materiale.
EMF (2015)	Economia che fornisce molteplici meccanismi di creazione di valore disaccoppiati dal consumo di risorse finite; in un'economia circolare, la crescita proviene "dall'interno", aumentando il valore derivato dalle

	strutture economiche, dai prodotti e dai materiali esistenti
Webster (2015)	Un'economia circolare è quella che è riparatrice per progettazione e che mira a mantenere prodotti, componenti e materiali alla loro massima utilità e valore, in ogni momento.
Consiglio Europeo (2015)	Nell'economia circolare il valore dei prodotti, dei materiali e delle risorse è mantenuto nell'economia il più a lungo possibile e la generazione di rifiuti ridotta al minimo.
Wijkman e Skånberg (2015)	Sistema industriale riparatore per intenzione e design. L'idea è che invece di scartare i prodotti prima che il valore sia completamente utilizzato, dovremmo usarli e riutilizzarli.
Bocken et al. (2016)	Insieme di strategie di progettazione e modelli di business che rallentano, chiudono e restringono i circuiti delle risorse.
Geissdoerfer et al. (2017)	Sistema rigenerativo in cui l'input di risorse e gli sprechi, le emissioni e le perdite di energia sono ridotti al minimo rallentando, chiudendo e restringendo i circuiti di materiali ed energia. Ciò può essere ottenuto mediante progettazione, manutenzione, riparazione, riutilizzo, rigenerazione, ricondizionamento e riciclo di lungo periodo.
WRAP (2016)	Un'alternativa all'economia lineare tradizionale in cui manteniamo le risorse in uso il più a lungo possibile, ne estraiamo il massimo valore durante l'uso, quindi recuperiamo e rigeneriamo prodotti e materiali alla fine di ogni vita utile.
Prieto Sandoval et al. (2020)	Sistema economico che rappresenta un cambiamento di paradigma nel modo in cui la società umana è interrelata con la natura e mira a prevenire l'esaurimento delle risorse, chiudere i circuiti energetici e dei materiali e facilitare lo sviluppo sostenibile attraverso la sua implementazione al livello micro (imprese e consumatori), meso (agenti economici integrati in simbiosi) e macro (città, regioni e governi)

Tabella 6. Definizioni di Economia Circolare

Per concludere questo paragrafo, ci terrei a fare due considerazioni, anche considerando quanto presentato nella Tabella 2 (ovvero le definizioni di sustainable manufacturing).

Innanzitutto, è doveroso notare la grande quantità non solo di autori ma anche di istituzioni politiche, globali ma anche nazionali (come nel caso della RPC), ad indicare come l'Economia Circolare non sia solo un concetto tecnologico ma anche sociale ed omnicomprensivo. Sempre a tal proposito, è doveroso osservare come la definizione cinese sia datata 2008 mentre quella europea sia del 2015, evidenziando quindi un vantaggio a livello temporale della Cina, come riportato anche nel paragrafo storico.

In secundis, è giusto notare che, sebbene non vi sia una definizione univoca, vi sono diversi concetti ricorrenti nelle varie definizioni, ossia il flusso circolare delle materie, l'estrazione massima del valore lungo il ciclo di vita, l'assenza di sprechi di materiali ed energia, ma anche di valore e l'importanza della progettazione del ciclo di vita del prodotto per raggiungere gli obiettivi.

#### 3.4.4. Caratteristiche

Il modello di economia lineare convenzionale si basa su prodotti fabbricati a partire da materie prime, venduti e smaltiti come rifiuti dopo l'uso (Jawahir e Bradley 2016); generalmente, quel modello è definito come "prendi-usa-distruggi" (Ghisellini et al., 2016). Inoltre, questo modello

non considera altri fattori come l'impatto sui capitali della società, comprese le risorse umane, e sulla conservazione delle risorse scarse se non quelli meramente economici (Kok et al., 2013).

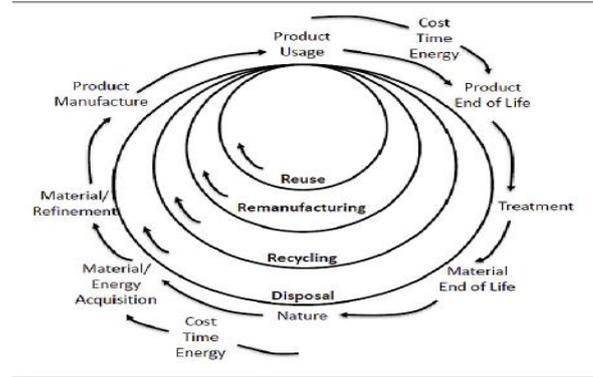
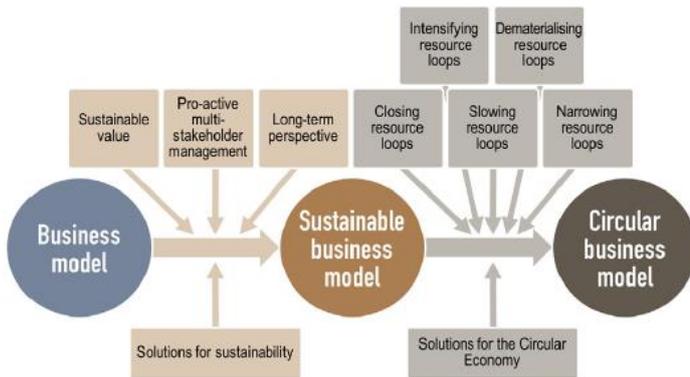


Figura 24. Confronto tra modelli di business, tratto da Geissdoerfer et al. (2018) Figura 25. Economia circolare, tratto da Korhonen et al. (2018)

Il rapporto "Crescita all'interno: una visione dell'economia circolare per un'Europa competitiva" (EMF, 2015), propone il framework Re-SOLVE basato su sei azioni di business per le imprese e i paesi che vogliono muoversi verso l'economia circolare: Rigenerare, Condividere, Ottimizzare, Loop, Virtualizzare e Scambiare (Kalmykova et al., 2018).

Uno dei principi comuni riscontrati tra i vari approcci è quello di massimizzare il valore delle risorse in uso che può essere definito anche come ottimizzazione delle scorte. L'origine del principio di ottimizzazione delle scorte si basa sul riconoscimento della natura limitata delle risorse della Terra e può essere ricondotta a diversi concetti consolidati, tra cui la "cradle-to-cradle", l'"economia in stato stazionario" e l'"ecologia industriale".

Un altro principio comune che è stato identificato negli approcci EC è l'Eco-efficienza. L'Eco-efficienza è stata definita come un approccio di minimizzazione e dematerializzazione, che si basa sulla "minimizzazione del volume, velocità e tossicità del sistema di flusso del materiale". L'eco-efficacia, invece, implica "la trasformazione dei prodotti e dei flussi di materiali ad essi associati in modo tale che formano una relazione di sostegno con i sistemi ecologici e la crescita economica futura e futura" (Kalmykova et al., 2018).

Un'altra caratteristica condivisa dagli approcci EC è il meccanismo per raggiungere l'ottimizzazione delle scorte e la prevenzione dei rifiuti attraverso le principali strategie ambientali (le 6R): Ridurre, Riutilizzare, Riciclare, Recuperare, Rigenerare, Riprogettare (Kalmykova et al., 2018).

A queste caratteristiche, (Prieto-Sandoval et al., 2018) aggiungono queste quattro componenti che dovrebbero essere incluse nella definizione di EC:

- 1) il ricircolo delle risorse e dell'energia, la minimizzazione della domanda di risorse e il recupero di valore dai rifiuti,
- 2) un approccio multilivello (micro, meso e macro);
- 3) la sua importanza come percorso per raggiungere uno sviluppo sostenibile;
- 4) la sua stretta relazione con l'innovazione della società (in quanto concetto socioeconomico).

A differenza del riciclo tradizionale, l'approccio EC orientato alla politica pratica e alla difesa delle imprese enfatizza il riutilizzo, la rigenerazione, il rinnovamento, la riparazione, la riprogettazione, il ricondizionamento e il potenziamento di prodotti, componenti e materiali, nonché il potenziale delle fonti energetiche sostenibili come il solare, l'eolico, la biomassa e l'energia derivata dai rifiuti, tramite l'utilizzo in tutta la catena del valore del prodotto utilizzando un approccio basato sul ciclo di vita dalla culla alla culla (EMAF, 2013; Rashid et al., 2013; Mihelcic et al., 2003; Braungart et al., 2007). Quindi, l'EC una volta completamente sviluppata promuoverà cicli di materiali di alto valore invece del riciclo solo per materie prime di basso valore come nel riciclo tradizionale (Ghisellini et al., 2016).

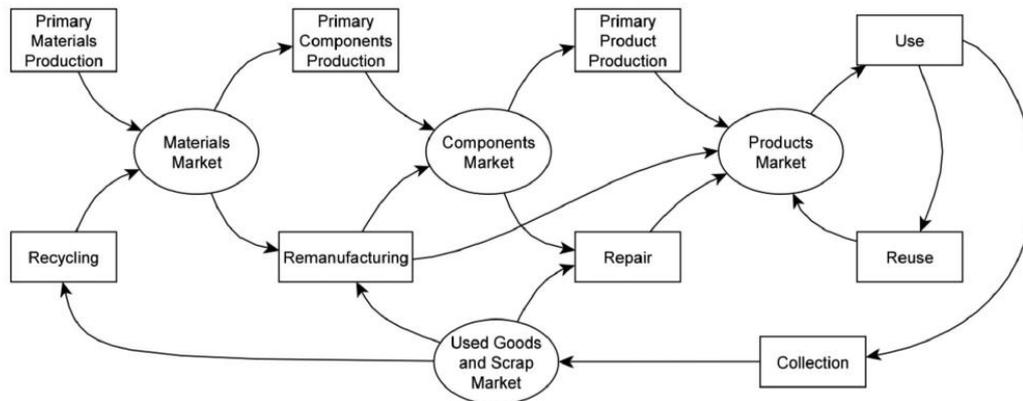


Figura 26. Economia circolare come rete di mercati, tratto da Zink and Geyer (2017)

Molto interessante è lo studio di (Gregson et al., 2015) per cui l'idea di economia circolare è anche un'economia morale: esistono modi giusti e sbagliati di costituire la circolazione economica dei materiali e, all'interno dell'UE, la rivalorizzazione dei rifiuti attraverso le sole reti di riciclo globali conta sempre più come il modo sbagliato per farlo. Le motivazioni sono:

- 1) La condanna dell'UE alle discariche. La discarica è la bestia nera degli ideali dell'economia circolare perché la sua funzione di "tomba" consente la persistenza dell'economia lineare. Le discariche dovrebbero essere obsolete in un'economia circolare. La premessa alla base di questa politica tecnocratica, tuttavia, è il sogno tecnico del circolo perfetto raggiunto tramite un perfetto recupero, tecnologicamente impossibile.
- 2) Il valore intrinseco del riciclo. Riconoscendo che gran parte del recupero delle risorse è un'attività di scarso valore, simile all'estrazione di risorse, una questione molto importante è quanto possano essere redditizie tali attività quando si trovano all'interno delle economie europee, o se, per essere finanziariamente sostenibili, gli impianti all'interno dell'UE devono sacrificare la qualità stessa della produzione che la loro ubicazione intende garantire.
- 3) La dipendenza da risorse. L'EC è un mezzo per acquisire beni a fine vita entro i confini dell'UE, apparendo sempre più come una forma di assicurazione geopolitica. In un mondo in cui la crescita economica dei paesi in via di sviluppo minaccia la stabilità delle economie da tempo abituate ad avere le risorse, offre un'assicurazione contro la sempre maggiore insicurezza dell'approvvigionamento di risorse rare non presenti nel vecchio continente (Gregson et al., 2015).

Come evidenziato da (Prieto-Sandoval et al., 2018), l'economia circolare è un approccio multilivello, ossia micro (singola impresa), meso (catena di fornitura, distretto) e macro (nazione o continente). A livello micro la transizione verso la CE implica l'adozione di una produzione più pulita e di un design ecologico. Poiché l'eco-design tiene conto di tutti gli impatti ambientali di un prodotto sin dalle prime fasi della progettazione, ha il potenziale per migliorare l'approccio dell'economia circolare favorendo il miglioramento dell'uso di materiali e risorse (Sherwin e Evans, 2000; Prendeville et al., 2014).

Generalmente a livello meso lo sviluppo di parchi eco-industriali e la simbiosi industriale lungo la catena di fornitura sotto la filosofia EC sono fonte di vantaggi ambientali (minore consumo di risorse energetiche e materiali e minore inquinamento di acqua, aria e suolo) ed economici (es. minori costi per la sostituzione delle materie prime e minori costi di trattamento dei rifiuti) (Ghisellini et al., 2016).

Un'implicazione diretta di questo cambiamento sulla società sarebbe un passaggio graduale da un'economia basata sulla vendita di beni ad una basata sulla vendita di prestazioni. Per le imprese, un ripensamento dei cicli della catena del valore e un approccio alla progettazione dell'intero sistema giocherebbero un ruolo significativo nelle pratiche operative (Genovese et al., 2017).

Inoltre, in letteratura sono stati sviluppati e presentati diversi strumenti per facilitare la progettazione dell'economia circolare. È stato costruito ad esempio un database delle strategie EC, con 45 strategie adatte per l'applicazione in diverse parti della catena del valore, ovvero approvvigionamento di materiali, progettazione, produzione, distribuzione, uso, raccolta e smaltimento, riciclaggio, rigenerazione e input (Kalmykova et al., 2018).

(Acerbi and Taisch, 2020) invece presentano diverse strategie di gestione circolare, ovvero che consentono di ridurre il consumo di risorse, di estendere i cicli di vita delle risorse e di chiudere i circuiti delle risorse. Lo studio evidenzia come alcune delle strategie come il design circolare, l'efficienza dei materiali e dell'energia, una produzione più pulita, lo smontaggio e le 3R abbiano un impatto sulle attività di produzione interna e sui processi effettivamente intrapresi dalle aziende. Invece, l'adozione di altre strategie, come la servitizzazione, la simbiosi industriale o la supply chain a ciclo chiuso, è supportata e abilitata da attività esterne, che sono tutte quelle attività implementate grazie all'interazione con attori esterni, tra cui clienti o aziende interne o esterni alla catena, che assicurano i flussi di ritorno delle risorse (Acerbi and Taisch, 2020).

(Elia et al., 2020) ha invece studiato la distribuzione di pratiche di EC nei vari settori produttivi e di seguito ne vengono riportati i risultati:

- I risultati sui settori industriali evidenziano una maggiore concentrazione di strategie CE in alcune aree di business (es. recupero dei materiali, beni di largo consumo e packaging) coinvolte da diversi anni in iniziative a sostegno della sostenibilità ambientale, ma l'implementazione CE si sta diffondendo anche in altri settori industriali, dall'ICT a quelli tessili e chimici.

- La presenza relativamente elevata di aziende appartenenti al settore elettronica ed elettricità (EEE) & ICT è promettente per due ragioni principali: da un lato, questo settore è ampiamente riconosciuto come uno dei più critici per l'esaurimento delle risorse e la gestione dei rifiuti principalmente a causa della presenza di sostanze pericolose e materiali preziosi. D'altra parte, l'adozione in queste catene di fornitura di strategie CE, applicate lungo l'intera catena, potrebbe essere un potente strumento per affrontare le sfide ambientali ed economiche correlate (Parajuly e Wenzel, 2017).

- L'analisi della struttura operativa della catena di fornitura (SC) di ciascuna società caratterizzante il campione, mostra che la maggior parte delle società analizzate gestisce solo i fornitori di primo livello nella SC; una quota molto inferiore controlla l'intera SC. In particolare, la maggior parte delle aziende del campione concentra le proprie attività nei processi di produzione primaria (fornitura / produzione) e secondaria (4R);

- L'analisi mostra che un livello più elevato di adozione di CE si verifica quando l'azienda integra diversi livelli nella propria SC; il tipo di integrazione della SC influenza la maggior parte degli obiettivi perseguiti dall'azienda nell'ambito di una strategia CE (Elia et al., 2020).

Infine, vengono presentati, seguendo il lavoro di (D'Amato et al., 2017), le differenze tra i concetti di economia circolare (EC), economia verde (GE) e bioeconomia (BE), presentati nella Tabella 7.

La GE mira a riunire la conservazione dell'ambiente e la riduzione della povertà (Barbier, 2012). La definizione dell'UNEP afferma che la GE "si traduce in un miglioramento del benessere umano e dell'equità sociale, riducendo al contempo in modo significativo i rischi ambientali e le scarsità ecologiche"(UNEP, 2011). Secondo la premessa GE, le diverse risorse naturali fornite dagli ecosistemi (cioè il capitale naturale) forniscono benefici fondamentali per l'economia e la società, che sono spesso invisibili o ignorati (D'Amato et al., 2017).

L'attuale comprensione di BE, sviluppata nell'ultimo decennio, è radicata nell'idea che gli input industriali (ad es. materiali, prodotti chimici, energia) dovrebbero essere derivati da risorse

biologiche rinnovabili, con ricerca e innovazione che consentano il processo di trasformazione (Bugge et al., 2016; Kleinschmit et al., 2014; Pfau et al., 2014). In questo contesto la silvicoltura, l'agricoltura e l'industria forestale possono svolgere un ruolo fondamentale nella fornitura di sostituti biologici per le fonti non rinnovabili (Ollikainen, 2014; Roos e Stendahl, 2015).

<b>Punti chiave</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Economia Circolare</b>	Sviluppo sostenibile nelle industrie e città	Riciclo nel ciclo di vita per ridurre i rifiuti	Simbiosi industriale (UE)	Valutazione dell'efficienza delle SC	Controllo di emissioni e consumo	GSCM
<b>Economia Verde</b>	Sviluppo sostenibile	Investimenti green	Turismo, business, educazione	Energie rinnovabili e da biomasse	Riciclare, riutilizzare e ridurre	Utilizzo della terra
<b>Bioeconomia</b>	Energie rinnovabili e da biomasse	Politiche rurali (UE)	Applicazione medica delle biotecnologie	Biomateriali	Fornitura di biomassa	Bio-sicurezza

Tabella 7. Punti chiave di EC, GE, BE, tratto da D'Amato et al. (2017)

I risultati mostrano che i tre concetti hanno distribuzioni geografiche diverse, con il predominio cinese nella ricerca EC, un forte focus europeo sulla BE e una portata prevalentemente globale per GE. Dal punto di vista dei contenuti, l'EC si concentra sui processi urbani industriali per disaccoppiare l'uso delle risorse e la produzione economica; la BE si concentra sull'innovazione basata sulle risorse biologiche e sulle pratiche di utilizzo del suolo nel contesto dello sviluppo rurale; e la GE racchiude una prospettiva generale per uno sviluppo socio-ambientale equilibrato con un'area di ricerca globale. Di conseguenza, la GE risulta essere il concetto più inclusivo, comprendente alcune idee sia di EC che di BE. Nessuno dei concetti, tuttavia, affronta argomenti di decrescita e quindi non riesce a trattare i potenziali limiti alla crescita (D'Amato et al., 2017).

### 3.4.5. Vantaggi

Come per gli argomenti precedenti, in questo paragrafo vengono presentati i vantaggi dell'economia circolare. Essi vengono però raggruppati sotto i tre criteri della sostenibilità (o Triple Bottom Line), ossia ambientale, sociale ed economico.

Uno degli obiettivi dell'economia circolare è ridurre l'uso di risorse naturali, ridurre la quantità di rifiuti, diminuire le emissioni di gas serra e l'uso di sostanze pericolose e passare a fornitori di energia rinnovabile e sostenibile (Bastein et al., 2013). L'aspettativa è che l'adozione dell'EC trasformerà fundamentalmente le attività economiche riducendone la dipendenza da flussi di carbonio non rinnovabili e ad alta intensità di emissioni verso una produzione e un consumo più sostenibili (Korhonen et al., 2018). Infatti, un'implementazione dell'economia circolare potrebbe ridurre il consumo di materiali del 32% entro il 2030 e del 53% entro il 2050 ed il 45% delle emissioni globali di gas a effetto serra affrontando cinque aree chiave: acciaio, plastica, alluminio, cemento e alimenti (Govindan and Hasanagic, 2018). Quindi un punto di forza dell'economia circolare è che può disaccoppiare la crescita economica ed il consumo di risorse utilizzando nuovi modelli di business basati sui servizi invece che sulle risorse naturali (Eijk 2015). Infine, l'economia circolare ridurrà i rifiuti attraverso il riciclo e il riutilizzo di prodotti che creeranno benefici sia

ambientali che economici, aumenteranno la durata dei prodotti e avranno l'opportunità di creare più posti di lavoro (Ilić e Nikolić 2016).

Infatti, un'altra caratteristica che motiva i governi a implementare l'economia circolare è la promessa di crescita dell'occupazione. Gran parte della creazione di posti di lavoro deriva dalle maggiori esigenze di manodopera associate al riutilizzo, alla rigenerazione e alla riparazione. Il processo di riciclo rappresenterà anche un'alta percentuale dei posti di lavoro creati, ma la riparazione e la rigenerazione creeranno più posti di lavoro rispetto al riciclo (van Loon e Van Wassenhove 2017). Il processo di riutilizzo in particolare creerà posti di lavoro più qualificati mentre il riciclo e la gestione dei rifiuti creano posti di lavoro mediamente o poco qualificati nei settori della raccolta, della manipolazione e del trattamento (Govindan and Hasanagic, 2018). Secondo un rapporto dell'UE, una diminuzione del consumo di risorse avrebbe portato a 1,4-2,8 milioni di nuove opportunità di lavoro nell'Unione europea entro il 2020 (MacArthur 2012).

Il motore primario per le imprese per implementare l'economia circolare è che devono attenersi alle leggi vigenti per la gestione dei rifiuti. Tuttavia, implementando pratiche di economia circolare nella catena di approvvigionamento, le organizzazioni possono ottenere un vantaggio strategico, con conseguente crescita economica. Questo guadagno finanziario è ottenibile recuperando tutte le materie prime che sono attualmente smaltite nel sistema lineare tradizionale.

Studi del MacArthur (EMF, 2012) mostrano che, sulla base di una modellazione dettagliata a livello di prodotto, l'economia circolare rappresenta un'opportunità di risparmio sui costi materiali netti di 340–380 miliardi di dollari all'anno a livello dell'UE per uno "scenario di transizione" e 520–630 miliardi all'anno per uno "scenario avanzato" (Nederland Circulair 2015). A livello globale alcuni hanno persino suggerito che una volta che l'EC sarà pienamente implementata, si otterrebbero guadagni economici superiori a 1000 miliardi di dollari USA all'anno (FICF e McKinsey, 2014).

Inoltre, le misure aggiuntive per aumentare la produttività delle risorse del 30% entro il 2030 potrebbero aumentare il PIL di quasi l'1% e creare anche 2 milioni di posti di lavoro aggiuntivi (CE, 2014). Secondo Lacy e Rutqvist (2015) infine, il passaggio a un sistema circolare offre un'opportunità economica di \$ 4,5 trilioni, che aumenterebbe la nostra resilienza economica riducendo al contempo la dipendenza da risorse scarse.

Infine, l'economia circolare potrebbe aiutare la transizione verso un percorso di decrescita (minor utilizzo di risorse con aumento del benessere) che sembra inevitabile in particolare nelle economie industrializzate che hanno superato i limiti ecologici (Kerschner, 2010). Come suggerito da Kerschner (2010), la decrescita economica nel Nord potrebbe infatti implementare un percorso per raggiungere l'obiettivo di un'economia a stato stazionario e globalmente equa, consentendo una maggiore crescita economica nel Sud. In questa prospettiva, l'EC può essere visto come un vantaggio per i sostenitori della decrescita e uno svantaggio per coloro che sostengono una crescita economica quantitativa continua. D'altronde, le dimensioni ambientali e sociali della sostenibilità finora hanno suscitato meno interesse rispetto alla sfera economica e necessitano del giusto riconoscimento. È quindi necessario uno spostamento, in particolare nei paesi sviluppati, verso un modello di sviluppo più qualitativo, come potrebbe essere l'EC, dove le persone vivono in modo equo nei limiti del nostro Pianeta, come suggerito da Brown e Ulgiati (2011).

### 3.4.6. Esempi

In questa sezione, vengono presentati alcuni esempi riportati in letteratura, tratti da (Bocken et al., 2016) e da MacArthur (2017), al fine di indicare come il paradigma dell'Economia Circolare sia già ampiamente implementato in varie realtà produttive, a livello mondiale ma anche europeo.

I servizi HP Instant Link offrono un esempio pratico di successo innovativo, fornendo servizi di stampa a privati e piccole imprese in tutto il mondo. Il modello di business si basa sul controllo in tempo reale delle stampanti per inviare ai clienti cartucce sostitutive, insieme a buste prepagate per la restituzione delle cartucce usate, prima che il cliente esaurisca l'inchiostro. Il modello dimostra con successo un programma di recupero e riciclo dei componenti nel settore dell'elettronica di consumo grazie al quale l'uso di imballaggi viene ridotto e viene eliminato fino al 57% dei rifiuti (MacArthur 2017a). Un secondo esempio pratico viene da Renault, una società che rilavora parti del motore, crea una seconda vita per le batterie elettriche e aumenta il riciclo "a circuito breve" delle materie prime. Attualmente, il 36% della massa totale di un nuovo veicolo prodotto in Europa proviene da materiali riciclati e l'85% di un ZEV è riciclabile (MacArthur 2017b).

---

#### *Business model strategies for slowing loops*

1	Access and performance model	Providing the capability or services to satisfy user needs without needing to own physical products	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Car sharing</li> <li>• Laundrettes</li> <li>• Document Management Systems (e.g. Xerox, Kyocera)</li> <li>• Tuxido hire</li> <li>• Leasing jeans</li> <li>• Leasing phones</li> </ul>
2	Extending product value	Exploiting residual value of products – from manufacture, to consumers, and then back to manufacturing – or collection of products between distinct business entities	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automotive industry – remanufacturing parts</li> <li>• Gazelle offering consumers cash for electronics and selling refurbished electronics (gazelle.com)</li> <li>• Clothing return initiatives (e.g. H&amp;M, M&amp;S' Shwopping)</li> </ul>
3	Classic long-life model	Business models focused on delivering long-product life, supported by design for durability and repair for instance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• White goods (e.g. Miele's 20 year functional life span of appliances; [4])</li> <li>• Luxury products claiming to last beyond a lifetime (e.g. luxury watches such as Rolex or Patek Philippe)</li> </ul>
4	Encourage sufficiency	Solutions that actively seek to reduce end-user consumption through principles such as durability, upgradability, service, warranties and reparability and a non-consumerist approach to marketing and sales (e.g. no sales commissions)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Premium, high service and quality brands such as Vitsœ and Patagonia [7]</li> <li>• Energy Service Companies (ESCOs)</li> </ul>

#### *Business model strategies for closing loops*

5	Extending resource value	Exploiting the residual value of resources: collection and sourcing of otherwise "wasted" materials or resources to turn these into new forms of value	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interface – collecting and supplying fishing nets as a raw material for carpets</li> <li>• RecycleBank – providing customers with reward points for recycling and other environmentally benign activities (recyclebank.com)</li> </ul>
6	Industrial Symbiosis	A process- orientated solution, concerned with using residual outputs from one process as feedstock for another process, which benefits from geographical proximity of businesses	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalundborg Eco-Industrial Park (<a href="http://www.symbiosis.dk/en">http://www.symbiosis.dk/en</a>)</li> <li>• AB sugar and other sugar refiners – internal "waste = value" practices [46]</li> </ul>

Figura 27. Esempi di pratiche di economia circolare, tratto da Bocken et al. (2016)

### 3.4.7. Problematiche e critiche

Dopo aver presentato i vantaggi e tutti gli aspetti pro-economia circolare, questo paragrafo riguarda le problematiche e le critiche presenti in letteratura. Esse si possono fondamentalmente raggruppare in quattro categorie, ossia le sfide legate alle imprese (acquisto di competenze e materiali), alla mentalità dei clienti ed all'effetto rimbalzo (o *Rebound effect*), oltre che a critiche più a livello propriamente metodologico.

In primis, le imprese devono affrontare molte sfide per adottare l'economia circolare in una catena di approvvigionamento. In primo luogo, la tecnologia richiede che i prodotti debbano essere progettati per essere riciclati o rigenerati. Dal rapporto della Commissione europea (2014), la progettazione impropria o troppo complessa di prodotti diventa una sfida importante per i rigeneratori e i riciclatori. D'altra parte, i requisiti specifici del cliente costringono i produttori a rendere il loro prodotto unico e a servire uno scopo specifico (Kang e Hong 2010). In questi casi, la ristrutturazione, lo smontaggio e il riutilizzo diventano un compito arduo e quindi è necessario progettare il prodotto con le preoccupazioni di una prospettiva economica circolare sin dal design iniziale (Nederland Circulair 2015). A ciò bisogna anche aggiungere il fatto che non ci sono linee guida e standard sulla ristrutturazione, il che si traduce in una varietà di qualità del prodotto sul mercato per la ristrutturazione (Govindan and Hasanagic, 2018).

Successivamente, per monitorare efficacemente i progressi verso un'EC, è necessario comprendere il legame tra la quantificazione utilizzando indicatori di circolarità e gli impatti ambientali per evitare un potenziale errore di giudizio (Harris et al., 2020).

Nonostante le attuali limitazioni, alcuni studi suggeriscono che le impronte ecologiche delle risorse (energia, acqua, suolo e materiali) sono buone proxy per il danno ambientale poiché rappresentano l'82% della varianza nelle classifiche dei prodotti (Steinmann et al., 2016-2017). Allo stesso modo, da 135 indicatori di impatto LCA, Steinmann et al. (2016) hanno concluso che il 92% della varianza potrebbe essere coperto da solo sei: cambiamento climatico, riduzione dell'ozono, effetti combinati di acidificazione ed eutrofizzazione, ecotossicità terrestre, ecotossicità marina e uso del suolo. Un passo successivo è definire limiti o soglie che non dovrebbero essere superati, cosa che ad esempio abbiamo a livello globale per le emissioni di GHG, oltre all'adattamento al prodotto e il loro uso motivato, ad es. a seconda che alcuni fattori come la tossicità o l'eutrofizzazione, ecc., siano motivo di preoccupazione (Harris et al., 2020).

In secundis, tutti i modelli di business delle aziende dipendono dal cambiamento del comportamento dei consumatori e dei fornitori, poiché il passaggio all'economia circolare richiede un cambio di paradigma sistemico. Ad esempio, la percezione della qualità del prodotto da parte dei clienti delle aziende dal materiale rigenerato o riciclato tende ad essere inferiore rispetto ai prodotti tradizionali, con conseguenti prezzi inferiori. Ciò, nonostante i requisiti di alta qualità dei prodotti e i vantaggi relativamente piccoli nella struttura dei costi (Geissdoerfer et al., 2018). I consumatori, infatti, sono più cauti se pensano che i loro telefoni, laptop o tablet siano prodotti riutilizzati, così come nell'abbigliamento e nei prodotti per bambini (Govindan and Hasanagic, 2018). La mancanza di accettazione dei prodotti di seconda mano da parte dei clienti è infatti il principale ostacolo all'adozione dell'economia circolare dato che l'accettazione da parte dei consumatori è fondamentale se le imprese si aspettano di trarre vantaggio dai prodotti rinnovati. La letteratura conferma che la risposta del consumatore ai prodotti rinnovati si concentra sulla disponibilità a pagare, dato che i consumatori mostrano una disponibilità inferiore per i prodotti ricondizionati a causa di una maggiore percezione del rischio e di una minore percezione della qualità (Govindan and Hasanagic, 2018).

Infine, l'economia circolare richiede ai consumatori di diventare partecipanti più attivi nel riciclo o riutilizzo dei prodotti e di cambiare l'attitudine a vivere in una cultura passiva dello scarto (Ghisellini et al., 2016). Se le imprese hanno adottato l'economia circolare, i consumatori non devono solo restituire i prodotti dopo l'uso, ma anche accettare volontariamente i prodotti rigenerati. Da questa discussione, è evidente che l'implementazione dell'economia circolare è una responsabilità condivisa di tutti gli stakeholder (Govindan and Hasanagic, 2018).

La terza critica si basa sul fatto che la maggior parte degli autori (ad esempio (Bocken et al., 2016)) si concentra sui miglioramenti delle prestazioni ambientali dell'economia circolare piuttosto che assumere una visione olistica su tutte e tre le dimensioni della sostenibilità (Geissdoerfer et al., 2017). Infatti, i tre pilastri della sostenibilità (economica, ambientale e sociale) includono esplicitamente la dimensione sociale, in termini di stakeholder umani, benessere umano e diritti umani. Come tale solleva questioni di equità intergenerazionale, tra le generazioni presenti e future, e di equità intra-generazionale, tra i diversi popoli all'interno della generazione attuale, cioè i mondi sviluppati e in via di sviluppo, e le persone all'interno di questi mondi. Questa attenzione più limitata comprende una copertura ristretta del benessere sociale da parte della maggior parte degli autori di economia circolare. Se vengono citati gli aspetti sociali, il riferimento è soprattutto alla creazione di posti di lavoro, in quanto non sembra esserci una chiara comprensione della misura in cui l'economia circolare possa contribuire al benessere soggettivo (Frey e Stutzer, 2001). Alcuni autori, come Webster (2015), cercano di costruire altri elementi di una dimensione sociale dell'economia circolare aggiungendo un sistema fiscale più giusto ed efficiente e modificando gli stili di vita attraverso l'economia condivisa, anche se è giusto non trascurare effetti dannosi sul benessere come il deterioramento dell'occupazione sicura (Malhotra e Van Alstyne, 2014), implicano infatti effetti dannosi sull'inclusione sociale e sul benessere. La seconda critica concettuale riguarda il domandarsi fino a che punto dovrebbe spingersi la società nel riciclo dei materiali? (Andersen, 2007). Mentre le prime e più semplici opzioni di riciclo forniscono evidenti vantaggi, una volta intrapresa la strada del riciclo, i benefici successivi diventano gradualmente sempre più difficili da ottenere. Si deve riconoscere che a un certo punto ci sarà un punto limite in cui il riciclaggio diventerà troppo difficile e oneroso per fornire un vantaggio netto. Infatti, in un'economia di mercato, i prezzi dei materiali e delle risorse naturali saranno troppo bassi e rifletteranno principalmente i costi associati all'estrazione mineraria e ai valori a breve termine, ma non all'esaurimento né ai costi ambientali. In questi casi, solo una gamma limitata di opzioni circolari avrà senso dal punto di vista dei manager dell'azienda. Si può sostenere che se le aziende sono razionali e alla ricerca di profitto, le opzioni di riciclo e riutilizzo avrebbero dovuto già essere realizzate. In un'economia capitalista convenzionale, il riciclaggio sarà intrapreso solo dove è desiderabile da un punto di vista economico privato. I decisori responsabili del processo decisionale pubblico devono trascendere prospettive così ristrette e istituire meccanismi che garantiscano che il riciclaggio e il riutilizzo avvengano dove è socialmente desiderabile ed efficiente (Andersen, 2007).

Infine, l'approccio dell'economia circolare può anche essere criticato per avere conseguenze non intenzionali e obiettivi eccessivamente semplicistici (Murray et al., 2017). Ad esempio, molte attività sostenibili apparentemente positive hanno esiti ambientali molto negativi (carburanti "verdi" o bio, metalli delle terre rare, etanolo, pannelli solari). Oltre a ciò, la longevità nella progettazione del prodotto non è sempre efficiente dal punto di vista ecologico, dato che molti prodotti di lunga durata che non si degradano rapidamente consumano più energia utile e rilasciano più entropia di quelli progettati per un risultato più naturale, probabilmente con una vita più breve (Murray et al., 2017).

Infine, l'ultima critica riguarda l'effetto Rimbalzo o *Rebound effect*, sollevato da (Zink and Geyer, 2017), per cui per la tendenza a trascurare la parte economica dell'economia circolare dei suoi fautori, le attività di economia circolare possono aumentare la produzione complessiva, che può compensare parzialmente o totalmente i propri benefici.

Nella misura in cui la produzione secondaria impedisce effettivamente la produzione primaria, il vantaggio ambientale è la differenza tra gli impatti sostenuti del ritrattamento e gli impatti evitati della produzione primaria. Inoltre, se la produzione primaria viene ridotta, le scarse risorse vengono preservate per un uso futuro e le discariche vengono riempite meno rapidamente, anche se è riconosciuto che i vantaggi derivanti dall'evitare gli impatti sulla produzione primaria in genere superano entrambi questi vantaggi accessori (The Economist 2007; UNEP 2010).

Esistono almeno due meccanismi generali mediante i quali la produzione secondaria può portare al Rimbalzo. Il primo ha a che fare con la sostituibilità dei beni secondari, per cui i beni secondari possono essere sostituiti insufficienti dei beni primari perché sono di qualità inferiore o sono altrimenti meno desiderabili per gli utenti (ad esempio, la plastica riciclata e la carta raramente competono direttamente con le materie prime). Il secondo ha a che fare con l'effetto dei beni secondari sui prezzi di mercato, dato che questa diminuzione dei prezzi farà aumentare la domanda sia del bene che dei suoi sostituti poiché i consumatori si percepiscono come relativamente più ricchi (effetto reddito) e prendono decisioni di consumo su tutte le altre merci in relazione al bene più economico (effetto sostituzione). Inoltre, spesso il prodotto "benchmark" nelle economie in via di sviluppo non è affatto un prodotto (come nel caso dei telefoni cellulari ricondizionati), quindi non è nemmeno possibile uno spostamento reale della produzione primaria. Pertanto, l'aumento dell'offerta di prodotti, componenti e materiali in queste economie si tradurrà in un aumento relativamente maggiore dei consumi e quindi in maggiori impatti ambientali rispetto alle economie sviluppate (Zink and Geyer, 2017).

I suggerimenti per evitare l'effetto Rimbalzo includono garantire che i prodotti siano buoni sostituti delle alternative di riferimento e concentrarsi sui mercati in cui la sensibilità al prezzo dell'acquirente è bassa. Contrariamente al mantra dell'economia circolare, l'attenzione manageriale non dovrebbe concentrarsi semplicemente sulla chiusura dei cicli di materiali e prodotti, ma sul causare lo spostamento della produzione primaria. Allo stesso modo, e ancora contrariamente al mantra, l'attenzione non dovrebbe essere sulla massimizzazione dell' "utilità" del prodotto o del materiale, ma sulla massimizzazione del potenziale di spostamento delle merci a fine vita (Zink et al. 2014).

Infine, non tutti i fautori dell'economia circolare la intendono come un paradigma vantaggioso per l'ambiente. Ad esempio, la società di consulenza McKinsey & Company vede l'economia circolare come un'opportunità non per l'ambientalismo, ma per l'arbitraggio. McKinsey & Company consigliava esplicitamente ai propri clienti che la commercializzazione di prodotti, componenti e materiali secondari che non cannibalizzano le vendite esistenti (cioè, non sostituisce la produzione primaria) creerà i maggiori profitti (McKinsey & Company 2014). Di conseguenza, introdurre il concetto di economia circolare nei mercati liberi e con imprese che mirano unicamente a massimizzare i profitti è molto probabile che provochi un rimbalzo. Ciò che è veramente necessario per ridurre l'impatto ambientale è quindi una minore produzione e un minor consumo. L'economia circolare promette questo risultato, ma, una volta considerate le realtà economiche, potrebbe non riuscire a realizzare il suo potenziale (Zink and Geyer, 2017).

### 3.4.8. Importanza delle politiche

Come evidenziato anche nel paragrafo 3.4.3, il concetto di Economia Circolare non è solo tecnologico, ma anche e soprattutto sociopolitico. Con tale premessa, si capisce l'importanza delle politiche a fini incentivatori ma anche a livello di benchmarking di strategie d'implementazione, come presentato nello studio di (McDowall et al., 2017).

(Govindan and Hasanagic, 2018) presentano la necessità di leggi e politiche per introdurre tasse ed oneri ambientali pertinenti per rendere più fattibile per le imprese l'adozione dell'economia circolare lungo tutta la sua catena di fornitura, presentando a supporto due motivazioni.

La prima ragione è economica. Sulla base dell'approccio fiscale sull'esternalità, i costi marginali degli effetti esterni si rifletteranno sui prezzi di mercato, in modo che gli attori del mercato li considerino nelle loro transazioni reciproche. È chiaro che l'ambiente non è una merce gratuita ma ha un prezzo da pagare (Andersen, 2007), che deve venire esplicitata ad esempio tramite misure del tipo "Carbon cap and trade" o di tasse sull'inquinamento. Un altro approccio a sostegno è che la tassazione dell'esternalità spesso offre l'opportunità di sviluppare tecnologie nuove e più pulite. La seconda ragione è di tipo incentivativo. La ricerca mostra che ci sono molte barriere che rendono difficile per le imprese adottare un'economia circolare nella catena di fornitura. Uno di questi è la riluttanza del governo a prendere iniziative per sviluppare strumenti economici e finanziari migliori per le industrie. La mancanza di sostegno finanziario da parte dei governi attraverso prestiti bancari, riduzioni fiscali ed incentivi ostacolano l'interesse di attuare l'economia circolare attraverso strategie eco-efficienti (Su et al. 2013).

Il tema dell'economia circolare è in cima all'agenda politica e in particolare in Europa (CE, 2014a, b, 2015a), si prevede che promuova la crescita economica creando nuove imprese e opportunità di lavoro, risparmiando sui costi dei materiali, volatilità dei prezzi, migliorando la sicurezza dell'approvvigionamento e riducendo allo stesso tempo le pressioni e gli impatti ambientali (Kalmykova et al., 2018). A seguito delle preoccupazioni per i prezzi elevati delle materie prime, infatti la Commissione europea ha lanciato un'iniziativa faro sull'efficienza delle risorse, che è stata inizialmente resa operativa attraverso la tabella di marcia per un'Europa efficiente sotto il profilo delle risorse (CE 2011). A ciò ha fatto seguito l'annuncio di una serie di misure politiche noto collettivamente come "Pacchetto Economia Circolare". Questo è stato successivamente sostituito dal "Closing the Loop - Un piano d'azione per l'economia circolare" (CE, 2015a). Il piano d'azione definisce un quadro politico che si basa e integra le politiche e gli strumenti giuridici esistenti. In particolare, il "Piano d'Azione Europeo Economia Circolare" propone emendamenti alla normativa in materia di rifiuti e discariche e propone anche varie nuove iniziative, nei macro-argomenti Produzione, Consumo, Gestione dei Rifiuti, Innovazione e Monitoraggio (McDowall et al., 2017). Un ulteriore passo avanti è stato fatto poi col "Green New Deal" (CE, 2020) con tutta una serie di politiche a livello ambientale, che non riguardano solo l'EC.

Infine, sempre (McDowall et al., 2017), propone un confronto tra l'approccio cinese, considerata attualmente la culla dell'EC, e quello europeo, ossia il paradigma nascente sotto questo punto di vista. In sintesi, l'approccio cinese riflette una maggiore preoccupazione per la produzione industriale, l'acqua, l'inquinamento e pone maggiore attenzione alla scala (attraverso un sistema di sperimentazione multilivello gerarchico) e al luogo (attraverso l'incorporazione di idee EC nella pianificazione dell'uso del suolo). La politica EC è strutturata come parte di una più ampia risposta alle sfide ambientali create dalla rapida crescita e industrializzazione.

La concezione europea ha invece una portata ambientale più ristretta, concentrandosi su rifiuti e risorse, con scarsa attenzione per l'inquinamento, in gran parte silenzioso su questioni di scala o luogo. Le politiche EC sono inquadrare in termini sia economici che ambientali, concentrandosi sul potenziale di efficienza delle risorse per aumentare la competitività dell'economia continentale. Infine, sono evidenziate le opportunità di sinergie tra Cina e UE. I grandi flussi commerciali tra le due regioni suggeriscono una serie di aree in cui indicatori, standard e apprendimento reciproco concordati potrebbero facilitare lo sviluppo di una EC all'interno di entrambe le regioni e oltre. Tali aree includono sforzi per modellare la progettazione del prodotto per la durata, la riparabilità e il riciclo, standard per prodotti, processi eco-industriali e materiali secondari, coordinamento delle politiche sulle industrie primarie, come l'acciaio, e test sull'efficacia degli strumenti politici (McDowall et al., 2017).

### 3.5. Politiche

#### 3.5.1. Introduzione e contesto

Le politiche ambientali internazionali stanno cercando un accordo universale per mantenere il riscaldamento globale al di sotto di una soglia critica, ovvero di limitare l'aumento della temperatura a 1,5 ° C (IPCC, 2018). Infatti, come si può notare in Figura 28, come riportato da (Tanaka, 2011), si ha avuto un progressivo aumento delle politiche, soprattutto in ambito climatico, nel corso degli ultimi 25 anni.

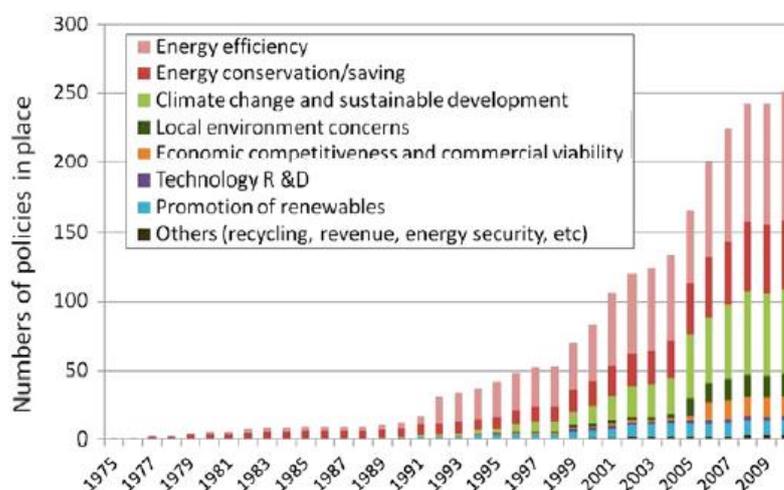


Figura 28. Politiche nel corso degli anni, tratto da Tanaka (2011)

Il raggiungimento di questo obiettivo implica una riduzione delle emissioni di gas serra (responsabili del 55% delle emissioni globali), nonché una migrazione verso un'economia a zero emissioni entro il 2050 (Durán-Romero et al., 2020). Per attuare tali riduzioni, un tasso di decarbonizzazione annuale del sistema energetico è stimato all'11,3%, che è sette volte superiore al tasso attuale (EMF, 2019). Tuttavia, la politica sul cambiamento climatico non dovrebbe concentrarsi solo sulla riduzione delle emissioni di gas serra (GreenHouse Gases o GHG), ma anche cercare di limitare la quantità di materie prime utilizzate nei processi produttivi in quanto essi rappresentano il 45% delle attuali emissioni di GHG totali (Behrens, 2016; IRP, 2019). Infatti, alcune stime indicano che anche con politiche energetiche basate sull'efficienza o su fonti energetiche a zero emissioni di carbonio, le emissioni del settore industriale (acciaio, alluminio, cemento e plastica) raggiungeranno cumulativamente i 649 miliardi di tonnellate di CO2 entro il 2100 e la produzione alimentare dovrà soddisfare il fabbisogno alimentare di una popolazione mondiale di 9 miliardi entro il 2050 (FAO, 2009; EMF, 2019; Fróna et al., 2019).

Come riportato da (Durán-Romero et al., 2020), in tema di economia circolare e mitigazione del cambiamento climatico, le priorità dei politici dovrebbero essere rivolte quindi alle industrie ad alta intensità di risorse e inquinanti. Le politiche devono essere dirette al monitoraggio del consumo di energia, al controllo della produzione di acque reflue e rifiuti, al monitoraggio degli

impatti sull'ambiente naturale causati dall'agricoltura e dall'uso del suolo dell'industria edile e della produzione di beni. Inoltre, è importante sottolineare come, secondo il modello a quintupla elica (Quintuple Helix Model o QHM), presentato di seguito, il ruolo di tutte le parti interessate è cruciale nel supportare questa transizione tramite le azioni collaborative di aziende, università, governo e società per ridurre al minimo gli impatti sull'ambiente (Durán-Romero et al., 2020).

Bisogna però distinguere i ruoli delle singole componenti, come riportato da (Zhu and Sarkis, 2007), per cui le pressioni non di mercato da parte dei regolatori e dei gruppi di attivisti considerano tipicamente le questioni ambientali come esternalità negative e spesso costringono i produttori a migliorare le loro prestazioni ambientali attraverso il sistema legale ed i mass media. Gli attori legati al mercato, come ad esempio le imprese, si occupano di questioni ambientali principalmente per migliorare le prestazioni e / o le relazioni infra-aziendali (Zhu and Sarkis, 2007).

(Garetti and Taisch, 2012) sottolineano inoltre come, forti della pressione odierna per la sostenibilità e l'efficienza energetica, le norme e gli standard si stanno trasformando nel fulcro dell'economia e ancora di più nel fulcro centrale delle aziende. In questo contesto, un'attenzione speciale deve essere rivolta al raggiungimento di una produzione standardizzata, sostenibile ed efficiente dal punto di vista energetico. Infatti, da una prospettiva economica, gli standard e le norme hanno un effetto sulla crescita economica pari a quello dei brevetti e delle licenze (Garetti and Taisch, 2012).

È interessante infine notare, come riportato da (Tanaka, 2011), che la maggior parte delle politiche e delle misure di efficienza energetica non vengono utilizzate isolatamente, ma fanno spesso parte di pacchetti politici. E quindi, questi aspetti richiedono attenzione alla coerenza delle politiche per mantenere l'efficacia complessiva e l'efficienza a livello di costi.

Tale aspetto mostra anche la scala, o portata, di ogni misura. Quando la scala è piccola, come le misure sugli equipaggiamenti, sono necessarie molte misure per raggiungere determinati livelli di risparmio energetico, comportando costi di transazione elevati ma anche una maggiore visibilità degli effetti. D'altra parte, le misure applicate su grande scala, come l'intera economia o più imprese, hanno costi di transazione relativamente inferiori. Tuttavia, poiché tali misure offrono alle aziende maggiori gradi di libertà e flessibilità nelle loro azioni di conformità, i loro effetti sono più difficili da quantificare (Tanaka, 2011).

### 3.5.2. Ruolo delle politiche

In questo paragrafo viene riportato il ruolo delle politiche e la loro finalità, per comprendere al meglio a cosa servano e come debbano essere implementate per ricavarne un'utilità massima.

(Dagiliene et al., 2020) riporta il fatto che le imprese manifatturiere cercano di legittimare la propria posizione e le proprie azioni riflettendo logiche istituzionali incentrate su fattori normativi e *best practices* piuttosto che requisiti legislativi. Quest'osservazione è importante, in particolare per gli standard e gli organismi professionali, poiché le linee guida per la rendicontazione della sostenibilità e le certificazioni di terze parti possono fungere da facilitatori della traduzione delle pratiche commerciali circolari nei rapporti delle aziende (Dagiliene et al., 2020).

Andando invece ad indagare il ruolo delle politiche, i governi forniscono sostegno alle imprese attraverso una regolamentazione che funge da fattore di spinta e attrazione per l'implementazione dell'eco-innovazione all'interno delle imprese. Essi sviluppano ed implementano anche politiche che rafforzano la riduzione, riutilizzo, riciclaggio e recupero, ossia il

modello 4-R del modello CE (Manickam e Duraisamy, 2019). Il successo nel raggiungimento degli obiettivi di EC e resistenza al cambiamento climatico richiede inoltre sostegno finanziario e la creazione di segnali di mercato al fine di allineare gli interessi dei produttori e dei consumatori (Durán-Romero et al., 2020). Il governo deve stabilire quindi incentivi sia per le imprese che per i consumatori, implicando lo sviluppo di nuove e radicali eco-innovazioni ed una maggiore consapevolezza sociale che miri a cambiare i comportamenti dei consumatori e dei produttori verso un'economia più collaborativa (Durán-Romero et al., 2020). Infine, (Tanaka, 2011) evidenzia come la politica faciliti gli sforzi tecnici delle imprese. L'uso efficace della politica per il miglioramento dell'efficienza energetica dipende da come essa può quindi dare incentivi, direttamente o indirettamente, al settore industriale per ogni possibile miglioramento tecnico.

Infine, Zofio and Prieto (2001) sottolineano come, nello stabilire standard normativi ragionevoli, i regolatori dovrebbero tenere conto di considerazioni fisiche, economiche e legali della produzione.

Da un punto di vista fisico, i processi produttivi sono azioni termodinamiche che inevitabilmente generano in una certa misura rifiuti. Tuttavia, la quantità di rifiuti prodotta solitamente varia in base alla tecnologia che viene applicata, ad es. tecniche più nuove e più costose sono in grado di produrre quantità uguali di produzione desiderabile con contaminanti inferiori (Zofio and Prieto, 2001). Da un punto di vista economico, l'implementazione di tecnologie più rispettose dell'ambiente richiede la sostituzione delle tecnologie precedenti con quelle nuove. Questo processo richiede normalmente grandi investimenti che possono essere intrapresi solo per un numero di anni limitato. Infine, l'azione politica, ad es. accordi internazionali, hanno ripercussioni legali e impegnano le amministrazioni nazionali a imporre i massimi livelli di contaminazione alle industrie nazionali. Tenendo presenti queste diverse dimensioni dell'azione normativa, quindi, quando i funzionari pubblici fissano un dato standard di settore, devono conciliare una situazione di interesse multiplo (Liberatore, 1995).

### 3.5.3. Tipologie di politiche

In questo paragrafo vengono riportati tre modelli teorici di analisi delle politiche riportati in letteratura. Questi sono in particolare il modello a quintupla elica (QHM) presentato da (Durán-Romero et al., 2020), la teoria neo-istituzionale formulata da DiMaggio e Powell (1983) e la teoria di (Tanaka, 2011), che viene ripresa anche nei paragrafi successivi.

La teoria neo-istituzionale viene utilizzata per spiegare il motivo per cui possono essersi verificati cambiamenti nei processi organizzativi delle imprese (ad esempio, pratiche di reporting ambientale) e per spiegare il processo che ha portato all'adozione di sistemi, metodi e regole innovativi simili (KleinWoolthuis e Taminiau, 2017; Scott, 1995; DiMaggio e Powell, 1983).

L'assunzione principale è che, quando le organizzazioni sono influenzate da pressioni esterne, cercano di adottare quelle regole e routine che sono percepite come legittime nella società. In questo modo, le organizzazioni cercano di aumentare la loro legittimità incorporando nuove pratiche, norme e valori, nonché di comunicare agli stakeholder esterni (ad esempio gli investitori) un allineamento tra le loro norme ed i loro valori e quelli della società (Milne e Patten, 2002). DiMaggio e Powell (1983) definiscono la tendenza delle organizzazioni ad adottare regole e routine simili come isomorfismo, che può essere ulteriormente suddiviso in pressioni coercitive, normative e mimetiche.

Secondo DiMaggio e Powell, l'isomorfismo coercitivo "nasce dall'influenza politica e dal problema

della legittimità” e deriva da pressioni formali e informali esercitate da altre organizzazioni da cui l'organizzazione dipende o da aspettative della società, e.g. disposizioni governative ma anche dei clienti. Pertanto, il pilastro normativo svolge un ruolo stabilizzante che opera principalmente attraverso meccanismi coercitivi e sanzioni per non conformità. Tali meccanismi hanno un impatto positivo sia sulla responsabilità sociale d’impresa che di contabilità ambientale (Otham et al., 2011; Ferdous et al., 2019). Pertanto, ci si può aspettare che le aziende cerchino di legittimare la loro transizione verso attività sostenibili riflettendo le logiche istituzionali (Dagilene et al., 2020). Il pilastro normativo si riferisce a regole che introducono una dimensione prescrittiva, valutativa e obbligatoria nella vita sociale (Scott, 1995). L'isomorfismo normativo deriva "principalmente dalla professionalizzazione" (DiMaggio e Powell, 1983) e fornisce una base morale di legittimità che si riferisce a valori e norme stabiliti. Quindi l'adozione di sistemi di gestione informali, come gli standard di certificazione (ISO14001, ISO14006, EMAS) potrebbe spostare le aziende verso un business più sostenibile (Scarpellini et al., 2020) e supportare lo sviluppo di indicatori di prestazione ambientale (Latan et al., 2018).

Infine, l'isomorfismo mimetico risulta da "risposte standard all'incertezza" (DiMaggio e Powell, 1983). Quando strutture e sistemi non sono ben compresi, quando gli obiettivi sono ambigui o quando l'ambiente sociale è incerto, le organizzazioni tendono a seguire le regole e le routine di altre organizzazioni simili e di maggior successo.

(Dagilene et al., 2020) ha analizzato l’applicazione di questi effetti e scoperto che le aziende manifatturiere, come non ci si potrebbe aspettare, cercano di legittimare la propria posizione e le proprie azioni riflettendo logiche istituzionali incentrate su fattori normativi e best practice piuttosto che requisiti legislativi. Inoltre, hanno riscontrato che i fattori coercitivi, ossia una legislazione più forte del paese verso l’EC e lo stato di quotazione, non influenzano le aziende a divulgare più informazioni ambientali e di EC. È stato inoltre riscontrato che le pressioni normative e mimetiche hanno un'influenza significativa sulla rendicontazione ambientale dal punto di vista EC, mentre l'impatto dei fattori coercitivi non era significativo. Pertanto, le imprese manifatturiere cercano di legittimare le loro azioni riflettendo logiche istituzionali basate su fattori normativi, e quindi di mercato, e best practice, e quindi di benchmarking, piuttosto che su fattori coercitivi.

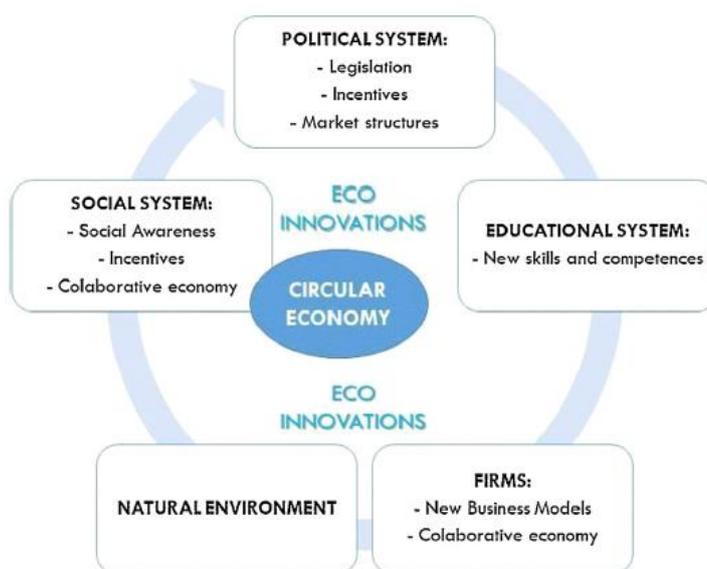


Figura 29. QHM ed eco-innovazioni, tratto da Duran Romero et al. (2020)

Il modello a Quintupla Elica (QHM), presentato in Figura 29, si basa sul modello a quadrupla elica ma inserisce anche l'ambiente naturale, oltre ai quattro componenti chiave. Questi sono il sistema politico (in quanto legislatore e regolatore di mercato), il sistema educativo (in quanto fornitore di competenze e capacità), quello sociale e le imprese (Durán-Romero et al., 2020).

Esso offre una coerenza tra tutte le eliche, dalle istituzioni pubbliche (in alto) alle imprese (in basso) alla ricerca di un equilibrio tra economia e ambiente e includendo la società civile. L'interazione tra diversi sottosistemi (educativo, industriale, politico, sociale e ambiente naturale) della

QHM e la circolazione dei flussi di conoscenza che fungono da input tra di loro, promuovono innovazioni, creano valore e contribuiscono a un futuro sostenibile (Carayannis et al., 2012; Carayannis e Campbell, 2019). Quindi, le iniziative che stimolano l'innovazione in ciascuna spirale in cui le organizzazioni pubbliche e private interagiscono, cercano di avere un impatto positivo su tutti gli altri sottosistemi e sulla società nel suo insieme, avendo il potenziale per creare un quadro favorevole per la sostenibilità. Dati gli sviluppi esistenti nel campo, il QHM può essere considerato un quadro teorico appropriato per le politiche del cambiamento climatico e della transizione verso l'EC, che richiedono un approccio transdisciplinare, la partecipazione di più parti interessate (Behrens, 2016) insieme allo sviluppo dell'innovazione in ciascuna elica (Yun e Liu, 2019).

Per (Tanaka, 2011), i governi utilizzano due approcci politici generali e vari flussi di influenza per incoraggiare l'industria a migliorare la propria efficienza energetica, vedi Figura 30. Tali approcci generali sono: (1) misure specifiche dell'azienda o del settore e (2) misure a livello di settore o dell'economia incentrate sulle circostanze ambientali e sociali in cui operano le aziende ed i settori. In particolare, le misure specifiche includono regolamentazioni, strumenti finanziari diretti e accordi; le misure generali includono tasse sull'energia, tasse sul carbonio e scambio di emissioni. Esistono anche altre politiche che creano un ambiente per l'industria per migliorare il risparmio energetico, ad esempio l'istruzione e la formazione (Tanaka, 2011).

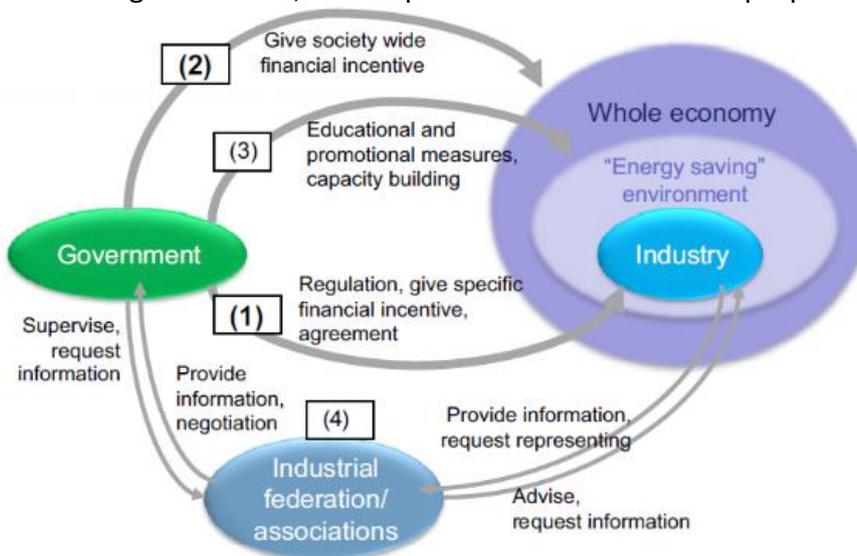
In particolare, come viene riportato in Tabella 8 nel prossimo paragrafo, le politiche si possono dividere in tre categorie, ossia prescrittive, economiche e di supporto.

Le politiche prescrittive sono regolamenti, mandati e accordi che impongono direttamente azioni specifiche o comunicano aspettative a industrie, aziende e / o associazioni.

Le politiche economiche sono tasse e sgravi fiscali, sostegni finanziari diretti (es. sovvenzioni e prestiti), schemi di scambio e prezzi energetici differenziati che cercano di influenzare il rapporto costo-beneficio delle azioni tecniche.

Infine, le politiche di supporto sono strumenti di identificazione delle opportunità di efficienza energetica (ad esempio, raccolta dati, audit energetici e benchmarking), misure cooperative (ad esempio, contest e partnership), sviluppo di capacità e consulenze che aiutano a creare un ambiente favorevole per le transizioni tecniche (Tanaka, 2011).

Altri due tipi di politiche non inclusi però nell'analisi sono: (1) ricerca, sviluppo sponsorizzati dal governo (RD&D) e (2) investimenti governativi diretti. Le caratteristiche della RD&D sponsorizzata dal governo, che vanno dalla ricerca scientifica di base allo sviluppo tecnologico specifico dell'applicazione, sono molto specifiche del progetto, che però sono troppo numerosi e troppo incerti nella portata e nella tempistica dei loro effetti per essere inclusi nell'analisi. Mentre l'investimento diretto del governo in apparecchiature e processi industriali efficienti dal punto di vista energetico è raro, anche quando le aziende sono di proprietà statale (Tanaka, 2011).



Valutando l'effettiva implementazione di queste teorie, le politiche di sostegno sono la categoria più prevalente (40% di tutte le misure), seguite dalle politiche economiche (35%) e dalle politiche prescrittive (24%) (Tanaka, 2011).

Figura 30. Interazioni tra economia ed istituzioni, tratto da Tanaka (2011).

### 3.5.4. Esempi di politiche

Vengono di seguito presentati alcuni esempi di politiche prima a livello macro, ossia di piani nazionali o europei, e poi a livello di singole politiche.

Come sottolineato in *The Circular Gap Report*, "il mondo può massimizzare le possibilità di evitare pericolosi cambiamenti climatici passando a un'economia circolare, consentendo così alle società di raggiungere gli obiettivi dell'accordo di Parigi sull'azione per il clima" (Circle Economy, 2019). Ad esempio, il governo cinese ha incluso il concetto nei suoi ultimi piani quinquennali per lo sviluppo economico e sociale nazionale (Su et al., 2013; Zhou et al., 2014; Wu et al., 2014) e ha sviluppato iniziative per la promozione produzione più pulita, prevenzione dell'inquinamento e controllo dei rifiuti. Alcune ONG nel Regno Unito, come la Ellen MacArthur Foundation, hanno affrontato l'implementazione della CE (Ellen MacArthur Foundation, 2012, 2013, 2014). Altri paesi come Danimarca, Francia, Germania, Paesi Bassi, Sud Africa, Svezia e Vietnam hanno sviluppato conferenze o iniziative in materia di riduzione dei rifiuti o programmi di riciclaggio relativi al modello EC. A livello europeo invece, nel 2019, una relazione sull'attuazione del piano d'azione per l'economia circolare ha rafforzato la necessità di impiantare il piano d'azione (Commissione europea, 2019) e recentemente è stato introdotto un nuovo piano di economia circolare per un'Europa più pulita e competitiva (Durán-Romero et al., 2020).

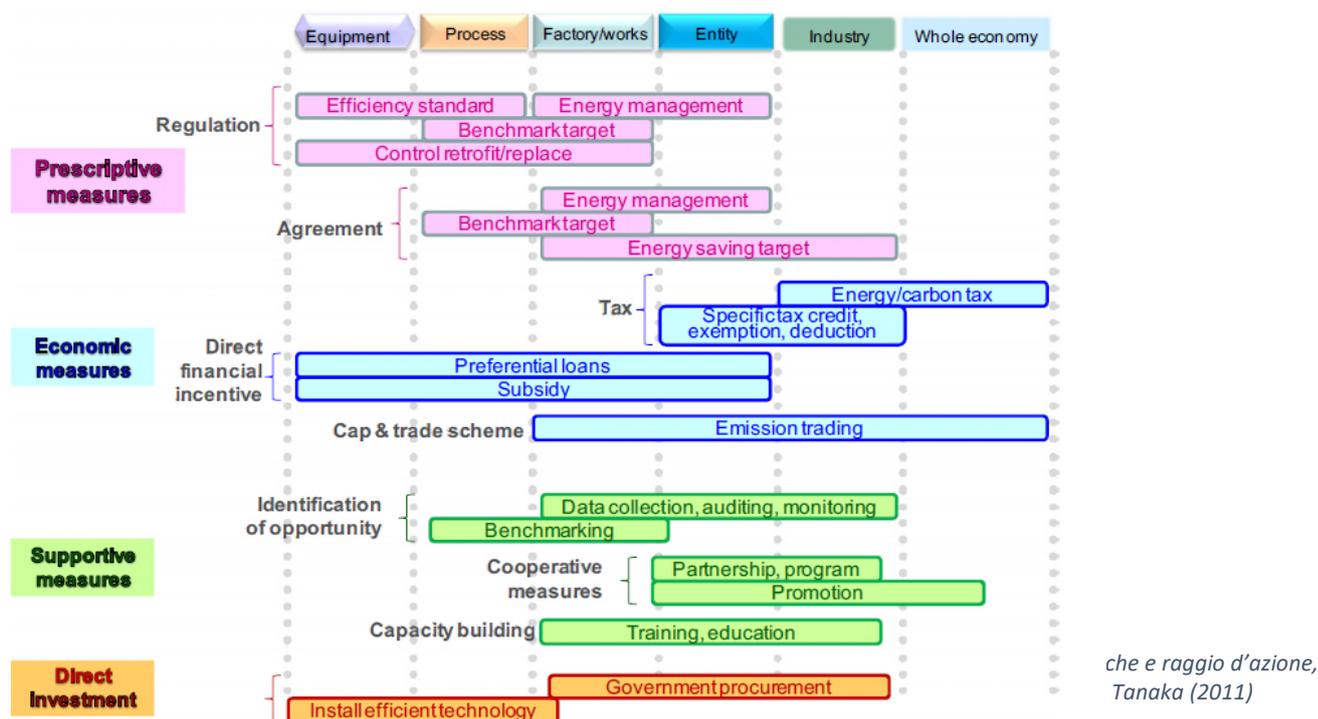
(Tanaka, 2011) riporta le principali politiche, presentate in Tabella 8, ed il loro spettro di azione, in Figura 31, evidenziandone anche le tendenze principali. In particolare, i paesi esaminati hanno introdotto per la prima volta accordi negoziati per promuovere gli sforzi volontari dell'industria e le normative per la gestione energetica come misure per dare flessibilità all'industria nella scelta delle azioni di risparmio energetico, ma poi si sono spostati verso schemi più obbligatori mirati a obiettivi specifici. Tra le politiche economiche, sussidi e prestiti preferenziali, spesso legati agli audit energetici, sono stati utilizzati dalla metà e dalla fine degli anni '70. Sono state introdotte tasse sul carbonio e riduzioni delle tasse sull'energia legate ad azioni di efficienza energetica, ma non hanno avuto grande popolarità. Al contrario, i sistemi di limitazione e scambio delle emissioni di gas a effetto serra sono stati introdotti solo di recente, ma rappresentavano già nel 2011 il 7% di tutte le misure, con una fortissima implementazione a livello europeo (Tanaka, 2011).

In particolare, anche grazie alla vittoria del Premio Nobel 2018, si ha avuta una sempre maggiore attenzione alla *carbon tax*, ovvero una tassa sull'impronta di carbonio con l'intento di penalizzare le aziende sulla produzione e distribuzione "a lunga distanza" non rispettose dell'ambiente, aumentando la tassa su di esse (Gemechu et al., 2012). Pertanto, la presenza di questo tipo di tassa sull'impronta di carbonio aiuta a invogliare i rivenditori a rifornirsi dai produttori vicini o quelli con metodi produttivi e logistici più efficienti e verdi, portando direttamente alla riduzione degli inquinanti ed al miglioramento della sostenibilità ambientale (Choi, 2013).

Tipologie di politiche	Esempi
<b>Prescrittive</b>	
Regolamentazioni per l'efficienza dell'equipaggiamento	Standard di efficienza
Regolamentazioni per l'efficienza dei processi	Target e prescrizioni di obiettivi del processo
Regolamentazioni per la gestione energetica	Standard di gestione e piani energetici Energy Manager interni e consulenti esterni
Negoziare di accordi	Target e obiettivi di efficienza energetica Preparazione di piani di conservazione
<b>Economiche</b>	

Tasse sul consumo energetico	Tasse
Sconti fiscali	Crediti, deduzioni o esenzioni fiscali
Incentivi finanziari diretti	Sussidi, sconti o finanziamenti preferenziali
Cap and trade	Trading delle emissioni
Prezzi differenziati dell'energia	Controllo delle tariffe
<b>Di supporto</b>	
Identificazione delle opportunità di efficienza energetica	Raccolta di dati di consumo
	Monitoraggio e benchmarking
Misure cooperative	Promozione di partnership
	Programmi competitivi e collaborativi
Creazione delle competenze	Consulenze, formazione ed educazione

Tabella 8. Esempi di politiche, adattato da Tanaka (2011)



### 3.5.5. Effetti dell'implementazione delle politiche

In conclusione, vengono riportati gli effetti dell'implementazione delle diverse politiche secondo quanto riportato in letteratura in diversi ambiti e settori, oltre che paesi.

Ad esempio, secondo quanto riportato da (Durán-Romero et al., 2020), l'analisi dell'adozione del modello EC in tre industrie ad alta intensità di risorse (trasporti, cibo e costruzioni) ha mostrato che le emissioni di CO<sub>2</sub> nell'UE diminuirebbero del 48% entro il 2030 e dell'83% entro il 2050, rispetto ai livelli del 2012 (EMF, 2013). Inoltre, strategie EC applicate in quattro settori ad alta intensità energetica (cemento, alluminio, acciaio e plastica) hanno dimostrato una possibile riduzione delle emissioni europee del 56% annuo entro il 2050. Su scala globale, il risparmio di emissioni potrebbe raggiungere 3,6 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub> all'anno (Materiale Economia, 2018). Un'EC applicata all'industria alimentare potrebbe ridurre le emissioni del 49%, ovvero 5,6 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub> (EMF, 2019). Lo studio ha concluso che le strategie di efficienza dei materiali possono ridurre le emissioni dei materiali e dell'energia operativa negli alloggi del 40% entro il 2050 nei paesi del G7 e fino al 70% in India e Cina; e nei veicoli del 30-40% entro il 2050 nei paesi del G7, in India e in Cina (Durán-Romero et al., 2020).

Un esempio più pratico è dato dal rapporto del Club di Roma, che ha stimato gli effetti macroeconomici di uno spostamento verso un'EC in cinque paesi (Finlandia, Francia, Paesi Bassi, Spagna e Svezia). Lo studio si è basato sull'introduzione di tre azioni parallele: 25% in più di efficienza nell'uso dell'energia, riduzione del 50% nell'uso di combustibili fossili a favore delle energie rinnovabili e un uso più efficiente dei materiali. Le stime indicano che le emissioni di CO<sub>2</sub> diminuirebbero tra il 65% e il 70% (Wijkman e Skånberg, 2016).

In tema *carbon tax* invece, Hua et al. (2011) hanno derivato la politica di inventario ottimale ed esplorato gli impatti portati da fattori come il prezzo del carbonio e il limite di carbonio sulle decisioni di inventario ottimali e la rispettiva quantità di inquinanti e costi di carbonio. Mentre (Choi, 2013) ha esplorato gli effetti della tassa sulle modalità di approvvigionamento in ambito *quick response* (QR), ossia una politica di inventariato molto rapida con forte outsourcing nei paesi in via di sviluppo usata nella moda per rispondere rapidamente ai cambiamenti della domanda, ed ha osservato che:

- 1) In presenza della tassa sul carbonio, il produttore sarà invogliato ad impiegare fornitori locali come unica modalità di approvvigionamento perché le rispettive aspettative economiche possono essere facilmente soddisfatte.
- 2) Dal punto di vista del rischio operativo, quando è presente la tassa sul carbonio, il rivenditore di moda può ridurre il proprio livello di rischio scegliendo di rifornirsi dal produttore locale con QR. Questo effetto di riduzione del rischio è anche dimostrato uguale all'effetto di riduzione dell'incertezza della domanda per il singolo scenario di ordinazione (Choi, 2013).

Andando invece a seguire i filoni della teoria istituzionale, l'esistenza di pressioni di mercato (normative) e coercitive spinge le organizzazioni a migliorare le prestazioni ambientali, soprattutto quando queste pressioni causano l'adozione di pratiche di progettazione ecocompatibile e approvvigionamenti verdi (Zhu and Sarkis, 2007). Più nel dettaglio, i produttori che devono far fronte a pressioni normative più elevate tendono a implementare approvvigionamenti verdi e aumentare gli investimenti, mentre l'esistenza di una pressione competitiva (mimetica) migliora in modo significativo i vantaggi economici derivanti dall'adozione di una serie di pratiche GSCM senza influenze deleterie sulle prestazioni ambientali (Zhu and Sarkis, 2007).

Pertanto, se i manager implementano forniture verdi a seguito di pressioni normative, le prestazioni ambientali tendono ad essere migliori. Incentivare forniture verdi come parte della politica normativa, così come per l'introduzione della certificazione ISO 14001, migliorerà le prestazioni ambientali, senza fare la differenza in termini di impatto sulle prestazioni economiche. Allo stesso tempo, la pressione normativa causa anche una peggiore performance economica per quanto riguarda il ritorno degli investimenti. L'implicazione di questo risultato è che i responsabili delle politiche normative dovrebbero spingere gli approvvigionamenti verdi, fornendo al contempo aiuto alle aziende per praticare il ritorno degli investimenti attraverso il benchmarking e la creazione o il miglioramento dei sistemi politici e produttivi (Zhu and Sarkis, 2007).

In conclusione, ricordiamo che nessuna singola politica o misura è universale. In primo luogo, ogni settore è diverso, ha esigenze e deve affrontare barriere diverse per migliorare l'efficienza energetica in diverse regioni e paesi. In secondo luogo, sono state condotte troppe poche valutazioni dell'efficacia delle politiche per capire come le politiche potrebbero essere trapiantate con profitto in altri luoghi e situazioni. Infine, le azioni tecniche per migliorare l'efficienza energetica possono incontrare più barriere, che non possono essere affrontate con una singola misura, quindi è necessario un pacchetto di misure (Tanaka, 2011).

<b>Criteri</b>	<b>Politiche prescrittive</b>			<b>Politiche economiche</b>			<b>Politiche di supporto</b>
	<i>Regolamentazioni sull'efficienza produttiva</i>	<i>Regolamentazioni sulla gestione energetica</i>	<i>Accordi negoziati</i>	<i>Tasse sul consumo e sulle emissioni</i>	<i>Cap &amp; trade</i>	<i>Incentivi fiscali e finanziari</i>	<i>Identificazione di opportunità, cooperazione e creazione di competenze</i>
<b>1. Riduzione del consumo energetico e delle emissioni in maniera economica</b>							
1.1. Potenziale tecnico di riduzione di consumo ed emissioni	Medio-Basso	Medio-Basso	Medio-Alto	Alto	Alto	Medio-Basso	Medio-Alto
1.2. Ambizione e precisione delle misure nell'area coperta	Alto	Medio-Alto	Medio-Basso	Alto	Alto	Medio	Alto
1.3. Flessibilità di adesione	Basso	Alto	Alto	Alto	Alto	Medio-Basso	Alto
<b>2. Facilità di sviluppo ed esecuzione delle politiche</b>							
2.1 Comprensibilità senza bisogno di competenze tecniche specifiche	Basso	Alto	Basso	Alto	Basso	Medio-Basso	Alto
2.2. Facilità di misurazione degli effetti	Medio-Alto	Medio	Medio	Basso	Medio	Medio-Alto	Basso
<b>3. Effetti secondari</b>							
3.1. Accelerazione della Ricerca e Sviluppo di lungo termine	Medio	Medio	Medio	Medio-Basso	Medio-Basso	Medio-Alto	Medio-Alto

Tabella 9. Effetti delle politiche, adattato da Tanaka (2011)

## 3.6. Sviluppo prodotto

### 3.6.1. Introduzione, contesto e vantaggi

Innanzitutto, riportiamo quanto detto da Ottman et al. (2006), che affermano che “sebbene nessun prodotto di consumo abbia un impatto zero sull'ambiente, nel business i termini 'prodotto verde' o 'prodotto eco-sostenibile' sono usati comunemente per descrivere quelli che si sforzano di proteggere o migliorare l'ambiente naturale, conservare energia e/o risorse e ridurre o eliminare l'uso di agenti tossici, inquinamento e rifiuti”. D'altronde, descrivere un prodotto come sostenibile è problematico a causa di problemi di volume e scala della produzione, nonché di impatti variabili a seconda dei contesti in cui un prodotto specifico viene realizzato, utilizzato e riutilizzato o smaltito. Inoltre, esistono molte sfide legate agli sforzi attuali per valutare prodotti e materiali a causa di dati insufficienti, mancanza di accordo sui criteri e difficoltà nel considerare gli impatti cumulativi (Waage, 2007). Detto ciò, in questo capitolo verranno analizzate le tecniche, gli approcci, i vantaggi e le barriere dell'implementazione di strategie di sviluppo di prodotti verdi o sostenibili.

È noto infatti che, sebbene solo il 5-7% dell'intero costo del prodotto sia attribuibile alla progettazione iniziale, le decisioni prese durante questa fase influenzano il 90% del costo totale del prodotto (Ramani et al., 2010; Waage, 2007). Allo stesso modo, si può ipotizzare un ragionamento analogo per gli impatti ambientali, ossia che la sostenibilità del prodotto è in gran parte determinato durante la fase iniziale di progettazione. A causa degli alti livelli di incertezza riguardo alla realizzazione del progetto nella fase iniziale di progettazione, nuovi metodi e strumenti sono essenziali, pertanto, per fornire ai progettisti una base per accertare il grado di sostenibilità di un dato prodotto o processo (Ramani et al., 2010). La vera sfida è quindi anticipare con precisione i costi e i benefici per quanto riguarda la competitività del prodotto. La progettazione di prodotti ecocompatibili ha ricevuto inoltre la dovuta attenzione perché la progettazione del prodotto influenza in modo significativo il costo di smontaggio, ispezione e riparazione dei componenti, rigenerazione e riciclo (Waage, 2007).

Inoltre, durante le prime fasi di progettazione, il designer ha il potere di plasmare l'intento progettuale del progetto per influenzare il comportamento dei consumatori. Ciò è particolarmente importante nel campo della sostenibilità in cui le politiche normative e la coscienza dei consumatori devono ancora essere completamente sviluppate. È necessaria l'integrazione con la gestione del ciclo di vita del prodotto e la gestione dell'interoperabilità nei modelli di conoscenza ambientale oltre a consentire al progettista di interagire con i modelli di conoscenza e i dati di progettazione, nonché di visualizzare i dati acquisiti dai prodotti precedenti. Per una maggiore sostenibilità è necessario un approccio basato sull'intera comunità che combini ricerca accademica, fonti nazionali, privati e perfino eco-distretti con grandi imprese (Ramani et al., 2010).

Per quanto riguarda la definizione di prodotto verde, i campi della psicologia (Fishbein 1967) che dell'economia (Lancaster 1966) suggeriscono che i prodotti siano definibili come insiemi di attributi (o qualità), sui quali i consumatori possono avere preferenze eterogenee. Gli attributi ambientali tipici elencati in varie guide verdi per i consumatori includono ad esempio riciclabilità, contenuto riciclato, efficienza del trasporto, riduzione del contenuto tossico ed emissioni (Chen, 2001). Gli attributi ambientali possono essere incorporati attraverso varie decisioni di progettazione, come la selezione dei materiali, il design della confezione e l'utilizzo di energia e solventi. Secondo l'US EPA (1991), tuttavia, una delle maggiori sfide per l'industria è quella di

sviluppare prodotti ecocompatibili che non entrino in conflitto in modo significativo con le caratteristiche o le prestazioni dei prodotti tradizionali, come sicurezza, velocità e convenienza. A causa della natura multi-obiettivo dello sviluppo di prodotti verdi, molto spesso il miglioramento di un attributo può essere realizzato solo a scapito di un altro.

Tuttavia, lo sviluppo di prodotti verdi, che affronta le questioni ambientali attraverso la progettazione e l'innovazione del prodotto, sta ricevendo un'attenzione significativa da parte di consumatori, industrie e governi di tutto il mondo. Un sondaggio condotto dal Gallup International Institute (1992) riporta che il 65% degli americani, il 59% dei tedeschi e il 31% dei giapponesi esprimono la propria disponibilità a pagare un premio verde su un prodotto eco-sostenibile. Inoltre, secondo lo studio di (Garetti and Taisch, 2012), il 72% degli intervistati ha dichiarato che pongono maggiore attenzione durante gli acquisti, dato che il 59% è preoccupato che "la società è cresciuta troppo sconnesso dal mondo naturale" ed il 64% dichiara che riceve anche benefici psicologici dall'acquisto di un prodotto ecologico.

Per quanto riguarda invece i vantaggi legati allo sviluppo di prodotti verdi o sostenibili, la valutazione degli impatti della progettazione del prodotto nelle altre fasi del ciclo di vita, integrandosi con la Gestione del Ciclo di vita del Prodotto (Product Lifecycle Management o PLM) può consentire una maggiore generazione di valore (Badurdeen and Jawahir, 2017). Un tale approccio consentirà infatti l'esplorazione di tutte le alternative per soddisfare i requisiti di processo per la sua ottimizzazione, incluso un focus sulla sostenibilità in tutti i processi e una pianificazione ottimizzata per tutti i processi 6R. Migliori modelli di costo del ciclo di vita consentiranno una previsione più accurata dei costi e l'ottimizzazione degli attributi di prodotto e processo per creare il valore totale del ciclo di vita così da fornire prodotti migliori a costi inferiori.. Infatti, migliori modelli di costo, che incorporano i dati di tutte e quattro le fasi del ciclo di vita del prodotto consentiranno una valutazione dei costi più accurata nelle prime fasi del processo di sviluppo per ridurre il costo del prodotto. Permetteranno inoltre di sviluppare progetti di prodotti che consentano una migliore gestione della fine del ciclo di vita (riutilizzo, rigenerazione o riciclo) per promuovere un maggiore recupero di valore. In quello stato immaginato, la progettazione di prodotti più sostenibili sarà un processo virtuale facilitato da una serie completa di strumenti basati su computer che consentiranno di eseguire una valutazione di tutti i requisiti di sostenibilità e possibilità di prodotti alternativi (Badurdeen and Jawahir, 2017) come ad esempio il gemello digitale presentato più avanti.

Oltre a ciò, un prodotto o un processo sostenibile è intuitivamente allettante, poiché i prodotti la cui produzione e utilizzo comportano meno energia, meno input di materiale e meno rifiuti e inquinamento dovrebbero essere convenienti sia per il consumatore che per il produttore. In pratica, tuttavia, sviluppare un prodotto che eccelle in termini ambientali pur rimanendo economicamente e tecnicamente competitivo, è una sfida significativa. Affrontare questa sfida per creare una soluzione "vantaggiosa per tutti", o almeno per gestire in modo più ottimale qualsiasi compromesso che si presenta, rende un lavoro di base competente probabilmente ancora più cruciale (Pujari, 2006). Poi, la letteratura evidenzia diversi vantaggi che possono derivare dall'integrazione delle questioni di sostenibilità ambientale nello sviluppo del prodotto e nelle operazioni aziendali: maggiore efficienza nell'uso delle risorse, ritorno sugli investimenti, aumento delle vendite, sviluppo di nuovi mercati, miglioramento dell'immagine aziendale, differenziazione dei prodotti e maggiore competitività (Dangelico and Pujari, 2010).

Infatti, anche (Dangelico and Pujari, 2010) hanno ricavato che l'aspettativa di crescita del mercato

verde e l'aumento dei profitti e il miglioramento della reputazione e dell'immagine aziendale sono fattori importanti per lo sviluppo di prodotti verdi. Altra motivazione è la responsabilità ecologica, derivante dalla preoccupazione che le aziende hanno per obblighi e valori sociali, e che spesso trae origine da un orientamento ambientale interno all'azienda o dall'impegno personale del top management (Dangelico and Pujari, 2010).

Infine, viene presentata una rassegna sul contesto chiave per l'implementazione e l'incentivazione di tecniche di sviluppo prodotto verde.

L'ideazione di prodotti, processi e sistemi di produzione risulta essere influenzata da fattori esterni in continua evoluzione, inclusa l'introduzione di nuove normative, nuovi materiali, tecnologie, servizi e comunicazioni, la pressione sui costi e la sostenibilità. L'introduzione di nuove leggi nella produzione per ridurre l'impronta ambientale del prodotto ha avuto una profonda influenza sui processi di fabbricazione e ha portato alla nascita di una nuova generazione di apparecchiature di produzione caratterizzate da una maggiore efficienza energetica, a partire dalle macchine utensili. Inoltre, la necessità di aumentare la competitività aziendale sta portando a concepire i prodotti come entità più complesse, con il prodotto fisico arricchito da attività di servizio e comunicazione. Ciò introduce una nuova generazione di prodotti, denominati prodotti adattabili, che sono adattabili nel loro design e/o nella loro produzione (Tolio et al., 2010).

Lo sviluppo di prodotti verdi è stimolato anche da varie forme di standard ambientali imposti dai governi di tutto il mondo, divenuti sempre più severi negli ultimi trent'anni (Chen, 2001).

Andando invece ad investigare gli aspetti più interni alla catena del valore, (Pujari, 2006) afferma che le performance ecologiche di un prodotto è in gran parte determinata dagli impatti ambientali "a monte". Infatti, la prestazione ambientale del prodotto verde non è qualcosa rappresentata esclusivamente dal prodotto stesso, ma anche dall'impatto ambientale del sistema di produzione, dall'organizzazione che gli sta dietro e dalla sua catena di fornitura (Peattie, 1995).

Idealmente, l'introduzione della sostenibilità e del pensiero basato sui sistemi durante il processo di progettazione si verifica quando la sostenibilità fa parte dell'etica organizzativa, inoltre essa richiederà un'integrazione ancora più stretta in futuro dei manager responsabili dello sviluppo del prodotto, del marketing e dell'ambiente. A sua volta, uno sforzo di progettazione che incorpori il potenziale per una gestione estesa del prodotto e la re-incorporazione di materiali usati o riciclati nella produzione ha senso quando l'organizzazione è disposta a stabilire meccanismi per la raccolta dei prodotti usati e il recupero dei materiali. Per le aziende, questo approccio richiede anche la definizione di nuovi metodi finanziari per analizzare il costo dell'intero ciclo di vita di prodotti e materiali e pensare in termini di ciclo chiuso (Waage, 2007).

### 3.6.2. Fasi del ciclo di vita

Il concetto di ciclo di vita del prodotto è estremamente importante nel corso dell'analisi perché, come riporta (Dangelico and Pujari, 2010), l'innovazione verde di prodotto è un processo multiforme in cui tre tipi chiave di attenzione all'ambiente - materiale, energia e inquinamento - sono evidenziati in base al loro maggiore impatto sull'ambiente nelle diverse fasi del ciclo di vita fisico del prodotto. È importante notare che se da un lato non tutti i prodotti hanno un'impronta ambientale significativa in ciascuna fase del ciclo di vita e che l'impronta non deriva per forza da tutti gli aspetti (materiale, energia e inquinamento), dall'altro quasi tutti i prodotti hanno un impatto ambientale significativo in almeno uno delle tappe.

La gestione del ciclo di vita del prodotto (Product Lifecycle Management o PLM) è l'attività aziendale di gestione, nel modo più efficiente possibile, dei prodotti di un'impresa lungo tutto il

loro ciclo di vita, dalla prima idea del prodotto fino a quando non viene ritirato e smaltito. Il PLM è l'attività che consente ad un'impresa di aumentare i propri ricavi tramite una maggiore innovazione, riducendo il time-to-market per i nuovi prodotti e fornendo nuovi servizi per i prodotti esistenti, oltre a consentire un migliore supporto nell'uso dei prodotti da parte dei clienti (Tao et al., 2018).

Il concetto di ciclo di vita del prodotto, riportato in Figura 31, è stato proposto da Dean (1950) nel 1950 ed è stato utilizzato nella ricerca sulla strategia di marketing del prodotto da Levitt (1965). Il ciclo di vita del prodotto si riferiva inizialmente al processo dall'accettazione da parte del mercato all'eliminazione finale. Successivamente, un ciclo di vita biologicamente ispirato del prodotto è stato suddiviso in quattro fasi, ovvero introduzione, crescita, maturità e declino. Con l'avvento del *concurrent engineering*, il ciclo di vita del prodotto è stato esteso al campo dell'ingegneria e il ciclo di vita del prodotto è stato ridefinito per coprire l'intero processo dall'analisi della domanda del prodotto, progettazione, approvvigionamento, produzione, trasporto, vendita, utilizzo e assistenza post-vendita fino al riciclo (Tao et al., 2018).

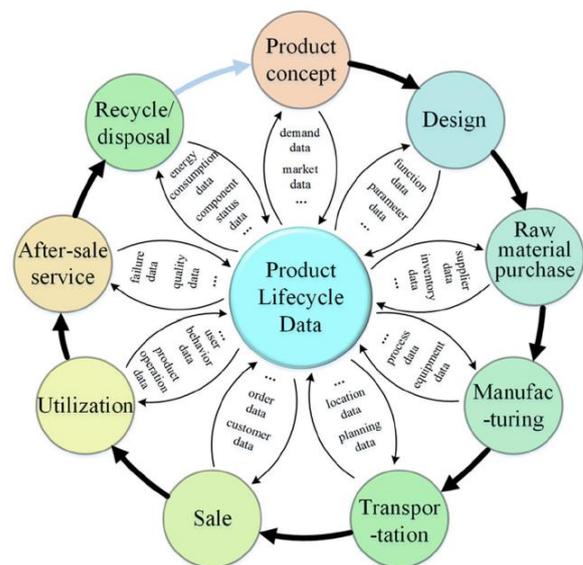


Figura 31. Fasi del ciclo di vita, tratto da Tao et al. (2017)

A questo punto, vengono riportati tre concetti chiave rilevati in letteratura, che permettono una migliore comprensione dell'utilità del ciclo di vita nello sviluppo di prodotto sostenibile e degli strumenti utili a questa transizione, ossia il concetto di obsolescenza, quello di gemello digitale (o *digital twin*) e dell'ingegnere del ciclo di vita (*lifecycle engineer*).

Il gemello digitale, concetto proposto da (Tao et al., 2018), è una simulazione multi-fisica, multi-scala e probabilistica integrata di un prodotto che utilizza modelli fisici, programmi di simulazione, aggiornamenti dei sensori etc., per simulare la vita del gemello fisico corrispondente.

L'idea e il concetto di gemello digitale, che è composto da prodotto fisico, prodotto virtuale e dati connessi che legano prodotto fisico e virtuale, possono realizzare la convergenza tra lo spazio fisico e virtuale del prodotto (Tao et al., 2018), sul modello dei CPS dell'Industria4.0. Il gemello digitale può infatti confrontare e analizzare direttamente i valori teorici dei big data e i valori reali delle attività del ciclo di vita del prodotto. Di conseguenza, può ottimizzare in modo iterativo varie attività nell'intero ciclo di vita del prodotto. Nello spazio virtuale del gemello digitale, è possibile simulare, monitorare, ottimizzare e verificare varie attività nell'intero ciclo di vita del prodotto, con possibilità di autoevoluzione (Tao et al., 2018). Pertanto, il gemello digitale permette di modificare il prodotto in fase progettuale, andandone ad analizzare e simulare l'intero ciclo di vita per verificare come le singole scelte progettuali ne influenzino non solo la produzione, ma addirittura la logistica ed il riciclo o il riutilizzo, permettendo così di scegliere anticipatamente le caratteristiche del prodotto più consone da un punto di vista ambientale.

(Brambila-Macias and Sakao, 2021) propongono il concetto di detentore della conoscenza del ciclo di vita dei prodotti di un'impresa, definito come ingegnere del ciclo di vita. La missione di un ingegnere del ciclo di vita è quella di anticipare, prevenire e prendere decisioni basate

sull'evidenza per determinare la migliore soluzione per specifiche sfide ambientali e aggiungere conoscenza a un team o organizzazione nel processo di sviluppo (Brambila-Macias and Sakao, 2021). La funzione di questa figura è quella di raccogliere informazioni, identificare, quantificare e assegnare priorità agli impatti ambientali per le attività rilevanti nella progettazione e comunicare al team di progettazione o all'organizzazione possibili contromisure per un uso efficiente ed efficace delle risorse nell'intero ciclo di vita al fine di ottimizzarlo e ridurre al minimo gli sprechi e l'inquinamento. La sua conoscenza dovrebbe riguardare l'analisi del ciclo di vita, i materiali e la loro selezione, l'efficienza energetica e la legislazione. Infine, non solo la conoscenza, ma anche altre abilità legate al concetto di *knowledge manager* sono evidenziate quali la comunicazione ed il ragionamento a livello di sistema produttivo e di ciclo di vita del prodotto (Brambila-Macias and Sakao, 2021). Il concetto di ingegnere del ciclo di vita nasce quindi dalla necessità di organizzare e gestire metodicamente tutte le informazioni, tecniche, ambientali e normative, richieste al prodotto nel corso del suo intero ciclo di vita. Tale figura, simbolo della sempre maggiore specializzazione richiesta agli ingegneri, ma anche del loro approccio olistico lungo tutte le fasi del ciclo di vita, potrebbe rappresentare quindi una fonte di vantaggio per le imprese che inglobano tale risorsa all'interno della propria organizzazione.

### 3.6.2.1. Infinite lifecycle model

Infine, viene ripreso il ragionamento di (Den Hollander et al., 2017), che sottolinea l'importanza di definire la durata del prodotto in termini di obsolescenza. Un prodotto diventa obsoleto se non è più considerato utile o significativo dal suo utente (Burns, 2010). La letteratura distingue diversi tipi di obsolescenza o motivi per cui i prodotti vengono scartati, ad esempio Burns (2010) individua l'obsolescenza estetica (cioè i prodotti che sono diventati obsoleti), l'obsolescenza sociale (cioè i prodotti che sono diventati fuorilegge), l'obsolescenza tecnologica e l'obsolescenza economica. Ulteriori esempi includono l'obsolescenza logistica e funzionale (Den Hollander et al., 2017). Tuttavia, ridotta alla sua essenza, tutta l'obsolescenza in ultima analisi è una perdita del valore percepito del prodotto e/o del sistema, innescata, in alcuni casi, da una ridotta funzionalità dello stesso (Box 1983). Di conseguenza, lo stato di obsolescenza non deve essere permanente, spesso può essere invertito, dando a un prodotto una nuova prospettiva di vita (Den Hollander et al., 2017).

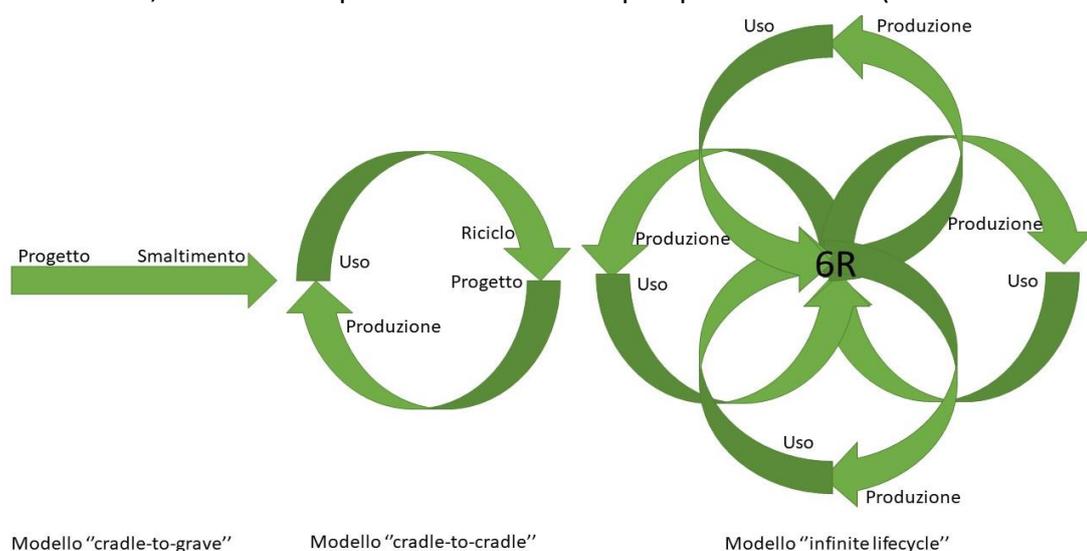


Figura 32. Confronto tra modelli di ciclo di vita

Da ciò si può evincere come il ciclo di vita del prodotto in realtà possa essere visto non più solo come lineare (vita-morte) ma come un'evoluzione su più cicli in cui si passa, tramite le 6R, da un prodotto obsoleto, e quindi con minore valore percepito, ad un altro nuovamente appetibile, con conseguente creazione del valore per il consumatore e profitti per l'impresa ad ogni passaggio da un ciclo di vita all'altro, rinominato da questo studio come modello del ciclo di vita infinito o *infinite lifecycle*, presentato in Figura 32. Tale concetto si differenzia dal modello circolare tradizionale perché non considera una singola iterazione, ma permette di mostrare le interdipendenze tra un ciclo di un prodotto ed un altro, oltre a mostrare quando e dove si abbia la creazione di valore nelle iterazioni. In particolare, si può notare come i vari cicli di vita si intersechino in corrispondenza delle fasi "passive" (fine-vita, recupero e progettazione, in contrapposizione a quelle "utili" di produzione e di uso), ad indicare il fatto che i singoli prodotti compiono il loro ciclo di vita attraverso la produzione e l'uso ma poi, nel fine-vita e riprogettazione/riciclo del modello circolare, vengono riconvertiti in altri beni. Infatti, tale modello sembra proporre anche una settima R, ossia la Reincarnazione, che in realtà include Riciclo, Rilavorazione e Riprogettazione, per cui il prodotto non viene elaborato per venire nuovamente commercializzato ma può venire scomposto e destinato ad altri prodotti, generando quindi un insieme di catene logistiche e del valore, che si intrecciano nelle varie iterazioni, o reincarnazioni del prodotto. Da questa R si può trarre quindi un paragone filosofico per spiegare il principio del modello, immaginando che il prodotto sia l'essere umano (d'altronde i modelli traggono palesemente ispirazione antropocentrica dai termini *cradle*-culla e *grave*-tomba). Di conseguenza, il modello lineare (*cradle-to-grave*) si può facilmente identificare con una teoria epicureista o nichilista della vita per cui una volta cessata la funzione utile del prodotto, esso viene abbandonato. Il modello circolare (*cradle-to-cradle*) invece si può paragonare alle grandi teorie religiose medio-orientali, tra cui il Cristianesimo e lo Zoroastrismo, per cui una volta terminata la vita vi sarà un ritorno dell'uomo/prodotto, ma generalmente sempre nella stessa forma umana. Infine, il concetto di ciclo di vita infinito è assimilabile alla teoria Induista (da cui deriva la Reincarnazione), per cui non vi è necessariamente una reincarnazione uomo-uomo, ma il bene/anima può passare da una forma ad un'altra. Allo stesso modo, si può capire come il prodotto secondo questo modello possa venir, nella sua fase "passiva" (paragonabile alla morte), reincarnato in un altro prodotto con forme, componenti ed utilità anche completamente diverse rispetto a quelle originali.

Infine, viene sottolineato il fatto che, come un motore a combustione interna a due tempi che genera potenza ad ogni rivoluzione dell'albero motore, così il prodotto, tramite la sua rilavorazione, genera nuovo valore per i clienti, secondo quanto illustrato da (Den Hollander et al., 2017), permettendo così nuovi profitti non solo per la singola impresa (ri)lavoratrice ma anche per tutta la catena di fornitura e del valore ad essa collegata.

### 3.6.3. Strumenti di progettazione e sviluppo prodotto eco-compatibile

La progettazione eco-compatibile è definita come "l'integrazione degli aspetti ambientali nella progettazione e nello sviluppo del prodotto, con l'obiettivo di ridurre gli impatti ambientali negativi durante il ciclo di vita di un prodotto" (ISO 14006, 2011). La progettazione ecocompatibile, come sopra definita, coinvolge quindi due componenti: l'elaborazione delle informazioni per la risoluzione dei problemi e l'implementazione dell'elaborazione delle informazioni nelle attività di un'organizzazione (Brambila-Macias and Sakao, 2021).

In alternativa, la Comunità Europea definisce l'eco-design come "l'integrazione sistematica degli

aspetti ambientali nella progettazione del prodotto con l'obiettivo di migliorare le prestazioni ambientali del prodotto durante tutto il suo ciclo di vita” (CE 2009). L'eco-design è ciò che Faber et al. (2005) e de Pauw (2015) definiscono come un approccio relativo, ossia come un approccio che “inizia con lo stato attuale delle cose e identifica i problemi esistenti, che le persone successivamente tentano di risolvere, con miglioramenti che avvengono in modo incrementale. In contrasto con l'approccio assoluto, il focus di questo approccio relativo non è l'ottimo, ma il meno peggio o il migliore dell'attuale” (Faber et al. 2005). Di conseguenza si deduce come non vi sia un percorso ottimale univoco nello sviluppo di pratiche di sviluppo prodotti verdi ma un insieme di strumenti, metodologie e processi che permettono di migliorare le performance dei prodotti, presentati in Figura 33 e 34.

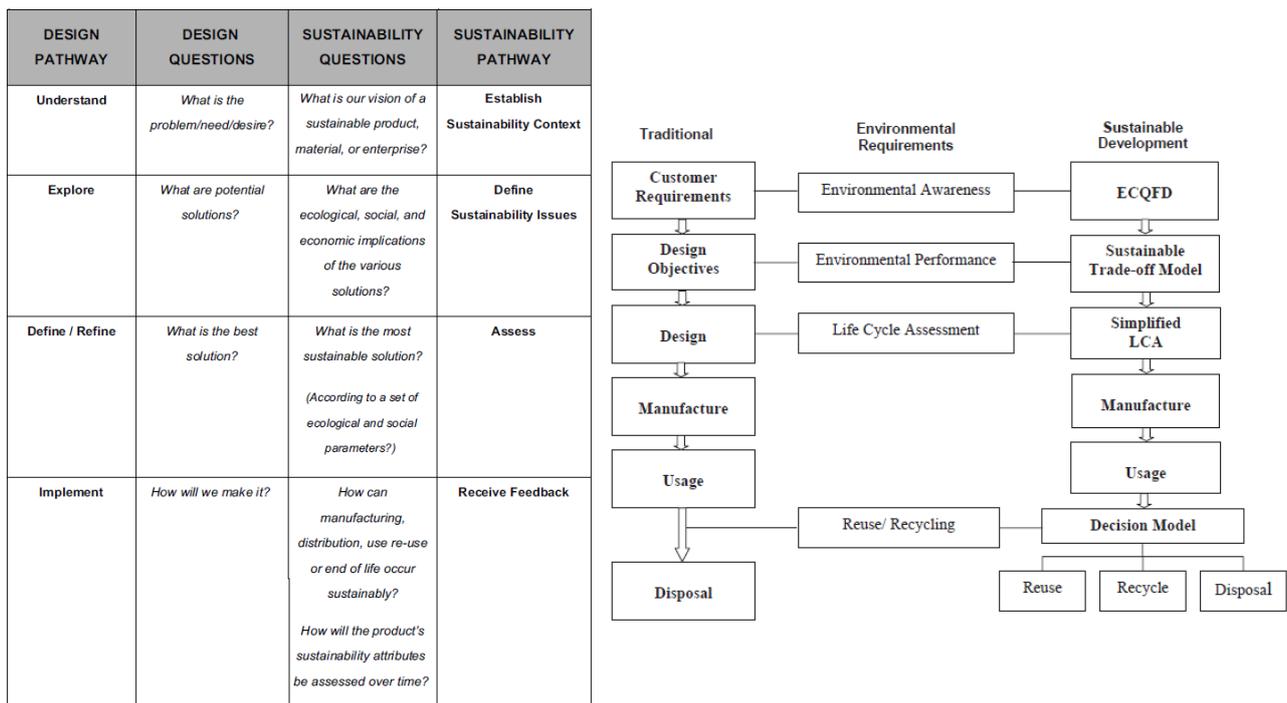


Figure 33-34. Confronto tra percorsi e metodologie progettuali tradizionali e sostenibili, tratti da Waage (2007) e Kaebnick et al.

Tradizionalmente, nel processo di progettazione sono sempre stati seguiti tre obiettivi chiave, ossia le prestazioni del prodotto (PP), costo del prodotto (PC) e costo di sviluppo (DE). Negli ultimi due decenni, per via dell'introduzione della *Concurrent Engineering*, si è aggiunto un quarto obiettivo, dovuto alla necessità di accorciare il time-to-market, ossia la velocità di sviluppo (DS). Oggi, in un'ottica di sviluppo sostenibile, va aggiunto un quinto obiettivo, la performance ambientale (EP). Ciò genera un modello di compromesso per lo sviluppo sostenibile, che può essere utilizzato per bilanciare i cinque obiettivi chiave di progettazione tra loro (Figura 35). Il vantaggio di questo approccio è che i requisiti ambientali sono pienamente integrati nel processo, godendo della stessa classificazione di importanza di tutti gli obiettivi tradizionali. Il nuovo obiettivo, la Performance Ambientale, può essere valutato applicando tutte le tecniche di progettazione (Kaebnick et al., 2003) che verranno illustrate di seguito.

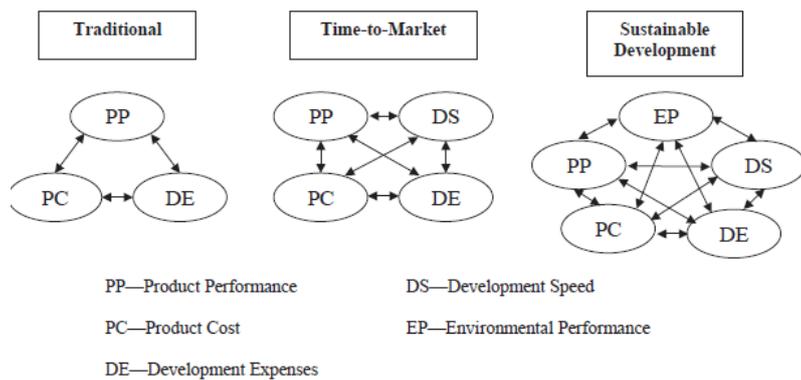


Figura 35. Evoluzione dei trade-off progettuali, tratto da Kaebernick et al. (2003)

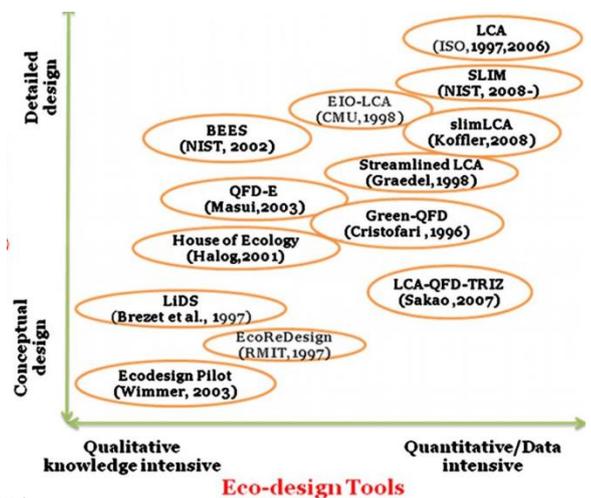


Figura 36. Strumenti progettuali, tratto da Ramani et al. (2010)

Uno dei principi guida della progettazione eco-compatibile è la Gerarchia dei Rifiuti, descritta nella direttiva quadro europea sui rifiuti (CE 2009). La gerarchia dei rifiuti descrive un ordine di priorità per la gestione dei rifiuti, passando dalla prevenzione dei rifiuti (l'opzione ideale), al riutilizzo, al riciclo, passando per altri tipi di recupero (ad esempio, recupero di energia) fino allo smaltimento (l'opzione meno preferibile). Per la progettazione eco-compatibile quindi, l'obiettivo è combattere per la prevenzione del riutilizzo e per il riutilizzo del recupero. A corollario, i rifiuti sono definiti nella direttiva quadro sui rifiuti come "qualsiasi sostanza o oggetto che il detentore scarta o intende o è tenuto a scartare" (Den Hollander et al., 2017).

Con il Principio di Inerzia, Walter Stahel ha introdotto un ulteriore principio guida, derivato in particolare dal design circolare: "Non riparare ciò che non è rotto, non ricostruire qualcosa che può essere riparato, non riciclare un prodotto che può essere rigenerato. Sostituire o trattare solo la parte più piccola possibile per mantenere il valore economico esistente del sistema tecnico" (Stahel 2010). Per i progettisti di prodotto, il Principio di Inerzia riguarda l'integrità del prodotto, che qui definiamo come la misura in cui un prodotto rimane identico al suo stato originale (ad esempio, come viene realizzato) nel tempo. Il punto di partenza è il prodotto originale e l'intenzione del Principio di inerzia è di mantenere il prodotto in questo stato, o in uno stato il più vicino possibile al prodotto originale, il più a lungo possibile, riducendo così al minimo e idealmente azzerando i costi ambientali quando si eseguono interventi per preservare o ripristinare nel tempo il valore economico aggiunto del prodotto. Ciò illustra la natura assoluta del Principio di inerzia, ossia che è finalizzato ad un obiettivo utopico (Den Hollander et al., 2017).

Rimanendo ancora ad un livello molto teorico, è interessante riprendere il ragionamento di (Den Hollander et al., 2017) presentato nel paragrafo precedente ed introdurre il concetto di *presource*. Esso nasce dall'unione di *product* e *resource*, in italiano sarebbe prisorsa, ed è un termine per prodotti obsoleti in attesa di ripristino. Il concetto di risorsa riguarda l'intero prodotto quando è diventato obsoleto e come tale non discrimina tra componenti, parti o materiali. A seconda dell'intervento che viene applicato per recuperare i prodotti obsoleti in attesa di ripristino, la *presource* è convertita in prodotti o componenti (ad esempio, attraverso riparazione, rinnovo e rigenerazione) o materiali (ad esempio, riciclo). Seguendo il Principio di Inerzia e il concetto di integrità del prodotto, i progettisti in un CE dovrebbero prima mirare a impedire che un prodotto diventi obsoleto e, in secondo luogo, assicurarsi che le *presource* possano essere recuperate con il massimo livello di integrità (cioè invertendo l'obsolescenza). Questi due obiettivi possono essere perseguiti a livello di prodotti e componenti (indicato come progettazione per l'integrità del prodotto) o a livello dei materiali (indicato come progettazione per il riciclo). I progettisti possono

aiutare a prevenire che un prodotto diventi obsoleto creando prodotti con un'elevata durata fisica ed emotiva, destinati ad essere utilizzati a lungo. In altre parole, tali prodotti resistono all'obsolescenza. I progettisti possono anche creare prodotti facili da mantenere e/o aggiornare, consentendo così un uso prolungato. Per facilitare il recupero (inversione dell'obsolescenza), i progettisti possono creare prodotti che sono, ad esempio, facili da riparare o rinnovare (Den Hollander et al., 2017).

Andando invece ad analizzare gli strumenti più specifici, negli anni sono stati proposti e sviluppati numerosi strumenti di eco-design. Ad esempio, l'ISO-TR 14062 suggerisce l'uso di circa 30 diversi strumenti. Gli attuali strumenti di progettazione ecologica variano nella presentazione dei dati e nell'attuazione del processo di progettazione. Questi strumenti, mostrati in Figura 36, possono generalmente essere classificati in tre categorie: strumenti basati su liste di controllo, strumenti basati sulla valutazione del ciclo di vita (LCA) e strumenti basati sulla distribuzione di funzioni di qualità (QFD). È bene ricordare che non esiste un singolo strumento di progettazione eco-compatibile in grado di gestire tutti gli aspetti della realizzazione di prodotti sostenibili poiché vi sono una serie di limitazioni associate a tutti i tipi di strumenti di progettazione eco-compatibile. Esistono infine alcune metodologie che mitigano il problema dell'incertezza introducendo la simulazione probabilistica, la correlazione e l'analisi di regressione. La simulazione Monte Carlo è uno degli strumenti più diffusi da utilizzare per analizzare l'incertezza attraverso l'assegnazione della distribuzione probabilistica a ciascuna fonte di dati incerti (Ramani et al., 2010). Di seguito vengono presentati alcuni dei principali strumenti ricavati in letteratura:

- Indubbiamente, la strategia del prodotto all'interno di una funzione produttiva è più strettamente associata ai problemi di progettazione per l'ambiente (Design for Environment o DFE) e analisi del ciclo di vita (LCA). La gestione del prodotto è la riduzione al minimo degli effetti nocivi del prodotto sull'ambiente in ogni fase del suo ciclo di vita del prodotto, dalla progettazione e sviluppo alla produzione, distribuzione, uso e smaltimento (Dutton, 1998; Hart, 1995). Questo concetto implica anche che i progettisti, e coloro che sono centrali per il suo sviluppo dal punto di vista della catena di approvvigionamento, siano responsabili del prodotto e dei suoi materiali per tutta la vita del prodotto.
- In particolare, il DFE del prodotto è un processo di progettazione in cui gli attributi preferibili dal punto di vista ambientale di un prodotto, tra cui riciclabilità, disassemblaggio, manutenibilità, ricondizionamento e riutilizzabilità, vengono trattati come obiettivi di progettazione piuttosto che come vincoli (Ashley, 1993). Il DFE fornisce linee guida per i progettisti per esaminare la capacità ambientale di un prodotto durante il suo intero ciclo di vita, introducendo modifiche nelle prime fasi del processo di progettazione del prodotto (Billatos e Basaly, 1997; DeMendonca e Baxter, 2001). Essa è una pratica mediante la quale le considerazioni ambientali vengono integrate nelle procedure di progettazione dell'ingegneria di prodotto e di processo con lo scopo di sviluppare prodotti e processi compatibili con l'ambiente pur mantenendo gli standard di prodotto, prezzo, prestazioni e qualità. Il design per l'ambiente consente di considerare le questioni ambientali come opportunità di business per nuovi prodotti, processi o tecnologie di produzione. In generale, a causa della complessità dei prodotti odierni e dell'organizzazione dipartimentale della maggior parte delle aziende, DFE è essenzialmente un'attività interfunzionale. Sebbene DFE suggerisca diversi modi in cui è possibile includere considerazioni ambientali nella progettazione, è prescrittivo, ossia prevede che le considerazioni e le decisioni in fase di progettazione devono essere informate dalla conoscenza che proviene da un'analisi dettagliata (Ramani et al., 2010).

- Tale analisi è fornita dall'LCA, che è un esame delle fasi consecutive e interconnesse di un sistema di prodotto, dall'acquisizione di materie prime o la generazione di risorse naturali allo smaltimento finale (fine vita), andandone ad evidenziare tutti gli aspetti economici ed ambientali.

- La progettazione per la produzione e l'assemblaggio (Design for Manufacturing and Assembly o DFMA) è emersa per affrontare la necessità di accogliere le considerazioni delle funzioni di produzione e assemblaggio all'interno della progettazione. Sebbene il focus di DFMA fino ad oggi sia sulla riduzione al minimo dei costi e del time-to-market, analogamente a quanto mostrato in Figura 26, tale approccio ha il potenziale per essere ampliato per includere considerazioni di sostenibilità e per integrare design e produzione rispettosi dell'ambiente. Per portare considerazioni sulla produzione in un progetto per un approccio ambientale, gli strumenti DFMA devono essere ampliati. Poiché la disponibilità di informazioni e conoscenze sulla produzione è la chiave per ottenere un DFMA efficace, la priorità sembra essere lo sviluppo di un database di inventario del ciclo di vita ambientale per processi di produzione esistenti ed emergenti e l'integrazione del database nel modello di informazioni DFMA (Ramani et al., 2010).

- La gestione del fine vita (End of Life o EOL) è il processo di conversione dei prodotti al termine del ciclo di vita in altri prodotti, componenti o materiali. La progettazione del prodotto è il fattore più importante per ottenere una gestione EOL redditizia. Le caratteristiche progettuali del prodotto, come l'architettura di prodotto, le proprietà dei materiali, le prestazioni funzionali e l'affidabilità, influenzano notevolmente i tipi di prodotti obsoleti che possono essere raccolti, i tipi di articoli recuperati che possono essere rilavorati, le operazioni di ripristino necessarie per produrli e la redditività delle unità recuperate. Pertanto, la gestione dell'EOL dovrebbe essere considerata nella fase di progettazione al fine di facilitare un ritiro e un recupero efficienti ed efficaci. Le strategie EOL implicano una combinazione di decisioni sul livello di smontaggio e sulle opzioni di fine vita. Queste strategie sono influenzate dalle caratteristiche del prodotto, dalle capacità del produttore e da altri vincoli come il costo e l'impatto ambientale di queste decisioni. Come hanno affermato Simpson (1998), Perera et al. (1999) e Bras (2007), aumentare la condivisione delle parti tra le varianti di prodotto può favorire la gestione del fine vita in due modi. In primo luogo, aumentano le economie di scala nell'operazione di recupero e gli strumenti e le capacità dei lavoratori necessari e il tempo di installazione diminuiscono in varie operazioni di ripristino. In secondo luogo, aumenta l'intercambiabilità dei componenti tra le varianti di prodotto, il che a sua volta facilita il riutilizzo delle parti (Ramani et al., 2010).

- Di conseguenza si ha una grande importanza della progettazione per lo smontaggio (Design for Disassembly o DFD), ossia un metodo di progettazione che rende un prodotto facile da smontare. Per un riutilizzo e una rigenerazione redditizi, la progettazione di un prodotto dovrebbe avere efficienza nell'assemblaggio, smontaggio, test, riparazione, pulizia, ispezione, ricondizionamento e sostituzione. In particolare, la facilità di riparazione e aggiornamento sono enfatizzati in molti studi. Per eseguire il rendering di un prodotto con tali caratteristiche, sono stati evidenziati diversi concetti, tra cui il design della piattaforma di progettazione modulare, il design per l'aggiornamento e il design per l'adattabilità (Ramani et al., 2010). I principi fondamentali del DFD sono ad esempio l'utilizzare meno parti e meno materiali, utilizzare accoppiamenti a scatto invece di viti, ed hanno una varietà di implicazioni per la produzione. Queste implicazioni possono includere fasi di produzione più semplici e prodotti meno costosi, che si adattano a programmi di efficienza come la *concurrent engineering* e la gestione della qualità totale (Sarkis, 2001).

- Il paradigma dell'economia circolare ha introdotto un'altra metodologia ovvero la progettazione per il recupero del materiale (Design for Material Recovery o DFMR). Infatti, la redditività

economica e l'impatto ambientale del recupero dei materiali sono direttamente influenzati dai materiali utilizzati. La riduzione della diversità dei materiali in un prodotto, l'utilizzo di materiali meno tossici e l'utilizzo di materiale biodegradabile sono linee guida di progettazione ben note applicabili in fase di progettazione. Anche la struttura del prodotto è un fattore importante che influenza il recupero del materiale, infatti, sotto quest'ottica sono più desiderabili un design modulare, che supporti una facile separazione dei diversi tipi di materiali (Ramani et al., 2010).

-Il design per l'integrità del prodotto (Design for Product Integrity o DFPI), presentato in Figura 29, ha come obiettivo quello di ridurre al minimo e idealmente eliminare i costi ambientali, preservando o ripristinando il valore economico aggiunto del prodotto nel tempo. È importante notare che un prolungamento della vita utile del prodotto non sempre si traduce in una netta riduzione del carico ambientale dato che nel tempo possono essere sviluppate versioni più recenti di prodotti che incorporano tecnologie più efficienti. Da quel momento in poi, gli impatti ambientali che derivano dall'uso prolungato di un prodotto possono diventare maggiori degli impatti incorporati di un prodotto sostitutivo più efficiente (Bakker et al. 2014). Poiché il principio di inerzia non tiene conto di ciò, i progettisti di prodotto devono comprendere le conseguenze ecologiche dei loro interventi di progettazione. Il DFPI deve essere applicato insieme a modelli di business che consentano l'acquisizione (ripetuta) del valore economico nel tempo. Ad esempio, per fare in modo che un prodotto che è stato progettato per la rigenerazione funzioni davvero, i prodotti obsoleti devono essere costantemente restituiti all'OEM per essere rigenerati. Ciò richiede accordi per la logistica inversa e un modello transazionale che consenta ai produttori di mantenere il controllo economico del loro prodotto nel tempo (Den Hollander et al., 2017).

- Come si può vedere dalla Fig.37, una componente del DFPI è la progettazione per il riciclo (design for recycle o DFR) in cui l'obiettivo del designer è garantire che i materiali del prodotto possano essere riciclati nel modo più efficiente ed efficace possibile e possano essere reinseriti nel sistema economico, con importanti implicazioni a livello di selezione del materiale e delle tecniche produttive (Den Hollander et al., 2017).

- Infine, viene presentata anche una modifica del tradizionale processo QFD, denominato ECQFD (ossia *environmentally conscious quality function deployment*). Viene aggiunta una terza dimensione alla matrice QFD, che copre gli aspetti ambientali sotto forma di metriche ambientali (EM) (Fig.28), in cui le metriche sono utilizzate per valutare i requisiti del cliente (EM-CR) e i requisiti tecnici (EM-TR) in base al loro impatto ambientale (Kaebernick et al., 2003).

Design for Product Integrity		
Long use	Extended use	Recovery
<i>Resisting Obsolescence: design approaches for long use</i>	<i>Postponing Obsolescence: design approaches for extended use</i>	<i>Reversing Obsolescence: design approaches for recovery</i>
Design for Physical Durability	Design for Maintenance	Design for Recontextualising
Design for Emotional Durability	Design for Upgrading	Design for Repair
		Design for Refurbishment
		Design for Remanufacture

Figura 37. DFPI e sue componenti, tratto da Ramani et al. (2010)

#### 3.6.4. Barriere e ostacoli

Come per i capitoli precedenti, in questo paragrafo vengono presentate i principali ostacoli e barriere all'implementazione dello sviluppo di prodotti sostenibili.

Infatti, l'attuale tendenza allo sviluppo di prodotti verdi non è priva di ostacoli e insidie. Primo, molti attributi ambientali, come il risparmio di carburante o la riciclabilità, hanno effetti in conflitto con attributi o prestazioni del prodotto tradizionale, come sicurezza, resistenza dei materiali e convenienza. Incorporare livelli soddisfacenti di attributi sia verdi che tradizionali in un prodotto può rappresentare sfide tecniche importanti per i produttori (Chen, 2001).

In secondo luogo, nonostante l'introduzione di prodotti ecologici come alternative ai prodotti ordinari già esistenti, molti clienti continuano a scegliere prodotti ordinari con bassa qualità ambientale a causa di considerazioni di costi e prestazioni o per ignoranza e incredulità (Ottman 1998). Infatti, come riportato da (Dangelico and Pujari, 2010), sviluppare la consapevolezza del cliente sui prodotti verdi non è difficile, ma l'atteggiamento e il comportamento del cliente nell'acquisto ed in una maggiore disponibilità a pagare per prodotti verdi non è la stessa cosa. Alcune categorie di prodotti sono più sensibili al prezzo di altre in base a quanto di più i clienti vogliono pagare per i prodotti verdi. Terzo, come la maggior parte delle attività innovative, lo sviluppo di prodotti verdi è un'attività caratterizzata da alti livelli di rischio e incertezza. Spesso l'investimento in ricerca e sviluppo è costoso e il suo rendimento è molto incerto (Chen, 2001) portando quindi soprattutto le imprese più piccole ad evitarlo.

Infine, e forse la cosa più importante, la definizione di prodotto come verde in sé non è un concetto ben definito. I produttori, i consumatori e il governo possono avere opinioni diverse sulla eco-compatibilità di un prodotto e sui suoi effettivi benefici per l'ambiente (Kleiner 1991). Di conseguenza, è necessario un modello analitico che consideri le interazioni tra le preferenze dei consumatori, le decisioni sui prodotti dei produttori e le politiche ambientali dei governi per comprendere meglio l'impatto dello sviluppo di prodotti verdi su consumatori, industrie e società nel suo insieme (Chen, 2001). Di conseguenza, mentre l'industria dovrebbe riconoscere che la richiesta di prodotti verdi da parte del pubblico è in realtà un'opportunità di marketing o economica piuttosto che un fastidioso onere o una minaccia inevitabile, le istituzioni dovrebbero creare un ambiente normativo che sia da un lato favorevole all'innovazione dei prodotti verdi e d'altra parte abbastanza rigorosi da garantire la qualità ambientale complessiva. Per incoraggiare soluzioni ambientali innovative come lo sviluppo di prodotti verdi, è di fondamentale importanza per il governo bilanciare il rigore e la compatibilità con l'innovazione delle normative ambientali (Chen, 2001).

A queste considerazioni, (Dangelico and Pujari, 2010) aggiungono che uno dei rischi principali dello sviluppo e della commercializzazione di prodotti verdi è un maggiore controllo pubblico da parte delle parti interessate, in particolare dei gruppi ambientalisti. Inoltre, diverse nuove imprese e imprese verdi si fondano sull'aspettativa di sussidi governativi continui che potrebbero non durare, lasciando le aziende molto vulnerabili.

È importante notare che è improbabile che i prodotti verdi siano in grado di sostenere il successo a lungo termine sul mercato a meno che non riescano a dimostrare prestazioni ambientali credibili senza compromettere i benefici funzionali del prodotto. Ad esempio, Ottman (1998) mostra che il 41% dei consumatori non acquista prodotti "verdi" a causa della loro percezione di inferiorità. Anche se una categoria di prodotti nota come GPI, o innovazioni di prodotti verdi, in cui le prestazioni del prodotto verde sono significativamente migliori rispetto ai prodotti della

concorrenza o convenzionali (Peattie, 1992) possono rappresentare la soluzione allo stallo tra economia e ambiente (Porter e van der Linde, 1995).

Un altro problema è la già citata consapevolezza da parte dei clienti, che spesso non sono disposti a pagare un prezzo premium per gli attributi del prodotto verde. A volte, la consapevolezza dei clienti può essere stimolata per mezzo di etichette ecologiche (o *ecolabel*), che rendono i prodotti verdi chiaramente riconoscibili per i clienti, anche se creare credibilità attraverso etichette ecologiche o certificazioni di terze parti richiederà processi interni rigorosi, scientifici e sistematici per integrare e misurare l'impatto ambientale dei prodotti in ogni fase del ciclo di vita (Dangelico and Pujari, 2010). Infine, poiché ogni innovazione radicale di prodotto porta cambiamenti significativi come, ad esempio, l'obsolescenza dei vecchi prodotti con rischio di cannibalizzazione delle vendite, e la possibilità per interi mercati di emergere, trasformarsi o scomparire (Kaplan, 1999; Van de Ven et al., 1999), le innovazioni radicali di prodotto verdi potrebbero contribuire notevolmente al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità ambientale. Ciò, tuttavia, richiede un cambiamento sistemico sia dell'infrastruttura che del comportamento dei consumatori (Dangelico and Pujari, 2010).

Infine, (Waage, 2007) evidenzia un'altra barriera informativa, per cui i dati per particolari attributi di sostenibilità di materiali e prodotti sono spesso indisponibili (ad esempio, proprietari o non ancora raccolti), costosi o non verificati. Anche con sostanze tossiche ben conosciute, è difficile ottenere informazioni sugli impatti in modo che un'azienda possa scegliere i materiali in base a preoccupazioni ambientali e sociali. Esiste quindi, sottolinea lo studio, un enorme potenziale per agenzie governative di affrontare queste problematiche attraverso la creazione di database pubblici con informazioni tecniche e rigorose sulla sostenibilità di prodotti e materiali, aggiungendone di nuove man mano che nuovi materiali e tecnologie entrano sul mercato. Concludono che qualunque sia l'istituzione che sviluppa questo database, è essenziale che tutte le informazioni siano trasparenti e *open source* (Waage, 2007).

In conclusione, viene presentata la teoria di (Pickett-Baker and Ozaki, 2008) sul comportamento di acquisto dei clienti e come questo sia influenzato dai loro valori e dal marketing.

I valori ambientali svolgono un ruolo primario nel comportamento eco-sostenibile in quanto influenzano le convinzioni delle persone, che poi hanno influenze sulle norme personali che portano a comportamenti pro-ambientali dei consumatori (Reser e Bentrupperbaumer, 2005; Stern, 2000). Quindi, sebbene i valori pro-ambientali non garantiscano un comportamento pro-ambientale, è probabile che i tali valori conducano a comportamenti pro-ambientali (Pickett-Baker and Ozaki, 2008). Tuttavia, un individuo preoccupato per l'ambiente non si comporta necessariamente in modo ecologico in generale o nei propri acquisti. Questo è noto come "gap valore-azione". Ciò sembra essere dovuto al fatto che gli atteggiamenti generali non sono abbastanza specifici da portare ad un'azione pro-ambientale dato che interessi soggettivi più specifici interferiscono con la relazione tra valori e comportamento. Tale articolo ha anche scoperto che i consumatori con elevati valori ambientalistici hanno maggiori probabilità di credere che i prodotti verdi funzioneranno come previsto, mentre tra la maggior parte dei consumatori, uno dei principali ostacoli all'acquisto di prodotti verdi è la già nota preoccupazione per le prestazioni del prodotto, che di fatto ne ostacola l'acquisto. Per risolvere questo gap, (Pickett-Baker and Ozaki, 2008) suggeriscono che i prodotti a cui è stata data una maggiore esposizione tramite il marketing avranno maggiori probabilità di essere venduti in numero maggiore, specialmente al "gruppo oscillante" di consumatori (come definito da Roper Starch Worldwide) che rappresentano un segmento di mercato di dimensioni vicine alla maggioranza (33%). È più

probabile che i valori pro-ambientali si traducano in un comportamento più ambientalistico quando i valori e le convinzioni sono sufficientemente specifici, dato che l'azione verde si allinea con gli interessi soggettivi dei consumatori e gli attributi del prodotto sono percepiti positivamente. Inoltre, dimostrare scenari vantaggiosi per tutti sia per il consumatore che per l'ambiente è utile (ad es. più sicuro per i tuoi figli, risparmio di denaro, proiezione di un'immagine pro-ambientale ecc.). Infine, i consumatori generalmente si fidano delle prestazioni di marchi noti, quindi i prodotti ecologici che funzionano bene e non iperbolizzano le prestazioni ambientali potrebbero essere venduti con successo da marchi ben noti (Pickett-Baker and Ozaki, 2008).

### 3.6.5. Esempi di prodotti

Anche in questo paragrafo, riportiamo Ottman et al. (2006), che affermano che `` sebbene nessun prodotto di consumo abbia un impatto zero sull'ambiente, nel business il termine 'prodotto verde' viene usato comunemente per descrivere coloro che si sforzano di proteggere o migliorare l'ambiente naturale, conservare energia e/o risorse e ridurre o eliminare l'uso di agenti tossici, inquinamento e rifiuti. ''

Prima di presentare alcuni esempi di prodotti green, è giusto sottolineare come le innovazioni di prodotto per la sostenibilità in pochissimi casi siano innovazioni *disruptive* (ad es. energia eolica, LED, auto elettriche, mobilità alternativa). La maggior parte delle innovazioni sostenibili nello sviluppo prodotto riguarda un'innovazione incrementale o evolutiva (ad esempio prodotti rigenerati, indumenti a base di cotone organico, vernici a base d'acqua, solo per citarne alcuni) (Pujari, 2006). Di seguito riporto diversi esempi, tratte da (Dangelico and Pujari, 2010) ed altre fonti secondarie:

- Ammorbidente concentrato Lenor (riduce il volume delle confezioni);
- Lush (prodotti cosmetici vegetali, etici, anti-test su animali e sfusi);
- Save the Duck (piumini che non sfruttano animali e crudeltà su di essi);
- Borracce in alluminio (permettono di ridurre l'uso di bottiglie di plastica);
- Lipton Team (utilizza solo tè da tenute certificate);
- Ri-Generation (commercia elettrodomestici rigenerati);
- Eyewear Natural (occhiali creati da amido di mais);
- GreenAir (purificatore d'aria che sfrutta le piante al proprio interno);
- Scarborough University (produce la resina per la stampa 3D da olio di frittura esausto);
- e-Fuel di Bosch e biocombustibili (prodotti da sostanze naturali o CO<sub>2</sub>);
- Cingomma (riutilizza copertoni di biciclette per produrre cinture);
- SONO Motors (vetture elettriche con pannelli solari incorporati per la ricarica);
- Mobilità *last mile*, come bici e monopattini elettrici (permettono di evitare spostamenti in auto di singoli individui con conseguenti riduzioni di inquinamento legato al traffico).

## 3.7. Strategie

### 3.7.1. Introduzione

In questo capitolo vengono affrontate tutte le tematiche inerenti alla gestione dell'impresa in ambito sostenibilità, all'interno di tutte le sue funzioni, tanto è vero che sono presenti due paragrafi inerenti due funzioni aziendali particolari. È giusto notare come tale argomento sia di per sé alquanto vasto e generico, seppur tutti gli articoli siano raggruppabili sotto l'egida della strategia aziendale, ovvero sia influenzabile dalle decisioni del management dell'impresa.

Nell'attuale scenario globale, le principali sfide che le nostre società devono affrontare sono il cambiamento climatico, la povertà e l'ineguaglianza, la crescita della popolazione, l'inquinamento e l'aumento del costo dell'energia e delle risorse (Cherrafi et al., 2016). Le aziende di tutto il mondo sono sotto pressione da parte di clienti, autorità regolatorie e altre parti interessate affinché gestiscano le proprie operazioni in modo responsabile per migliorare le proprie prestazioni ambientali e sociali. Pertanto, migliorare le prestazioni di sostenibilità e ridurre l'impatto ambientale e sociale dei processi industriali non è più solo un'opzione, ma un imperativo aziendale: la sostenibilità è emersa come un nuovo criterio competitivo (Garza-Reyes, 2015b; Wong e Wong, 2014).

A ciò si aggiunga che uno studio relativamente recente con 30.000 partecipanti in 60 economie suggerisce che i millennial sono disposti a spendere di più per i prodotti e i servizi offerti dalle aziende impegnate in questioni di sostenibilità (The Nielsen Company, 2015), si capisce allora come il paradigma della produzione sostenibile abbia attirato molta attenzione nell'ultimo decennio come approccio produttivo emergente inteso a consentire alle imprese di affrontare queste sfide e guidarle a distinguersi nell'ambiente competitivo di oggi (Eslami et al., 2018).

Infine, un altro fattore che spinge le aziende a migliorare le proprie prestazioni ambientali è il rischio di essere ritenute responsabili o riconosciute negligenti per incidenti o danni ambientali, rischio che corrono anche quando agiscono con prudenza e utilizzano tecnologie all'avanguardia. Per limitare le responsabilità, allora molte aziende implementano rigidi meccanismi di riduzione del rischio, abbassando i livelli di inquinamento, inquinanti e sostanze tossiche (P, B e T) associati alle loro catene di fornitura e prodotti (Snir 2001; Wolf 2001; Kleindorfer e Saad 2005).

Nel campo della letteratura aziendale e ambientale, la gestione verde si riferisce alla gestione dell'interazione aziendale e dell'impatto sull'ambiente (Lee and Ball, 2003). La gestione verde nelle organizzazioni deve andare oltre la conformità normativa e deve includere strumenti concettuali come la prevenzione dell'inquinamento, la gestione del prodotto e la responsabilità sociale delle imprese (Hart, 2005). Nel tempo, l'atteggiamento delle aziende nei confronti della sostenibilità è cambiato considerevolmente da un atteggiamento reattivo a uno proattivo. La domanda chiave per i dirigenti riguardo all'inverdimento aziendale o alla gestione verde è quindi "come integrare il processo decisionale ambientale nel business con risultati redditizi" (Dwyer et al., 2009).

Savitz e Weber (2006), infatti, suggeriscono che un'impresa sostenibile è quella che crea profitti per i propri azionisti proteggendo l'ambiente e migliorando la vita di coloro con cui interagisce. Inoltre, Lash e Wellington (2007) suggeriscono che le imprese saranno in svantaggio competitivo se non presteranno attenzione alle questioni di sostenibilità. Incorporare le preoccupazioni dei consumatori e dei manager sull'ambiente naturale e fisico contribuirà infatti non solo a performance aziendali superiori, soprattutto in termini di vantaggio competitivo, ma anche a una migliore reputazione aziendale (Sharma et al., 2010).

Inoltre, la discussione accademica e aziendale sulle priorità competitive evidenzia le quattro priorità tradizionali da anni, ossia costo, qualità, flessibilità e prestazioni di consegna (Macchi et al., 2020) ma vale la pena osservare come stiano emergendo nuove priorità competitive, ovvero:

innovazione, servizio post-vendita, protezione dell'ambiente, pubblicità, ampia distribuzione di prodotti, relazione col cliente (Macchi et al., 2020). Martin-Pena and Diaz-Garrido (2008) includono infatti una nuova priorità, la protezione dell'ambiente. Essa è definita come la capacità del sistema produttivo di ridurre l'impatto ambientale delle proprie operazioni e di produrre prodotti rispettosi dell'ambiente; Diaz et al. (2005) e Savino and Batbaatar (2015) la considerano importante quanto le altre priorità in un'azienda che mira a perseguire l'eccellenza produttiva.

Infine, viene presentata la definizione di Gestione Operativa Sostenibile di (Kleindorfer et al., 2005) come l'insieme di competenze e concetti che consentono ad un'impresa di strutturare e gestire i propri processi aziendali per ottenere rendimenti competitivi sui propri asset capitali senza sacrificare le legittime esigenze degli stakeholder interni ed esterni e nel rispetto dell'impatto delle proprie operazioni sulle persone e sull'ambiente. La gestione sostenibile delle operazioni deve aiutare le imprese a diventare agili, adattive e allineate nel bilanciare i profitti con le persone e il pianeta.

Infine, viene riportato un modello futuribile degli impianti produttivi, tratto da (Tiwari and Khan, 2020), ossia il Modello Produttivo Eco-Sistema (Manufacturing Eco-System Model o MEM). In esso gli impianti produttivi sono integrati in una rete che facilita i processi basati sui flussi per governare la produzione, l'energia, le risorse e le competenze delle persone basate su una simbiosi guidata da sistemi cyber-fisici e le moderne tecnologie dell'informazione e della comunicazione (Alcacer e Cruz-Machado, 2019; Golini et al., 2014; Herrmann et al., 2014). In questo modello, gli impianti non funzionano alla loro massima efficienza (utilizzo delle capacità completamente stressato) ma lavorano con efficienze ottimali. L'obiettivo è infatti quello di massimizzare i risultati collaborativi di più stabilimenti per soddisfare le esigenze invece di spingere un singolo impianto di produzione a produrre il massimo che può ottenere per spingere i prodotti di massa nei mercati saturi (Tiwari and Khan, 2020).

In tale paradigma, gli impianti modulari in grado di personalizzazione di massa sono preferiti rispetto a linee di assemblaggio flessibili e non modulari in grado di produrre in serie (Shim et al., 2017). Le stazioni di lavoro sono distribuite in modo tale da poter gestire più progetti di prodotto, possono seguire complesse regole euristiche di programmazione della produzione, possono adattarsi automaticamente a diverse dimensioni dei lotti (carichi di lavoro) e colli di bottiglia e possono elaborare una combinazione di regole di scadenza (come, first in first out, regole della data di scadenza modificate, regole di configurazione minima e regole di slacking) (Shim et al., 2017). Inoltre, come evidenziato da (Tiwari and Khan, 2020), una capacità cruciale ma spesso trascurata, necessaria per la sostenibilità nell'ambito del quadro TBL riguarda l'integrazione delle competenze umane con la tecnologia. La formazione TBL, la formazione tecnica, il coinvolgimento dei clienti nelle iniziative TBL in un'organizzazione, lo sviluppo di contenuti verdi basati su standard stabiliti (in particolare, ISO 14001) e l'induzione di pratiche sostenibili nelle competenze e nelle pratiche dei fornitori sono fattori chiave per l'efficacia del raggiungimento degli obiettivi TBL nelle operazioni organizzative (Jabbour et al., 2013; Jabbour et al., 2015; Kannan et al., 2014; Teixeira et al., 2012; Teixeira et al., 2016).

In conclusione, vengono riportati due osservazioni di (Sharma et al., 2010; Ueda et al., 2009) che riprendono il concetto di sostenibilità produttiva a livello più concettuale ed etico.

Infatti, il problema della sostenibilità è un problema decisionale, che presenta una forte caratteristica dilemmica, in una società fortemente discrepante tra bene collettivo e interessi individuali. Pertanto, è desiderabile realizzare un sistema in cui sia lo scopo generale che la domanda individuale possano essere raggiunti contemporaneamente attraverso l'interazione dinamica tra agenti decisionali che hanno vari obiettivi e valori. A tal fine, dobbiamo dedicare maggiore attenzione alla meccanica sociale di valori, come l'esternalità della rete, il dilemma

sociale, i beni pubblici e gli stili di vita, di conseguenza gli approcci transdisciplinari e sintetici sono necessari come approcci accademici (Ueda et al., 2009).

In secundis, Savitz e Weber (2006) suggeriscono che gli interessi commerciali e gli interessi dell'ambiente e della società si intersecano nelle operazioni di ogni azienda. Definiscono quindi la sovrapposizione tra gli obiettivi aziendali di aumentare la quota di mercato e i profitti e gli obiettivi ambientali di affrontare il cambiamento climatico e la salute pubblica come il "punto dolce della sostenibilità". Il punto di partenza per la sostenibilità ambientale è, per loro, sorprendentemente semplice: se tutti riconoscono che gli ecosistemi e le risorse naturali sono limitate, le decisioni economiche possono essere orientate in modo tale che i prodotti delle azioni economiche siano anche ambientalmente sostenibili (Sharma et al., 2010).

### 3.7.2. Trade-off e vantaggi

A livello accademico e soprattutto manageriale, la sostenibilità è sempre stata vista come un compromesso con gli altri obiettivi produttivi, in particolare quello economico, per via soprattutto di una miopia che non considera gli investimenti in sostenibilità come tali ma come fardelli che consumano tempo e risorse dell'impresa. Di conseguenza, in questo paragrafo vengono riportati i principali spunti tratti dalla letteratura inerenti questi trade-off ed alla loro risoluzione, soprattutto grazie a (Vargas-Berrones et al., 2020).

Per quanto riportato, Wickham Skinner (1969, 1974) è stato il primo ricercatore che ha esplicitamente evidenziato l'esistenza di potenziali compromessi tra diverse misure/obiettivi di performance (es. costo, qualità, velocità di consegna) che definiscono le operazioni dell'intera tecnologia e sistemi basati sull'uomo. Un tema chiave nella ricerca di Skinner è che nega esplicitamente la possibilità per un'azienda di operare senza compromessi. A suo avviso, questa impossibilità deriva dai limiti che sono inerenti a tutte le tecnologie e ai sistemi basati sull'uomo (Skinner 1969, 140). Rispecchiando le opinioni di Skinner, Porter (1996) sostiene che i compromessi tra diversi aspetti nelle operazioni delle imprese sono qualcosa che non può essere eliminato ('... un compromesso significa che avere di più di una cosa richiede averne meno di un'altra', 1996). Più specificamente: "I compromessi sono essenziali per la strategia. Creano il bisogno di scelta e limitano intenzionalmente ciò che un'azienda offre" (Porter, 1996).

Inoltre, è stato affermato che esiste un conflitto intrinseco tra la protezione dell'ambiente e le performance aziendali. Questa linea di pensiero postula che le crescenti richieste alle società di proteggere l'ambiente aumenteranno l'onere dei costi e, di conseguenza, le aziende avranno meno risorse per aumentare la produttività e potrebbero perdere la loro competitività sul mercato (Palmer et al., 1995). Tuttavia, lo stesso Porter (1991) ha sostenuto che "il conflitto tra protezione ambientale e competitività economica è una falsa dicotomia basata su una visione ristretta delle fonti di prosperità e una visione statica della concorrenza". Ha infatti affermato che rigidi standard ambientali possono innescare l'innovazione e l'aggiornamento di tecnologie sostenibili, osservando che "standard normativi costruiti correttamente, che mirano ai risultati e non ai metodi, incoraggeranno le aziende a riprogettare la loro tecnologia. Il risultato in molti casi è un processo che non solo inquina meno, ma abbassa anche i costi o migliora la qualità. I processi saranno modificati per diminuire l'uso di risorse scarse o tossiche e per riciclare i sottoprodotti sprecati" (Porter 1991). Ossia sostiene semplicemente che tali regolamentazioni possono aiutare a innescare l'innovazione che compenserà i costi del rispetto di essi.

Più recentemente, Haffar e Searcy (2017) sostengono che diverse forme di compromesso determineranno collettivamente se un'azienda perseguirà la sostenibilità, nonché dove e come può farlo. Questo approccio è interessante perché sembra fornire soluzioni operative e allo stesso tempo affrontare le diverse preoccupazioni delle parti interessate in merito all'ambiente, all'impatto sociale e ai profitti economici (Winn, Pinkse e Illge 2012). Tuttavia, è necessario riconoscere e indagare le questioni pratiche e complesse (comprese le tensioni e i compromessi) che sorgono quando si implementano iniziative di sostenibilità / verde (Van der Byl e Slawinski 2015).

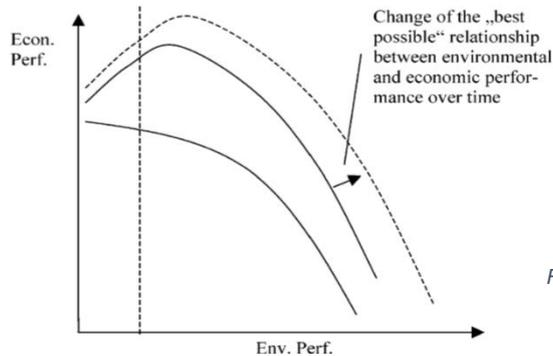


Figura 38. Relazione tra performance economiche ed ambientali, tratto da Wagner (2005)

Una volta presentati i trade-off, vengono ora presentati i risultati della risoluzione degli stessi. Prima, tuttavia, analizzando la Figura 38, si evidenzia come in realtà esista un trade-off nella relazione tra performance economiche ed ambientali (ma anche sociali) dato dal fatto che quest'ultime comportano degli investimenti crescenti che vanno a penalizzare la componente economica. Tuttavia, è interessante notare come, seguendo le curve, si abbia una forma "ad U rovesciata" per cui vi è un punto di massimo che rappresenta la performance economica/ambientale ottima, al di là del quale l'aumento di quest'ultima comporta inevitabilmente una diminuzione dei profitti. Sta quindi alle decisioni dei manager decidere, a seconda della curva delle singole imprese e delle missioni delle singole imprese, il livello ottimale di performance ambientale ed in base ad esso ricavare i profitti.

I risultati di (Vargas-Berrones et al., 2020) indicano che le aziende non possono offrire ai propri clienti prodotti più rispettosi dell'ambiente senza aumentare i costi complessivi di produzione. Tuttavia, questo non significa che, almeno in alcuni contesti e circostanze, le imprese non saranno in grado di compensare, o almeno sopportare, lo "svantaggio" dell'implementazione di iniziative verdi, per via del ritorno degli investimenti, coerentemente con la teoria di (Wagner, 2005).

Al di là di tutti i vantaggi riportati nei capitoli precedenti, migliori prestazioni in materia di ambiente, salute e sicurezza possono aiutare gli sforzi di produttività a livello di impianto (Klassen 2001) e aumentare i ricavi e la quota di mercato (Delmas 2001, 2004). Per ottenere questi risultati positivi, l'azienda deve stabilire sistemi e strumenti di gestione che integrino metriche di ambiente, salute e sicurezza con altre metriche di processo all'interno dell'azienda e lungo la catena di fornitura (Bowen et al. 2001).

Contesto\Tempo	Presente	Futuro
<b>Interno</b>	Prevenzione dell'inquinamento ( <i>minimizzare rifiuti ed emissioni</i> ) <u>Riduzione di costi e rischi</u>	Tecnologie pulite ( <i>sviluppo di competenze ed innovazioni</i> ) <u>Innovazione e riposizionamento</u>

<p><b>Esterno</b></p>	<p>Product stewardship (aumentare trasparenza e affidabilità) <u>Reputazione e legittimità</u></p>	<p>Visione sostenibile (roadmap per soddisfare nuovi bisogni) <u>Traiettorie di crescita</u></p>
-----------------------	--	--

Figura 39. Approcci strategici e pay-off in base ai contesti spaziali e temporali, adattato da Lee (2009)

### 3.7.3. Tipi di strategie

Una volta presentati e risolti i trade-off con le performance economiche, vengono presentate le diverse tipologie di strategie ed il loro raggruppamento fondamentale in strategie basate sulle risorse (ovvero derivate dalla Resource Based Theory o RBT) e quelle basate sull'approccio snello o Lean, di cui viene presentato anche un'unione con le strategie circolari. Oltre a ciò, si potrebbe anche distinguere in base all'approccio del management, ossia passivo, attivo e proattivo, ma tali distinzioni non vengono analizzate in quanto non presenti nella letteratura analizzata e perché di minore interesse per lo studio attuale anche da un punto di vista tecnico.

Basandosi sulla RBT, Hart (1995) ha sviluppato una tipologia di strategie ambientali: *l'approccio end-of-pipe*, (ossia cercare di ridurre le emissioni a fine processo), la prevenzione dell'inquinamento o gestione della qualità totale, la *product stewardship* o gestione del prodotto e lo sviluppo sostenibile.

Le conseguenze gestionali che (Wagner, 2005) deriva sono che una strategia end-of-pipe (che porta a miglioramenti principalmente negli output indesiderati dei processi di produzione, come le emissioni nell'aria e nell'acqua, ma non molti miglioramenti dell'efficienza) si traduce in pochi effetti positivi o addirittura negativi di miglioramento delle prestazioni ambientali sulle prestazioni economica e quindi il management dovrebbe evitare una strategia basata esclusivamente sulle attività di end-of-pipe.

La prevenzione dell'inquinamento invece riduce o previene l'inquinamento e può comportare costi inferiori in seguito alla buona riuscita degli investimenti necessari. Esempi di prevenzione dell'inquinamento includono la riduzione dell'utilizzo delle risorse, la riduzione della quantità di rifiuti generati e il riciclo.

La *product stewardship* estende la prospettiva ambientale all'intera catena del valore, compresi altri stakeholder interni ed esterni come R&S, progettisti di prodotto e fornitori. Esempi di gestione del prodotto includono la riprogettazione di prodotti e processi per essere più rispettosi dell'ambiente, l'utilizzo di risorse rinnovabili e l'incoraggiamento dei fornitori a praticare la prevenzione dell'inquinamento e la gestione del prodotto (Rusinko, 2007).

Nel loro insieme, la prevenzione dell'inquinamento e la gestione del prodotto possono essere definite pratiche di produzione sostenibili dal punto di vista ambientale o sostenibilità ambientale della produzione. Tali pratiche di prevenzione e gestione dell'inquinamento riducono e/o riciclano risorse e prodotti di scarto, che tenderebbero ad avere un effetto immediato e al ribasso sui costi di produzione (Rusinko, 2007). Rispetto ai vantaggi immediati in termini di costi, i vantaggi derivanti dalla prelazione competitiva (miglioramento dell'immagine aziendale, attrazione di nuovi clienti e promozione di idee innovative in azienda) tendono a simboleggiare il potenziale per un futuro vantaggio competitivo.

Per quanto riguarda invece i sistemi Lean, essi comprendono il Lean, il Lean&Green, il Six Sigma ed il Lean Six Sigma.

L'obiettivo principale di un sistema snello è produrre prodotti o servizi di qualità superiore al minor costo e nel minor tempo eliminando gli sprechi (Dennis, 2007; Liker, 1996). Nel contesto snello, lo spreco è definito come "qualcosa di diverso dalla quantità minima di attrezzature, materiali, parti, spazio e tempo che sono assolutamente essenziali per aggiungere valore al prodotto" (Russell e Taylor, 2000). Tutti questi sprechi hanno un impatto diretto su prestazioni, qualità e costi e sono tutte operazioni senza valore aggiunto per le quali i clienti non vogliono pagare. Con l'avvento della coscienza ambientale e sociale, la definizione di Lean è stata ampliata per incorporare concetti di sostenibilità economica, sociale e ambientale (Cherrafi et al., 2016). All'interno delle operazioni produttive, la produzione snella è attualmente il paradigma di gestione delle operazioni di maggior successo, che implica un impatto elevato sulla sostenibilità delle operazioni. L'espansione della gestione Lean, Lean&Green o Green Lean (L&G o GL) è stata introdotta come metodo per permettere i miglioramenti dell'efficienza ambientale ed economica nella produzione (Kurdve et al., 2014; Zokaei et al., 2013). Con la sua attenzione all'efficienza, alle condizioni di lavoro e alla creazione di una cultura del miglioramento continuo, infatti il lean implica l'eco-efficienza, ma anche la circolarità di conseguenza (Kurdve and Bellgran, 2021). Oliveira et al. (2018) hanno presentato un elenco di strumenti o tecniche designati per l'applicazione L&G (ovvero miglioramento continuo, selezione dei materiali e controllo della pianificazione), di cui troviamo un esempio in Figura 40. Gli strumenti possono essere applicati in ogni impresa con le opportune modifiche da parte di un professionista esperto (Mourtzis et al., 2016). Anche se il Lean si concentra spesso sul lavoro e sulle perdite di lead time, mentre il Green pone l'accento sulla minimizzazione dei flussi di spreco di risorse e sulla circolarità (attraverso la gerarchia dei rifiuti), entrambi i concetti si completano a vicenda (Garza-Reyes, 2015). Espandendo il concetto di Lean, il concetto di GL è stato quindi introdotto come un modo efficiente per rendere operativa la sostenibilità, in particolare per i miglioramenti dell'efficienza ambientale ed economica (kaizen) nella produzione (Kleindorfer et al., 2005). La ricerca sul GL ha coinvolto la sincronizzazione con concetti come Six Sigma (Cherrafi et al., 2016), operazioni agili, Industria 4.0 (Duarte et al., 2020) e gestione della catena di fornitura (Mollenkopf et al. al., 2010).

L'approccio Six Sigma (o  $6\sigma$ ) è una struttura organizzata e parallela per ridurre la variabilità nei processi organizzativi utilizzando figure specialistiche, un metodo strutturato e metriche delle performance con l'obiettivo di raggiungere gli obiettivi strategici" (Schroeder et al., 2008). Gli obiettivi del Six Sigma sono migliorare le prestazioni del processo e raggiungere alti livelli di qualità indagando ed eliminando le cause alla radice dei difetti e riducendo al minimo la variabilità del processo e del prodotto (Zu et al., 2008). L'algoritmo di risoluzione  $6\sigma$  comprende cinque fasi chiamate ciclo DMAIC (Definisci, Misura, Analizza, Migliora e Controlla) (Bergman e Klefsj, 2003; Magnusson et al., 2003) ed è tipicamente utilizzato per guidare l'implementazione del Six Sigma e per raggiungere gli obiettivi aziendali. Tipicamente, dopo aver definito il tipo di problema, vengono impiegati particolari strumenti per misurare lo stato attuale del problema, analizzandone e trovandone le cause. Quindi le cause vengono rimosse, migliorando il processo con piani d'azione specifici. Infine, nella fase di controllo vengono misurati e certificati i risparmi conseguiti e il livello di variabilità delle caratteristiche Critical-To-Quality (CTQ) per il senior manager che sponsorizza il progetto. Dal punto di vista della ricerca, lo studio condotto da Kuei e Madu (2003) afferma che il dominio del tradizionale approccio Six Sigma dovrebbe essere ampliato ed esteso per includere la sicurezza ambientale, l'integrità e la responsabilità sociale che sono reciprocamente dipendenti e sono fondamentali per il raggiungimento di  $6\sigma$ . In questo scenario, Lucato et al. (2015) hanno proposto una procedura per integrare considerazioni ambientali nella

tecnica Six Sigma come un modo per aumentare il livello di eco-efficienza delle imprese. In generale, gli studi condotti nell'area del Six Sigma e della sostenibilità sembrano suggerire che l'adozione del Six Sigma abbia un effetto benefico sulla performance di sostenibilità (Cherrafi et al., 2016).

Il termine "Lean Six Sigma" è stato utilizzato alla fine degli anni '90 e all'inizio degli anni 2000 (Byrne et al., 2007; George et al., 2004) per descrivere la combinazione di filosofie Lean e Six Sigma (Sheridan, 2000), mirando a superare le carenze di entrambi. Il Lean Six Sigma è definito come una strategia e metodologia aziendale che aumenta le prestazioni dei processi e sviluppa la soddisfazione del cliente, la leadership e i risultati economici migliorando qualità, velocità e costi (Snee, 2010). L'uso di strumenti e tecniche lean / Six Sigma per migliorare le prestazioni ambientali è supportato da molte ragioni. Innanzitutto, gli strumenti esistono già e sono ben testati. In secondo luogo, i dipendenti li conoscono già (Chiarini, 2014; Pojasek, 1999a). Al contrario, ci sono alcune situazioni in cui gli strumenti e le tecniche Lean / Six Sigma hanno il potenziale per provocare maggiori rischi o impatti ambientali e sociali (EPA, 2003); tuttavia, un'integrazione proattiva e deliberata delle dimensioni ambientale e sociale durante l'implementazione del Lean / Six Sigma potrebbe ridurre o eliminare questi rischi (EPA, 2004). Per un ulteriore approfondimento in merito, si rimanda a (Cherrafi et al., 2016), che presentano l'utilizzo dei diversi strumenti Lean Six Sigma (5S, kaizen, kanban, mappe del valore, PTM, SMED, poka-yokee, strumenti di analisi, SPC e riconfigurazione del layout) in ambito sostenibilità ed i loro effetti sugli obiettivi sociali ed ambientali dell'impresa.

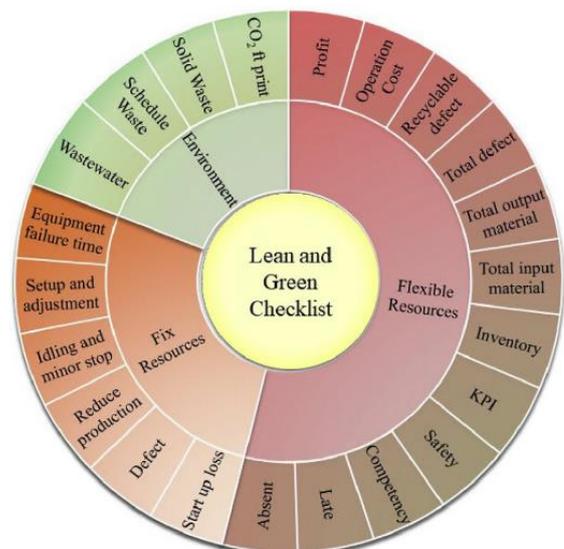


Figura 40. Esempio di strumento L&G (Checklist L&G), tratto da Leong (2020)

Infine, viene presentata, seguendo quanto riportato da (Kurdve and Bellgran, 2021), l'unione delle strategie GL e di Economia Circolare, data l'affinità tra questi strumenti.

Infatti, nel cuore degli strumenti GL, si trova il concetto di eco-efficienza (Abreu et al., 2017) incentrato sull'evitare l'uso non necessario di risorse, emissioni e rifiuti. David e Found (2016) elencano le soluzioni operative per il miglioramento della GL ambientale nell'ambito dell'implementazione di tecniche Lean, prevenzione dell'inquinamento, riutilizzo, riciclo e pianificazione delle risorse aziendali. Alcune soluzioni mirano a Evitare l'uso delle risorse (ad esempio, eliminare elementi non necessari, interrompere i processi quando non sono in uso o eseguire una corretta manutenzione delle apparecchiature per evitare guasti), alcune soluzioni operative si collegano al concetto di loop (convertendo i rifiuti in uscita in input di risorse) o sostituzione (sostituzione di tecnologia e input di materiale o energia). Altri sono più difficili da raggruppare (ad esempio il miglioramento dell'efficienza complessiva delle apparecchiature, OEE). (Kurdve and Bellgran, 2021). I risultati ottenuti dallo studio mostrano che la maggior parte dei miglioramenti nei casi di confronto sono di tipo Evitare o Sostituire, sebbene una parte significativa coinvolga anche Circolare (cioè operazionalizzazione della EC), ovvero l'EC non è necessaria per tutte le azioni di GL e di miglioramento ambientale. Tuttavia, il concetto di EC è stato utile in un numero significativo di casi, dimostrando che per tipi distinti di azioni di miglioramento delle operazioni sostenibili, l'EC può essere utile.

In conclusione, in molte soluzioni di casi sia empirici che di letteratura, la circolarità è stata ritenuta una soluzione necessaria poiché eliminare (Evitare) la causa principale non era possibile.

Sebbene il Lean enfatizzi l'eliminazione delle cause profonde delle perdite, in molte situazioni ciò non è possibile. In questo caso, l'integrazione del concetto EC è considerata vantaggiosa per supportare la gestione della produzione GL. I risultati hanno anche mostrato che erano necessarie anche alcune soluzioni GL (evitare e sostituire l'uso delle risorse), che non si adattavano alla definizione EC operativa. Le operazioni di produzione potrebbero essere migliorate da attività lean (riduzione dei rifiuti magri) e attività verdi (riduzione dei rifiuti verdi) o attività kaizen verdi combinate (Kurdve and Bellgran, 2021).

#### 3.7.4. Marketing

In questo paragrafo viene presentato quello che in letteratura è rappresentato come la funzione aziendale più importante nel perseguimento di una sostenibilità produttiva, assieme alla progettazione (che ha meritato un capitolo tutto suo) ed alla manutenzione (presente nel paragrafo successivo). In particolare, vengono ripresi, come presentati da (Peattie and Crane, 2005; Sharma et al., 2010), le opportunità offerte dalla transizione verde, le difficoltà ed i fallimenti attuali del marketing, cercando quindi di capire cosa e come il marketing possa fare per una transizione verso un nuovo paradigma.

All'interno del marketing, ci sono due flussi di ricerca che potrebbero essere utilizzati per supportare il collegamento tra sostenibilità e performance finanziarie superiori. In primo luogo, la teoria basata sulle risorse (Resource-Based Theory o RBT) suggerisce che un migliore accesso e utilizzo delle risorse porterà a un vantaggio competitivo e quindi a migliori prestazioni in termini di redditività (Hunt & Morgan, 1995). In secondo luogo, l'evidenza empirica suggerisce che le strategie ecologicamente consapevoli portano a una migliore fidelizzazione dei clienti e quindi a prestazioni migliori (Sisodia et al., 2007). I mezzi per ottenere tale sostenibilità ambientale sono la massimizzazione del valore aggiunto con il minor utilizzo di risorse, la minor quantità di rifiuti e il minor inquinamento (Schmidheiny, 1992; Lovins, Lovins, & Hawken, 1999).

Vi è ora un crescente riconoscimento del fatto che le strategie di prodotto rispettose dell'ambiente ottengono una migliore approvazione dei clienti e quindi contribuiscono ai profitti a lungo termine. Le aziende con un chiaro posizionamento ambientale nel mercato, come Ben & Jerry, Body Shop e Patagonia, sono spesso citate come esempi di marketing sociale di successo (Kotler, 2003). Poiché queste aziende godono di una reputazione ecologica, cercano fornitori che siano anche attenti all'ecologia. Pertanto, le azioni rispettose dell'ambiente non solo mirano a un sottoinsieme altrimenti ignorato di clienti attenti all'ambiente, ma anche, costruendo una catena di approvvigionamento verde, consentono anche all'azienda di sviluppare vantaggi competitivi rispetto ai loro concorrenti (Winsemius e Guntram, 1992).

Diverse aziende, come 3M, Winnie's o Patagonia, hanno avuto successo nel posizionare i loro prodotti ecocompatibili sui mercati di destinazione e promuoverli in modo efficace. Il posizionamento e le promozioni dei prodotti rispettosi dell'ambiente hanno avuto particolare successo, dato l'aumento del numero di tali prodotti realizzati dalle aziende in risposta alle richieste dei clienti aziendali (Osterhus, 1997). Si stima che ben il 42% dei clienti negli Stati Uniti sia disposto a pagare di più per prodotti "verdi" (Kotler, 2003). Tuttavia, molti prodotti ecocompatibili falliscono a causa di una forte attenzione solo agli aspetti ecologici del prodotto (Semon, 2006). Invece, gli sforzi di promozione dovrebbero concentrarsi su come gli aspetti ecologici si integrano con altre funzionalità necessarie per fornire migliori vantaggi complessivi a valore aggiunto.

Per King (1985), i fallimenti nella pratica del marketing erano spesso dovuti all'esistenza di "marketing falso", le cui manifestazioni definiva "marketing di spinta", "marketing del reparto marketing", marketing contabile e "marketing formula".

Il "marketing di spinta" riguarda un approccio altamente basato sulle vendite per cui le aziende hanno spesso utilizzato l'ambiente solo come dimensione promozionale aggiuntiva senza alcun tentativo di analizzare, o modificare, il prodotto sottostante stesso e i suoi impatti ambientali. Il "marketing del reparto marketing" identifica una mancanza di integrazione tra marketing e altre funzioni aziendali, impedendo alle aziende di sviluppare un approccio ampio e olistico al marketing verde mentre il "marketing formula" si basa sul fatto che gran parte di ciò che le aziende chiamavano "marketing" non era affatto marketing, nel senso di essere sostenuto dai principi e dalla filosofia del marketing. In pratica, gli orientamenti delle aziende si sono concentrati su produzione, vendita, costi, legislazione e PR, mentre il cliente è stato spesso di interesse marginale. Inoltre, le aziende hanno un marketing verde compartimentato piuttosto che sviluppare una prospettiva olistica che abbracci tutti gli aspetti dell'azienda, del prodotto e dei mezzi di produzione, consumo e smaltimento (Peattie and Crane, 2005).

Al contrario, il marketing sostenibile deve invece affrontare comportamenti di non acquisto come l'uso, la condivisione, la manutenzione, lo smaltimento e il ritiro del prodotto. In pratica, il green marketing è caratterizzato da un campo di gioco in pendenza dovuto al sussidio socio-ambientale di cui godono effettivamente molti prodotti convenzionali (esternalizzando i costi ambientali sociali) e agli effetti sulle prestazioni della rimozione di ingredienti dannosi (ma efficaci). I prodotti verdi sono quindi spesso spinti in una posizione competitiva estremamente difficile (Peattie and Crane, 2005).

Come mostrato nel riquadro A della Figura 41, l'attuale attenzione del marketing è scarsa sul raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità poiché i suoi sforzi sono rivolti principalmente a coloro che sono esterni all'azienda. Queste priorità derivano dalle funzioni tradizionali del marketing di stimolazione della domanda e gestione della domanda (Kotler, 1973). Tuttavia, per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità ambientale, sia il marketing che la stessa catena di fornitura devono avere un maggiore coordinamento interfunzionale, con il ruolo ampliato del marketing incentrato sia sulla gestione della domanda che sulla gestione dell'offerta (Sharma et al., 2010). In particolare, il ruolo ampliato del marketing in questo caso richiede uno sforzo più concertato nell'identificazione dei mercati di destinazione per i prodotti riciclati e rigenerati e per tentativi consapevoli di posizionamento per superare qualsiasi immagine negativa che i clienti possono avere di tali prodotti. Mentre i prodotti build-to-order comportano notevoli risparmi sui costi e aiutano gli obiettivi di sostenibilità ambientale, il marketing deve ancora capitalizzare le possibilità di personalizzazione della produzione build-to-order (BTO). Con l'input del marketing, l'enfasi del design del prodotto sarà sul design modulare che aiuti nei processi BTO, nel riciclo e nella rigenerazione. Nell'era emergente della sostenibilità ambientale, le aziende cercheranno la produzione modulare in modo da poter personalizzare, riciclare o rigenerare i prodotti. La funzione di marketing sarà anche determinante per consentire gli sforzi di riciclaggio come parte del programma di sostenibilità dell'azienda (Sharma et al., 2010).

In conclusione, in un futuro il marketing dovrà svolgere un ruolo più centrale e sarà il collante che guiderà le aziende di successo e sarà il fornitore di informazioni chiave sia sulla domanda che sull'offerta (Sharma et al., 2010). Nonostante ciò, forse la risposta per fare progressi più sostanziali verso la sostenibilità non spetta affatto ai professionisti del marketing, dal momento che gli attuali difetti del mercato lo rendono incapace di fornire la sostenibilità da solo (Peattie and Crane, 2005). Il mercato deve operare all'interno di una società in cui la sostenibilità è più che adottata come obiettivo di politica pubblica, ma è perseguita attivamente attraverso l'attuazione delle politiche in termini di tassazione, istruzione, politica industriale, spesa pubblica e investimenti. Mentre le prime previsioni di crescita nel mercato verde possono ora sembrare un po' esagerate, le previsioni per i crescenti problemi ambientali non lo sono state. Più tempo impiegheremo per

affrontare la questione e per compiere progressi verso un marketing più sostenibile, maggiori saranno le interruzioni e gli sforzi. Prima si compiono progressi sostanziali, più è probabile che la storia abbia un lieto fine (Peattie and Crane, 2005).

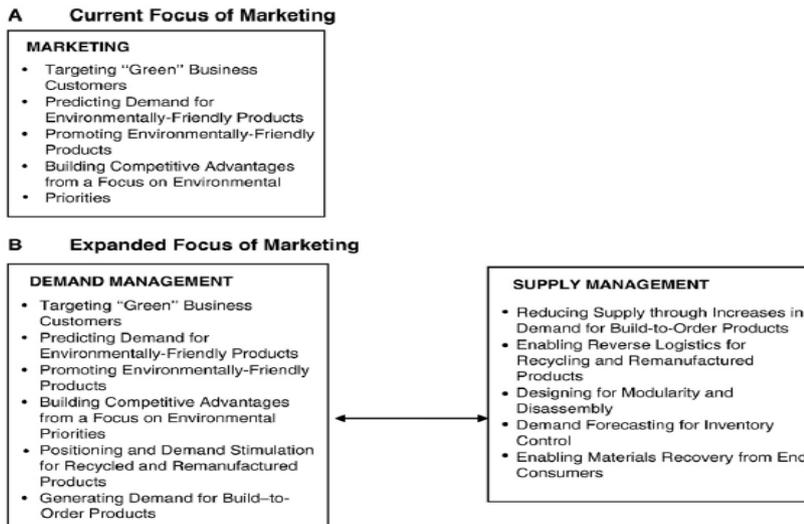


Figura 41. Analisi degli obiettivi attuali e futuri del marketing, tratto da Sharma et al. (2010)

### 3.7.5. Manutenzione

In questa sezione viene presentato un approfondimento, seguendo quanto riportato da (Franciosi et al., 2020), sulla manutenzione, in particolare quella predittiva inclusa anche nell'ambito I4.0, per la sua importanza strategica in ambito sostenibilità.

La manutenzione fornisce all'impresa la capacità di mantenere efficiente il proprio sistema di produzione e di fornire il prodotto alla qualità richiesta. In questo modo, il processo di manutenzione ha un grande potenziale nella ricerca di una produzione sostenibile grazie al suo impatto sui processi di altre imprese fornitrici (Franciosi et al., 2017). La manutenzione dovrebbe contribuire a promuovere la sostenibilità attraverso pratiche di gestione innovative, l'integrazione degli obiettivi di sostenibilità nella gestione della manutenzione convenzionale, l'adozione di nuove misure e lo sfruttamento di potenzialità derivate dalle nuove tecnologie (Garetti and Taisch, 2012). La manutenzione influisce sul volume e sui costi di produzione, sulle prestazioni degli asset, sulla disponibilità delle apparecchiature e sulla qualità del prodotto finale. Colpisce anche la salute e la sicurezza delle persone (Okoh e Haugen, 2014), l'ambiente naturale circostante e il benessere sociale (Franciosi et al., 2018). La manutenzione, infatti, ha molti impatti diretti e indiretti sugli aspetti legati alla sostenibilità: direttamente, attraverso l'esecuzione delle attività di manutenzione, e indirettamente, sui processi produttivi e sulla qualità del prodotto finale a causa dell'efficienza / inefficienza della manutenzione. Pertanto, una gestione corretta e sostenibile dei processi di manutenzione può ridurre e controllare tali impatti (Franciosi et al., 2020).

Viene quindi definito il concetto di Manutenzione Sostenibile come " un insieme di processi interconnessi che, da un lato, devono sostenere asset ed attrezzature durante il loro funzionamento al fine di garantire la conformità del processo di produzione, dei prodotti fabbricati e di ridurre il loro impatti sull'economia, la società e l'ambiente circostante e, d'altro canto, essa stessa deve essere una funzione aziendale sostenibile al fine di limitare i propri flussi e gli impatti generati durante le attività di manutenzione " (Franciosi et al., 2020).

L'obiettivo di una gestione sostenibile dei processi di manutenzione dovrebbe essere limitare l'influenza negativa sull'ambiente, garantire la sicurezza delle parti interessate e ottenere una

gestione più efficiente delle risorse e dell'energia (Jasiulewicz-Kaczmarek e Drozyner, 2011); questo, ad esempio, potrebbe essere ottenuto attraverso l'integrazione di pratiche Lean&Green nella gestione della manutenzione (Jasiulewicz- Kaczmarek, 2014). La principale conseguenza del considerare lo sviluppo sostenibile con i processi e le attività di manutenzione è che la funzione di manutenzione può essere focalizzata sul prolungamento dell'uso delle risorse, fornendo un'elevata efficienza delle risorse tecniche con un utilizzo ottimale delle risorse.

Una manutenzione inadeguata può portare ad una bassa produttività degli impianti, con conseguenti perdite di opportunità di mercato e minori profitti, nonché inventario extra per pezzi di ricambio e materiali necessari per mitigare gli effetti dei guasti e riparare i prodotti difettosi causati da malfunzionamenti del sistema. Per quanto riguarda l'ambiente, pratiche di manutenzione mal definite degli asset produttivi portano a molti problemi ambientali, come emissioni pericolose, sprechi di produzione dovuti a malfunzionamenti del sistema, utilizzo inefficiente dell'energia, consumo inefficace di risorse e spreco di materiali immagazzinati (Liyanage e Badurdeen, 2010) . Operazioni di manutenzione improprie causano anche trasporti extra, che significa più consumo di energia ed emissioni, insieme a più imballaggi necessari per proteggere i prodotti durante i movimenti, o spreco di energia per riscaldamento, raffreddamento e illuminazione durante i tempi di fermo della produzione per ritardi di manutenzione (Raouf, 2009). Dal lato sociale invece, il principale impatto sociale relativo alla manutenzione riguarda la salute e la sicurezza umana, infatti cattive pratiche di manutenzione causano condizioni di lavoro non sicure e malsane, incidenti e situazioni pericolose (Jasiulewicz-Kaczmarek e Drozyner, 2013). La manutenzione non riguarda solo i lavoratori direttamente coinvolti nelle attività di manutenzione, ma anche tutti i dipendenti della produzione e persino i clienti se strategie di manutenzione inadeguate o procedure eseguite in modo inadeguato portano a condizioni di lavoro non sicure e manufatti di bassa qualità (Franciosi et al., 2020).

Di conseguenza, si ricava l'enorme importanza che la funzione aziendale manutenzione può avere all'interno del raggiungimento degli obiettivi della TBL, data la sua influenza non solo sull'aspetto economico (con tutte le conseguenze finanziarie e qualitative), ma anche a livello sociale (in termini di protezione dei lavoratori e della loro condizione lavorativa) ed ambientale (a livello di prevenzione dell'inquinamento e di ottimizzazione delle risorse).

### 3.7.6. PMI

Infine, viene dedicato un paragrafo alle piccole-medie imprese innanzitutto perché esse costituiscono almeno l'85% del business statunitense, il 99% delle attività nell'Unione Europea e oltre il 99% delle imprese in Corea. Secondo l'OCSE (1985, 1995), i settori manifatturieri considerati sono quelli dominati dalle PMI in cui la risposta ambientale dei prodotti e dei processi da parte dell'azienda è importante in Europa e in Asia. Se consideriamo che oltre l'80% di tutte le imprese globali sono PMI, cresce la preoccupazione di creare un business case per la sostenibilità delle PMI e per promuovere gli investimenti delle PMI in pratiche commerciali sostenibili (Dwyer et al., 2009).

In particolare, sotto questo punto di vista è stato illuminante lo studio di (Jiao et al., 2020) che ha analizzato le cause di sopravvivenza delle imprese innovative in ambito verde in Cina, per ricavare spunti per i manager ed i regolatori per creare un ambiente ottimale per lo sviluppo di PMI sostenibili. Essi hanno ricavato che circa il 20%–40% delle aziende morirà entro i primi due anni di vita; quindi, dal punto di vista del ciclo di vita dell'impresa, i decessi delle imprese si verificano

spesso nel periodo imprenditoriale dato che le startup hanno poco tempo per essere stabilite e mancano dell'esperienza degli imprenditori, ci sono molte incertezze e l'ambiente esterno è turbolento, con un alto tasso di mortalità. Tuttavia, i decessi delle imprese si verificheranno anche dopo il periodo di avvio, sebbene l'impresa sia stata costituita da molto tempo e abbia superato il periodo di avviamento in sicurezza, ciò non significa che non sarà eliminata dal mercato (Jiao et al., 2020). Infatti, a causa della loro mancanza di risorse e capacità, le piccole e medie imprese hanno sempre avuto un alto tasso di mortalità; tuttavia, le grandi imprese muoiono a causa di errori nelle decisioni strategiche. Laddove le aziende più grandi, spesso multinazionali, hanno sviluppato le capacità necessarie per raggiungere la TBL negli ultimi decenni, le piccole e medie imprese (PMI) spesso non hanno le conoscenze, le competenze, i finanziamenti e le risorse umane per cambiamenti desiderati all'interno delle organizzazioni (Lee, 2008). Inoltre, si osserva spesso che gli approcci sono strettamente focalizzati su caratteristiche specifiche del processo di produzione o del prodotto quando le PMI hanno tentato di cambiare. Pertanto, le PMI spesso hanno una visione limitata sulla direzione della futura innovazione e tendono ad affrontare le questioni verdi in modo ad hoc (Lee, 2008; Nawrocka, 2008). Inoltre, la mancanza di risorse finanziarie da destinare alle iniziative green, la capacità di adattare la propria organizzazione a stimoli esterni e l'assenza di un'unità organizzativa appositamente finalizzata alla gestione delle tematiche ambientali rappresentano altri ostacoli alla transizione. Va però anche notato come le PMI hanno spesso alcuni vantaggi rispetto alle grandi organizzazioni nell'assicurare un'efficace gestione verde; infatti, le linee di comunicazione sono generalmente più brevi, le strutture organizzative sono meno complesse, le persone spesso svolgono più funzioni e l'accesso ai top manager è più semplice (Dwyer et al., 2009).

I fattori motivazionali per adottare la gestione ambientale sono una delle questioni chiave per capire perché le PMI si muovono verso una gestione più verde in modo reattivo o proattivo. La PMI considera la qualità dei prodotti in termini di prospettive ambientali ed economiche come i fattori chiave di successo per la propria attività futura. Inoltre, la domanda dei clienti è un altro fattore importante che influenza l'adozione della gestione ambientale proprio per la necessità delle PMI di seguire i bisogni del mercato pena l'uscita dal mercato stesso (Dwyer et al., 2009). Le normative ambientali e l'aumento della pressione dei clienti sono i principali motori della gestione verde (Perez-Sanchez et al., 2003). Ovviamente, il rispetto dei requisiti legali è il requisito ambientale più fondamentale per tutte le aziende. Le normative ambientali interessano maggiormente le PMI perché le aziende più piccole mancano delle risorse necessarie per far fronte a una regolamentazione molto più severa rispetto a quelle grandi. Per le PMI, il processo di adozione della tecnologia di prevenzione dell'inquinamento può essere più difficile, a causa della sua complessità e della mancanza di risorse economiche (Azzone et al., 1997). Si evince quindi come la legislazione ambientale e la pressione pubblica, oltre che quella della domanda, sono i principali fattori alla base dell'adozione di attività di gestione verde nelle PMI (Dwyer et al., 2009). Per quanto riguarda i vantaggi delle pratiche verdi, l'introduzione di programmi di formazione volti ad accrescere la consapevolezza ambientale dei dipendenti e di corsi specificamente indirizzati allo sviluppo di nuove competenze tecniche e gestionali riveste un'importanza fondamentale per favorire le innovazioni ambientali (Hart, 2005; Perez-Sanchez et al., 2003). La gestione verde può essere inoltre una fonte di risparmio sui costi e vantaggio competitivo per le PMI, dato che migliorando le prestazioni ambientali e la differenziazione dei prodotti, la leadership dei costi e la differenziazione possono essere rese operative nella pratica ambientale di queste imprese (Porter, 1985; Shrivastava, 1995).

Analizzando invece i risultati dello studio di (Jiao et al., 2020), esso ha scoperto che i legami politici possono aumentare significativamente la probabilità di sopravvivenza delle imprese, con imprese ancora deboli. Inoltre, la combinazione di posizionamento sul mercato, innovazione di marketing e strategia aziendale può anche costruire il vantaggio di sopravvivenza di un'azienda. I risultati hanno mostrato che diversi tipi di attività di innovazione di un'impresa hanno impatti importanti sulla sopravvivenza: l'innovazione commerciale impedisce all'impresa di fallire, così come l'innovazione di prodotto. Tuttavia, altri studi hanno dimostrato che, mentre l'innovazione tecnologica migliora la competitività di un'azienda, aumenta anche il rischio finanziario dell'azienda, aumentando così il rischio di fallimento dell'azienda.

Un'altra conclusione, sebbene sorprendente, è che una bassa R&S favorisce la sopravvivenza delle imprese innovative verdi. Sebbene in generale, la ricerca e lo sviluppo favorisca il miglioramento delle prestazioni aziendali, è un evento incerto con grandi rischi e cicli lunghi. Per le imprese innovative verdi cinesi, ma tale risultato è generalizzabile a quelle globali, a causa della loro piccola scala, delle limitate risorse interne ed esterne e della scarsa capacità di resistere ai rischi, una bassa ricerca e sviluppo è la strategia ottimale per la loro precoce sopravvivenza (Jiao et al., 2020). In secondo luogo, rispetto alle capacità basate sulle risorse, le capacità dinamiche possono promuovere meglio la sopravvivenza delle imprese innovative verdi in Cina. Infine, hanno scoperto che il sostegno del governo e la competitività dei prodotti avevano effetti di rafforzamento reciproco; vale a dire, le imprese innovative verdi con il sostegno del governo e prodotti altamente competitivi hanno mostrato una migliore redditività rispetto a quelle senza tali condizioni.

In conclusione quindi, nonostante le peculiarità delle PMI che tendenzialmente pregiudicano la loro sopravvivenza (mancanza di competenze, visione limitata del contesto e mancanza di fondi), la loro mortalità può essere ridotta tramite sostegni governativi, minori investimenti in ricerca e sviluppo, acquisizione di capacità dinamiche e competitività dei prodotti.

## 3.8. Persone

### 3.8.1. Introduzione

Questo capitolo è stato pensato per dare risalto a due aspetti estremamente importanti, raggruppati sotto il nome di "Persone". Perché è di persone che effettivamente si tratta in letteratura e nella realtà, nonostante la crescente automazione dei processi produttivi e la crescente alienazione ed omologazione dei lavoratori e dei consumatori. Infatti, i lavoratori, soprattutto quelli più specializzati, continueranno ad esistere ed anzi vedranno sempre nuove opportunità, e da qui nasce l'esigenza della formazione universitaria e superiore in ottica sostenibilità. Infine, difficilmente in un futuro la domanda sarà costituita dai bisogni dei robot ed allora acquisisce sempre maggiore importanza lo studio del comportamento d'acquisto dei clienti, in particolare al fine di comprenderne le necessità "verdi".

Infatti, una delle maggiori sfide incontrate dalla maggior parte dei paesi nel loro percorso verso l'Industria 4.0, ed il paradigma della sostenibilità in generale, è legata alle competenze richieste alla forza lavoro. Infatti, ci si aspetta che i dipendenti acquisiscano competenze avanzate nel dominio dell'Intelligenza artificiale, ICT, analisi dei dati, robotica, ma anche capacità ed abilità comprese le abilità cognitive, il pensiero analitico, la capacità decisionale, le capacità organizzative, intelligenza sociale, competenza tecnica e di sistema, ragionamento logico, risoluzione dei problemi. Inoltre, devono essere sviluppate tra il personale le qualifiche in termini di capacità di risoluzione dei problemi, analisi dei guasti, far fronte a richieste volubili, decodificare nuovi problemi e compiti non programmati, trattare una grande quantità di dati, etc. (Mian et al., 2020). Le università (scuole di istruzione superiore e corsi professionali) devono quindi svolgere un ruolo fondamentale nel promuovere le transizioni sociali e culturali richieste per l'Industria 4.0 e per la sostenibilità. Tuttavia, le università odierne sono state istituite dalla prospettiva delle tre rivoluzioni industriali precedenti, che non offrono le competenze necessarie per rafforzare la rivoluzione dell'Industria 4.0. Ciò sottolinea il fatto che le università o il sistema di istruzione superiore devono adattarsi per motivi di formazione e preparazione degli studenti per le industrie future (Mian et al., 2020). Inoltre, Prevedouros et al. (2018) hanno notato che l'integrazione della sostenibilità nei curricula universitari porta allo sviluppo di studenti con la capacità di affrontare le sfide ambientali e sociali del pianeta. Mentre gli sforzi per raggiungere un'economia circolare sono più evidenti negli ultimi due decenni (Geissdoerfer et al., 2017), ciò potrebbe essere ottenuto solo affrontando la causa principale del problema, ossia l'eliminazione della mentalità insostenibile dei futuri leader (Tasdemir and Gazo, 2020). Infatti, uno studio ha sottolineato che tale mentalità potrebbe essere alterata solo con un approccio pedagogico trasformativo che migliorerà le capacità di pensiero critico e insegnerà a creare soluzioni attuabili, che richiedono l'apprendimento basato sui problemi (Problem-Based Learning o PBL) (Thomas, 2009).

Per molte imprese, infatti, la consapevolezza della sostenibilità e la capacità di fornire soluzioni di sostenibilità a problemi su scala industriale sono diventate qualifiche indispensabili, e non solo più preferenziali, quando si recluta nuovo personale (Hesselbarth e Schaltegger, 2014). Da ciò si può quindi derivare la necessità di avere un sistema formativo, universitario ma anche superiore, che fornisca ai futuri ingegneri, economisti, insegnanti, ma anche ai semplici lavoratori, una solida formazione sulle sfide tecnologiche future ma anche e soprattutto su quelle ambientali e sociali, pena la perdita della competitività del sistema educativo, ma anche di quello economico nazionale. Inoltre, per completare quanto discusso sopra, i problemi di sostenibilità odierni

richiedono un approccio transdisciplinare, piuttosto che metodi mono o interdisciplinari, per stabilire una società efficace (Tassone et al., 2018; Tejedor et al., 2018). Il trasferimento delle conoscenze orientato alle imprese dovrebbe essere riprogettato per includere anche gli aspetti socio-ecologici in tutte le attività di istruzione superiore, vale a dire ricerca, istruzione ed estensione (Tasdemir and Gazo, 2020). Inoltre, Stachová et al. (2019) ha evidenziato l'importanza della collaborazione e della condivisione delle conoscenze tra gli istituti di istruzione e le organizzazioni imprenditoriali. Secondo loro, la partnership tra aziende e università fornisce maggiore competitività, versatilità e interoperabilità durante l'era dell'Industria 4.0. Affermano inoltre che l'istruzione universitaria dovrebbe essere più dinamica e che l'istruzione superiore dovrebbe essere strettamente associata alle imprese, alle istituzioni governative e alle comunità tecniche per la collaborazione e le partnership.

In termini di comportamento del consumatore socialmente responsabile, è importante la descrizione del consumatore consapevole e responsabile, come definito da Webb et al. (2008). Questo consumatore consapevole è ben informato sulle variabili più basilari come qualità, prezzo e garanzie, nonché su altri elementi come le recensioni di altri utenti, l'impatto ambientale e sulla salute del prodotto, il processo di produzione, le condizioni di lavoro e le materie prime utilizzate per la fabbricazione del prodotto. Tuttavia, la disponibilità e la disposizione di queste informazioni insieme costituiscono un ostacolo che il consumatore deve superare (Calderon-Monge et al., 2020). Sta quindi alle imprese fornire queste informazioni per differenziarsi dalle altre, sfruttando nuovi elementi competitivi quali la responsabilità sociale d'impresa (Corporate Social Responsibility o CSR), la trasparenza, la sostenibilità produttiva, l'approvvigionamento responsabile etc.

### 3.8.2 Importanza e ruolo dell'istruzione

Al giorno d'oggi, l'educazione alla produzione sostenibile è diventata un requisito essenziale nel curriculum presente e futuro. Gli sforzi mondiali coinvolgono il Decennio dell'istruzione per lo sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite che ha riferito che ci sono grandi ambizioni per l'integrazione della sostenibilità nel curriculum perseguito da 370 università all'interno di un accordo globale (Ibrahim et al., 2019).

A ciò si aggiunga che, nonostante il riconoscimento in tutto il mondo dell'Industria 4.0, la sua adozione olistica è vincolata dai requisiti di competenze specifiche tra la forza lavoro. Ci si aspetta che il personale acquisisca il pensiero adattivo, le capacità cognitive e computazionali, prevalentemente nell'area della tecnologia dell'informazione, dell'analisi dei dati, ecc. Pertanto, le università che hanno gettato le basi per i talenti o le tendenze future nella società devono adattare e modernizzare i programmi esistenti, oltre che le proprie strutture e infrastrutture (Mian et al., 2020).

Poiché le università sono un motore fondamentale dello sviluppo tecnologico ed economico, dovrebbero essere in prima linea per superare i problemi delle industrie all'interno del paese. Dovrebbero diventare il fornitore del pool di talenti richiesto e affermarsi come centro di conoscenza per aziende, industrie, unità produttive ed organizzazioni governative (Mian et al., 2020). A ciò si aggiunga il fatto che gli istituti di istruzione superiore sono tra gli elementi più influenti nell'attuazione dei concetti di sostenibilità e sviluppo sostenibile. Le industrie manifatturiere di tutti i tipi sono stakeholder chiave, che si affidano alle università per soddisfare la domanda di forza lavoro competente. Tra tutte queste missioni, oggi, le università stanno

cercando di sviluppare programmi di sostenibilità per aumentare ulteriormente la consapevolezza della sostenibilità e fornire agli studenti universitari un insieme di strumenti che fornirebbe loro un vantaggio competitivo nel mercato del lavoro (Tasdemir and Gazo, 2020).

Qualsiasi istituzione e qualsiasi dipartimento all'interno di tali istituzioni potrebbe contribuire a questi sforzi di sviluppo del curriculum se capiscono l'urgenza e le dinamiche delle preoccupazioni sulla sostenibilità (Tasdemir and Gazo, 2020). Inoltre, le università che non avranno successo nell'istruzione e nella formazione dei propri studenti sulle ultime tecnologie potrebbero essere in ritardo per le opportunità che sono garantite dall'Industria 4.0 e dal nuovo paradigma della sostenibilità produttiva (Mian et al., 2020), con evidenti ed inevitabili ripercussioni sulla competitività di questi atenei e della loro nazione.

Nell'ottica di un'effettiva trasformazione dell'università, si riporta quanto presentato da (Mian et al., 2020), rappresentato anche in Figura 42:

1. Il requisito principale nella piramide di trasformazione è l'assegnazione di fondi sufficienti necessari per l'ultima rivoluzione industriale. Le università dovrebbero dare la priorità agli investimenti in progetti di ricerca o iniziative in linea con la filosofia o gli obiettivi dell'Industria 4.0.
2. La creazione di un'adeguata consapevolezza tra studenti, dipendenti etc. può essere realizzato attraverso l'organizzazione di seminari educativi e workshop all'interno delle università. Gli esperti di tutto il mondo dovrebbero essere invitati a discutere dell'Industria 4.0, dei loro studi pilota o esempi pratici per esporre gli studenti ai vari termini dell'Industria 4.0 e ai problemi reali associati alla trasformazione dei sistemi tradizionali in sistemi intelligenti. Sessioni del genere saranno utili per stimolare l'interesse e trasmettere significative conoscenze e informazioni relative all'I4.0.
3. Inoltre, le università dovrebbero innovare il loro funzionamento, i laboratori e il curriculum adottando nuove tecnologie, o aggiornando quelle presenti, come la produzione additiva, software di simulazione, sistemi robotici, programmazione AI, materiali avanzati, realtà aumentata etc.
4. Oltre alle infrastrutture avanzate, le università necessitano di personale specializzato in Università 4.0 per adattare gli studenti ai concetti di Industria 4.0. Queste iniziative possono essere sostenute per creare nuovi istituti o centri di formazione professionale per educare il personale docente e qualificarlo per le sfide dell'era digitale.
5. Le università possono anche stimolare l'interesse del proprio personale attraverso l'inserimento di programmi di certificazione e stage rilevanti per l'Industria 4.0, ma anche finanziando studenti o dipendenti che desiderano partecipare a corsi di formazione o conferenze sugli aspetti dell'I4.0. Le università possono collaborare con aziende private per fornire programmi di tirocinio inerenti.
6. Le università dovrebbero infine aggiornare il curriculum esistente o introdurre nuovi corsi (es. analisi dei dati, IoT, robotica, sviluppo di app) per garantire che i futuri talenti soddisfino i requisiti delle industrie future. Dovrebbe essere inoltre promosso l'apprendimento basato su progetti, legato ad abilità relative alla leadership, al processo decisionale, alla comunicazione, al lavoro di squadra e alla gestione del tempo. I corsi e i progetti possono essere progettati per inculcare tra gli studenti il pensiero critico e adattivo, una solida competenza tecnica, la conoscenza multidisciplinare, l'intelligenza computazionale, ecc. (Mian et al., 2020).

Tale ricetta è facilmente rapportabile ad un paradigma sostenibile, e non più solo I4.0, assegnando fondi alla ricerca in ambito sostenibilità (1), organizzando seminari e workshop sulla TBL e sull'eco-

innovazione (2), adottando nuove tecnologie e nuovi strumenti in ottica LCA o DFE (3). Ma anche creando appositi centri di ricerca e dipartimenti sulla sostenibilità (4), organizzando e finanziando stage in aziende e conferenze con esperti mondiali (5) ed infine introducendo nuovi corsi sia tecnici (come progettazione del PLC, PLM, LCA, tecniche di sviluppo prodotto del paragrafo 3.6.3.) che gestionali, focalizzati sulla sostenibilità e sulla creazione della cultura della sostenibilità.

In conclusione, si raccomanda alle università di formare il personale esistente, acquisire nuovi talenti, superare le paure e le preoccupazioni dei dipendenti attraverso un'adeguata consulenza e sicurezza del lavoro, preparare una tabella di marcia o una serie di linee guida con l'aiuto di esperti del settore, stanziare fondi sufficienti, e definire procedure per ridurre al minimo le minacce alla sicurezza (Mian et al., 2020).

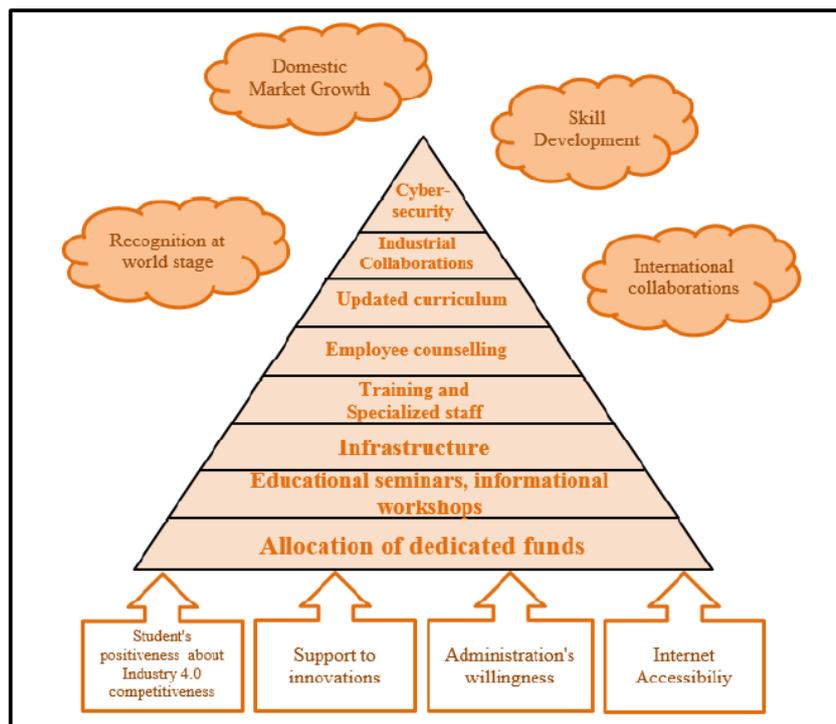


Figura 42. Trasformazione del sistema universitario, tratto da Mian et al. (2020)

Di seguito vengono riportati tre esempi di effettiva implementazione di pratiche di sostenibilità in ambito universitario, presenti in letteratura:

Fonte	Ente	Progetto	Pratiche
Tasdemir and Gazo (2020)	Purdue University (USA)	<i>Production and sustainability of secondary wood products</i>	Corso di 16 settimane sulla sostenibilità sia tramite conferenze ed altri strumenti teorici che sessioni pratiche in laboratorio basate su progetti
Mourtzis et al. (2018)	World Economic Fund (WEF)	<i>Education 4.0</i>	Progetto inter-universitario d'integrazione delle tecnologie 4.0 tramite seminari e workshop
Coskun et al. (2019)	Turkish German University (TU)	<i>Adapting Engineering Education to I4.0 Vision.</i>	Inserimento di nuovi corsi teorici, aggiornamento dei laboratori e nuovi club studenteschi.

Tabella 10. Esempi di implementazione di pratiche di sostenibilità

In conclusione, è giusto ricordare come l'istruzione di per sé non sia sufficiente alla transizione, nonostante la sua indubbia importanza nella formazione dei futuri decisori e gestori. Tuttavia, come riporta sempre (Mian et al., 2020), i governi possono compiere passi piccoli ma influenti, sostenendo e finanziando i propri istituti di istruzione per permettere un miglioramento delle competenze e preparare la forza lavoro per il futuro. Inoltre, si suggerisce che le università debbano collaborare con le industrie per migliorare la qualità delle risorse umane, potenziare le proprie competenze e sviluppare nuove idee. L'istruzione universitaria da sola non può far avanzare la nuova generazione: ha bisogno del supporto e della collaborazione delle imprese tecnologiche per abbracciare il sistema di apprendimento basato sul lavoro. È anche essenziale che le università e gli istituti di ricerca commercializzino le loro ricerche e quindi generino finanziamenti da investitori esterni per ulteriori progetti di ricerca. I professori devono collaborare con le aziende per creare incarichi collaborativi per promuovere l'apprendimento basato su progetti e la ricerca scientifica all'avanguardia (Mian et al., 2020). Solo così, infatti, l'università potrà svolgere appieno il suo ruolo formativo ed aumentare la consapevolezza della sostenibilità, garantendo al contempo una maggiore competitività propria e della propria nazione.

### 3.8.3. Comportamento dei clienti

Da ormai svariati anni l'impronta ecologica del consumo globale è maggiore della bio-capacità totale del pianeta, l'*overshoot day*, ossia il giorno nel quale l'umanità consuma interamente le risorse prodotte dal pianeta nell'intero anno, è sempre più vicino a giugno. Infatti, nel 2019 era il 29 luglio, nel 2009 il 20 agosto e nel 1999 il 30 settembre (Wikipedia), indicando che stiamo per doppiare la capacità della Terra. Pertanto, incorporare considerazioni di sostenibilità nella gestione aziendale è tanto importante quanto lo sviluppo di tendenze di consumo responsabili che bilancino le considerazioni sull'impatto ambientale e sociale con le preferenze ed i criteri delle decisioni di acquisto (Calderon-Monge et al., 2020). Come anello finale della catena del valore, i consumatori, attraverso il loro comportamento di acquisto, possono impostare tendenze e stabilire preferenze mentre incentivano, rifiutano o boicottano l'acquisto di prodotti, marchi, formati o altri attributi come reputazione, valori ed etica, considerazioni sociali e ambientali (Calderon-Monge et al., 2020).

In particolare, questo argomento viene affrontato riprendendo due lavori ricavati dalla letteratura: il primo, di (Calderon-Monge et al., 2020), affronta la responsabilità del consumatore in ottica ambientale e sociale, mentre il secondo, ossia (Jansson et al., 2010), analizza i comportamenti di acquisto dei clienti e come influenza l'acquisizione soprattutto in ambito verde.

Nonostante la sempre crescente quantità di informazioni a disposizione, i consumatori, tuttavia, seppur consapevoli dell'impatto dei materiali sono meno consapevoli dell'impatto sociale e ambientale dei processi di produzione e distribuzione dietro i prodotti che acquistano.

Inoltre, è diffusa l'opinione, in qualche modo intuitiva, è che esista una distinzione tra le dimensioni ambientale e sociale, per cui i consumatori che si concentrano sulle questioni ambientali sono considerati separatamente da coloro che considerano le questioni sociali ed economiche (Belz & Peattie, 2012). D'altro canto, i consumatori responsabili considerano insieme i criteri ambientali, sociali ed etici e poi acquistano i prodotti (Foretica, 2018). Questi criteri possono essere utilizzati per valutare le caratteristiche intrinseche del prodotto, il processo di fabbricazione, il luogo di origine, il rispetto dei diritti umani e dell'ambiente e le pratiche commerciali del distributore (Calderon-Monge et al., 2020).

In particolare, vi è una predominanza dell'interesse per la dimensione ambientale rispetto all'interesse per le altre dimensioni della sostenibilità (Simpson & Radford, 2014), dovuta a diverse cause (Kilbourne & Thyroff, 2020):

- In primo luogo, la crescente preoccupazione dei consumatori per l'ambiente, iniziata negli anni '70, proseguita negli anni '90 ed è diventata nuovamente prominente negli ultimi anni, è stata sfruttata dai professionisti del marketing per coinvolgere i consumatori in un consumo ecocompatibile;
- In secondo luogo, le persone sono più capaci di ricordare gli acquisti fatti con consapevolezza ambientale rispetto a quelli fatti con consapevolezza sociale, dato che gli aspetti relativi al benessere sociale sono difficili da includere nei prodotti e da trasmettere utilizzando strumenti di marketing di base come colore, packaging e contenuto;
- Inoltre, i consumatori reputano di sapere di più sullo sfruttamento del loro ambiente naturale che sul comportamento irresponsabile dell'azienda. Le asimmetrie informative fanno sembrare la giustizia sociale al di fuori del controllo del consumatore, con le questioni correlate che devono essere risolte in altri modi e semmai delegate alle autorità;
- Infine, la percezione che i consumatori hanno del maggiore potere o vulnerabilità della natura o dell'umanità potrebbe indicare la loro preoccupazione per l'ambiente naturale o sociale e la loro intenzione di acquistare prodotti ecologicamente o socialmente responsabili (Calderon-Monge et al., 2020).

Da ciò si può quindi ricavare l'importanza di definire il concetto di consumatore responsabile per capirne le caratteristiche e quindi come sfruttarle nel guidarlo nel processo d'acquisto. L'importanza e la responsabilità del consumatore in relazione al benessere generale è stata per prima riconosciuta da Webster (1975), che ha definito un consumatore socialmente consapevole come colui che "tiene conto delle conseguenze pubbliche del suo consumo privato o che tenta di utilizzare il proprio potere d'acquisto per realizzare un cambiamento sociale". Roberts (1993) ha introdotto il termine responsabilità e ha definito un consumatore socialmente responsabile come colui che "acquista prodotti e servizi che vengono percepiti avere un'influenza positiva (o meno negativa) sull'ambiente o che patrocina le attività che tentano di ottenere risultati positivi correlati al cambiamento sociale." Questa definizione copre le dimensioni dell'ambiente e della società ed è quindi più olistica. Carroll (1991) elenca quattro tipi di responsabilità del consumatore considerando le componenti economiche, legali, etiche e filantropiche della responsabilità. Secondo Belz e Peattie (2012), i comportamenti non devono essere sempre motivati eticamente per influenzare positivamente l'ambiente o la società. I consumatori sono guidati più dai propri obiettivi che da preoccupazioni sociali o ambientali. Cercano il valore funzionale, emotivo e sociale attraverso il loro comportamento d'acquisto (Calderon-Monge et al., 2020). Prendendo spunto anche dalla definizione di Webb et al. (2008), si può definire in questa sede il consumatore responsabile come *"colui che, durante il suo processo d'acquisto, sfrutta i mezzi d'informazione tradizionali (etichette, pubblicità, passaparola) ed informatici (siti, forum, recensioni e social network) per comprendere, nel limite delle proprie competenze e delle asimmetrie informative, tutti gli aspetti relativi alle performance del prodotto e della sua catena di fornitura. Tali performance non devono essere solo quelle economiche (ossia prezzo, qualità, velocità di consegna, etc.) ma anche e soprattutto ambientali (emissioni ed altre fonti d'inquinamento correlate, certificazioni, abbattimento delle foreste, riciclabilità e circolarità del prodotto, percentuale di materiali riciclati, opzioni di smaltimento) e sociali (provenienza delle materie prime da fonti certificate, condizioni lavorative dei fornitori, sfruttamento minorile, espropriazioni di terre correlate etc.)"*.

Infine, sulla base dei risultati dello studio, si forniscono diversi consigli pratici, tra cui un aumento della trasparenza riguardo ai processi di produzione e distribuzione dei prodotti, con eventuale inclusione delle informazioni sulla tracciabilità del prodotto sull'etichetta o tramite qualche altro mezzo, aumentando così la credibilità dell'immagine dell'azienda. Infatti, fornire maggiori

informazioni sull'origine dei prodotti dell'azienda, sui processi di produzione e sull'impatto sulla società e sull'ambiente, nonché dettagli sull'impatto sul prezzo finale, potrebbe trasformare la CSR in uno dei principali elementi di differenziazione del marchio negli anni successivi. Attraverso opportune campagne di informazione dei consumatori, le istituzioni pubbliche e i mezzi di comunicazione possono fornire informazioni sugli effetti delle decisioni di acquisto sul comportamento delle aziende e sull'importanza del business sostenibile a causa del suo impatto sul pianeta e sulle persone. Ciò consentirebbe ai consumatori di differenziare i marchi in base alla loro responsabilità sociale e ambientale e quindi condividere le recensioni di questi marchi con altri utenti sui social media (Calderon-Monge et al., 2020).

Aumentare la comprensione del comportamento verde dei consumatori è importante per ragioni ambientali e commerciali. Dal punto di vista ambientale, la diminuzione degli effetti negativi del consumo è vitale per raggiungere alcuni degli obiettivi proposti dalla comunità internazionale (OCSE, 2002; UNEP, 2007). Dal punto di vista commerciale e di marketing, lo sviluppo di prodotti meno dannosi per l'ambiente non è efficace senza che i consumatori adottino tecnologie e stili di vita più ecologici (Jansson et al., 2010). Fondamentalmente, i comportamenti verdi dei consumatori si raggruppano in due categorie, quelli di riduzione e quelli di eco-innovazione.

Nel primo caso rientrano ad esempio il risparmio di acqua ed energia, la riduzione dell'uso dell'auto e, in una certa misura, il riciclo e lo smaltimento responsabile dei rifiuti. In questa concettualizzazione, i comportamenti di riduzione vengono effettuati su base quotidiana e, in aggregazione, possono avere un effetto sostanziale sull'ambiente, raramente costano denaro, comportano sforzi frequenti e spesso provocano disagio per l'attore che esegue il comportamento (Ritchie e McDougall, 1985; Ritchie et al., 1981). Poiché i comportamenti di riduzione sono associati al cambiamento delle abitudini e comportano anche un certo disagio a livello individuale, è stato riscontrato che sono difficili da implementare da una prospettiva politica (Black et al., 1985; Gardner e Abraham, 2007). La seconda categoria di comportamenti verdi è spesso indicata come comportamenti che aumentano l'efficienza energetica o scelte tecnologiche (Stern, 1992; Stern e Gardner, 1981), poiché spesso implicano la sostituzione della vecchia tecnologia inefficiente con soluzioni più efficienti. Secondo Black et al. (1985) non c'è un reale disagio per l'individuo associato alle scelte tecnologiche che rende questi comportamenti più attraenti per molti consumatori rispetto ai comportamenti di riduzione, nonostante comporti un esborso iniziale (Jansson et al., 2010). Stern (2000) presenta quattro categorie di determinanti dei comportamenti dei consumatori verdi: forze contestuali, fattori attitudinali, abitudini o routine e capacità personali. Le forze contestuali influenzano il comportamento indirettamente attraverso fattori attitudinali (Black et al., 1985), ponendo questi ultimi al centro della comprensione del comportamento dei consumatori verdi da una prospettiva sia psicologica che di marketing (Alwitt e Berger, 1993). I risultati mostrano che i valori, le convinzioni, le norme e la forza dell'abitudine determinano la volontà di ridurre e la volontà di adottare l'eco-innovazione. Inoltre, l'adozione precedente è risultata essere un forte determinante della futura volontà di adottare un'eco-innovazione, ma non per il comportamento di riduzione (Jansson et al., 2010). Per quanto riguarda le implicazioni dello studio, la principale implicazione dello studio è che coloro che adottano un'eco-innovazione sono meno disposti a limitare l'utilizzo dell'innovazione, ma più disposti ad acquistare nuovamente l'innovazione in futuro. Ciò suggerisce che una volta che i consumatori hanno adottato l'eco-innovazione, il suo utilizzo diventa una componente integrata della loro vita. Dal punto di vista della comunicazione, gli adottanti potrebbero quindi essere dei comunicatori molto utili per spargere la voce sulla loro decisione di adottare (Jansson et al., 2010).

## 3.9. Indicatori

### 3.9.1. Introduzione

In questo penultimo capitolo vengono presentati gli indicatori, data la loro importanza a livello di letteratura ma soprattutto perché mezzo principale a disposizione delle imprese per comunicare agli stakeholder il proprio avanzamento ed impegno a livello ambientale e sociale.

La definizione di un adeguato set di indicatori è essenziale per comunicare le performance dell'azienda agli stakeholder esterni. È necessario lo sviluppo di un quadro strutturato di indicatori, come un sistema di schede di valutazione per i processi e un "indice di sostenibilità" comparabile per i prodotti. Infatti, la valutazione della sostenibilità contribuisce a monitorare gli indicatori di sostenibilità (ad es. consumo di energia, effetto ambientale, economia e altri), comprendere i livelli di sostenibilità dei sistemi di produzione, fornire supporti tecnologici e politici per migliorare la sostenibilità del sistema e quindi promuovere lo sviluppo sostenibile dell'impresa (Cai and Lai, 2021). Si comprende l'utilità degli indicatori dal fatto che, come riportato da (Moldavska, 2016) la sostenibilità non è una destinazione ma un viaggio, la transizione verso una produzione sostenibile può essere vista come un qualsiasi ciclo plan-do-check-act (PDCA). Pertanto, la transizione alla produzione sostenibile può essere definita come un processo che trasforma un'azienda manifatturiera in un'azienda sostenibile attraverso il processo continuo che consiste in valutazione delle attuali prestazioni di sostenibilità, identificazione delle aree di miglioramento, suggerimento di azioni specifiche all'interno dell'azienda e implementazione di queste azioni (Moldavska, 2016).

Detto ciò, definiamo innanzitutto un indicatore come misura o aggregazione di misure da cui si possono desumere conclusioni sul fenomeno di interesse. Gli indicatori standard forniscono un mezzo affidabile e ripetibile per i produttori quando valutano il loro livello di sostenibilità e consentono confronti tra prodotti, processi, aziende, settori o paesi. Un indicatore corretto deve essere misurabile, pertinente, comprensibile, affidabile, accessibile ai dati, tempestivo e valutabile (Joung et al., 2013). È tuttavia necessario ricordare che, gli strumenti di sintesi, così come gli indicatori in generale, seppur siano molti utili e pratici per sintetizzare le analisi di qualità e sostenibilità (o qualsiasi altro tipo di analisi), comportano inevitabilmente la perdita di alcune delle informazioni da sintetizzare (Franceschini et al., 2019). Di conseguenza, per quanto un indicatore possa essere completo, pertinente etc., vi sarà sempre la necessità di migliorare costantemente tali costrutti per ridurre sempre più le informazioni perse, permettendo quindi una valutazione completa e corretta di tutti gli aspetti, micro- e macroscopici, della sostenibilità.

Un set di indicatori è un gruppo di indicatori che comprendono una visione olistica della sostenibilità. Combinare gli indicatori delle dimensioni ambientali, economiche e sociali più comuni e valutare insieme tali indicatori è una pratica per misurare la sostenibilità su una scala molto più ampia rispetto ai singoli indicatori. A differenza dei set di indicatori, gli indici forniscono una conclusione più semplice sul livello di sostenibilità perché si basano su metodi matematici basati sul peso per aggregare molti indicatori in un unico punteggio (Joung et al., 2013).

Diversi meccanismi e indici di segnalazione sono stati sviluppati da varie organizzazioni indipendenti e governative negli ultimi due decenni (Svensson et al.2016). Alcuni di questi indici sono stati utilizzati come meccanismi di rendicontazione obbligatori nell'ambito delle normative in vigore, mentre altri sono stati progettati per finalità di rendicontazione volontaria (Vimal et al.2017; Wang et al.2013). I sistemi di misurazione delle prestazioni dovrebbero essere dinamici e

dovrebbero evolversi e adattarsi al mutevole ambiente interno ed esterno. La domanda su quando cambiare e quanto cambiare richiede una grande quantità di competenze tecniche e di business e di lungimiranza tecnologica. Le misure per i sistemi di produzione devono coprire gli indicatori chiave di prestazione in termini di costi, tempo, qualità e flessibilità e considerazioni sulla produttività (Hon, 2005). A titolo informativo, il framework GRI ha fornito una nuova prospettiva alle misurazioni della sostenibilità ed è il framework più popolare per il reporting di sostenibilità in tutto il mondo (Tiwari and Khan, 2020).

### 3.9.2. Tipologie ed esempi di indicatori

Di seguito vengono elencati e presentati i principali indicatori, set d'indicatori ed indici trovati in letteratura. Essi sono parzialmente anche rappresentati in Fig.42, raggruppati per dominio di applicazione e dettaglio tecnico. Come si può notare, il CSD ed il CEI, ovvero gli indicatori di sostenibilità nazionale rispettivamente dell'ONU e dell'OECD, sono quelli con dominio più vasto, con scala mondiale, mentre il NIST, l'LCA ed il GRI, che verranno presentati di seguito in questo paragrafo, sono indicatori aziendali, ossia usati per valutare la sostenibilità di singole imprese se non di singoli prodotti (come l'LCA) e pertanto sono quelli con dettaglio tecnico superiore. I principali indicatori ed indici vengono presentati di seguito nell'elenco, da cui sono esclusi quelli più generali a livello di dominio (come ad esempio il CSD, il CEI etc.), in quanto in questa sede è di maggiore importanza l'ambito produttivo-industriale:

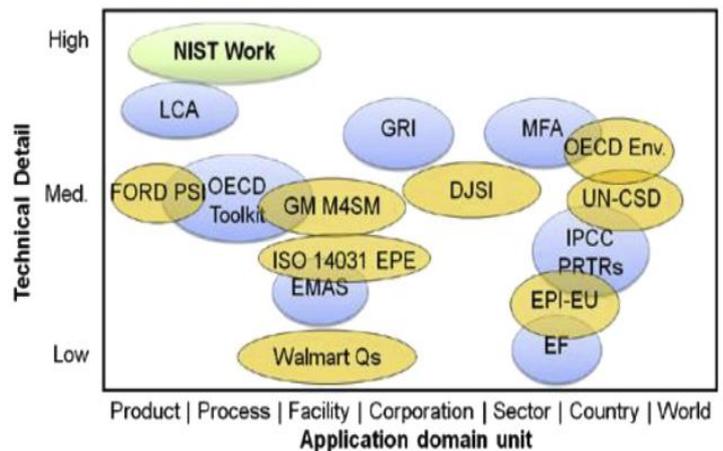


Figura 42. Indicatori ed indici, tratto da Faulkner and Badurdeen (2014)

- 1) Szekely e Knirsch (2005) presentano l'SBD-PMM, che include misure e metriche delle prestazioni strategiche, tattiche e operative, nonché beni materiali, intangibili, finanziari e non finanziari. Alcune delle misure di performance sono ad esempio impronta di carbonio, profitto, tasso di ritorno sugli investimenti, riduzione dei materiali, efficienza energetica, nuove opportunità di mercato, costi.
- 2) Ng et al. (2015) hanno sviluppato un meccanismo per semplificare l'integrazione delle pratiche di produzione verde per la loro effettiva implementazione e hanno proposto metriche L&G denominate Carbon-Value Efficiency (CVE), che valuta le pratiche Lean&Green e confronta le prestazioni dell'azienda con quelle dei concorrenti.
- 3) La carbon tax è considerata un approccio di sostenibilità per misurare e valutare gli effetti ambientali causati dall'emissione di carbonio. Sono state condotte numerose ricerche sulla carbon tax per studiare il meccanismo interno e il macro-impatto sulle imprese, seppur con difficoltà legate agli aspetti macroscopici, come il flusso del consumo di energia e l'impronta di carbonio nella produzione e lungo la catena (Cai and Lai, 2021).
- 4) Kuriger et al. (2011) propongono uno strumento di valutazione della produzione sostenibile snella con dashboard di miglioramento continuo in tempo reale su metriche selezionate tra cui consumo di energia e acqua, utilizzo di materiali ed emissioni di CO<sub>2</sub>.
- 5) La Commissione delle Nazioni Unite per lo sviluppo sostenibile (CSD) ha costruito un quadro di indicatori di sostenibilità per la valutazione dei progressi dei governi verso gli

obiettivi di sviluppo sostenibile. Un quadro gerarchico raggruppa gli indicatori in 38 sotto-temi e 15 temi principali, suddivisi tra i quattro aspetti dello sviluppo sostenibile. La principale differenza rispetto agli altri è il fatto che affronta gli aspetti istituzionali della sostenibilità, non tutti rilevanti per il mondo societario e sicuramente non a livello operativo e progettuale (Labuschagne et al., 2005).

- 6) Il Wuppertal Institute ha proposto indicatori per le quattro dimensioni dello sviluppo sostenibile, come definito dal CSD delle Nazioni Unite, insieme a indicatori di interconnessione tra queste dimensioni, applicabili a livello macro (nazionale) e micro (impresa) (Labuschagne et al., 2005).
- 7) L'International Organization for Standardization sta sviluppando una serie di standard energetici e ambientali orientati alla sostenibilità, come la serie ISO 14955, che si occupa della standardizzazione della valutazione energetica e ambientale e del miglioramento delle macchine utensili e del sistema di produzione meccanica (Cai and Lai, 2021). L'ISO 14031, derivato dalla famiglia delle ISO14000, presenta inoltre le linee guida per lo sviluppo di sistemi di gestione ambientale, suddividendoli in ambiti operativi, gestionali ed ambientali (Joung et al., 2013).
- 8) Il Ford Product Sustainability Index (Ford PSI) considera gli aspetti di sostenibilità rilevanti per le imprese automobilistiche. Comprende 8 indicatori, tra cui il costo del ciclo di vita, il suo impatto sulla qualità dell'aria e sul riscaldamento globale, i materiali sostenibili e quelli vietati e la sicurezza (Ford, 2005).
- 9) Gli Environmental Pressure Indicators (EPri) dell'UE rappresentano le attività umane con maggiore impatto ambientale. Contiene 60 indicatori che controllano le pressioni ambientali di tali attività sotto 10 punti tra cui l'inquinamento dell'aria, la perdita di biodiversità e lo sfruttamento delle risorse (UE, 1999).
- 10) I DJSI (Dow Jones Sustainability Indexes) valutano le performance di sostenibilità delle top-10% delle imprese quotate sul Dow Jones, da usare come criteri di valutazione per gli investitori. Vengono valutati 12 criteri riguardanti soprattutto la sostenibilità economica ma anche le altre dimensioni sociali ed ambientali.
- 11) La GRI (Global Reporting Initiative) è un'iniziativa volontaria di reporting ambientale su base aziendale, in cui più di 70 indicatori sono usati per valutare e tracciare in parametri di sostenibilità dell'impresa a tutti i livelli.
- 12) Grande attenzione ha ricevuto l'uso del Value Stream Mapping (VSM), tecnica utilizzata nella produzione lean per identificare i rifiuti, adattata alla produzione verde e sostenibile. La metodologia VSM convenzionale non tiene conto delle prestazioni ambientali e sociali in quanto esamina gli aspetti economici di una linea di produzione, la maggior parte dei quali riguarda il tempo (tempo di ciclo, tempo di consegna, tempo di cambio, ecc.). Incorporando la capacità di acquisire le prestazioni ambientali e sociali visivamente attraverso il VSM si aumenterà la sua utilità come strumento per valutare le operazioni di produzione da una prospettiva di sostenibilità (Faulkner and Badurdeen, 2014).
- 13) Utilizzando il VSM come base, Lai et al. (2008) hanno presentato una struttura per combinare l'analisi dei costi totali (TCA), l'analisi degli input ambientali del ciclo di vita (LCA) e un'analisi del consumo di energia (ECA). Sebbene lo studio si sia rivelato un successo, le interazioni tra le analisi creano un'alta complessità che non tutte le aziende potrebbero essere in grado di gestire per valutare la sostenibilità della propria linea di produzione.

- 14) Paju et al. (2010) hanno introdotto una nuova metodologia denominata Sustainable Manufacturing Mapping (SMM) che incorpora la simulazione di eventi discreti (DES) e l'analisi del ciclo di vita (LCA) insieme al VSM convenzionale. Questo approccio, utilizzando dati di inventario del ciclo di vita (LCI) più comuni disponibili in commercio combinati con DES e VSM, è implicitamente semplice da usare.
- 15) Infine, l'ultimo filone riguarda l'utilizzo della metodologia IPAT e la sua evoluzione ImPACT. Infatti, un'equazione comune utilizzata per determinare l'impatto ambientale della società è  $EI = P \times A \times T$ , dove EI è l'impatto ambientale, P è la popolazione, A è ricchezza e T è tecnologia. Poiché la popolazione e il benessere sono relativamente controversi e molto più difficili da limitare, la tecnologia sembra essere la soluzione più accettabile per la società (Sarkis, 2001).
- 16) Il modello ImPACT, per cui  $I = P \times A \times C \times T$ , amplia le definizioni IPAT, come in Fig.43, con l'obiettivo di trovare quale attore abbia l'influenza maggiore per ridurre l'impatto ambientale. Quindi, riformulare l'identità per separare il consumo pro capite in  $A \times C$  e le leve di sostenibilità dell'energia per PIL in  $C \times T$ , separando gli effetti degli stili di vita dalle tecnologie a un minore impatto. L'ImPACT mostra semplicemente che cambiare l'impatto ambientale significa cambiare quattro forze moltiplicative: il numero di persone, lo sforzo economico di ciascuna, la frazione di attività economica dedicata a un bene e l'impatto della produzione del bene. I consumatori possono ridurre l'impatto utilizzando la leva C, ossia riducendo il proprio consumo, mentre i produttori possono ridurre l'impatto, innovando con la leva T, ossia con innovazioni o efficientamenti tecnologici (Waggoner and Ausubel, 2002).

Category	Symbol	Actors	Dimension
Impact	I	All	Emission
Population	P	Parents	Capita
Affluence	A	Workers	GDP/capita
Intensity of use	C	Consumers	Energy/GDP
Efficiency	T	Producers	Emission/energy
Consumption/capita	$A \times C$		Energy/capita
Consumer challenge	$P \times A \times T$		$GDP \times (Emission/energy)$
Technology challenge	$P \times A \times C$		Energy
Sustainability challenge	$P \times A$		GDP
Sustainability levers	$C \times T$		Emission/GDP

Figura 43. Elementi del modello ImPACT, tratto da Waggoner and Ausubel (2002)

### 3.9.3. Problematiche e limitazioni

Una volta presentate le principali tipologie di indicatori, è giusto, così come fatto per i capitoli precedenti, illustrare le principali limitazioni e problematiche incontrate nell'implementazione di tali misure e nei loro confronti. In letteratura, infatti, vengono presentate diverse problematiche, non ultima il fatto che mancano prove empiriche sull'efficacia dei metodi di misurazione e dei metodi seguiti nella rendicontazione delle prestazioni ambientali (Tiwari and Khan, 2020).

Inoltre, oltre alla formulazione di indicatori corretti ed alla loro effettiva implementazione, il più grande problema è dato da alcune sfide nelle applicazioni reali, tra cui l'acquisizione dei dati e gli aggiornamenti sulla sostenibilità. Infatti, l'acquisizione di dati sufficienti è difficile da affrontare a causa dell'enorme quantità e varietà dei dati stessi, sollevando questioni su come interpretare e rispondere in tempo reale all'enorme mole di dati ricavati (Cai and Lai, 2021).

Un'altra sfida sta nell'incapacità della maggior parte delle valutazioni di sostenibilità di fornire un approccio pratico per le aziende per identificare le aree di miglioramento e le possibili azioni (Moldavska, 2016), ossia due delle funzioni base di un corretto set d'indicatori. Granly (2013) ha infatti indicato che molte aziende manifatturiere non dispongono di informazioni su come implementare un concetto di sostenibilità e su come identificare le pratiche esistenti e adattarle alle esigenze dell'azienda. La valutazione della sostenibilità è un mezzo per ottenere un'analisi completa e affidabile delle attuali prestazioni di sostenibilità dell'organizzazione di produzione che consente l'identificazione delle aree di miglioramento. Tuttavia, Moldavska e Welo (2015) mostrano che le valutazioni di sostenibilità esistenti dell'organizzazione di produzione identificano aree di miglioramento in un'organizzazione a livello troppo generale, limitando l'identificazione di azioni specifiche e, quindi, la transizione verso una produzione sostenibile.

Infine, come riportato da (Moldavska, 2016), un'altra grande problematica è che la valutazione della sostenibilità non riesce a cogliere la complessità della produzione sostenibile: relazioni tra questioni di sostenibilità e interconnessioni tra gli elementi dell'organizzazione, a causa di un approccio riduzionista ampiamente utilizzato. Questa idea è stata sostenuta da Halog e Manik (2011) i quali sostengono che lo sviluppo sostenibile è un fenomeno complesso che non può essere completamente coperto dagli strumenti di orientamento riduzionista.

In conclusione, un'ultima considerazione importante nella selezione delle metriche, presentata da (Faulkner and Badurdeen, 2014) per il SVSM ma facilmente estendibile a tutti gli altri potenziali indicatori: non sovrappollare il SVSM e quindi negare l'utilità di esso come strumento visivo includendo troppe metriche. Proprio come un VSM viene utilizzato nella produzione Lean per eseguire l'identificazione iniziale di attività dispendiose per ulteriori analisi e miglioramenti, un SVSM deve essere utilizzato come strumento preliminare per la valutazione della sostenibilità; deve aiutare a identificare aree per ulteriori indagini successivamente attraverso altri strumenti. Pertanto, la premessa seguita nello sviluppo di SVSM è quella di includere visivamente le metriche più essenziali per consentire tale analisi iniziale (Faulkner and Badurdeen, 2014). Argomento quantomeno attuale se si pensa alle numerose osservazioni e critiche sollevate in ambito politico-sanitario sul set d'indicatori utilizzati per la gestione delle zone regionali in Italia durante il periodo autunnale, reo di comprendere troppi indicatori e quindi ridurre la comprensibilità.

Di conseguenza, questo studio raccomanda l'utilizzo di indicatori che rispettino le caratteristiche base degli stessi (comprensibilità, validità etc.), ma che comprendano un approccio olistico (ossia tutti e tre gli aspetti della sostenibilità), riuscendo nel contempo ad analizzare l'enorme mole di dati ricevuta dagli impianti produttivi (anche tramite l'uso di strumenti I4.0), per fornire indicazioni corrette e complete ai decisori, senza però comprendere troppi indicatori, pena la perdita di comprensibilità.

#### 3.9.4. Indicatori di sostenibilità sociale

Come detto nel paragrafo precedente, uno dei principali problemi degli indicatori in ottica sostenibilità è legato alla mancanza di un approccio olistico, dato che spesso il lato sociale è quello che viene maggiormente escluso. Ciò rappresenta senza dubbio una criticità in quanto, come sottolineato da (Tasdemir et al., 2019), senza un approccio olistico, la sostenibilità non è altro che un'illusione in un deserto. Di conseguenza, è stato dedicato un paragrafo apposito, seppur breve, agli indicatori di sostenibilità sociale, per sottolineare l'importanza di un approccio olistico e proporre una possibile soluzione ricavata in letteratura.

Gli sforzi diretti a integrare gli aspetti sociali nelle misure di sostenibilità possono essere classificati in due concetti chiave, secondo quanto riportato da (Saxena et al., 2020):

1. Il movimento verso la sostenibilità sociale e la valutazione del ciclo di vita sociale integra l'LCA ambientale determinando le influenze sociali e politiche che portano a problemi ambientali. L'aspetto centrale di questo approccio è lo studio delle risorse ambientali che mettono in relazione gli effetti ambientali con le piattaforme sociali, culturali e politiche.
2. Indagine sui meccanismi di effetto tra flussi organizzativi, come input e output, e mid- ed endpoint socialmente focalizzati. Queste strategie considerano l'effetto di beni e servizi sugli individui, in particolare, la protezione del benessere, la dignità umana e la soddisfazione dei bisogni primari (Saxena et al., 2020).

Lo stato dell'arte di tali sforzi, sotto forma di standard e quadri di gestione, si può fare riferimento a Global Reporting Initiative e GRI 3.1, 2011 (Global Reporting Initiative, 2011); il Regolamento EMAS III del 2009 (diritto dell'Unione Europea, 2009; Commissione Europea, 2017); le Linee guida internazionali per la responsabilità sociale e ISO 26000: 2010 (ISO / TMB Working Group on Social Responsibility, 2010) e la ISO 14031: 2013 (ISO / TC 207 / SC 4, 2013), Accountability e AA 1000, Social Accountability e SA 8000, International Guidelines for Corporate and Social Responsibility e SR ISO 26000. In particolare, le linee guida per il reporting sulla sostenibilità della Global Reporting Initiative (le "Linee guida G3") specificano una struttura formale per la divulgazione annuale della sostenibilità aperta a tutte le forme di organizzazione. Gli indicatori di performance sociale sono suddivisi nei seguenti quattro gruppi principali: pratiche di lavoro e lavoro dignitoso, diritti umani, società e responsabilità del prodotto, come indicato nella Figura 44 (Saxena et al., 2020).

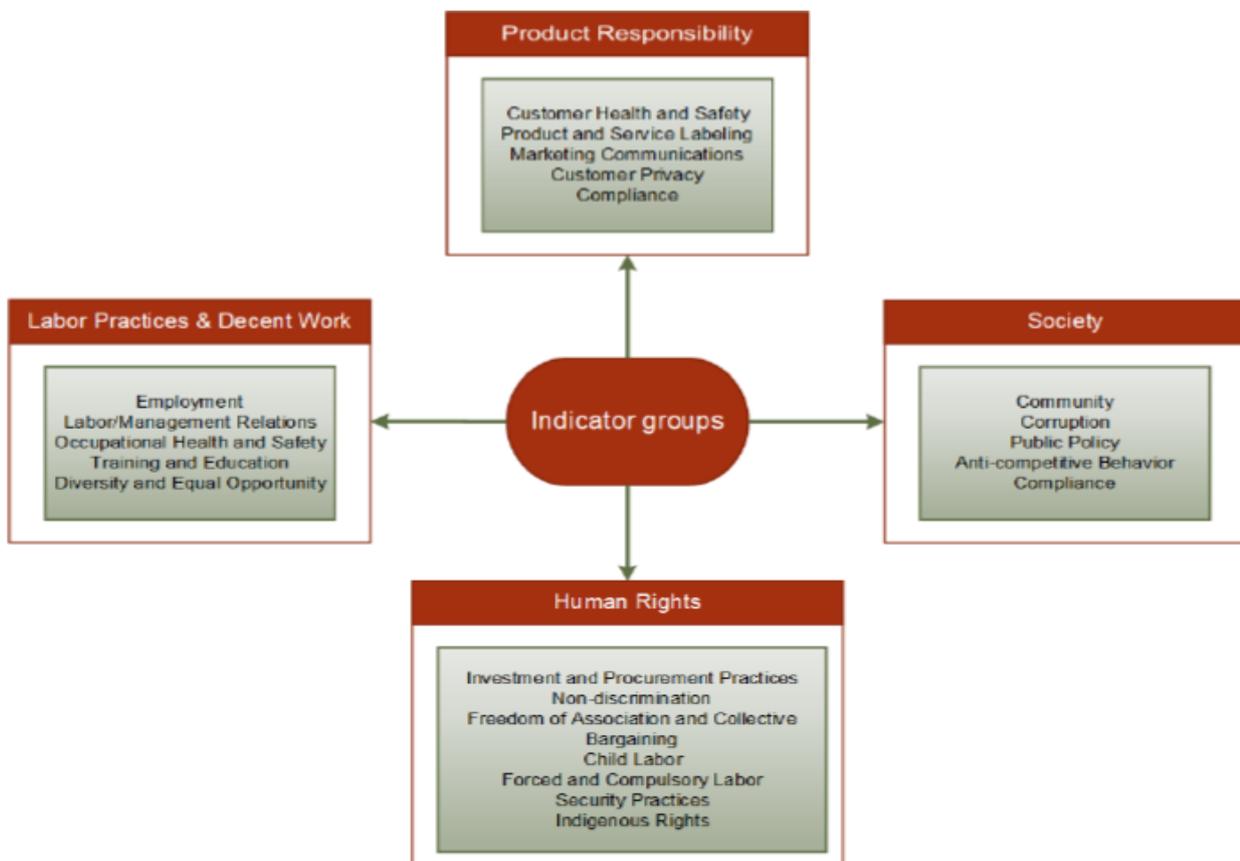


Figura 44. Indicatori sociali, tratto da Saxena et al. (2020)

## 3.10. Tecnologie

### 3.10.1. Introduzione

L'ultimo capitolo viene infine dedicato alle tecnologie, a quelle riportate in letteratura che potranno determinare un contributo sostanziale, potenziale o reale, ad un cambio di paradigma in ottica sostenibilità. È giusto precisare come queste siano state lasciate per ultime perché lungo tutto il documento è stato seguito un ordine di grandezza decrescente, ossia prima sono stati esaminati i grandi argomenti di natura contestuale (ossia I4.0, EC) e poi piano ci si è addentrati nei livelli più interni all'impresa (ossia sviluppo prodotto, strategie ed indicatori) fino alle tecnologie.

In particolare, questo capitolo prevede un forte focus sulla produzione additiva, assieme al paradigma complementare della produzione digitale diretta, seguito da un excursus sull'utilizzo delle blockchain in ambito produttivo ma anche sostenibile. Successivamente vengono presentate le tecnologie legate al Carbon Capture&Storage (o CCS), in quanto elemento fondamentale per un passaggio graduale ad un paradigma verde, ed infine un insieme di altre tecnologie di minore impatto nella letteratura sostenibile, quali i biocomposti, i big data e l'IT verde. Ovviamente vi sono molte altre tecnologie estremamente promettenti in ambito sostenibilità, quali ad esempio le energie rinnovabili e le auto elettriche o ad idrogeno, ma o non rientrano propriamente nel settore produttivo oppure non sono state rinvenute in letteratura e quindi non incluse nell'analisi corrente.

Infine, partendo dallo studio della Computing Technology Industry Association, le dieci tecnologie emergenti nel 2019 sono IoT, intelligenza artificiale, reti 5/6G, elaborazione serverless, Blockchain, Robotica, Biometria, Stampa 3D, Realtà aumentata/Realtà virtuale e Droni (Rayome, 2019), vorrei proporre la seguente osservazione. Sebbene l'Italia mediamente non rappresenti un esempio virtuoso sotto questo punto di vista, il mondo produttivo globale si trova di fronte ad un enorme cambiamento, ad una vera e propria rivoluzione industriale, la quarta appunto. In essa, un po' come moltissimi aspetti della vita di tutti i giorni, il lato software/digitale della produzione sta prendendo il sopravvento su quello più hardware/fisico. Le competenze dei lavoratori ma anche dei supervisor e dei manager dovranno prendere atto di ciò, imponendo un cambiamento anche radicale nell'educazione e nella formazione di tutti, per far sì che queste figure non vengano rimpiazzate da nuove professionalità (ad esempio l'ingegnere della produzione da quello informatico) o addirittura da tecnologie (lavoratori sostituiti in tutto e per tutto da robot e decisori affiancati o perfino rimpiazzati da intelligenze artificiali). Ma anche e soprattutto perché si capisca come sfruttare al meglio queste tecnologie per permettere una transizione quanto più rapida ed efficiente possibile verso un nuovo mondo, attualmente quasi utopico. Ossia ad emissioni zero, in grado di convivere simbioticamente con l'ambiente circostante, senza sfruttarne le risorse messe a disposizione, ma anche senza sfruttare gli stessi lavoratori e le popolazioni circostanti, alla ricerca del mero profitto e di una crescita perpetua già ora insostenibile e potenzialmente catastrofica.

### 3.10.2. Additive Manufacturing

Questo paragrafo viene dedicato alla produzione additiva (o *additive manufacturing* o AM), in quanto tra le tecnologie cardine non solo della produzione sostenibile ma anche della rivoluzione industriale stessa. Ovviamente, tale paragrafo, per quanto di lunghezza superiore a quelli precedenti, vuole essere solo una presentazione della tecnologia, dei suoi vantaggi e svantaggi,

con anche un confronto con le tecnologie tradizionali. Per maggiori spunti, si rimanda alla vastissima letteratura specializzata in materia.

L'AM, generalmente indicato come stampa 3D, forma un oggetto mediante deposizione strato per strato di materiale in polvere o fuso, sulla base delle specifiche CAD (computer-aided design) 3D. Sebbene l'AM sia stato sviluppato e commercializzato negli anni '80, i recenti sviluppi tecnologici e di contesto ne hanno portato l'utilizzo alla ribalta. In particolare, essa è stata indicata come la tecnologia di produzione futura, grazie ai tempi di consegna ridotti, alla capacità di personalizzazione di massa e alla minore energia del ciclo di vita (Yoon et al., 2014). In Figura 45 sono rappresentati alcuni dei principali metodi di AM. Questi possono essere suddivisi per lo stato fisico del materiale stampato (processi a base di liquido, solido e polvere) e dal metodo applicato per fondere la materia a livello molecolare (termico, luce ultravioletta (UV), laser o fascio elettronico (Hopkinson et al., 2006). I polimeri, le leghe di alluminio, acciaio e titanio, nonché i compositi ceramici sono attualmente stampabili con spessori minimi di 20–100µm, a seconda del processo e dello stato fisico del materiale (Hopkinson et al., 2006).

Per quanto riguarda il potenziale mercato, si stima che entro il 2020 la produzione additiva raggiungerà un volume di mercato di 11 miliardi di euro generato dalle vendite di prototipi, materiali e componentistica e con una prospettiva ottimistica riuscirà a raggiungere circa 130 miliardi nel prossimo decennio (Godina et al., 2020). Mentre il potenziale di mercato globale a medio termine di 3DP entro il 2025 è stimato a 230-550 miliardi di \$ (McKinsey Global Institute, 2013). I principali mercati identificati per 3DP sono i prodotti di consumo (100-300 miliardi di dollari) la produzione diretta di componenti medicali e il trasporto (100-200 miliardi di dollari) e la produzione di strumenti e stampi (30-50 miliardi di dollari; McKinsey Global Institute, 2013). Una delle nuove aree in cui l'AM creerà nuove opportunità di business è la riparazione, il rinnovamento e la rigenerazione. Le aziende stanno iniziando a scoprire le implicazioni dell'utilizzo delle tecnologie AM sull'estensione dei cicli di vita dei prodotti e sul fine-vita. Si prevede quindi che la disponibilità di tecnologie AM per la riparazione, il rinnovamento e la rigenerazione dei prodotti e la conseguente estensione dei cicli di vita dei prodotti creerà incentivi per le aziende ad adottare modelli di business prodotto-servizio e di economia circolare (Ford and Despeisse, 2016).

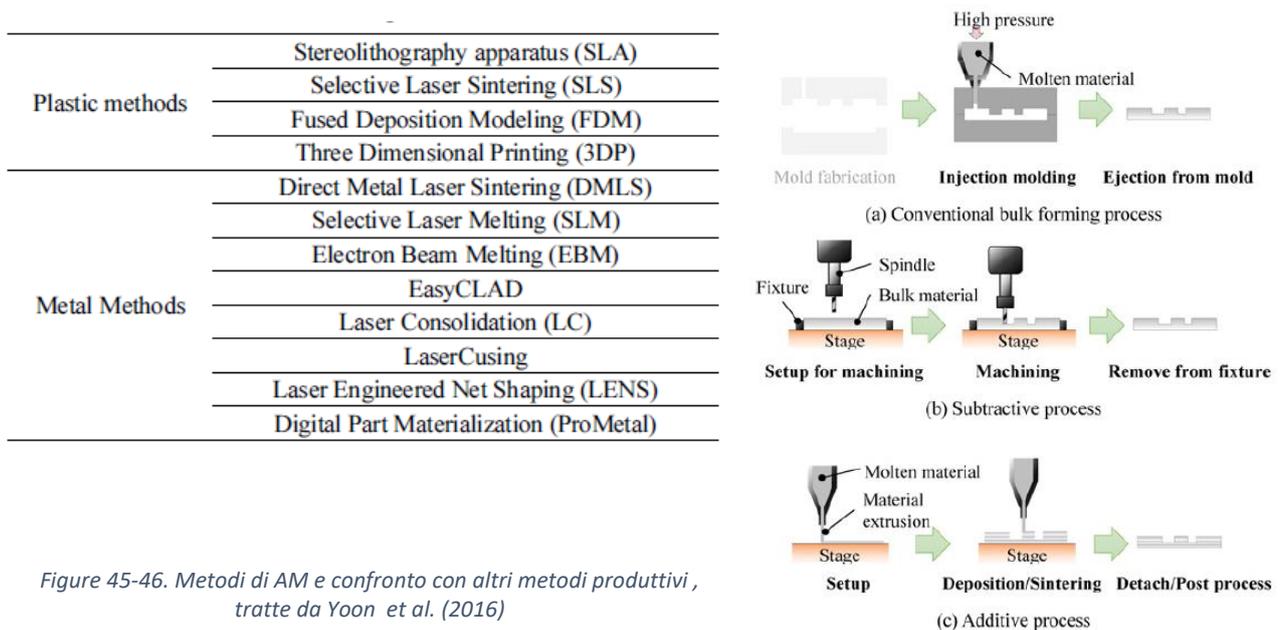


Figure 45-46. Metodi di AM e confronto con altri metodi produttivi, tratte da Yoon et al. (2016)

Traendo spunto dai diversi lavori in letteratura, in particolare (Yoon et al., 2014), viene presentato un confronto a livello di sostenibilità tra l'AM ed i due metodi lavorativi tradizionali ovvero i processi sottrattivi o "dal pieno", per cui partendo da un blocco unico di materiale si ricava la forma desiderata andando a rimuovere materiale (tramite frese, torni etc.), e la formatura, per cui il materiale fuso viene iniettato in uno stampo e lasciato raffreddare in modo da ottenere la forma definitiva senza bisogno di ulteriori lavorazioni se non estetiche, come sintetizzato in Figura 46.

In particolare, vengono riportati i risultati di tre studi trovati in letteratura, ossia (Huang et al., 2013; Yoon et al., 2014).

(Yoon et al., 2014) ricava che i processi di formatura convenzionali consumano meno energia rispetto ai processi sottrattivi e additivi, mentre i processi additivi hanno il più alto valore di consumo specifico di energia (CSE), nonché quello minimo di produttività. Il CSE dei processi additivi è circa 100 volte superiore a quella dei processi di formatura in massa convenzionali. Nel caso dei processi AM, inoltre, non era evidente alcuna differenza significativa tra i metodi con materiali plastici e metallici. Tuttavia, quando il numero di parti era ridotto, in particolare inferiore a 3, l'AM aveva un vantaggio rispetto ai processi di produzione convenzionali, sia in termini di CSE che di costo (Yoon et al., 2014).

Il secondo studio rivela che l'impatto ambientale totale era molto maggiore nel caso della lavorazione meccanica. Il processo AM è molto più rispettoso dell'ambiente, con una riduzione dell'impatto di circa il 70% (Serres et al., 2011).

Nell'ambito del progetto ATKINS è stato condotto un confronto completo tra AM e altri processi di produzione in termini di utilizzo di energia, utilizzo di acqua, materiale inviato in discarica e utilizzo di materiali vergini. Il risultato è riassunto in Figura 47. Sebbene l'AM abbia evidenti vantaggi in termini di impatto ambientale, il suo consumo di energia supera di gran lunga quello della fusione. È possibile che il puro processo di costruzione AM non sia ad alta intensità energetica. Tuttavia, una volta considerata l'intera procedura operativa, l'AM potrebbe non avere un vantaggio rispetto ai processi di produzione tradizionali in termini di consumo energetico (Huang et al., 2013).

Process	Energy use (kg CO <sub>2</sub> per component)	Water usage (kg per component)	Landfill waste (kg)	Virgin material use (kg per component)	Hazardous waste (kg per component)
Casting	1.9	0	N/A	2	N/A
Flexline machining	2.4	0.08	1.512 (waste can be recycled)	2 (from casting)	0.0064ii
Clean machining	N/a	0.15	N/A	N/A	N/A
AM	13.15	0	0	0.65	0

Figura 47. Confronto tra metodi produttivi a livello di parametri di sostenibilità, tratto da Huang et al. (2013)

In conclusione, i risultati mostrano che non è opportuno focalizzare l'impatto ambientale solo sulla considerazione elettrica, ma gli studi devono essere focalizzati su ogni aspetto (materiale, fluidi, elettricità) che contribuisce all'impatto ambientale. Nel campo della valutazione dell'impatto ambientale, questo è chiamato trasferimento dell'impatto. Infatti, se lo studio si concentra solo su un consumo specifico, l'impatto di un altro consumo di flusso potrebbe essere trascurato. Infatti, proprio come nella valutazione del ciclo di vita, è importante tenere conto di tutti i prodotti che contribuiscono all'impatto ambientale e non è giudizioso considerare solo il consumo elettrico in tale studio (Le Bourhis et al., 2013).

Inoltre, da questi studi è difficile generalizzare se l'AM abbia un impatto ambientale inferiore rispetto ad altre tecniche di produzione perché l'impatto del ciclo di vita delle parti realizzate con AM dipende fortemente dall'utilizzo dei macchinari (Faludi et al., 2015), le specifiche di ogni singola stampante e come viene elaborato il materiale in ingresso. È chiaro, tuttavia, che un

utilizzo crescente delle macchine attraverso la condivisione di macchine e strumenti è la chiave per ridurre l'impatto ambientale dell'AM (Ford and Despeisse, 2016).

Per la produzione di un oggetto di forma complessa con un numero limitato di tirature, l'AM ha un indubbio vantaggio significativo in termini di tempo di lavorazione e utilizzo del materiale rispetto ai processi convenzionali. Pertanto, la prototipazione rapida può essere realizzata utilizzando diverse tecnologie AM, grazie alla libertà geometrica e all'eliminazione degli utensili permessi (Yoon et al., 2014). Inoltre, essa ha la capacità di fare un uso efficiente delle materie prime e produrre scarti minimi raggiungendo una soddisfacente precisione geometrica. Utilizzando la produzione additiva, un progetto sotto forma di un modello solido 3D computerizzato può essere trasformato direttamente in un prodotto finito senza l'uso di attrezzature e utensili da taglio aggiuntivi, con nuove possibilità di produrre parti con geometria complessa difficili da ottenere utilizzando processi sottrattivi (Huang et al., 2013).

Nel caso dell'AM, ci sono chiari vantaggi in termini di efficienza delle risorse che permettono vantaggi sia economici che ambientali. Il motivo economico è primario, coi benefici ambientali che rappresentano un effetto collaterale positivo (Ford and Despeisse, 2016). Le analisi del ciclo di vita hanno dimostrato che l'adozione dell'AM potrebbe avere risparmi significativi nella produzione di beni. I risparmi sono stimati a \$ 113-370 miliardi entro il 2025, derivanti dalla riduzione degli input e della movimentazione dei materiali, insieme a catene di approvvigionamento più brevi (Gebler et al., 2014). Infatti, è stato sottolineato che l'AM ha il potenziale per ridurre il numero di fasi nella catena di fornitura tradizionale, innanzitutto con una catena di fornitura snella a basso costo attraverso la produzione just-in-time (JIT) e l'eliminazione dei rifiuti (Tuck et al., 2012). In secondo luogo, l'AM permette di implementare una strategia build-to-order con un controllo attento delle scorte ed una maggiore personalizzazione ed una maggiore reattività (Huang et al., 2013).

Proseguendo negli obiettivi della TBL, per quanto riguarda la sostenibilità sociale, l'AM può aiutare a migliorare la salute e il benessere delle persone perché adatta per produrre prodotti personalizzati che soddisfano le esigenze individuali, con conseguenze importanti soprattutto nell'assistenza sanitaria personalizzata. La tecnologia AM può anche essere utilizzata per produrre attrezzature di sicurezza su misura utilizzando materiali leggeri, garantendo la massima protezione senza sacrificare il comfort (Huang et al., 2013). Ulteriori vantaggi sono dati dalla maggiore accessibilità alla produzione per tutti i consumatori, con minori barriere all'ingresso e minori competenze richieste; tali argomenti vengono ripresi più nel dettaglio nel prossimo paragrafo. Ci sono due elementi chiave, secondo Gutowski et al. (2017), che conferiscono alla produzione additiva la qualità di tecnologia rispettosa dell'ambiente nonché metodo di produzione sostenibile. In primo luogo, essa riduce gli sprechi, poiché utilizza solo il materiale necessario strato per strato, e di conseguenza minimizza gli sprechi. Inoltre, è in grado di riutilizzare i rifiuti di plastica, ma anche di altro genere (come gli olii esausti), convertendoli in filamenti da stampa per creare nuovi prodotti. Il secondo punto chiave è la migliore accessibilità delle tecnologie di produzione additiva, potenziata dall'Industria 4.0, fornita ai produttori, che possono produrre direttamente in-house, riducendo i costi di logistica e di viaggio (Godina et al., 2020), con la possibilità di un approvvigionamento dei materiali in ingresso più locale (Ford and Despeisse, 2016). Infine, i processi AM non richiedono fluidi da taglio, che sono la principale fonte di pericolo nei flussi di rifiuti di produzione (Yoon et al., 2014).

Una volta presentati i principali vantaggi della produzione additiva, ne vengono presentati i principali contro, a livello ambientale e sociale ma anche normativo, per mettere in evidenza gli ambiti in cui indubbiamente vi sono maggiori margini di miglioramento al fine di comprendere esattamente come migliorare.

L'AM presenta diversi inconvenienti, in termini di qualità del prodotto, velocità di elaborazione e costi

elevati. I processi AM comportano la costruzione di una parte che può essere costituita da migliaia di strati; quindi, la fabbricazione può richiedere molto più tempo rispetto ai processi di produzione convenzionali. Inoltre, l'AM richiede una quantità significativa di energia per formare gli strati sottili dalla materia prima, poiché anche l'energia consumata per unità di volume del materiale è elevata (Yoon et al., 2014).

La principale perplessità ambientale è rappresentata senza dubbio dai materiali utilizzati. Un vasto assortimento di materiali come resine epossidiche, ciano-acrilati, policarbonati, acrilati, elastomeri, acrilonitrile / butadiene / stireni e nylon (poliammidi) è stato introdotto per l'AM negli ultimi due decenni. Tuttavia, gli effetti di alcuni materiali non sono ben compresi. L'esposizione prolungata a queste sostanze chimiche può portare ad allergie croniche anche se non si può dire nulla sul fatto che possano essere fatali. Poiché la maggior parte delle sostanze chimiche sono molecole a catena lunga, la loro biodegradabilità è molto scarsa comportandone una permanenza nell'ambiente terrestre e marino pluriennale. Infine, vanno considerate le emissioni di gas nocivi, come l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), il monossido di carbonio (CO) e gli ossidi di azoto emanati dopo la scomposizione di queste sostanze chimiche (Huang et al., 2013). L'unica eccezione potrebbe essere l'acido polilattico biopolimerico (PLA) (Faludi et al., 2015). I potenziali risparmi di materiale possono essere parzialmente compensati dalla tossicità relativa del materiale utilizzato per l'AM (Faludi et al., 2015) e dall'impatto dell'uso di energia per la produzione del materiale in ingresso e della lavorazione stessa. Pertanto, la piena prestazione ambientale dell'AM deve prendere in considerazione la domanda di energia da una prospettiva di sistema e non solo il processo (Ford and Despeisse, 2016).

Da un punto di vista normativo-legale, come in altri settori, sono emersi problemi di sicurezza dei dati e conformità con gli standard internazionali di protezione dei dati. Nel caso della produzione additiva, dove non esiste una legislazione specifica, i problemi legali legati alle licenze di produzione, alla protezione dei prodotti e alla contraffazione possono essere molto complessi. Ad esempio, qualsiasi modello 3D può essere copiato e replicato illegalmente e anche i problemi di controllo del processo dovranno ancora essere risolti affinché i processi di produzione forniscano garanzie a produttori, fornitori e consumatori (Godina et al., 2020).

Infine, nonostante molti impatti di questa tecnologia sul mercato siano potenzialmente positivi, altri avranno effetti negativi su vari settori, con la perdita di posti di lavoro, in particolare quello non qualificato. Tuttavia, la possibilità di lavorare a distanza porterà nuove opportunità e nuovi tipi di lavoro, creando nuove opportunità di apprendimento e competenze. Tuttavia, l'equilibrio tra impatti positivi e negativi della tecnologia non è ancora del tutto noto (Godina et al., 2020).

In conclusione, i risultati quantificati delle implicazioni di sostenibilità del 3DP riguardo a costi, energia ed emissioni di CO<sub>2</sub> mostrano che i potenziali di sostenibilità si verificano durante l'intero ciclo di vita dei prodotti stampati in 3D. Complessivamente, sono stimabili riduzioni dei costi di 170-593 miliardi di dollari USA, una riduzione del consumo di energia di 2,54-9,30 EJ e di emissioni di CO<sub>2</sub> di 130,5-525,5 Mt entro il 2025 nei mercati identificati per l'AM. Ciò rappresenta una riduzione complessiva di circa il 5% delle rispettive categorie (Gebler et al., 2014). In particolare, l'AM ha il potenziale per separare la domanda di energia e le emissioni di CO<sub>2</sub> dall'attività economica una volta applicato su larga scala nell'industria. Se i parametri tecnologici come la velocità di produzione e la disponibilità di materie prime stampabili aumentano, l'AM sarebbe applicabile a serie di produzione più grandi, il che implica che i suoi potenziali di sostenibilità aumenterebbero in modo significativo. Ovviamente, come per l'economia circolare, bisogna porre particolare attenzione poiché i guadagni in termini di sostenibilità rischiano di essere neutralizzati

attraverso un aumento dell'attività complessiva o "effetto rimbalzo" (Paech, 2012).

Successivamente, viene riportata una visione del futuro basata sull'AM in cui: "Le fabbriche del futuro saranno più varie e più distribuite di quelle di oggi. La fabbrica del futuro può essere al capezzale, in casa, sul campo, in ufficio e sul campo di battaglia "(BIS, 2013). In un mondo del genere, una produzione più localizzata potrebbe trasformare radicalmente le reti di fornitura e distribuzione. La maggiore applicazione dell'AM e di altre tecnologie di produzione digitale significa che "la logistica potrebbe riguardare più la fornitura di file di progettazione digitale e da un continente alle aziende di stampa in un altro che container, navi e aerei da carico" (PWC, 2014). Inoltre, la gamma di materiali applicabili deve essere ampliata per consentire la stampa di materiali avanzati, leghe ad alte prestazioni, nanomateriali e strutture di materiali ibridi. È necessario identificare i fattori di costo nei costi dei macchinari e sviluppare strategie per ridurre i costi dei macchinari, poiché i costi dei macchinari rappresentano la quota maggiore nei costi complessivi di produzione 3DP (Gebler et al., 2014). Inoltre, il passaggio a catene di approvvigionamento abilitate per AM diventerà probabilmente obbligatorio piuttosto che facoltativo nel tempo poiché le nuove tecnologie offrono il potenziale per una migliore soddisfazione dei clienti e personalizzazione di prodotti e servizi (Liu et al., 2020).

Infine, sebbene l'AM possa essere considerato un sostituto diretto dei processi di produzione tradizionali, i suoi principali vantaggi economici risiedono nella produzione di singoli o piccoli lotti personalizzati di merci. L'AM sarà un sostituto diretto per alcune organizzazioni, ma per molte sarà complementare alla produzione esistente, o un mezzo di ingresso nel mercato per il modo in cui abbassa il costo della produzione personalizzata su piccola scala (Ford and Despeisse, 2016). Sebbene sia improbabile che la tecnologia AM renderà obsoleti i processi di produzione tradizionali, è ragionevole aspettarsi che i processi AM giochino un ruolo sempre più importante nella produzione come tecnologia complementare (Huang et al., 2013).

### 3.10.3. Produzione digitale diretta

In questo paragrafo, prendendo spunto da (Chen et al., 2015), viene proposto il concetto di produzione digitale diretta (*direct digital manufacturing* o DDM), intesa come sistema complementare della produzione additiva, e quindi riportato qui come corollario alla stessa, andandone anche ad analizzare le implicazioni a livello di sostenibilità.

I metodi di produzione dei prodotti attuali è in fase di ridefinizione tramite il DDM. Le parti non saranno più prodotte in una fabbrica, assemblate in prodotti finali e spedite ai clienti. Invece, questi prodotti saranno fabbricati direttamente presso o vicino al cliente utilizzando la produzione additiva, derivati direttamente da un modello digitale (Gibson et al., 2010). Pertanto, l'AM si sta evolvendo in DDM come interconnessione di apparecchiature di produzione additiva, computer attraverso una rete (ad esempio Internet e server) e software (Chen et al., 2015). Il DDM ha la possibilità di combinare i vantaggi dei paradigmi di produzione in prodotti personalizzati di alta qualità con quelli di lotti di dimensione uno. In particolare, in Figura 48 si possono vedere l'evoluzione e le peculiarità dei sistemi produttivi. Si nota come il DDM sia costituito fondamentalmente da un'interazione tra *prosumers* (ossia un portmanteau dei termini inglesi per produttore e consumatore, ad indicare un cliente che partecipa attivamente alla progettazione/produzione del bene) con importanti implicazioni a livello di blockchain, dalla produzione localizzata, ossia l'utilizzo di stampa 3D, ed estremamente personalizzata.

Di conseguenza, si comprendono immediatamente i cospicui vantaggi di questo paradigma produttivo in termini ambientali, sociali ma anche economico-strategici.

Uno dei pilastri è, infatti, la decentralizzazione per ridurre l'impatto del trasporto ma anche per supportare le comunità locali. Di conseguenza, il DDM ha il potenziale di riduzione dei rifiuti attraverso una maggiore efficienza nell'utilizzo delle materie prime, ovvero la dematerializzazione, nonché attraverso la vicinanza al consumatore, con conseguente minore inquinamento e minore consumo di energia (Campbell et al., 2011).

Inoltre, a causa di catene del valore più decentralizzate e maggiore orientamento all'utente, il DDM riduce anche la necessità di inventario, che in termini economici rappresenta un risparmio di energia e materiale per lo stoccaggio e un minor numero di prodotti degradati (Chen et al., 2015).

In aggiunta, esso può ridurre l'impronta di carbonio riducendo le materie prime, i processi produttivi ad alta intensità energetica ed il consumo di carburante correlato al trasporto.

Da una prospettiva sociale, la produzione democratizzata consente pari possibilità a tutti i partecipanti ai mercati e alla società (Chen et al., 2015). È prevedibile che le barriere all'ingresso nel diventare un membro attivo della creazione di valore attraverso la produzione di beni siano ridotte dalla diminuzione dei costi del sistema, soprattutto se le competenze richieste sono inferiori a quelle attuali. In particolare, secondo (Chen et al., 2015) saranno necessarie solo competenze informatiche di base per consentire all'utente di diventare il proprio produttore, generando al meglio valore locale con risorse disponibili a livello locale. Infine, a seconda dell'apertura del sistema e della sua infrastruttura, l'inclusione dei paesi in via di sviluppo sarà abilitata sotto forma di innovazione aperta, in particolare l'hardware open source è in grado di colmare i divari tecnologici, educativi e culturali tra i paesi in via di sviluppo e quelli sviluppati (Salem e Khatib, 2004). Le stampanti 3D hanno dimostrato da tempo la loro capacità di colmare le lacune tecnologiche ed educative per le persone, ed è prevedibile che il DDM sia un buon candidato per colmare i divari tecnologici, educativi e culturali tra i paesi in via di sviluppo e quelli sviluppati (Chen et al., 2015). Infine, è anche giusto presentare i principali svantaggi di questo paradigma per guidarne l'implementazione. Poiché il DDM consente ad uno spettro più ampio di utenti di produrre qualsiasi prodotto, ciò può portare ad un aumento del consumo di materiale e quindi a problemi ambientali. Inoltre, man mano che la capacità del DDM di lavorare su scale più piccole migliora, verso il livello molecolare, la riciclabilità dei prodotti realizzati diventa più difficile. Inoltre, anche i rischi tossicologici e ambientali sconosciuti del DDM devono essere ulteriormente studiati per prevenire danni alla salute e all'ecosistema causati dall'uso e dallo smaltimento dei materiali utilizzati. Infine, possono emergere sfide sociali, oltre a quelle legate alla qualità della produzione, come la perdita di posti di lavoro nelle fabbriche, la sicurezza sul lavoro, oltre che la corretta gestione dei rifiuti (Chen et al., 2015).

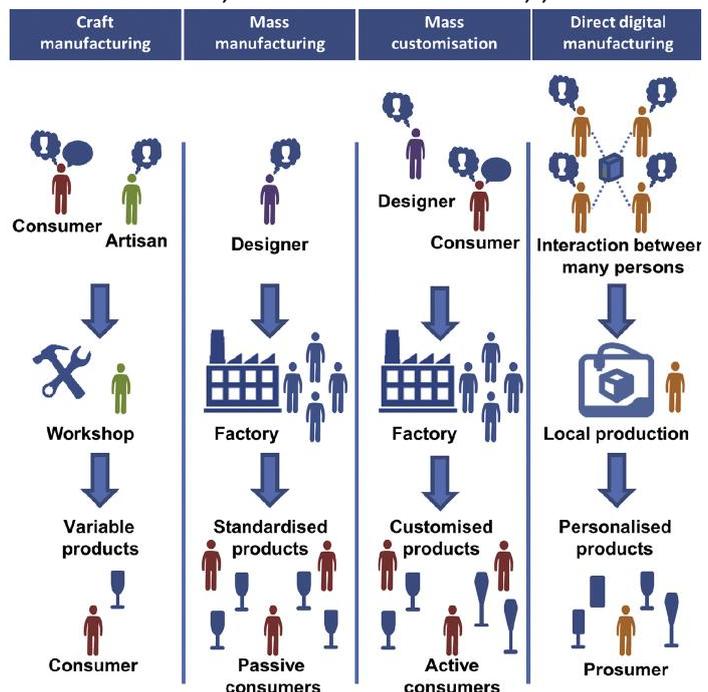


Figura 48. Confronto tra paradigmi produttivi, tratto da Chen et al. (2015)

#### 3.10.4. Blockchain

Una blockchain è una struttura dati distribuita in cui i dati sono condivisi su una rete peer-to-peer. I membri della rete, o nodi, comunicano e convalidano i dati seguendo un protocollo predefinito senza un'autorità centrale. Le blockchain vengono create utilizzando una crittografia per cui ogni blocco/transazione/file di dati possiede una funzione crittografica di hash ed è collegato a un blocco precedente. Una volta che un blocco viene verificato da una certa percentuale dei nodi di rete, viene aggiunto ai blocchi precedenti e forma una blockchain, nota anche come registro pubblico delle transazioni (Casado-Vara et al., 2018). Una blockchain include in genere le seguenti funzionalità, che possono dipendere dalla piattaforma utilizzata (Barton, 2018):

- Libro mastro condiviso: la struttura dati viene distribuita localmente e condivisa tra diversi partecipanti;
- Autorizzazione: transazioni sicure e autenticate che consentono riservatezza e trasparenza;
- Contratti intelligenti: i termini commerciali sono incorporati in un database e vengono implementati con le transazioni;
- Consenso: le transazioni sono approvate da utenti rilevanti che garantiscono l'immutabilità e la tracciabilità dei dati (Barton, 2018).

Il potenziale della blockchain risiede in ogni accordo, pagamento e attività transazionale che ha una registrazione digitale. Questi record possono essere convalidati e condivisi tra individui, macchine, algoritmi e organizzazioni. Trasparenza, minor rischio di frode, transazioni istantanee, privacy e sicurezza, garanzia dei dati finanziari e nessun costo di scambio sono tra i vantaggi della tecnologia blockchain (Sharma et al., 2017) (Crosby et al., 2016). Ad ogni modo le blockchain hanno numerose limitazioni attuali prima di un'ampia adozione e implementazione, tra cui scalabilità, normative, rischi per la sicurezza e consumo energetico sono i principali limiti (Esmaeilian et al., 2020).

La produzione sostenibile è spesso decentralizzata e svolta da più unità di produzione e individui, dove ogni unità di produzione è un'isola di informazioni isolata, specialmente se si avrà un passaggio verso le energie rinnovabili e la produzione additiva. La condivisione delle informazioni sul ciclo di vita del prodotto sta cambiando la protezione della proprietà intellettuale e i ruoli distintivi dei produttori nella rete. Il ciclo produttivo e la qualità sono sempre più difficili da garantire a causa della scarsa capacità di coordinamento a monte e a valle della comunità manifatturiera. È difficile per i produttori individuare rapidamente la fonte del guasto quando vengono rilevati problemi di qualità, poiché i guasti possono essere causati da un singolo nodo o da una coesione tra i nodi (Leng et al., 2020).

La blockchain offre quindi un innovativo meccanismo di transazione decentralizzato e trasparente, con la promessa di migliorare la sostenibilità delle reti produttive, evitando l'intervento di terze parti che non possono aggiungere valore (Leng et al., 2020). Dalla prospettiva produttiva del sistema, la blockchain potrebbe essere progettata come un abilitatore per guidare i sistemi informativi di produzione esistenti, come ERP e MES, che già esistono. Dal punto di vista della gestione del prodotto, la blockchain potrebbe fornire uno strumento per stabilire un database unificato per condividere le informazioni sui prodotti e concludere accordi, consentendo ai produttori non affidabili di scambiare capacità e requisiti liberamente. A livello operativo, la blockchain funge essenzialmente da server di indicizzazione per monitorare la produzione di parti e accelerare l'automazione della produzione. Infine, a livello aziendale, la blockchain consente ai produttori distribuiti di formare un ambiente affidabile e di auto-organizzare le loro

interconnessioni e le transazioni di servizio attraverso il decentramento e un meccanismo di credito trasparente (Leng et al., 2020).

In conclusione, le blockchain non sono adatte a tutte le modalità di produzione, sostenibile o meno. Prima di introdurre la blockchain nei sistemi di produzione sostenibili, è necessario determinare quali metriche la rendono unica e quali costi sono associati alla sua implementazione. Anche il monitoraggio continuo della sua implementazione per garantire che questi sistemi raggiungano i vantaggi desiderati in termini di risparmio energetico e sostenibilità è cruciale (Leng et al., 2020).

### 3.10.5. Carbon Capture and Storage

Diversi approcci sono considerati e adottati da vari paesi per ridurre le proprie emissioni di CO<sub>2</sub>, tra cui migliorare l'efficienza energetica e promuovere il risparmio energetico, aumentare l'utilizzo di combustibili a basse emissioni di carbonio, inclusi gas naturale, idrogeno o energia nucleare, distribuire energia rinnovabile, come solare, eolica, idroelettrica e bioenergia, applicare approcci di geo-ingegneria, ad es. imboschimento e rimboschimento e cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub> (o Carbon Capture&Storage o CCS) (Leung et al., 2014). Le strategie con le loro applicazioni, vantaggi e limitazioni vengono analizzate nella Tabella 10 di seguito, anche se è improbabile che l'adozione di un unico approccio o strategia possa soddisfare adeguatamente l'obiettivo IPCC di riduzione di CO<sub>2</sub>, ovvero 50-85% entro il 2050 dai livelli del 2000, e pertanto è necessario sviluppare un portafoglio di strategie di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

<b>Strategia</b>	<b>Applicazione</b>	<b>Vantaggi</b>	<b>Limitazioni</b>
Efficienza energetica	Edifici residenziali e fabbriche	Risparmi energetici del 20% facilmente raggiungibili	Investimenti in tecnologie di risparmio energetico
Combustibili puliti	Produzione di energia e trasporti	Minori emissioni nocive in impianti attuali	Costo superiore delle fonti rispetto a quelle attuali
Energie rinnovabili	Fotovoltaico, eolico, biomasse, idrogeno	Produzione energetica locale, indipendenza da petrolio, zero emissioni nell'uso	Intermittenza, costo, investimenti, immaturità
Geo-ingegneria	Riforestazione, compensazione	Approccio semplice ed economico di assorbimento delle emissioni	Non risolve la causa, impedisce l'uso del suolo per altre funzioni
CCS	Singoli centri di emissione	Mantenere gli impianti attuali senza immettere sostanze in atmosfera	Non risolve la causa, investimenti, immaturità

*Tabella 10. Strategie di riduzione delle emissioni, adattato da Leung et al. (2014)*

Tra i diversi approcci, il CCS può ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> (tipicamente del 85-90%) da grandi fonti di emissioni puntiformi, come i servizi di produzione di energia, e gli emettitori ad alta intensità energetica, ad es. cementifici. In questo approccio, la CO<sub>2</sub> viene prima catturata dai gas combusti/combustibili, separata dalla sostanza assorbitrice, trasportata e immagazzinata in modo permanente o riutilizzata (Leung et al., 2014). In particolare, per risolvere il problema del riscaldamento globale, le emissioni di CO<sub>2</sub> devono quindi iniziare a diminuire dal 2020, e la CCS è inevitabile se i combustibili fossili continuano a essere bruciati a più del 10% del tasso del 2010 (Haszeldine, 2009).

Il CCS elimina, purifica e concentra le emissioni di CO<sub>2</sub> dalla combustione di combustibili fossili, con un approccio tutto sommato semplice, presentato in Figura 49. La CO<sub>2</sub> emessa viene cattura

con una delle tecnologie presentate di seguito e convogliata per il trasporto. Dopo aver lasciato la centrale, la CO<sub>2</sub> catturata viene pressurizzata a 70 bar, formando un liquido che può essere trasportato in un sito di stoccaggio, dove il fluido viene iniettato nei pori della roccia ad una profondità di circa 800 metri s.l.m. Una buona scelta di siti di stoccaggio manterrà la CO<sub>2</sub> senza infiltrazioni apprezzabili per decine di migliaia di anni. Tuttavia, un monitoraggio sarà richiesto per decenni nel futuro, combinato a tecniche di rimedio ad uno stoccaggio carente (Haszeldine, 2009).

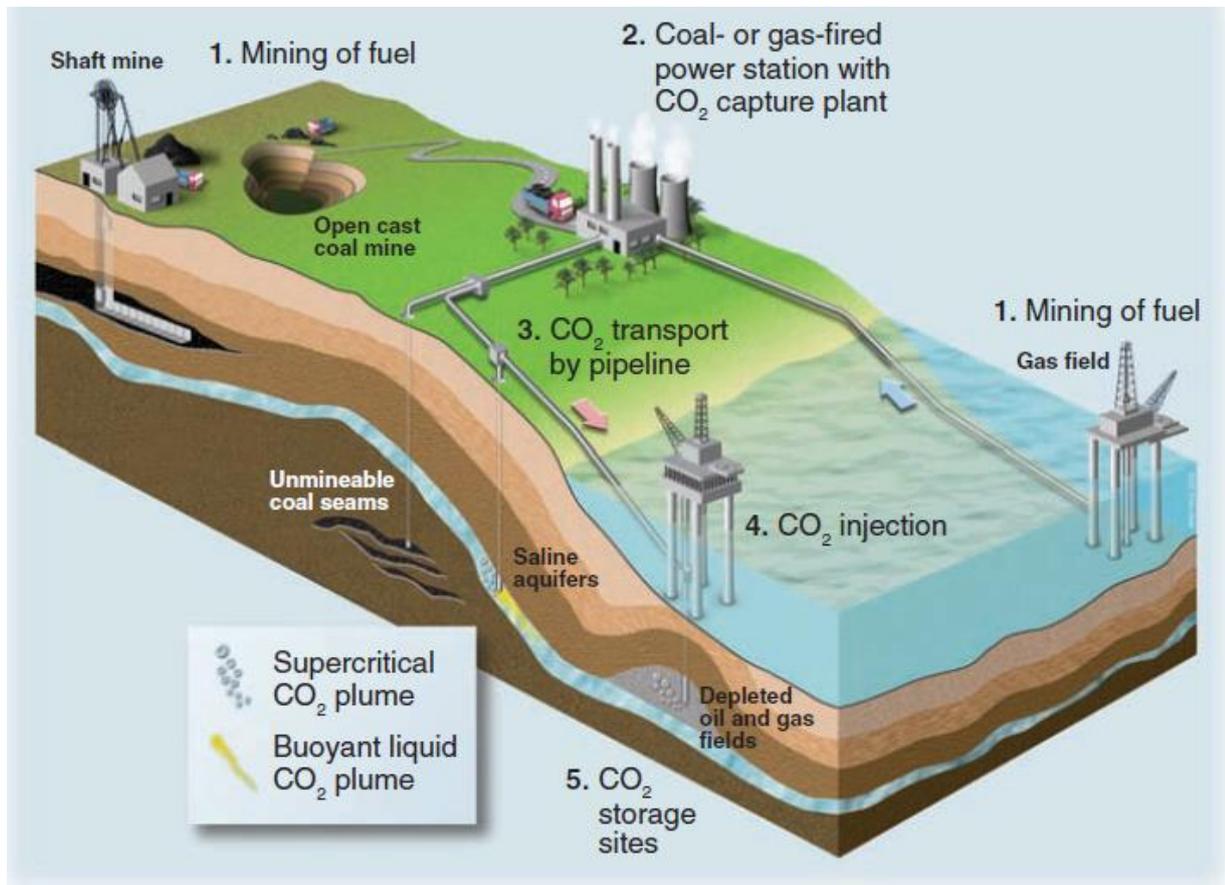


Figura 49. Funzionamento del CCS, tratto da Haszeldine (2009)

I tre metodi di cattura sono: la cattura post-combustione, che separa la CO<sub>2</sub> prodotta tramite l'uso di solventi chimici, la cattura pre-combustione, che rimuove chimicamente il carbonio nel combustibile lasciando bruciare l'idrogeno, o l'ossicombustione, che brucia carbone o gas in aria denitrificata per produrre solo CO<sub>2</sub> e acqua (Haszeldine, 2009).

La selezione della specifica tecnologia di cattura della CO<sub>2</sub> dipende in larga misura dal tipo di impianto e dal combustibile utilizzato, laddove per le centrali elettriche a gas, la tecnologia di cattura post-combustione è risultata generalmente essere la tecnologia migliore a causa del suo costo inferiore. L'assorbimento è il processo di separazione della CO<sub>2</sub> più maturo, grazie alla sua elevata efficienza e al minor costo; sebbene le questioni relative all'impatto ambientale debbano essere pienamente comprese (Leung et al., 2014).

Tecnica	Vantaggi	Svantaggi
Post-combustione	Tecnologia più matura, retrofit di impianti esistenti	Una bassa concentrazione di CO <sub>2</sub> ne riduce l'efficienza
Pre-combustione	Tecnologia sviluppata e sul mercato, retrofit, massima efficienza con concentrazioni alte	Eccessivo calore e bassa efficienza con combustibili con alto idrogeno, alta potenza assorbita, investimenti e costi operativi

Ossicombustione	Tecnologie di separazione dell'aria mature, massima efficienza ad altissime concentrazioni, minori dimensioni dell'impianto per minore volume del combustibile	Cali di efficienza, produzione di O <sub>2</sub> criogenico molto costosa, possibili problemi di corrosione
Combustione con loop chimico	Non viene richiesta separazione di CO <sub>2</sub> e N <sub>2</sub> , riducendo la potenza richiesta	Tecnologia in sviluppo

Tabella 11. Tecnologie CCS, adattato da Leung et al. (2014)

La migliore opzione per il trasporto di CO<sub>2</sub> dipende da una varietà di parametri, tra cui i volumi di CO<sub>2</sub> da trasportare, la durata prevista della fonte di CO<sub>2</sub> (es. Centrali elettriche, acciaierie e cementifici), la distanza tra la fonte di CO<sub>2</sub> e l'area di stoccaggio, trasporto e stoccaggio onshore vs. offshore e tipologia di infrastruttura di trasporto disponibile (es. Reti stradali e ferroviarie, condotte, banchine). La pipeline è considerata la soluzione più praticabile se grandi volumi di CO<sub>2</sub> sono disponibili per lungo tempo e se è possibile sviluppare un sistema di condutture; ulteriore vantaggio è rappresentato dal potenziale riutilizzo di condotte per il trasporto di gas o petrolio. In caso di stoccaggio in mare aperto, l'utilizzo di navi cisterna può essere economicamente competitiva a causa degli elevati costi delle condotte sottomarine. Mentre i costi degli impianti di stoccaggio intermedi e di attracco adeguato alle petroliere dovrebbero essere affrontati qualora le navi vengano utilizzate come vettori di CO<sub>2</sub>. Infine, quattro tipi principali di formazioni geologiche sono considerati per lo stoccaggio di CO<sub>2</sub>, ossia giacimenti di petrolio e gas esauriti, giacimenti di carbone non scavabili, falde acquifere saline e basalti (Leung et al., 2014).

La potenziale fuoriuscita di CO<sub>2</sub> è una delle principali preoccupazioni per lo stoccaggio geologico e deve essere sviluppato un programma di monitoraggio completo. Inoltre, sebbene esistano tecnologie per la cattura e lo stoccaggio della CO<sub>2</sub>, il costo complessivo dell'utilizzo delle attuali procedure CCS è ancora elevato e deve essere sostanzialmente ridotto prima che possa essere ampiamente utilizzato. Ci sono diversi ostacoli alla diffusione di CCS che devono essere affrontati nei prossimi anni, inclusa l'assenza di un chiaro business case per gli investimenti in CCS e l'assenza di solidi incentivi economici per supportare gli elevati costi aggiuntivi di capitale e operativi associati a CCS (Leung et al., 2014).

A ciò si aggiunga che il blocco maggiore non è tecnologico, ma piuttosto la mancanza di un mercato in grado di fornire entrate che giustifichino grandi investimenti. Ogni impianto a carbone dimostrativo richiede un sistema di supporto dei prezzi per molti anni per recuperare il capitale aggiuntivo di \$ 1,5 miliardi e il costo operativo della generazione di elettricità decarbonizzata, per cui il prezzo fornito dall'attuale mercato del carbonio è troppo basso e irregolare. Sono necessari sistemi di sostegno dei prezzi per introdurre la CCS, così come il sostegno viene fornito per introdurre le energie rinnovabili (Haszeldine, 2009).

Inoltre, vi è anche una forte componente di costo per i consumatori, ad esempio, nel Regno Unito, il CCS può costare a ciascuna famiglia un 10% in più all'anno per l'elettricità. Può sembrare costoso, ma se il CCS viene sviluppato ora come parte di un portafoglio di protezione globale del clima, si prevede che i costi di abbattimento di CO<sub>2</sub> richiesti nel 2050 si ridurranno da \$ 500 a \$ 50 per tonnellata (Haszeldine, 2009).

### 3.10.6. Ulteriori tecnologie

Infine, come già annunciato nella parte introduttiva vengono presentate delle tecnologie "minori" nella letteratura trovata ma che di sicuro possono avere un forte impatto sia a livello produttivo che di sostenibilità.

Secondo Dijcks (2013), i Big Data (o BD) possono essere definiti come dati aziendali tradizionali, generati da macchine o dati derivanti da weblog, sensori e registri e dati sociali. Essi sono caratterizzati da:

- (i) volume, che denota la grande quantità di dati che devono essere archiviati;
- (ii) velocità, che indica la frequenza o la velocità con cui i dati vengono generati e forniti;
- (iii) varietà, che illustra le diverse fonti mediante le quali i dati vengono generati.

White (2012) ha aggiunto una quarta dimensione, la veridicità, per evidenziare l'importanza dei dati di qualità e il livello di fiducia in una fonte di dati. Oltre alle quattro caratteristiche, gli studiosi hanno aggiunto anche un'altra dimensione, il valore, per denotare i benefici economici dei dati (Dubey et al., 2016).

Bi e Cochran (2014) sostengono che l'analisi dei BD è stata identificata come una tecnologia critica per supportare l'acquisizione, l'archiviazione e l'analisi nei sistemi di gestione dei dati nella produzione moderna. Connettendo IoT e BD a sistemi informativi di produzione avanzati si può aiutare a semplificare i colli di bottiglia esistenti attraverso il miglioramento dei sistemi di previsione. Pertanto, il volume, la varietà e la velocità dei dati forniscono impulso alle organizzazioni per adottare e perfezionare le funzioni di analisi dei dati migliorare gli attuali processi della catena di fornitura e le loro prestazioni. In particolare, la letteratura sul ruolo di BDA in Operations and Supply Chain Management (OM / SCM) ha sostenuto i benefici dal suo utilizzo, tra cui, tra l'altro, un aumento del 15-20% del ROI, della produttività e della competitività per le aziende e il settore pubblico, come così come il surplus economico per i clienti e un processo decisionale informato che consente visibilità nelle operazioni e una migliore misurazione delle prestazioni (Dubey et al., 2016). In ultima istanza, bisogna sottolineare come l'analisi dei dati in un'ottica GSCM può quindi riguardare l'interpretazione di tutti i parametri di sostenibilità dei singoli prodotti e dei singoli fornitori, nel caso di grandi catene di fornitura, permettendo quindi la selezione delle tecnologie più adatte, dei fornitori più sostenibili, del ciclo di vita migliore e di tutti quei parametri che possono permettere una transizione ottimale.

Le future riduzioni dell'impronta ecologica della generazione di energia risiederanno in un approccio multiforme che includa energie nucleari, solari, ad idrogeno, eolici e fossili (da cui viene sequestrato il carbonio tramite CCS) e biocarburanti (Ragauskas et al., 2006).

Lo spostamento dalla dipendenza della società dal petrolio alle risorse di biomassa è generalmente visto come un importante contributo allo sviluppo di una società industriale sostenibile e alla gestione efficace delle emissioni di gas serra. La grande sfida per la produzione di biomassa è sviluppare colture con una serie di caratteristiche fisiche e chimiche desiderabili, aumentando al contempo le rese di un fattore 2x o più. Raddoppiare la produttività globale delle colture energetiche dipenderà dall'identificazione dei vincoli fondamentali alla produttività e dall'affrontare tali vincoli con i moderni strumenti genomici, aumentando la cattura di energia luminosa e manipolando il meccanismo di azoto-fissazione (Ragauskas et al., 2006).

Inoltre, il passaggio di paradigma dagli idrocarburi a materie prime a base biologica altamente funzionalizzate creerà inoltre notevoli opportunità per l'industria di trasformazione chimica. Ad esempio, l'uso di carboidrati come materie prime chimiche eliminerà la necessità di diversi processi ossidativi ad alta intensità di capitale utilizzati nell'industria petrolifera. I carboidrati della biomassa forniranno una via praticabile ai prodotti come alcoli, acidi carbossilici ed esteri (Ragauskas et al., 2006).

Da un punto di vista operativo, una bioraffineria non è così diversa da un normale raffineria a petrolio. Ossia la materia prima costituita principalmente da polisaccaridi rinnovabili e lignina entra nella bioraffineria e, attraverso una serie di processi, viene frazionata e convertita in una

miscela di prodotti, tra cui carburanti per il trasporto, coprodotti ed energia diretta. Dopo aver estratto sostanze chimiche a valore aggiunto dalla biomassa nelle prime fasi, le separazioni e le operazioni chimiche dovranno essere spostate sulla produzione di biocarburanti. Indipendentemente dalle tecnologie di processo incorporate in una bioraffineria, quasi tutte genereranno alcuni prodotti di scarto che saranno intrattabili e difficili da convertire in biomateriali o biocarburanti con valore aggiunto. Questo residuo dovrà essere trattato in modo compatibile con l'ambiente, con la minima impronta ecologica. Tali rifiuti e residui offrono importanti fonti di energia all'interno della bioraffineria, dato il loro contenuto energetico chimico, e sono un candidato ideale per la conversione termochimica in syngas, utilizzato per la sintesi dell'ammoniaca (Ragauskas et al., 2006).

Tale visione contribuirà quindi alla sostenibilità non solo per la sua intrinseca dipendenza da biorisorse sostenibili, ma anche riciclando i rifiuti, con l'intero processo che diventerà quindi *carbon-neutral* (Ragauskas et al., 2006) in quanto a livello di tutto il ciclo di vita delle risorse la quantità di emissioni verrà pareggiata da quella assorbita dalla materia prima.

Come notato nell'introduzione, le tecnologie internet stanno diventando sempre più diffuse e stanno sempre più permeando la società e diventa quindi fondamentale, riprendendo (Murugesan, 2008), analizzarne gli aspetti sostenibili e quanto sia importante andare a migliorarne l'impatto.

Infatti, l'IT ha contribuito a problemi ambientali, di cui la maggior parte delle persone non si rende conto. I computer e altre infrastrutture IT consumano quantità significative di elettricità, ponendo un pesante fardello sulle nostre reti elettriche e contribuendo alle emissioni di gas serra. Inoltre, gli hardware pongono gravi problemi ambientali sia durante la sua produzione che durante lo smaltimento. L'IT è una parte significativa e crescente dei problemi ambientali che affrontiamo oggi, siamo obbligati a ridurre al minimo o eliminare, ove possibile, l'impatto ambientale dell'IT per contribuire a creare un ambiente più sostenibile (Murugesan, 2008).

Il consumo totale di energia elettrica da parte di server, computer, monitor, apparecchiature per la comunicazione dati e sistemi di raffreddamento per i data center è in costante aumento, con conseguente aumento delle emissioni di gas serra. Ogni PC in uso genera circa una tonnellata di anidride carbonica all'anno, considerando che al mondo esistono circa 3 miliardi di essi si capisce come le emissioni generate si capisce come essi sarebbero il terzo stato per emissioni, secondo solo a Cina ed USA (Wikipedia), con un valore pari a 30 volte quello italiano.

Inoltre, i componenti dei computer contengono materiali tossici, che vengono sempre più spesso dopo solo 2/3 anni dall'acquisto, rilasciati nelle discariche, specialmente del terzo mondo, inquinando la terra e contaminando l'acqua (Murugesan, 2008), se non addirittura bruciati con ovvie conseguenze a livello di emissioni e della salute dei vicini residenti.

Pertanto, l'IT verde è vantaggioso per l'ambiente migliorando l'efficienza energetica, riducendo le emissioni di gas serra, utilizzando materiali meno nocivi e incoraggiando il riutilizzo e il riciclo. Fattori come la legislazione ambientale, l'aumento dei costi di smaltimento dei rifiuti, l'immagine aziendale e la percezione del pubblico danno ulteriore impulso all'iniziativa dell'IT verde. Esso include le dimensioni della sostenibilità ambientale, l'economia dell'efficienza energetica e il costo totale di proprietà, che include i costi di smaltimento e riciclo.

Il Green IT abbraccia una serie di aree e attività di interesse, tra cui la progettazione per la sostenibilità ambientale, la gestione energetica, progettazione, layout e ubicazione dei data center; virtualizzazione dei server, smaltimento e riciclo responsabili, conformità normativa, metriche verdi, mitigazione dei rischi legati all'ambiente, utilizzo di fonti energetiche rinnovabili e l'etichettatura ecologica dei prodotti IT (Murugesan, 2008).

Ovviamente tale definizione si può abbondantemente espandere sia dal punto di vista dei prodotti, inglobando i vari smartphone/tablet etc., ma anche degli aspetti analizzati, quali la sostenibilità sociale. Non è un mistero, infatti, che i metalli rari utilizzati si trovino solo in determinati paesi africani ed americani in cui l'estrazione fa uso abbondante di lavoro minorile e sfruttamento. Esistono alternative a tutto ciò? Ad esempio, Fairphone produce smartphone con materiali plastici e metallici riciclati e derivati da miniere Fairtrade® a prezzi che, a parità di prestazioni tecnologiche, sono circa il triplo dei diretti concorrenti. Di conseguenza, nonostante vi possa essere un indubbio mark-up, è lecito chiedersi se sia giusto rinunciare alla nostra visione consumistica, volta alla massimizzazione dei profitti e del surplus del consumatore, in favore di una distribuzione del benessere ed una sostenibilità maggiore oppure se continuare a guardare solo i prezzi dei prodotti senza curarsi di alcun altro aspetto mentre il mondo si distrugge attorno a noi.

## 4. Sistema Qualità ed EcoSistema

L'idea iniziale di questa tesi nasce dal paragone tra la Qualità e la Sostenibilità aziendale con lo scopo di analizzare la storia della Qualità e carpirne gli insegnamenti ed i fattori di successo da sfruttare per promuovere una cultura della Sostenibilità all'interno del sistema produttivo. Successivamente, questa idea è evoluta in un'analisi di più ampio respiro a livello di letteratura specifica sulla sostenibilità anche se viene, come indicato dal titolo, dedicato un capitolo a tale confronto, per fornire nuovi strumenti e concetti utili ad una diffusione dell'EcoSistema, ovvero, analogamente al Sistema Qualità, un approccio di gestione dell'impresa focalizzato sulla Sostenibilità.

### 4.1. Storia della Qualità

Il concetto di Qualità a livello industriale nasce con la rivoluzione tayloristica degli anni '20, anche se a livello puramente ispettivo, ed inizia ad acquisire sempre maggiore importanza negli USA con la Seconda guerra mondiale, a causa delle necessità di correttezza dimensionale dei componenti soprattutto dei carrarmati. Una volta conclusosi il conflitto, vi è un inizio dell'opera di diffusione delle competenze acquisite da un lato nella sfera d'influenza americano, ovvero il mondo occidentale, e dall'altro, ancora più importante, nel Giappone della ricostruzione post-bellico.

In questo frangente, infatti, i maggiori pensatori americani di questa disciplina hanno educato e formato migliaia di ingegneri della produzione, tra cui probabilmente Ohno e Ishikawa sono i più famosi, con i risultati in termini di qualità produttiva giapponese attuale noti.

Di seguito vengono riportati, riprendendo quanto presentato da G. Mattana (2005) ed il sito Qualitiamo.it, i principali pensatori della Storia della Qualità coi rispettivi apporti:

- W.E. Deming (1900-1993): considerato il fondatore della Qualità, introduce i concetti di miglioramento continuo (per i giapponesi *kaizen*) e l'analisi continua del sistema con l'utilizzo di metodi statistici per trovare le "cause radice" responsabili dei guasti;
- W. Shewart (1891-1967): maestro di Deming, è il padre del controllo statistico di qualità ed elabora i concetti di "cause comuni" e di "cause speciali" della varianza, introduce le carte di controllo per la rilevazione degli errori in linea;
- J. Juran (1904-2008): padre della gestione della qualità, sottolinea l'importanza dell'osservazione sul campo e dell'empiricità dei risultati, introduce la monetizzazione del linguaggio per una maggiore comprensione da parte del management;
- A. Feigenbaum (1920-2014): è il padre della gestione totale della qualità (Total Quality Management o TQM), ossia della Qualità come principio di governo dell'impresa, diffusa in

tutti i suoi aspetti, primo quality manager (QM) della storia, introduce il concetto di mancanza della qualità come fonte di perdite economiche;

- **P.B. Crosby** (1926-2001): maggiore predicatore della qualità, presentata in termini semplici come un investimento (eliminazione sprechi ed efficienza), promulga l'importanza delle risorse umane, in quanto la gestione della qualità dev'essere ubiqua e non specialistica;
- **C. Möller** (1942-): si concentra sulle performance individuali, l'impresa migliora solo se i dipendenti lo fanno a loro volta, basa il suo approccio su obiettivi personali, valutazione della qualità del proprio lavoro ed un'attenta pianificazione del lavoro al fine di fornire sempre e solo qualità.
- **K. Ishikawa** (1916-1989): padre della scuola giapponese, presenta la qualità come al primo posto per il raggiungimento del profitto, una qualità orientata al cliente e basata anche sul concetto di benchmarking, è famoso soprattutto per la semplificazione dei mezzi statistici per una maggiore comprensione anche dei profani (tra cui l'omonimo diagramma) e per la creazione dei "circoli della qualità";
- **S. Mizuno** (1910-1989): teorico del TQM insieme ad Ishikawa, pone l'accento sulla soddisfazione del cliente come unico metodo di sopravvivenza dell'impresa in contrapposizione al profitto occidentale, introduce anche il concetto di cliente interno lungo la catena del valore e la sua soddisfazione come principio guida dell'impresa;
- **H. Kume**: erede di Ishikawa, è colui che ha formalizzato i sette strumenti della qualità, secondo il credo che il 95% dei problemi possano essere risolti direttamente dagli operai, a cui fornire quindi strumenti semplici e comprensibili;
- **Y. Akao** (1928-2016): padre del QFD (Quality Function Deployment), che permette di portare la voce del cliente all'interno dei processi aziendali, in particolare la progettazione e sviluppo, aumentando il focus dell'impresa sul cliente;
- **T. Ohno** (1912-1990): padre del *just-in-time* (JIT) e del modello produttivo Toyota, è noto per le tecniche produttive del *kanban*, delle 5S e dei 7 wastes;
- **S. Shingo** (1909-1990): collaboratore di Ohno, mise a punto il concetto di "zero difetti" e di SMED (*single minute exchange of dies*), con un forte focus della qualità a livello operativo e non solo manageriale;
- **G. Taguchi** (1924-2012): si concentra sulla progettazione del prodotto, introduce il concetto di *Robust design*, per cui ci si focalizza sull'affidabilità e sulla qualità come parametri progettuali, oltre al concetto di preferire progetti poco soggetti a varianza piuttosto che cercare successivamente di risolverla, oltre ad introdurre l'idea di "perdita di qualità", come fonte di perdita economica.

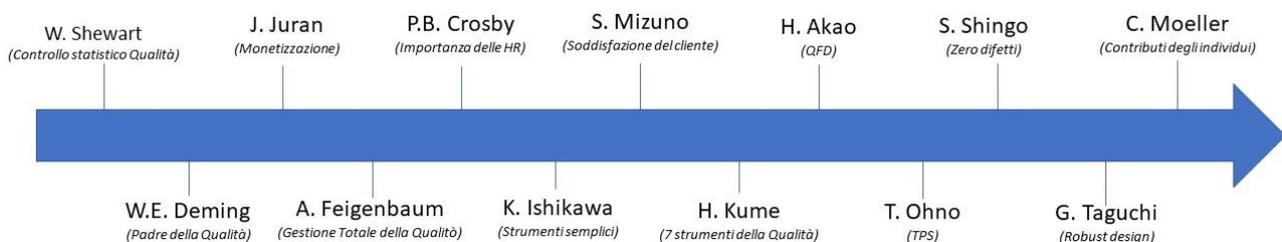


Figura 50. Storia della Qualità

Di conseguenza, vengono riportati i punti chiave evidenziati dall'evoluzione della Qualità:

1. Analisi continua e miglioramento continuo: ricerca continua delle cause dei difetti, col fine ultimo di raggiungere i "zero difetti", ossia la condizione ideale simbolo della completa efficacia del sistema messo in atto;

2. Impegno del management: la Qualità dev'essere il principio di governo dell'impresa (TQM) e quindi vi dev'essere un impegno da parte del management per assecondare questo sforzo dall'alto, con una comunicazione efficace a tutti i livelli;
3. Monetizzazione ed investimento: per comunicare col management, la qualità dev'essere monetizzata, in modo da supportare le teorie dei QM e per mostrarla come investimento con un ritorno (riduzione delle perdite ed efficienza produttiva) e non solo come un costo, se non come mezzo primo per raggiungere il profitto;
4. Ubiquità dello sforzo: la Qualità permea tutta l'impresa e quindi anche gli operatori di linea che, potendo risolvere fino al 95% delle cause anticipatamente, devono disporre della mentalità corretta, tramite educazione e corsi, ma anche di strumenti semplici, comprensibili e tempestivi, come i 7 strumenti e le carte di controllo;
5. Focus su cliente: la soddisfazione del cliente tramite un prodotto di qualità dev'essere la condizione necessaria per la sopravvivenza dell'impresa, la voce del cliente coi suoi bisogni dev'essere inclusa all'interno della R&S per presentare il prodotto perfetto per lui;
6. Focus sulla progettazione del prodotto: la qualità e l'affidabilità devono essere introdotti come parametri progettuali per consentire di soddisfare il cliente e di guidare l'impresa attorno al concetto di qualità, sia a livello progettuale ma anche operativo;
7. Qualità lungo la catena del valore: considerando i fornitori lungo la catena del valore come clienti, si introduce il concetto di soddisfazione del fornitore a valle come se fosse un cliente, guidando le imprese fornitrici verso una maggiore qualità ed un approccio complessivo lungo tutta la filiera, in cui, grazie alla logica JIT, si riducono gli sprechi ed i magazzini con conseguente risparmio ed efficienza globale.
8. Benchmarking: sia tra imprese che tra impianti o funzioni all'interno della stessa impresa, ma anche tra operatori della stessa linea, viene riportata l'importanza del confronto continuo, anche tramite circoli della qualità o riunioni inter-funzione, per comprendere i possibili margini di miglioramento, gli errori e le azioni da intraprendere per migliorare.

#### 4.2. Ricerche esistenti sul parallelismo Sistema Qualità-EcoSistema

Questo paragrafo presenta gli spunti ricavati dalla letteratura analizzata in occasione del lavoro svolto nel capitolo precedente e quindi non prettamente focalizzato sul rapporto tra sostenibilità e qualità, seppur presenti spunti utili che vengono appunto riportati di seguito. Per un maggiore approfondimento di questo rapporto si rimanda quindi ad analisi di letteratura specializzata, mentre questo paragrafo ha solo una funzione di presentare spunti utili allo scopo del capitolo.

Innanzitutto, (Sarkis, 2001) presenta i diversi punti in comune tra Qualità e Sostenibilità partendo dal presupposto che l'approccio della qualità totale (TQM) si sovrappone e comprende molte iniziative ambientali all'interno delle organizzazioni. L'obiettivo finale di "zero difetti" si adatta, infatti, bene al concetto di zero emissioni classico delle organizzazioni più verdi.

Inoltre, il miglioramento continuo, un principio fondamentale degli sforzi di TQM, è stato integrato con pratiche aziendali rispettose dell'ambiente. Infatti, gli standard ISO 14000 hanno come base le fasi di pianificazione, esecuzione, verifica, azione (Plan-Do-Check-Act o PDCA) del ciclo di miglioramento continuo di Deming (Sarkis, 2001).

Successivamente, Sarkis evidenzia come, analogamente alle iniziative TQM in cui l'empowerment rende tutti responsabili della qualità in un contesto di produzione, le organizzazioni devono maturare responsabilità ambientali al livello operativo. Questo cambiamento richiede che le problematiche operative ambientali siano affrontate dai dipendenti operativi, non solo dal

personale tecnico della funzione qualità. L'integrazione di queste competenze di gestione ambientale nella pratica quotidiana richiederà sforzi simili a quelli della diffusione della responsabilità della gestione della qualità, portando alla gestione totale della qualità ambientale (Total Quality Environmental Management o TQEM) (Sarkis, 2001). Infatti, la certificazione ISO 14000 da sola non garantisce un sistema sostenibile di successo ma deve essere utilizzato a supporto di ulteriori pratiche organizzative. In uno studio su tre organizzazioni, Kitazawa and Sarkis (1998), hanno scoperto che i sistemi di gestione ambientale (due dei quali erano certificati ISO 14000), per avere successo nella minimizzazione dei rifiuti e nella riduzione della fonte, richiedevano un supporto significativo da parte dei dipendenti. Infatti, il successo o il fallimento di questi programmi e iniziative inizia col top management mentre l'implementazione e l'esecuzione spetta ai dipendenti di livello inferiore dell'organizzazione. La gestione ambientale dei processi e delle pratiche organizzative è stata tradizionalmente relegata a personale specializzato, con competenze tecniche necessarie per gestire queste attività. Ciò implica che i lavoratori dovranno diventare più capaci di valutare le ramificazioni ambientali delle loro operazioni e delle loro apparecchiature, con l'ausilio di strumenti e programmi di formazione (Sarkis, 2001). Infine, Zhu and Sarkis (2004) hanno dimostrato che la gestione della qualità ha una forte relazione con i sistemi di gestione ambientale mentre King and Lenox (2001) hanno osservato che le aziende che incorporano sistemi di gestione della qualità hanno una maggiore probabilità di incorporare sistemi di gestione ambientale (Environmental Management Systems o EMS).

(Cherrafi et al., 2016) suggerisce l'utilizzo di tecniche e strategie già esistenti a livello qualità ed adattate ai bisogni della sostenibilità per velocizzarne la diffusione. Tra questi, vengono presentati ad esempio le metodologie lean, il PDCA, il 6 $\sigma$  ed altri, che sono presentati più in dettaglio nel paragrafo 3.7. Nel paragrafo precedente (3.6), negli studi di (Kaebernick et al., 2003; Ramani et al., 2010) vengono presentati diversi strumenti di progettazione ambientale basati sul QFD. Infatti, l'obiettivo di un QFD tradizionale è convertire le esigenze dei clienti in caratteristiche ingegneristiche e, allo stesso tempo, migliorare il livello di qualità del prodotto. Introducendo gli impatti ambientali del prodotto stesso e durante il suo ciclo di vita nei QFD come nuove esigenze dei clienti, è stata sviluppata una serie di strumenti di progettazione ecocompatibile, che includono QFD per l'ambiente (environmental-conscious QFD o ECQFD), funzioni di qualità verde e Casa dell'Ecologia (in contrapposizione alla Casa della Qualità) (Ramani et al., 2010). In particolare nell'ECQFD, viene aggiunta una terza dimensione alla matrice QFD, che copre gli aspetti ambientali sotto forma di metriche ambientali (EM). Le metriche del QFD vengono utilizzate per valutare i requisiti del cliente (EM-CR) e i requisiti tecnici (EM-TR) sul loro impatto ambientale (Kaebernick et al., 2003). In generale, l'applicazione di questi strumenti parte dalla raccolta sia delle esigenze dei clienti che delle esigenze ambientali e dallo sviluppo delle correlazioni tra queste esigenze e le caratteristiche di qualità. Viene quindi eseguita un'analisi funzionale per identificare in che modo le caratteristiche di qualità sono correlate con le caratteristiche ingegneristiche sia dal punto di vista ambientale che da quello tradizionale. Un grave inconveniente di questi strumenti basati su QFD, simili al QFD tradizionale, è che lo sviluppo di correlazioni tra esigenze ambientali e qualità e caratteristiche ingegneristiche è totalmente a carico dei progettisti e di solito le correlazioni sviluppate si basano sulla conoscenza della tradizionale disciplina di ingegneria ambientale senza la considerazione del ciclo di vita (Ramani et al., 2010).

Infine, Stokes (2009) suggerisce di monetizzare la sostenibilità, basandosi sull'incorporazione della TBL nel sistema di produzione e nel suo contesto. Fattori come la conformità ambientale, la

comunicazione e l'efficienza operativa forniscono risultati misurabili supportabili da obiettivi aziendali tradizionali, ma per misurare i risultati, essi devono essere "monetizzati" in base alle priorità dei risultati e alle prestazioni aziendali. Ciò permette infatti di dare una misura degli impatti e dei progressi svolti, oltre che permettere una migliore comunicazione col management, in quanto esperto finanziario e non ambientale.

#### 4.3. Conclusioni e spunti ulteriori

In conclusione, si può partire da quanto riportato in letteratura, ovvero che un sistema Qualità già esistente rappresenta un incentivo alla creazione di un EcoSistema (King and Lenox, 2001). Di conseguenza, si possono sfruttare gli strumenti e le metodologie, come ad esempio i 7 strumenti, ma anche le stesse strategie, quali il Lean&Green, per consentire una transizione agevolata.

Molto importante sono anche l'adozione di una mentalità ubiqua della sostenibilità, inter-livello ed inter-funzione e lungo la catena del valore, l'introduzione della sostenibilità nella progettazione ed un continuo benchmarking.

In particolare, oltre alla già citata ECQFD, vengono qui proposti per completezza i 7 strumenti della qualità, che devono essere integrati con altri strumenti (già esistenti o nuovi) caratteristici, ed un loro possibile adattamento in ottica sostenibilità:

1. Checklist: tabelle in cui sono elencati, tramite spunte, i difetti rilevati tramite controlli periodici. È uno strumento molto semplice ed intuitivo che permette di avere una rendicontazione puntuale e comprensibile in ogni istante e con frequenze diverse. Può essere utilizzato dagli operatori per rilevare le problematiche a livello ambientale del processo (e.g. consumo di elettricità o risorse, rifiuti liquidi o solidi) ma soprattutto dai tecnici per valutare i parametri di sostenibilità dei fornitori e dei prodotti, agevolando quindi il processo decisionale;
2. Istogramma: diagramma delle densità di frequenza dei dati che consente di confrontare i valori teorici della distribuzione gaussiana con quelli reali dei dati. Esso permette quindi di verificare gli scostamenti dalla distribuzione ideale e quindi di verificare dove sono presenti gli errori e le problematiche e ricavare quindi le possibili cause e risolverle;
3. Diagramma di Ishikawa: diagramma a lisca di pesce che evidenzia le principali categorie di cause generiche (misure, personale, macchine, metodi, materiali) per poi dividerle nelle singole cause del contesto. Analogamente, si possono adattare le categorie di cause alle esigenze della sostenibilità, andando quindi ad analizzare le singole cause non in base al loro effetto sulla qualità ma sulla sostenibilità dei prodotti e dei processi;
4. Diagramma di Pareto: diagramma a colonne con le frequenze dei dati in ordine decrescente che permette di classificare le tipologie di cause o difetti così da prioritizzare i difetti da risolvere e verificare la percentuale di problematiche risolte eliminando le diverse cause.
5. Analisi per stratificazione: tecnica di analisi dei dati che permette di distinguere i dati provenienti da diverse fonti in modo da analizzare le sottocategorie di problematiche causate dalla medesima causa. Essa consente quindi di addentrarsi maggiormente nell'analisi delle singole cause per trovare più nel dettaglio le motivazioni delle problematiche e quindi, in ottica sostenibilità, sarebbe utilizzabile per un'analisi delle sotto-cause al fine di comprendere più approfonditamente le cause con un approccio top-down;
6. Diagramma a dispersione: diagramma a punti che consente di evidenziare la relazione tra due o più variabili che influenzano i dati analizzati così da individuare la correlazione tra di

esse e permettere una regressione lineare per comprendere al meglio la relazione tra i vari parametri di qualità (o sostenibilità) del processo o della catena del valore;

7. Carte di controllo: grafico (o coppia di grafici) con l'andamento della variabile analizzata nel tempo ed il suo permanere entro limiti stabiliti. Verrebbe pertanto utilizzata per verificare la permanenza dei dati (come i consumi o le emissioni) nei limiti imposti dalla legge o dagli obiettivi aziendali.

La seconda lezione importante traibile dalla Qualità è la necessità di avere una mentalità ubiqua che permei tutta l'impresa, ad ogni livello ed in ogni funzione aziendale. Ciò si traduce nella già citata necessità di fornire anche ai singoli operatori di linea strumenti semplici e comprensibili ma anche formazione specialistica, tramite ad esempio corsi di aggiornamento, sugli argomenti della sostenibilità, così da permettere una rilevazione tempestiva delle problematiche. Contemporaneamente, vi è la necessità della formazione di una nuova serie di figure tecniche ma anche dirigenziali, specializzate in sostenibilità e con una forte spinta verso di essa, che permetta di avere a tutti i livelli della catena decisionale ed in tutti i reparti aziendali un forte impegno così da riconoscere, analizzare e risolvere tutte le questioni ambientali e sociali inerenti all'impresa e la sua responsabilità. Allo stesso modo questo sforzo non dev'essere solo interno ma anche rivolto all'esterno, ossia riguardare tutti gli step della catena di fornitura e coinvolgere direttamente i fornitori nell'analisi e nello sforzo profuso.

Successivamente, vi sono due corollari a ciò: il primo è che, come suggerito da Stokes (2009), bisogna introdurre, ad esempio tramite una tassazione o un mercato delle emissioni, una monetizzazione del linguaggio per rendere la sostenibilità un concetto facilmente misurabile e comprensibile per il management. Ciò renderebbe finalmente effettiva la trasformazione della Sostenibilità da costo ad investimento con un ritorno in termini di risparmio di risorse, minori costi di smaltimento, maggiori opportunità di riciclo etc.

Il secondo corollario è l'importanza della progettazione, con tecniche quali i vari DfX e LCA, in quanto nelle moderne imprese vi è un orientamento non solo del layout produttivo ma anche di tutta l'impresa attorno al prodotto. Pertanto, una filosofia progettuale attorno ad un prodotto più sostenibile avrebbe un diretto impatto non solo sulla catena di fornitura del prodotto stesso, con possibilità di utilizzo delle 7R e della logistica inversa, ma anche su tutta l'impresa in quanto permetterebbe di dare una forte svolta verso la sostenibilità dell'impresa tutta.

Infine, bisogna sottolineare l'importanza del continuo benchmarking sia all'interno dell'impresa, con una costante analisi dei processi e del loro impatto, ma anche all'esterno della stessa, tramite confronto con altre imprese ma anche per mezzo di certificazioni. A tal proposito hanno rivestito una notevole importanza la creazione di certificazioni internazionali a livello ambientale (si veda la famiglia ISO 14000 ad esempio) e sociali (e.g. ISO 26000), ma anche di enti terzi (come Fairtrade o EcoLabel) nel guidare l'adozione di pratiche di sostenibilità ma anche nel permettere l'identificazione ed il riconoscimento delle imprese adottanti o che pongono la sostenibilità all'interno della propria visione strategica.

Tuttavia, bisogna notare una differenza sostanziale tra le due, ossia che la Sostenibilità, in quanto elemento di interesse della comunità anche a livello nazionale e globale, ha bisogno di un forte intervento esterno a livello politico-regolatorio, come evidenziato nel capitolo 3.5, che ne spinga l'adozione sia a livello incentivativo che regolatorio, come la creazione di un sistema di tassazione e di mercato.

## 5. Conclusioni

Questa tesi si è prefissata lo scopo di analizzare la letteratura inerente la Sostenibilità industriale ed i possibili insegnamenti che essa potrebbe trarre dalla storia della Qualità, tutto ciò tenendo anche conto delle domande di ricerca presentate nel corso dell'analisi bibliografica.

Per quanto riguarda la prima domanda (*Quali sono gli argomenti principali di cui si compone la ricerca sulla sostenibilità nella produzione e qual è lo stato dell'arte del "sustainable manufacturing"?*) è stato ricavato che fondamentalmente gli articoli presenti in letteratura comprendono aspetti sia intra-impresa (come strategie, sviluppo prodotto, indicatori e tecnologie), ovvero aspetti influenzabili dalle decisioni dei manager, ma anche extra- ed inter-impresa, ovvero che non solo non riguardano una singola impresa ma in alcuni casi comprendono tutto il contesto generale. Questo punto è di estrema importanza in quanto, sulla base del modello delle traiettorie tecnologiche o quello del QHM, si potrebbe dire che nessun'impresa è un'isola, ossia che per consentire questa vera e propria rivoluzione produttiva, c'è bisogno di un cambiamento di paradigma a tutti i livelli, sia della singola impresa, che della catena di fornitura (ossia la GSC), del contesto tecnologico (Industria 4.0), sociale (Economia Circolare e Persone intese come clienti), educativo (Università) ma anche e soprattutto a livello politico (Politiche), il che rappresenta forse la più grande differenza col Sistema Qualità.

Per quanto riguarda la seconda domanda (*Quali sono gli argomenti più discussi e con più spunti futuri e quelli che meritano ulteriore approfondimento?*) la principale conclusione che si può trarre, come presentato nel secondo capitolo, è che gli argomenti con maggiore rilevanza nella letteratura in analisi sono stati la Green Supply Chain (GSC), l'Economia Circolare e le Strategie. In particolare, la GSC ha avuto un grande appeal soprattutto negli ultimi anni e probabilmente ne avrà sempre di più per via delle enormi problematiche legate all'inquinamento generato dall'approvvigionamento. Ma anche e soprattutto sarà interessante analizzare le conseguenze logistiche del COVID, con tutte le tematiche relative alla chiusura delle frontiere e la libera circolazione di merci e persone che potrebbero portare ad un crescente *insourcing*, con auspicabili conseguenze a livello occupazionale, sociale e soprattutto ambientale. Successivamente, l'Economia Circolare rappresenta senza dubbio la più grande opportunità e necessità a livello sociale e produttivo, nonché il contesto ideale per il fiorire di una nuova cultura della Sostenibilità. Tale concetto, basato sulle 6R o meglio 7R (vedasi la Reincarnazione nel paragrafo 3.6.2.), ha un impatto dirompente in tutti i campi dell'impresa, a partire dalla progettazione (vedasi DFD e DFR), passando per la cultura dell'impresa, al suo marketing, fino alla gestione del ciclo di vita dei prodotti ed il loro smaltimento. Infine, le Strategie rappresentano il primo concetto intra-impresa, anche per il fatto di includere argomenti trasversali (come le PMI o la manutenzione). Ciò a riprova del fatto che la sostenibilità sia un concetto olistico, che richiede una corretta implementazione di strategie e metodologie, anche tratte da o evoluzione del paradigma attuale come il Lean&Green, e quindi uno sforzo manageriale nella gestione della singola impresa, ma anche e soprattutto un impegno di altri attori.

Ed è proprio su questi attori che la letteratura analizzata mostra la sua principale fallacia, in quanto gli ultimi due argomenti per numero di articoli sono proprio le Politiche e le Persone.

Per quanto riguarda il primo argomento, si è detto fin dall'introduzione dell'importanza a livello politico-normativo della Sostenibilità e come essa, a differenza della Qualità, abbia bisogno di un

deciso contributo esterno, in termini incentivatori/regolatori/di mercato, per completare la transizione e come questo apporto non sia stato rimarcato nel corso dell'analisi. Il secondo argomento è invece un'aggregazione di Università e Clienti. In particolare, l'Università include anche l'Educazione superiore in generale, in quanto fornitori di competenze sia ingegneristiche che manageriali ma anche tecniche o anche solo di educazione dei futuri cittadini. Detto dell'Educazione, in letteratura vengono anche analizzati i comportamenti dei consumatori, green o meno, e sottolineato come essi dovrebbero essere compresi ed indirizzati in favore di una maggiore sostenibilità delle scelte, che indirettamente porterebbe ad un'innovazione sostenibile dei prodotti *demand pull*. Si può quindi dedurre l'enorme importanza di questi attori che però non sono considerati così approfonditamente in letteratura, sebbene si possa trovare una parziale scusante a ciò. Infatti, la grandissima maggioranza delle fonti dell'analisi sono fonti tecniche in ambito tecnologico-produttivo (vedasi ad esempio "International Journal of Cleaner Production"), con poche fonti "generalistiche" o sociologiche o tantomeno politico-legali. Pertanto, una possibile limitazione di questo studio è determinata dalle fonti troppo "produttivo-centriche", ma, allo stesso modo, si può dedurre anche che la letteratura di settore dovrebbe diversificarsi su tematiche alternative ma, come si vede, dal sicuro e notevole contributo.

Infine, per quanto riguarda la terza domanda (*Quali sono le possibili lezioni che la Sostenibilità può apprendere dalla Qualità?*), le principali indicazioni sono la possibilità di sfruttare gli strumenti e le metodologie, come i 7 strumenti, e le stesse strategie, quali il Lean&Green, per consentire una transizione agevolata. Altri spunti sono anche l'adozione di una mentalità ubiqua della sostenibilità, inter-livello, inter-funzione e lungo la catena del valore, l'introduzione della sostenibilità nella progettazione ed un continuo benchmarking.

In particolare, di estrema importanza è la necessità della creazione di un ambiente dedito alla Sostenibilità, il cosiddetto EcoSistema, che pervada tutta l'impresa e tutta la sua catena del valore. Esso deve comprendere un approccio manageriale volto alla comprensione, in termini monetari ed indicatoriali, delle opportunità offerte dalla Sostenibilità, da non vedersi più come costo ma come investimento. Oltre a ciò, occorre una completa comunicazione che passi attraverso i vari strati gerarchici fino allo staff tecnico, che deve vedere l'entrata di nuovi professionisti della sostenibilità, come analisti e progettisti, fino agli operatori di linea, che devono essere formati e responsabilizzati in merito. Tale approccio deve sempre essere supportato da un continuo benchmarking sia all'interno dell'impresa, con una costante analisi dei processi e del loro impatto, ma anche all'esterno della stessa, tramite confronti con altre imprese e per mezzo di certificazioni ambientali e sociali.

Quindi, si può concludere che la Sostenibilità a livello industriale abbia una buona base teorica in tutti i suoi punti, da quello strategico a quello indicatoriale, disponendo anche di un solido contesto alla base, sia a livello tecnico (Industriale 4.0) che sociale (Economia Circolare). Per una sua effettiva implementazione, che come mostrato in più articoli comporterebbe diversi vantaggi per la società ma anche per le imprese stesse, vi è però la necessità di un approccio olistico, che coinvolga non solo le singole imprese ed i suoi gestori e dipendenti, ma anche tutta la sua catena del valore e tutti gli attori attorno ad essa. In particolare, vi è la necessità di maggiore formazione ed educazione dei futuri manager e tecnici, dei cittadini in quanto domanda, ma anche di un deciso intervento statale o sovrastatale che guidi le imprese nell'interesse comune.

Per troppo tempo la "tragedia dei *commons*" ha mostrato come l'interesse dei singoli, insito nell'umanità, porti allo sfruttamento del nostro pianeta, all'insegna di un continuo progresso e di

un'avidità che attualmente non è più accettabile. Se è vero che il "Climate Clock" indichi che abbiamo poco meno di sette anni per interrompere questo trend catastrofico per riconciliarci col nostro ecosistema, c'è bisogno dell'impegno di ogni singolo attore, dal consumatore alla multinazionale, dall'accademico al politico, per risolvere questa situazione e salvare l'umanità dalla più grande minaccia alla sua sopravvivenza.

In tale scenario, questa tesi vuole sostenere il fatto che ogni impresa di ogni settore debba dare il proprio contributo in merito, così da generare una cultura della sostenibilità condivisa coi propri fornitori e con quelli di beni complementari (e.g. auto elettriche ed energie rinnovabili). Questo elaborato, inoltre, si prefigge di fornire un'analisi ed una descrizione della letteratura sulla sostenibilità industriale per presentare e discutere l'argomento, così da fornire una base attorno a cui approfondire la discussione sia a livello accademico che pratico.

## 6. Ringraziamenti

Innanzitutto, ci tengo a ringraziare il **Prof. Galetto** per aver accettato di essere il relatore di questa tesi e di aver creduto in questo progetto, seppur inconsueto per i suoi standard, nonché di avergli dato una forma più accademica e strutturata permettendo di renderla ciò che è. A ciò si deve aggiungere un grande ringraziamento ad **Elisa Verna** per la sua immensa pazienza e disponibilità nella correzione delle bozze dei capitoli, oltre che per la competenza e la celerità con cui ha saputo indirizzarmi nella scrittura di questa tesi e dell'articolo da essa derivato.

Poi, ci tengo a ringraziare tutti i miei familiari, a partire dai miei genitori **Elisabetta e Luigi** per avermi supportato nelle mie scelte universitarie e di vita e mia sorella **Cecilia** per la sua disponibilità e presenza. A loro aggiungo i miei **nonni** Donato e Nella, **zii** Fabio, Lella, Roberto, Serena, Sergio, i miei **cugini** Alessio, Paola e Umberto, **Nicola e Sandra**. Ulteriori ringraziamenti vanno a **Tiziana, Marco e Beppe** per l'accoglienza e per l'opportunità datami, oltre che Michele e soprattutto **Resy** per il supporto in questi anni e per avermi sempre accolto in casa sua.

Successivamente, voglio ringraziare di cuore tutti i miei **amici di Genova**, tra cui tengo a ricordare Andre, Arma, Anto, Chiara, Cut, Dani, Fede L. e O., Giorgia, Jack, Michi, Macca, Max, Passa, Paul e Sem, per avermi reso più leggero il periodo passato a Genova e per tutte le esperienze, compleanni, fantacalcio, giri e partite. Oltre che a Matteo per gli insegnamenti trasmessimi di questi mesi. A questi si aggiungono i miei **amici di Torino**, con cui sono riuscito a mantenere un rapporto in questi anni, a partire da Carlo Alberto ed Alarico, Paolo, Giulio, Elisa ed Andrea, Francesco, Sara, Alessandra, Tommaso, Edoardo. Nonché tutti i miei **colleghi universitari**, compagni di progetti, esami e lezioni, oltre che di momenti di condivisione e uscite assieme, ossia Alberto, Alessia, Andrea, Chiara, Dalia, Elena, Fabio, Federico, Francesca, Francesco, Giorgia, Giulia, Halima, Luca, Lorenzo, Maurizia, Roberta, Valentina P. e L., Vincenzo.

Infine, ci tengo a ringraziare come sempre **la mia ragazza Giulia** per essere sempre stata al mio fianco in questi anni universitari, per avermi supportato nei momenti più brutti e per esserci stata in quelli più belli, per aver reso tutto ciò un po' più colorato, oltre che per avermi aiutato nello studio e nella vita di tutti i giorni. Grazie a lei tutto questo è stato possibile, o quantomeno più agevole, e quindi non posso far altro che ringraziarla come e più di tutti gli altri.

Grazie a tutti voi che avete reso questo percorso universitario possibile, per aver arricchito la mia vita ed aver reso questo periodo un percorso di crescita personale e professionale.

## 7. Appendice

In questa appendice viene presentata la tabella degli articoli analizzati nel corso della tesi, riportando per ognuno la numerazione progressiva necessaria nel diagramma in Figura 6.

Autori (anno)	Titolo	Categoria	Anno	Descrizione	Fonte	Autore	Co-autore	Co-autore	Co-autore	Citazioni	Nazione
[1] (Acerbi and Taisch, 2020)	A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector	Economia circolare	2020	Analisi bibliografica per studiare l'adozione di principi di EC per la creazione di strategie di produzione circolare	Journal of Cleaner Production	F. Acerbi	M. Taisch			0	Italia
[2] (Ageron et al., 2012)	Sustainable supply management: an empirical study	Green supply chain	2012	Analisi della integrazione della sostenibilità nella supply chain	International Journal of Production Economics	B. Ageron	A. Gunasekaran	A. Spalanzani		463	Francia
[3] (Agyabeng-Mensah et al., 2020)	Exploring financial performance and green logistics management practices: examining the mediating influences of market, environmental and social performances	Green supply chain	2020	Analisi della influenza delle pratiche di logistica green sulle performance ambientali, sociali, economiche e di mercato	Journal of Cleaner Production	Y. Agyabeng-Mensah	E. Afum	E. Ahenkorah		13	Cina
[4] (Ahmadi et al., 2020)	An integrated model for selecting suppliers on the basis of sustainability innovation	Green supply chain	2020	Proposta di un framework per valutare l'innovatività ambientale dei fornitori	Journal of Cleaner Production	H. Badri Ahmadi	H-W. Lo	H. Gupta	S. Kusi-Sarpong	150	Taiwan
[5] (Andersen, 2007)	An introductory note on the environmental economics of the circular economy	Economia circolare	2007	Presentazione dei principi fondamentali di economia ambientale rilevanti per una scienza della sostenibilità integrata	Sustainability Science	M.S. Andersen				244	Danimarca
[6] (Badurdeen and Jawahir, 2017)	Strategies for value creation through sustainable	Sustainable Manufacturing	2017	Presentazione delle capacità strategiche necessarie per creare valore e dei prodotti,	Global Conference on Sustainable Manufacturing	F. Badurdeen	I.S. Jawahir			24	USA

	manufacturing			processi e sistemi da esse derivanti							
[7] (Beier et al., 2020)	Industry 4.0: How it's defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes	Industria 4.0	2020	Definizione dell'Industria 4.0 da una prospettiva socio-tecnica e valutazione della sua sostenibilità	Journal of Cleaner Production	G. Beier	A. Ullrich	S. Niehoff	M. Reissig	29	Germania
[8] (Bhatt et al., 2020)	Sustainable manufacturing, bibliometrics and content analysis	Sustainable Manufacturing	2020	Analisi bibliometrica e dei contenuti della letteratura sul sust.manuf.	Journal of Cleaner Production	Y. Bhatt	K. Ghuman	A. Dhir		10	Finlandia
[9] (Bocken et al., 2016)	Product design and business model strategies for a circular economy	Economia circolare	2016	Sviluppo di un framework di strategie per guidare progettisti e strateghi nella transizione da economia lineare a circolare	Journal of Industrial and Production Engineering	N.M.P. Bocken	I. de Pauw	C. Bakker	B. van der Grinten	470	Olanda
[10] (Bonilla et al., 2018)	Industry 4.0 and sustainability implications: a scenario-based analysis of the impacts and challenges	Industria 4.0	2018	Analisi basata sulla letteratura per discutere l'impatto sulla sostenibilità e le sfide della Industria 4.0 in 4 diversi scenari	Sustainability	S. Bonilla	H. R. O. Silva	M. T. da Silva	R. F. Goncalves	89	Brasile
[11] (Le Bourhis et al., 2013)	Sustainable manufacturing: evaluation and modelling of environmental impacts in additive manufacturing	Tecnologie	2013	Proposta di una metodologia per valutare l'impatto ambientale dell'add.manuf. considerando tutti i flussi di risorse, da integrare nella progettazione delle parti da stampare	International Journal of Advanced Manufacturing Technologies	F. Le Bourhis	O. Kerbrat	J.-Y. Hascoet	P. Mognol	131	Francia
[12] (Brambila-Macias and Sakao, 2021)	Effective ecodesign implementation with the support of a lifecycle engineer	Sviluppo prodotto	2020	Proposta della figura del "lifecycle engineer" come guida di un'organizzazione nel processo di eco-design	Journal of Cleaner Production	S.A. Brambila-Macias	T. Sakao			1	Svezia
[13] (Buisse and Verbeke, 2003)	Proactive environmental strategies: a stakeholder management perspective	Strategie	2003	Analisi empirica dei collegamenti tra le strategie ambientali e la gestione degli stakeholder	Strategic Management Journal	K. Buisse	A. Verbeke			1008	Belgio
[14]	Sustainability	Indicatori	2020	Proposta di un	Renewable	W. Cai	K. Lai			0	Hong Kong

(Cai and Lai, 2021)	assessment of mechanical manufacturing systems in the industrial sector			approccio di valutazione e comparazione della sostenibilità della produzione	and Sustainable Energy Reviews						
[15] (Calderon-Monge et al., 2020)	Analysis of sustainable consumer behaviour as a business opportunity	Persone	2020	Analisi su come i clienti incorporino tematiche di sostenibilità nei loro comportamenti di acquisto	Journal of Business Research	E. Calderon-Monge	I. Pastor-Sanz	F.J. Sendra Garcia		0	Spagna
[16] (Chan et al., 2017)	Management of sustainable manufacturing systems	Sustainable Manufacturing	2016	Classificazione dei problemi matematici collegati alla gestione del sust. manuf.	International Journal of Production Research	F.T.S. Chan	N. Li	S.H. Chung	M. Saadat	43	Hong Kong
[17] (Chen, 2001)	Design for the environment: a quality-based model for green product development	Sviluppo prodotto	2001	Proposta di un modello per analizzare le problematiche strategiche e politiche di sviluppo prodotto green	Management Science	C. Chen				339	Canada
[18] (Chen et al., 2015)	Direct digital manufacturing: definition, evolution and sustainability implications	Tecnologie	2015	Presentazione delle origini, stato dell'arte, vantaggi, sfide e futuri sviluppi del "direct digital manufacturing"	Journal of Cleaner Production	D. Chen	S. Heyer	S. Ibbotson	K. Salonitis	165	Svezia
[19] (Chen et al., 2004)	Strategic purchasing, supply management and firm performance	Green supply chain	2004	Esame della relazione tra approvvigionamento, gestione delle forniture e performance	Journal of Operations Management	I. Chen	A. Paulraj	A. Lado		504	USA
[20] (Cherrafi et al., 2016)	The integration of lean manufacturing, Six Sigma and sustainability: a literature review and future research directions for developing a specific model	Strategie	2016	Rassegna della letteratura sull'integrazione dei tre sistemi di gestione, con analisi dei gap e spunti di ricerca	Journal of Cleaner Production	A. Cherrafi	S. Elefezazi	A. Chiarini	A. Mokhlis	163	Marocco
[21] (Chin et al., 2015)	Green supply chain management, environmental	Green supply chain	2015	Rassegna della letteratura sulle relazioni tra GSC, collaborazione lungo	Global Conference on Sustainable Manufacturing	T. Ai Chin	H. Hon Tat	Z. Sulaiman		130	Malesia

	collaboration and sustainability performance			la SC e performance ambientali							
[22] (Choi, 2013)	Local sourcing and fashion quick response system: the impacts of carbon footprint tax	Politiche	2013	Analisi dell'influenza della carbon tax sulla scelta ottimale di allocazione produttiva e ne aumenti la sostenibilità	Transportation Research	T. Choi				131	Hong Kong
[23] (D'Amato et al., 2017)	Green, circular, bio economy: a comparative analysis of sustainability avenues	Economia circolare	2017	Analisi bibliografica per analizzare le differenze tra economia verde, circolare e bio	Journal of Cleaner Production	D. D'Amato	N. Droste	B. Allen	M. Kettunen	178	Finlandia
[24] (Dagiliene et al., 2020)	Wise managers think about circular economy, wiser report and analyze it, research of environmental reporting practices in EU manufacturing companies	Politiche	2020	Analisi dell'influenza delle pressioni istituzionali sulla reportistica ambientale in ambito EC	Journal of Cleaner Production	L. Dagiliene	M. Frenzel	K. Sutiene	T. Wnuk-Pel	0	Lituania
[25] (Dangelico and Pujari, 2010)	Mainstreaming Green Product Innovation: why and how companies integrate environmental sustainability	Sviluppo prodotto	2010	Analisi delle dimensioni, motivazioni, sfide e finalità della innovazione di prodotto green	Journal of Business Ethics	R.M. Dangelico	D. Pujari			457	Italia
[26] (Dantas et al., 2020)	How the combination of circular economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals	Economia circolare	2020	Analisi bibliografica per identificare come la combinazione di pratiche di EC e tecnologie 4.0 possa contribuire al raggiungimento dei SDG	Sustainable Production and Consumption	T.E.T. Dantas	E.D. de-Souza	I.R. Destro	G. Hammes	0	Brasile
[27] (Dekker et al., 2012)	Operations Research for green logistics	Green supply chain	2012	Presentazione degli spunti presenti e degli sviluppi futuri in ottica logistica green	European Journal of Operational Research	R. Dekker	J. Bloemhof	I. Mallidis		459	Olanda
[28]	The impact of big	Tecnologie	2015	Analisi bibliografica	International	R. War Dubey	A.	S.J. Childe	S.F. Wamba	152	India

(Dubey et al., 2016)	data on world-class sustainable manufacturing (WCSM)			per identificare i fattori di sviluppo del WCSM e prospettive future	Journal of Advanced Manufacturing Technologies		Gunasekaran				
[29] (Durán-Romero et al., 2020)	Bridging the gap between circular economy and climate change mitigation policies through eco-innovations and quintuple helix model	Politiche	2020	Analisi degli elementi chiave del "Quintuple Helix Model" che contribuiscono alla eco-innovazione dell'EC	Technological Forecasting & Social Change	G. Duran-Romero	A.M. Lopez	T. Beliaeva	M. Ferasso	0	Spagna
[30] (Dwyer et al., 2009)	Why and how to adopt green management into business organizations	Strategie	2009	Analisi del processo di adozione di strategie di gestione green in PMI	Management Decision	R. Dwyer	D. Lamond	K. Lee		172	Germania
[31] (Elia et al., 2020)	Evaluating the adoption of circular economy practices in industrial supply chains: an empirical analysis	Economia circolare	2020	Analisi della relazione tra il livello di integrazione verticale della supply chain e le strategie di EC adottate	Journal of Cleaner Production	V. Elia	M.G. Gnoni	F. Tornese		0	Italia
[32] (Eltayeb et al., 2011)	Green supply chain initiatives among certified companies in Malaysia and environmental sustainability	Green supply chain	2011	Valutazione dei risultati ambientali, economici e intangibili della adozione di una GSC	Resources, Conservation and Recycling	T. Eltayeb	S.Zailani	T. Ramayah		368	Malesia
[33] (Esmacilian et al., 2016)	The evolution and future of manufacturing	Sustainable Manufacturing	2016	Survey sulla evoluzione del manufacturing in letteratura	Journal of Manufacturing Systems	B. Esmacilian	S. Behdad	B. Wang		246	USA
[34] (Esmacilian et al., 2020)	Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0	Tecnologie	2020	Analisi dell'utilità di Blockchain e Industria 4.0 per l'implementazione della GSC	Resources, Conservation and Recycling	B. Esmacilian	J. Sarkis	K. Lewis	S. Behdad	1	USA
[35] (Faheem et al., 2018)	Smart grid communication and information technologies in the perspective of Industry 4.0: opportunities and challenges	Tecnologie	2018	Rassegna sulle applicazioni delle smart grid, benefici, requisiti e caratteristiche, le principali sfide e le direzioni di ricerca	Computer Science Review	M. Faheem	S.B.H. Shah	R.A. Butt	B Raza	58	Malesia

[36] (Faulkner and Badurdeen, 2014)	Sustainable Value Stream Mapping: methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance	Indicatori	2014	Proposta di una metodologia per sviluppare una "Sustainable Value Stream Mapping" identificandone le metriche ed i metodi	Journal of Cleaner Production	W. Faulkner	F. Badurdeen			180	USA
[37] (Ford and Despeisse, 2016)	Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges	Tecnologie	2016	Analisi delle implicazioni dell'add.manuf. sulla sostenibilità della produzione, dei vantaggi e delle sfide	Journal of Cleaner Production	S. Ford	M. Despeisse			415	UK
[38] (Franciosi et al., 2020)	Measuring maintenance impacts on sustainability of manufacturing industries: from a systematic literature review to a framework proposal	Strategie	2020	Analisi bibliografica per analizzare l'impatto della manutenzione sulla sostenibilità produttiva ed identificarne gli indicatori	Journal of Cleaner Production	C. Franciosi	A. Voisin	S. Miranda	S. Riemma	7	Italia
[39] (Garetti and Taisch, 2012)	Sustainable manufacturing: trends and research challenges	Sustainable Manufacturing	2012	Analizzare l'impatto della sostenibilità in ambito produttivo, i trend e le barriere	Production Planning and Control	M. Garetti	M. Taisch			391	Italia
[40] (Gebler et al., 2014)	A global sustainability perspective on 3D printing technologies	Tecnologie	2014	Analisi delle implicazioni dell'add.manuf. sulla sostenibilità e quantificazione delle differenze di costi, consumo energetico ed emissioni nel ciclo di vita	Energy Policy	M. Gebler	A.J.M. Uiterkamp	C. Visser		298	Olanda
[41] (Geissdoerfer et al., 2018)	Business models and supply chains for the circular economy	Economia circolare	2018	Analisi delle performance ambientali di business model e supply chain all'interno dell'EC	Journal of Cleaner Production	M. Geissdoerfer	S.N. Morioka	M.M. de Carvalho	S. Evans	135	UK
[42] (Geissdoerfer et al., 2017)	The circular economy, a new sustainability paradigm?	Economia circolare	2017	Ricerca bibliometrica per evidenziare differenze e relazioni tra econ.circ. e sostenibilità	Journal of Cleaner Production	M. Geissdoerfer	P. Savaget	N.M.P. Bocken	E.J. Hultink	925	UK

[43] (Genovese et al., 2017)	Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: evidence and some applications	Economia circolare	2017	Confronto delle performance di sistemi produttivi tradizionali e circolari, presentando le sfide legate alla gestione della supply chain e le dinamiche di mercato	Omega	A. Genovese	A.A. Acquaye	A. Figueroa	S.C. Lenny Koh	292	UK
[44] (Ghisellini et al., 2016)	A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems	Economia circolare	2016	Analisi bibliografica per illustrare le principali caratteristiche, origini, pro e contro, modelli e implementazione dell'EC sui diversi livelli	Journal of Cleaner Production	P. Ghisellini	C. Cialani	S. Ulgiati		1103	Italia
[45] (Giannakis and Papadopoulos, 2016)	Supply chain sustainability: a risk management approach	Green supply chain	2016	Identificazione e analisi dei principali rischi collegati alla sostenibilità in una GSC e proposta di strategie di gestione	International Journal of Production Economics	M. Giannakis	T. Papadopoulos			207	Francia
[46] (Godina et al., 2020)	Impact assessment of additive manufacturing on sustainable business models in industry 4.0 context	Tecnologie	2020	Proposta di un framework per l'analisi degli impatti economici, sociali ed ambientali dell'add.manuf. sui modelli di business 4.0	Sustainability	R. Godina	I. Riberio	F. Matos	B.T. Ferreira	1	Portogallo
[47] (Govindan and Hasanagic, 2018)	A systematic review on drivers, barriers and practices towards circular economy: a supply chain perspective	Economia circolare	2018	Analisi delle barriere e dei driver che influenzano la diffusione dell'EC nella supply chain	International Journal of Production Research	K. Govindan	M. Hasanagic			134	Danimarca
[48] (Green et al., 2012)	Green supply chain management practices: impact on performance	Green supply chain	2012	Analisi dell'impatto ambientale ed economico della adozione di pratiche di GSC	Supply chain Management, An International Journal	K. W. Green Jr	P. Zelbst	J. Meacham	V. S. Bhadauria	575	USA
[49] (Gregson et al., 2015)	Interrogating the circular economy: the moral economy of resource recovery in the EU	Economia circolare	2015	Presentazione dei rischi e sfide principali nell'UE in ottica EC	Economy and Society	N. Gregson	M. Crang	S. Fuller	H. Holmes	192	UK

[50] (Guerra-Zubiaga et al., 2015)	Tacit knowledge reuse in a next generation sustainable manufacturing process	Strategie	2015	Proposta di un approccio sulla creazione della conoscenza tacita e suo utilizzo per il sust.manuf.	International Mechanical Engineering Congress and Exposition	D.A. Guerra-Zubiaga	D. Heiling	O. Onadipe		2	USA
[51] (Gunasekaran and Spalanzani, 2012)	Sustainability of manufacturing and services: investigations for research and applications	Sustainable Manufacturing	2011	Rassegna della letteratura sullo sviluppo sostenibile del business (SBD)	International Journal of Production Economics	A. Gunasekaran	A. Spalanzani			335	USA
[52] (Gupta et al., 2020)	Barriers and overcoming strategies to supply chain sustainability innovation	Green supply chain	2020	Analisi delle barriere all'adozione di una GSC e proposta di strategie per il loro superamento	Resources, Conservation and Recycling	H. Gupta	S. Kusi-Sarpong	J. Rezaei		3	India
[53] (Harikannan et al., 2020)	Sustainable industry 4.0: an exploratory study for uncovering the drivers for integration	Industria 4.0	2020	Identificazione ed analisi dei driver principali della integrazione tra Industria 4.0 e sostenibilità	Journal of Modelling in Management	N. Harikannan	S. Vinodh	A. Gurumurthy		0	India
[54] (Harris et al., 2020)	Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy	Economia circolare	2020	Esame degli indicatori e dei metodi di valutazione ambientale della circolarità dei beni a livello di prodotto, settore e nazione	Sustainable Production and Consumption	S. Harris	M. Martin	D. Diener		0	Svezia
[55] (Haszeldine, 2009)	Carbon Capture and Storage: how green can black be?	Tecnologie	2009	Analisi delle barriere tecnologiche, regolatorie ed economiche per la commercializzazione di tecnologie CCS	Science	R.S. Haszeldine				1266	Scozia
[56] (Den Hollander et al., 2017)	Product design in a circular economy	Sviluppo prodotto	2017	Confronto dei principi guida, metodi e strategie progettuali della progettazione in ottica EC e dell'eco-design, con lo sviluppo di un set di nuovi concetti e definizioni	Journal of Industrial Ecology	M.C. den Hollander	C.A. Bakker	E.J. Hultink		122	Olanda
[57] (Hon, 2005)	Performance and Evaluation of	Indicatori	2005	Analisi bibliografica della misurazione	CIRP Annals - Manufacturing	K.K.B. Hon				154	UK

	Manufacturing Systems			delle performance produttive su più livelli	Technology						
[58] (Huang et al., 2013)	Additive manufacturing and its societal impact: a literature review	Tecnologie	2012	Analisi dell'impatto sociale, ambientale ed efficienza della supply chain dell'add.manuf.	International Journal of Advanced Manufacturing Technologies	S.H. Huang	P. Liu	A. Mokasdar	L. Hou	757	Cina
[59] (Ibrahim et al., 2019)	Education of sustainable manufacturing in curriculums: evidences from Iraqi colleges	Persone	2019	Analisi della diffusione di conoscenze di sust.manuf. nei curricula e della loro importanza	Conference on Sustainable Engineering Techniques	Y.M. Ibrahim	S.S. Abdulameer	N. Hami	N.A. Yaacob	0	Malesia
[60] (Jakhar et al., 2020)	Stakeholder pressure for sustainability: can innovative capabilities explain the idiosyncratic response in the manufacturing firms?	Persone	2020	Analisi del ruolo delle capacità innovative nel determinare la risposta di un'impresa alle pressioni degli stakeholders nella adozione di pratiche sostenibili	Business Strategy and the Environment	S.K. Jakhar	A. Bhattacharya	H. Rathore	S.K. Mangla	0	India
[61] (Jansson et al., 2010)	Green consumer behaviour: determinants of curtailment and eco-innovation adoption	Persone	2010	Analisi delle determinanti di comportamenti green ed adozione di eco-innovazioni da parte dei clienti	Journal of Consumer Marketing	J. Jansson	A. Marell	A. Nordlund		242	Svezia
[62] (Jayal et al., 2010)	Sustainable manufacturing: Modelling and optimization challenges at the product, process and system levels	Sustainable Manufacturing	2010	Rassegna dei trend e dei nuovi concetti di prodotti, processi e sistemi sostenibili	Journal of Manufacturing Science and Technology	A.D. Jayal	F. Badurdeen	O.W. Dillon	L.S. Jawahir	501	USA
[63] (Jena et al., 2020)	Application of Industry 4.0 to enhance sustainable manufacturing	Industria 4.0	2019	Presentazione di un modello di fabbrica smart che ottimizzi l'uso di risorse ed elimini gli scarti in ottica sust. manuf.	Environmental Progress & Sustainable Energy	M. C. Jena	S. K. Mishra	H. S. Moharana		9	India
[64] (Jiao et al., 2020)	What factors determine in the survival of green innovative enterprises in China? A method based on fsQCA	Strategie	2020	Analisi dei meccanismi ed elementi chiave che determinano la sopravvivenza di PMI green	Technology in Society	J. Jiao	X. Zhang	Y. Tang		0	Cina
[65]	Categorization of	Indicatori	2012	Categorizzazione	Ecological	C.B. Joung	J. Carrell	P. Sarkar	S.C. Feng	257	USA

(Joung et al., 2013)	indicators for sustainable manufacturing			degli indicatori di sostenibilità produttiva per creare un set univoco	Indicators						
[66] (Kaebernick et al., 2003)	Sustainable product development and manufacturing by considering environmental requirements	Sviluppo prodotto	2003	Descrizione di 4 metodologie e strumenti per un paradigma di sviluppo prodotto basato sul sust. manuf.	Robotics and Computer Integrated Manufacturing	H. Kaebernick	S. Kara	M. Sun		170	Australia
[67] (Kalmykova et al., 2018)	Circular economy, from review of theories and practices to development of implementation tools	Economia circolare	2018	Analisi dei diversi approcci e principi sottostanti, verso l'EC per sviluppare strumenti per la sua implementazione	Resources, Conservation and Recycling	Y. Kalmykova	M. Sadagopan	L. Rosaldo		211	Svezia
[68] (Kamble et al., 2018)	Sustainable Industry 4.0 framework: a systematic literature review identifying the current trends and future perspectives	Industria 4.0	2018	Analisi bibliografica sul tema dell'Industria 4.0 sostenibile, con analisi dei trend e delle prospettive future	Process Safety and Environmental Protection	S. Kamble	A. Gunasekaran	S. A. Gawankar		173	India
[69] (Kleindorfer et al., 2005)	Sustainable operations management	Strategie	2005	Analisi delle tematiche di sostenibilità nelle operations con spunti di ricerche future	Production and Operations Management	P.R. Kleindorfer	K. Singhal	L.N. van Wassenhove		977	USA
[70] (Korhonen et al., 2018)	Circular economy as an essentially contested concept	Economia circolare	2018	Proposta di un modello per la ricerca in ambito EC che aiuti la categorizzazione, classificazione ed organizzazione della ricerca	Journal of Cleaner Production	J. Korhonen	C. Nuur	A. Feldmann	S.E. Birkie	172	Svezia
[71] (Kristoffersen et al., 2020)	The smart circular economy: a digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies	Economia circolare	2020	Creazione dello "Smart CE framework" per supportare le strategie produttive di EC nel raggiungimento del XXII SDG	Journal of Business Research	E. Kristoffersen	F. Blomsma	P. Mikalef	J. Li	0	Norvegia
[72]	Green lean operationalisation	Strategie	2020	Illustrazione dei benefici a livello	Journal of Cleaner	M. Kurdve	M. Bellgran			1	Svezia

(Kurdve and Bellgran, 2021)	of the circular economy concept on production shop floor level			operativo dell'adozione di strumenti come la Green Performance Map	Production						
[73] (Kusiak, 2018)	Smart manufacturing	Industria 4.0	2018	Presentazione delle origini, stato dell'arte e futuri sviluppi del manuf. con focus sulla Industria 4.0	International Journal of Production Research	A. Kusiak				235	USA
[74] (Labuschagne and Brent, 2005)	Sustainable project life-cycle management: the need to integrate life cycles in the manufacturing sector	Sviluppo prodotto	2004	Proposta di integrazione delle metodologie di project management e principi di sviluppo sostenibile considerando i cicli di vita dei progetti	International Journal of Project Management	C. Labuschagne	A.C. Brent			170	Sud Africa
[75] (Labuschagne et al., 2005)	Assessing the sustainability performances of industries	Indicatori	2005	Proposta di un nuovo framework per la valutazione della sostenibilità nelle operations, che consideri anche criteri sociali	Journal of Cleaner Production	C. Labuschagne	A.C. Brent	R.P.G. van Erck		534	Sud Africa
[76] (Leng et al., 2020)	Blockchain-empowered sustainable manufacturing and product lifecycle management in Industry 4.0: a survey	Tecnologie	2020	Analisi dell'utilità delle Blockchain per la sostenibilità dalla prospettiva del sistema produttivo e della gestione del ciclo di vita	Renewable and Sustainable Energy Reviews	J. Leng	G. Ruan	P. Jiang	K. Xu	2	Cina
[77] (Leong et al., 2020)	Enhancing the adaptability: lean and green strategy towards the Industry Revolution 4.0	Strategie	2020	Proposta di un modello adattativo per l'implementazione di strategie lean&green per risolvere problemi di dinamiche di settore associati all'Industria 4.0	Journal of Cleaner Production	W. Dong Leong	S. Yong Teng	B. Shen How	S. Lin Ngan	0	UK
[78] (Leung et al., 2014)	An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies	Tecnologie	2014	Presentazione dello stato dell'arte della tecnologia CCS	Renewable and Sustainable Energy Reviews	D. Leung	G. Caramanna	M. Maroto-Valer		1169	Hong Kong
[79]	Towards circular	Economia circolare	2016	Rassegna delle	Journal of	M. Lieder	A. Rashid			560	Svezia

(Lieder and Rashid, 2016)	economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry			ricerche per comprendere gli ambiti rilevanti dell'EC, motivazioni e contesti della ricerca	Cleaner Production						
[80] (Liu et al., 2020)	New technologies in operations and supply chains, implications for sustainability	Green supply chain	2020	Presentazione delle nuove tecnologie nelle operations e nella SC e del loro impatto sulla sostenibilità	International Journal of Production Economics	Y. Liu	Q. Zhu	S. Seuring		1	UK
[81] (Lu et al., 2007)	Environmental principles applicable to green supplier evaluation by using multi-objective decision analysis	Green supply chain	2007	Presentazione di un metodo di valutazione delle performance dei fornitori in una GSC	International Journal of Production Research	L. Lu	C.H. Wu	T.-C. Kuo		255	Taiwan
[82] (Macchi et al., 2020)	Analysing the support of sustainability within the manufacturing strategy through multiple perspectives of different business functions	Strategie	2020	Proposta di una metodologia per valutare le strategie di sust.manuf. In diversi contesti e i ruoli delle singole funzioni aziendali	Journal of Cleaner Production	M. Macchi	M. Savino	I. Roda		1	Italia
[83] (Mangla et al., 2015)	Risk analysis in green supply chain using fuzzy AHP approach: a case study	Green supply chain	2015	Analisi dei rischi rilevanti nell'adozione ed implementazione di una GSC	Resources, Conservation and Recycling	S. Kumar Mangla	P. Kumar	M. Kumar Barua		203	India
[84] (McDowall et al., 2017)	Circular economy policies in China and Europe	Economia circolare	2017	Analisi dei diversi atteggiamenti politici ed indicatori in Cina ed UE verso la EC tramite documenti, articoli e pubblicazioni	Journal of Industrial Ecology	W. McDowall	Y. Geng	B. Huang	E. Bartekova	133	UK
[85] (Mian et al., 2020)	Adapting universities for sustainability education in Industry 4.0: channel of challenges and opportunities	Persone	2020	Analisi dei fattori che influenzano l'adozione e la diffusione di tematiche di educazione sostenibile nelle università	Sustainability	S.H. Mian	B. Salah	W. Ameen	K. Moiduddin	2	KSA
[86]	Model-based	Indicatori	2016	Proposta di un	Conference on	A. Moldavska				12	Norvegia

(Moldavska, 2016)	sustainability assessment, an enabler for transition to sustainable manufacturing			modello di valutazione della sostenibilità come facilitatore della transizione verso il sust.manuf.	Life Cycle Engineering						
[87] (Müller et al., 2018)	What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability	Industria 4.0	2018	Esame della rilevanza di opportunità e barriere collegate all'Industria 4.0 come drivers per la sua implementazione in ottica sostenibilità	Sustainability	J. M. Muller	D. Kiel	K.-I. Voigt		172	Germania
[88] (Murray et al., 2017)	The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context	Economia circolare	2017	Presentazione dei concetti chiave dell'EC e sua operazionalizzazione in politica e business, con proposta di una nuova definizione	Journal of Business Ethics	A. Murray	K. Skene	K. Haynes		459	UK
[89] (Murugesan, 2008)	Harnessing Green IT: principles and practices	Tecnologie	2008	Proposta di un approccio per una transizione green dell'IT e di strategie aziendali per minimizzare l'impatto ambientale	IEEE Computer Society	S. Murugesan				567	Malesia
[90] (Nascimento et al., 2019)	Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context	Industria 4.0	2018	Esplorazione della integrazione di tecnologie 4.0 e pratiche di economia circolare per la creazione di nuovi modelli di business	Journal of Manufacturing Technology Management	D. L. M. Nascimento	V. Alencastro	O. L. G. Quelhas	R. G. G. Caiado	72	Brasile
[91] (Nidumolu et al., 2009)	Why sustainability is now the key driver of innovation	Sustainable Manufacturing	2009	Elencazione dei step e sfide per il sust.manuf. e loro risoluzione	Harvard Business Review	R. Nidumolu	C.K. Prahalad	M.R. Rangaswami		901	USA
[92] (Noci, 1997)	Designing green vendor rating systems for the assessment of a supplier's environmental performance	Green supply chain	1997	Progettazione di un modello per selezionare i fornitori in base alla loro sostenibilità	European Journal of Purchasing & Supply Management	G. Noci				289	Italia
[93] (Nujoom et	The multi-objective	Sustainable Manufacturing	2016	Sviluppo di un modello per la	International Conference on	R. Nujoom	A. Mohammed	Q. Wang	N. Bennett	5	UK

al., 2016)	optimization model for sustainable manufacturing system design			progettazione di un sistema produttivo, che incorpori vincoli economici ed ecologici	Renewable Energy Research and application						
[94] (O'Rourke, 2014)	The science of sustainable supply chains	Green supply chain	2014	Presentazione dello stato dell'arte della misurazione ed analisi della sostenibilità della SC	Science	D. O'Rourke				143	USA
[95] (Pathak et al., 2020)	Performance obstacles in sustainable manufacturing	Sustainable Manufacturing	2020	Identificazione degli ostacoli principali nella realizzazione del sust.manuf. e proposta di un modello strutturale	Journal of Advances in Management Research	P. Pathak	M. P. Singh	G. K. Badhotiya		0	India
[96] (Peattie and Crane, 2005)	Green marketing: legend, myth, farce or prophesy?	Strategie	2005	Analisi bibliografica su teorie e pratica del marketing e suo apporto alla sostenibilità della produzione	Qualitative Market Research: an international journal	K. Peattie	A. Crane			294	UK
[97] (Pickett-Baker and Ozaki, 2008)	Pro-environmental products: marketing influence on consumer purchase decision	Sviluppo prodotto	2008	Analisi dell'efficacia del marketing e branding nell'introduzione di nuovi prodotti e tipologie di consumi	Journal of Consumer Marketing	J. Pickett-Baker	R. Ozaki			440	UK
[98] (Prieto-Sandoval et al., 2018)	Towards a consensus on the circular economy	Economia circolare	2018	Analisi letteraria per proporre una visione delle nozioni base dell' EC e presentarne la relazione con l'eco-innovazione	Journal of Cleaner Production	V. Prieto-Sandoval	C. Jaca	M. Ormazabal		147	Spagna
[99] (Pujari, 2006)	Eco-innovation and new product development: understanding the influences on market performance	Sviluppo prodotto	2006	Analisi dell'impatto di iniziative di eco-innovazione in progetti di sviluppo di prodotti green sulle performance di mercato	Technovation	D. Pujari				342	Canada
[100] (Ragauskas et al., 2006)	The path forward for biofuels and biomaterials	Tecnologie	2006	Proposta di una roadmap per la transizione da risorse carboniose non rinnovabili a biorisorse	Science	A.J. Ragauskas	C.K. Williams	B.H. Davidson	G.Britovsek	4090	USA
[101] (Ramani et	Integrated sustainable	Sviluppo prodotto	2010	Proposta di un framework per la	Journal of Mechanical	K. Ramani	D. Ramanujan	W.Z. Bernstein	F. Zhao	280	USA

al., 2010)	lifecycle design: a review			ricerca tramite l'unione dei metodi progettuali tradizionali e teorie di sostenibilità	Design						
[102] (Rasmussen, 2020)	The role of structural context in making business sense of investments for sustainability, a case study	Politiche	2020	Analisi del contesto strutturale del processo di investimento in eco-innovazione	Sustainability	J. Rasmussen				0	Svezia
[103] (Roblek et al., 2016)	A Complex View of Industry 4.0	Industria 4.0	2016	Rassegna della teoria e delle pratiche della Industria 4.0 e dei cambiamenti apportati da essa e dall'IoT	SAGE Open	V. Roblek	M. Mesko	A. Krapez		298	Slovenia
[104] (Rosen and Kishawy, 2012)	Sustainable manufacturing and design: concepts, practices and needs	Sustainable Manufacturing	2012	Valutazione dell'importanza della integrazione della sostenibilità nella produzione e nel design	Sustainability	M. A. Rosen	H. A. Kishawy			170	Canada
[105] (Roy et al., 2020)	Evaluating strategies for environmental sustainability in a supply chain of an emerging economy	Green supply chain	2020	Presentazione di una metodologia per la valutazione di strategie di sostenibilità ambientale in base al loro impatto sulla supply chain	Journal of Cleaner Production	S.Roy	M. Das	S. M. Ali	A. S. Raihan	5	Bangladesh
[106] (Ruben et al., 2018)	State of the art perspectives of lean and sustainable manufacturing	Sustainable Manufacturing	2017	Rassegna della letteratura sul lean and sustainable manufacturing	International Journal of Lean Six Sigma	R.B. Ruben	S. Vinodh	Asokan P.		5	India
[107] (Rusinko, 2007)	Green manufacturing: an evaluation of environmentally sustainable manufacturing practices and their impact on competitive outcome	Strategie	2007	Studio delle relazioni tra pratiche di produzione sostenibile e risultati a livello competitivo	IEEE Transactions on Engineering Management	C.A. Rusinko				226	USA
[108] (Sarkis, 2001)	Manufacturing's role in corporate environmental sustainability	Sustainable Manufacturing	1999	Elencazione dei temi strategici ed operativi della sostenibilità in	International Journal of Production Management	J. Sarkis				260	USA

				ambito manufacturing							
[109] (Sauvé et al., 2016)	Environmental sciences, sustainable development and circular economy: alternative concepts for trans-disciplinary research	Economia circolare	2016	Analisi dei problemi epistemologici e pratici associati alla ricerca transdisciplinare e delle opportunità e sfide associate ad essi	Environmental Development	S. Sauvé	S. Bernard	P. Sloan		230	Canada
[110] (Saxena et al., 2020)	Sustainability assessment for manufacturing operations	Indicatori	2020	Proposta di integrazione di metriche di sostenibilità e tradizionali per la scelta ottimale del processo	Energies	P. Saxena	P. Stavropoulos	J. Kechagias	K. Salonitis	6	UK
[111] (Schrettle et al., 2014)	Turning sustainability into action: explaining firms' sustainability efforts and their impact on firm performance	Strategie	2014	Proposta di un framework per spiegare le motivazioni delle scelte di sostenibilità e quali settori dell'impresa sono influenzate	International Journal of Production Economics	S. Schrettle	A. Hinz	M. Scherrer-Rathje	T. Friedli	162	Svizzera
[112] (Seuring et al., 2008)	Sustainability and supply chain management, an introduction to the special issue	Green supply chain	2008	Presentazione dei principali ambiti di ricerca e rassegna dei principali paper in ambito SC	Journal of Cleaner Production	S. Seuring	J. Sarkis	M. Muller	P. Rao	232	USA
[113] (Shankar et al., 2017)	Analyzing sustainable manufacturing practices: a case study in India	Sustainable Manufacturing	2017	Analisi ed identificazione di pratiche efficaci in ambito sust.manuf.	Journal of Cleaner Production	K. Madan Shankar	D. Kannan	P. Udhaya Kumar		31	Danimarca
[114] (Sharma et al., 2010)	Sustainability and business-to-business marketing: a framework	Strategie	2010	Proposta di un framework per identificare il ruolo del marketing B2B per raggiungere obiettivi di sostenibilità e vantaggio competitivo	Industrial Marketing Management	A. Sharma	G.R. Iyer	A. Mehrotra	R. Krishnan	170	USA
[115] (de Sousa Jabbour et al., 2018a)	Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of	Industria 4.0	2018	Analisi di una integrazione tra Industria 4.0 e sust.manuf. e dei suoi possibili fattori critici di successo	Technological Forecasting & Social Change	A. Jabbour	C. Jabbour	C. Foropon	M. G. Filho	140	Francia

	critical success factors										
[116] (de Sousa Jabbour et al., 2018b)	Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations	Industria 4.0	2018	Proposta di una roadmap che promuova l'applicazione dei principi di economia circolare per mezzo di approcci dell'Industria 4.0	Annals of Operations Research	A. Jabbour	C. Jabbour	M. Filho	D. Roubaud	150	Francia
[117] (Stock et al., 2018)	Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: a qualitative assessment of its ecological and social potential	Industria 4.0	2018	Valutazione della possibile creazione di valore sostenibile nell'Industria 4.0 e suo sfruttamento per uno sviluppo sostenibile	Process Safety and Environmental Protection	T. Stock	M. Obenaus	S. Kunz	H. Kohl	81	Germania
[118] (Stock and Seliger, 2016)	Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0	Industria 4.0	2016	Rassegna dello stato dell'arte dell'Industria 4.0 con una sintesi delle opportunità in tema sust.manuf.	Global Conference on Sustainable Manufacturing	T. Stock	G. Seliger			527	Germania
[119] (Tanaka, 2011)	Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector	Politiche	2011	Analisi delle politiche di efficientamento energetico, loro efficacia e connessione con azioni tecniche e stakeholders	Energy Policy	K. Tanaka				145	Giappone
[120] (Tao et al., 2018)	Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data	Sviluppo prodotto	2018	Proposta di un metodo di progettazione, produzione e servizi guidati dai corrispettivi digitali	International Journal of Advanced Manufacturing Technologies	F. Tao	J. Cheng	Q. Qi	M. Zhang	482	Cina
[121] (Tasdemir and Gazo, 2020)	Integrating sustainability into higher education curriculum through transdisciplinary perspective	Persone	2020	Sviluppo di un curriculum di studi che integri tecniche di gestione e sostenibilità per allineare gli interessi di università e mercato del lavoro	Journal of Cleaner Production	C. Tasdemir	R. Gazo			6	USA
[122] (Tasdemir et al., 2019)	Sustainability benchmarking tool: theoretical and conceptual model proposition	Indicatori	2020	Proposta di uno strumento per valutare e paragonare le performance di	Environment, Development and Sustainability	C. Tasdemir	R. Gazo	H.J. Quesada		2	USA

	of a composite framework			sostenibilità di organizzazioni e supply chains, tramite 33 KPI							
[123] (Tiwari and Khan, 2020)	Sustainability accounting and reporting in the industry 4.0	Strategie	2020	Presentazione delle corrispondenze tra gli attributi dell'Industria 4.0 e la Global Reporting Initiative	Journal of Cleaner Production	K. Tiwari	M.S. Khan			11	India
[124] (Tolio et al., 2010)	Co-evolution of products, processes and production systems	Sviluppo prodotto	2010	Analisi bibliografica sul tema della co-evoluzione dei sistemi produttivi	CIRP Annals - Manufacturing Technology	T. Tolio	D. Ceglarek	H.A. El Maraghy	A. Fischer	184	Italia
[125] (Tseng et al., 2018)	Circular economy meets Industry 4.0: can big data drive industrial symbiosis?	Industria 4.0	2018	Analisi del ruolo dei big data nella simbiosi tra settori per l'unione di economia circolare ed Industria 4.0	Resources, Conservation and Recycling	M.-L. Tseng	R. R. Tan	A. S.F. Chiu	C.-F. Chien	111	Taiwan
[126] (Ueda et al., 2009)	Value creation and decision-making in sustainable society	Strategie	2009	Discussione sulla creazione del valore nella società, considerando esternalità di rete, dilemmi sociali e sostenibilità	CIRP Annals - Manufacturing Technology	K. Ueda	T. Takenaka	J. Vancza	L. Monostori	133	Giappone
[127] (Vachon and Klassen, 2008)	Environmental management and manufacturing performance, the role of collaboration in the supply chain	Green supply chain	2008	Analisi dell'impatto di collaborazioni a livello ambientale lungo la supply chain sulle performance produttive	International Journal of Production Economics	S. Vachon	R.D. Klassen			920	Canada
[128] (Vargas-Berrones et al., 2020)	Can you have your cake and eat it? Investigating trade-offs in the implementation of green initiatives	Strategie	2019	Analisi dei possibili trade-off strategici e produttivi nella implementazione di iniziative green	Production Planning and Control	K.X. Vargas-Berrones	R. Sarmiento	G. Whelan		2	Messico
[129] (Waage, 2007)	Re-considering product design: a practical roadmap for integration of sustainability issues	Sviluppo prodotto	2007	Proposta di un framework per integrare prospettive di sostenibilità nelle decisioni di progettazione, produzione e logistica	Journal of Cleaner Production	S.A. Waage				141	USA
[130] (Waggoner)	A framework for sustainability	Indicatori	2002	Modifica all'IPAT per analizzare,	PNAS	P.E. Waggoner	J.H. Ausubel			229	USA

and Ausubel, 2002)	science: a renovated IPAT identity			progettare e gestire l'uso delle risorse produttive con minore impatto ambientale							
[131] (Wagner, 2005)	How to reconcile environmental and economic performance to improve corporate sustainability	Strategie	2005	Analisi delle relazioni tra performance economiche e ambientali e l'influenza delle strategie aziendali a livello di sostenibilità, con conseguenti implicazioni manageriali	Journal of Environmental Management	M. Wagner				207	Germania
[132] (Wan et al., 2015)	Industry 4.0: Enabling Technologies	Industria 4.0	2015	Rassegna dei concetti, tecnologie, vantaggi e interazioni con altri settori dell'Industria 4.0	ICIT	J. Wan	H. Cai	K. Zhou		88	Cina
[133] (Wang et al., 2020)	Assessing sustainability performance of global supply chains, an input-output modelling approach	Green supply chain	2020	Proposta di un modello MRIO per valutare le performance ambientali di una supply chain	European Journal of Operational Research	H.Wang	C. Pan	Q. Wang	P. Zhou	2	Cina
[134] (Witjes and Lozano, 2016)	Towards a more circular economy: proposing a framework linking sustainable public procurement and sustainable business models	Economia circolare	2016	Proposta di un framework di fornitura service-oriented che migliori l'efficienza di utilizzo delle risorse, considerando anche aspetti socio-culturali	Resources, Conservation and Recycling	S. Witjes	R. Lozano			193	Olanda
[135] (Wu et al., 2020)	Partner selection in sustainable supply chains: a fuzzy ensemble learning model	Green supply chain	2020	Proposta di un modello per la selezione dei fornitori in una GSC	Journal of Cleaner Production	C. Wu	C. Lin	D. Barnes	Y. Zhang	0	Cina
[136] (Yadav et al., 2020)	A framework to achieve sustainability in manufacturing organisations of developing economies using	Industria 4.0	2020	Sviluppo di una struttura per incentivare la sostenibilità nelle imprese di paesi emergenti tramite tecnologie Industria	Computers in Industry	G. Yadav	A. Kumar	S. Luthra	J. A. Garza-Reyes	2	India

	Industry 4.0 technologies 'enablers'			4.0							
[137] (Yoon et al., 2014)	A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive and additive processes: review and case study	Tecnologie	2014	Analisi bibliografica per ricavare il consumo energetico specifico dei tre processi produttivi e loro correlazione tramite la forma logaritmica reciproca della produttività	International Journal of Precision Engineering and Manufacturing	H-S. Yoon	J.-Y. Lee	H.-S. Kim	M.-S. Kim	163	Corea del Sud
[138] (Zheng et al., 2020)	A Lagrangian heuristic algorithm for sustainable supply chain network considering CO2 emission	Green supply chain	2020	Proposta di un algoritmo per la pianificazione produttiva in ottica Green Supply Chain	Journal of Cleaner Production	M. Zheng	W. Li	Y. Liu	X. Liu	0	Cina
[139] (Zhu and Sarkis, 2007)	The moderating effects of institutional pressures on emergent green supply chain practices and performance	Politiche	2007	Analisi delle relazioni tra pratiche di green supply chain e performance ambientali ed economiche in base alle pressioni istituzionali	International Journal of Production Research	Q. Zhu	J. Sarkis			577	Cina
[140] (Zink and Geyer, 2017)	Circular economy rebound	Economia Circolare	2017	Inchiesta sul rebound della EC, motivazioni, meccanismi e strategie per evitarlo	Journal of Industrial Ecology	T. Zink	R. Geyer			154	USA
[141] (Zofio and Prieto, 2001)	Environmental efficiency and regulatory standards: the case of CO2 emissions from OECD industries	Politiche	2001	Analisi dei risultati della applicazione di framework di analisi dati in base agli scenari regolatori	Resource and Energy Economics	J.L. Zofio	A.M. Prieto			198	Spagna

Tabella 11. Articoli esaminati con presentazione dei criteri di analisi

## 8. Bibliografia

### *Fonti primarie (articoli analizzati)*

- Acerbi, F., Taisch, M., 2020. A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector. *J. Clean. Prod.* 123086.
- Ageron, B., Gunasekaran, A., Spalanzani, A., 2012. Sustainable supply management: An empirical study. *Int. J. Prod. Econ.* 140, 168–182.
- Agyabeng-Mensah, Y., Afum, E., Ahenkorah, E., 2020. Exploring financial performance and green logistics management practices: examining the mediating influences of market, environmental and social performances. *J. Clean. Prod.* 258, 120613.
- Ahmadi, H.B., Lo, H.-W., Gupta, H., Kusi-Sarpong, S., Liou, J.J.H., 2020. An integrated model for selecting suppliers on the basis of sustainability innovation. *J. Clean. Prod.* 277, 123261.
- Andersen, M.S., 2007. An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustain. Sci.* 2, 133–140.
- Badurdeen, F., Jawahir, I.S., 2017. Strategies for value creation through sustainable manufacturing. *Procedia Manuf.* 8, 20–27.
- Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., Habich, M., 2020. Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes—A literature review. *J. Clean. Prod.* 259, 120856.
- Bhatt, Y., Ghuman, K., Dhir, A., 2020. Sustainable manufacturing. Bibliometrics and content analysis. *J. Clean. Prod.* 260, 120988.
- Bocken, N.M.P., De Pauw, I., Bakker, C., Van Der Grinten, B., 2016. Product design and business model strategies for a circular economy. *J. Ind. Prod. Eng.* 33, 308–320.
- Bonilla, S.H., Silva, H.R.O., Terra da Silva, M., Franco Gonçalves, R., Sacomano, J.B., 2018. Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. *Sustainability* 10, 3740.
- Brambila-Macias, S.A., Sakao, T., 2021. Effective ecodesign implementation with the support of a lifecycle engineer. *J. Clean. Prod.* 279, 123520.
- Buysse, K., Verbeke, A., 2003. Proactive environmental strategies: A stakeholder management perspective. *Strateg. Manag. J.* 24, 453–470.
- Cai, W., Lai, K., 2021. Sustainability assessment of mechanical manufacturing systems in the industrial sector. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 135, 110169.
- Calderon-Monge, E., Pastor-Sanz, I., Garcia, F.J.S., 2020. Analysis of sustainable consumer behavior as a business opportunity. *J. Bus. Res.* 120, 74–81.
- Chan, F.T.S., Li, N., Chung, S.H., Saadat, M., 2017. Management of sustainable manufacturing systems—a review on mathematical problems. *Int. J. Prod. Res.* 55, 1210–1225.
- Chen, C., 2001. Design for the environment: A quality-based model for green product development. *Manage. Sci.* 47, 250–263.
- Chen, D., Heyer, S., Ibbotson, S., Salonitis, K., Steingrímsson, J.G., Thiede, S., 2015. Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications. *J. Clean. Prod.* 107, 615–625.
- Chen, I.J., Paulraj, A., Lado, A.A., 2004. Strategic purchasing, supply management, and firm performance. *J. Oper. Manag.* 22, 505–523.
- Cherrafi, A., Elfezazi, S., Chiarini, A., Mokhlis, A., Benhida, K., 2016. The integration of lean manufacturing, Six Sigma and sustainability: A literature review and future research directions for developing a specific model. *J. Clean. Prod.* 139, 828–846.
- Chin, T.A., Tat, H.H., Sulaiman, Z., 2015. Green supply chain management, environmental collaboration and sustainability performance. *Procedia Cirp* 26, 695–699.
- Choi, T.-M., 2013. Local sourcing and fashion quick response system: The impacts of carbon footprint tax. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 55, 43–54.
- D’Amato, D., Droste, N., Allen, B., Kettunen, M., Lähtinen, K., Korhonen, J., Leskinen, P., Matthies, B.D., Toppinen, A., 2017. Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. *J. Clean. Prod.* 168, 716–734.
- Dagilene, L., Frenzel, M., Sutiene, K., Wnuk-Pel, T., 2020. Wise managers think about circular economy, wiser report and analyze

it. Research of environmental reporting practices in EU manufacturing companies. *J. Clean. Prod.* 274, 121968.

- Dangelico, R.M., Pujari, D., 2010. Mainstreaming green product innovation: Why and how companies integrate environmental sustainability. *J. Bus. ethics* 95, 471–486.
- Dantas, T.E.T., de-Souza, E.D., Destro, I.R., Hammes, G., Rodriguez, C.M.T., Soares, S.R., 2020. How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. *Sustain. Prod. Consum.*
- de Sousa Jabbour, A.B.L., Jabbour, C.J.C., Foropon, C., Godinho Filho, M., 2018a. When titans meet—Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. *Technol. Forecast. Soc. Change* 132, 18–25.
- de Sousa Jabbour, A.B.L., Jabbour, C.J.C., Godinho Filho, M., Roubaud, D., 2018b. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Ann. Oper. Res.* 270, 273–286.
- Dekker, R., Bloemhof, J., Mallidis, I., 2012. Operations Research for green logistics—An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *Eur. J. Oper. Res.* 219, 671–679.
- Den Hollander, M.C., Bakker, C.A., Hultink, E.J., 2017. Product design in a circular economy: Development of a typology of key concepts and terms. *J. Ind. Ecol.* 21, 517–525.
- Dubey, R., Gunasekaran, A., Childe, S.J., Wamba, S.F., Papadopoulos, T., 2016. The impact of big data on world-class sustainable manufacturing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 84, 631–645.
- Durán-Romero, G., López, A.M., Beliaeva, T., Ferasso, M., Garonne, C., Jones, P., 2020. Bridging the gap between circular economy and climate change mitigation policies through eco-innovations and Quintuple Helix Model. *Technol. Forecast. Soc. Change* 160, 120246.
- Dwyer, R., Lamond, D., Lee, K., 2009. Why and how to adopt green management into business organizations? *Manag. Decis.*
- Elia, V., Gnoni, M.G., Tornese, F., 2020. Evaluating the adoption of circular economy practices in industrial supply chains: An empirical analysis. *J. Clean. Prod.* 273, 122966.
- Eltayeb, T.K., Zailani, S., Ramayah, T., 2011. Green supply chain initiatives among certified companies in Malaysia and environmental sustainability: Investigating the outcomes. *Resour. Conserv. Recycl.* 55, 495–506.
- Esmailian, B., Behdad, S., Wang, B., 2016. The evolution and future of manufacturing: A review. *J. Manuf. Syst.* 39, 79–100.
- Esmailian, B., Sarkis, J., Lewis, K., Behdad, S., 2020. Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. *Resour. Conserv. Recycl.* 163, 105064.
- Faheem, M., Shah, S.B.H., Butt, R.A., Raza, B., Anwar, M., Ashraf, M.W., Ngadi, M.A., Gungor, V.C., 2018. Smart grid communication and information technologies in the perspective of Industry 4.0: Opportunities and challenges. *Comput. Sci. Rev.* 30, 1–30.
- Faulkner, W., Badurdeen, F., 2014. Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. *J. Clean. Prod.* 85, 8–18.
- Ford, S., Despeisse, M., 2016. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *J. Clean. Prod.* 137, 1573–1587.
- Franciosi, C., Voisin, A., Miranda, S., Riemma, S., Iung, B., 2020. Measuring maintenance impacts on sustainability of manufacturing industries: from a systematic literature review to a framework proposal. *J. Clean. Prod.* 260, 121065.
- Garetti, M., Taisch, M., 2012. Sustainable manufacturing: trends and research challenges. *Prod. Plan. Control* 23, 83–104.
- Gebler, M., Uiterkamp, A.J.M.S., Visser, C., 2014. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy* 74, 158–167.
- Geissdoerfer, M., Morioka, S.N., de Carvalho, M.M., Evans, S., 2018. Business models and supply chains for the circular economy. *J. Clean. Prod.* 190, 712–721.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P., Hultink, E.J., 2017. The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *J. Clean. Prod.* 143, 757–768.
- Genovese, A., Acquaye, A.A., Figueroa, A., Koh, S.C.L., 2017. Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. *Omega* 66, 344–357.
- Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S., 2016. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *J. Clean. Prod.* 114, 11–32.
- Giannakis, M., Papadopoulos, T., 2016. Supply chain sustainability: A risk management approach. *Int. J. Prod. Econ.* 171, 455–470.

- Godina, R., Ribeiro, I., Matos, F., T Ferreira, B., Carvalho, H., Peças, P., 2020. Impact assessment of additive manufacturing on sustainable business models in industry 4.0 context. *Sustainability* 12, 7066.
- Govindan, K., Hasanagic, M., 2018. A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective. *Int. J. Prod. Res.* 56, 278–311.
- Green, K.W., Zelbst, P.J., Meacham, J., Bhadauria, V.S., 2012. Green supply chain management practices: impact on performance. *Supply Chain Manag. An Int. J.*
- Gregson, N., Crag, M., Fuller, S., Holmes, H., 2015. Interrogating the circular economy: the moral economy of resource recovery in the EU. *Econ. Soc.* 44, 218–243.
- Guerra-Zubiaga, D.A., Heiling, D., Onadipe, O., Katuwal, R.-K., Dhital, P., Mamun, A.A., 2015. Tacit Knowledge Reuse in a Next Generation Sustainable Manufacturing Process, in: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, p. V02BT02A059.
- Gunasekaran, A., Spalanzani, A., 2012. Sustainability of manufacturing and services: Investigations for research and applications. *Int. J. Prod. Econ.* 140, 35–47.
- Gupta, H., Kusi-Sarpong, S., Rezaei, J., 2020. Barriers and overcoming strategies to supply chain sustainability innovation. *Resour. Conserv. Recycl.* 161, 104819.
- Harikannan, N., Vinodh, S., Gurumurthy, A., 2020. Sustainable industry 4.0—an exploratory study for uncovering the drivers for integration. *J. Model. Manag.*
- Harris, S., Martin, M., Diener, D., 2020. Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy. *Sustain. Prod. Consum.*
- Haszeldine, R.S., 2009. Carbon capture and storage: how green can black be? *Science* (80-. ). 325, 1647–1652.
- Hon, K.K.B., 2005. Performance and evaluation of manufacturing systems. *CIRP Ann.* 54, 139–154.
- Huang, S.H., Liu, P., Mokasdar, A., Hou, L., 2013. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 67, 1191–1203.
- Ibrahim, Y.M., Abdulameer, S.S., Hami, N., Yaacob, N.A., Othman, S.N., 2019. Education of Sustainable Manufacturing in Curriculums: Evidence from Iraqi Colleges, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, p. 22049.
- Jakhar, S.K., Bhattacharya, A., Rathore, H., Mangla, S.K., 2020. Stakeholder pressure for sustainability: Can 'innovative capabilities' explain the idiosyncratic response in the manufacturing firms? *Bus. Strateg. Environ.* 29, 2635–2653.
- Jansson, J., Marell, A., Nordlund, A., 2010. Green consumer behavior: determinants of curtailment and eco-innovation adoption. *J. Consum. Mark.*
- Jayal, A.D., Badurdeen, F., Dillon Jr, O.W., Jawahir, I.S., 2010. Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2, 144–152.
- Jena, M.C., Mishra, S.K., Moharana, H.S., 2020. Application of Industry 4.0 to enhance sustainable manufacturing. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 39, 13360.
- Jiao, J., Zhang, X., Tang, Y., 2020. What factors determine the survival of green innovative enterprises in China?—A method based on fsQCA. *Technol. Soc.* 62, 101314.
- Joung, C.B., Carrell, J., Sarkar, P., Feng, S.C., 2013. Categorization of indicators for sustainable manufacturing. *Ecol. Indic.* 24, 148–157.
- Kaebnick, H., Kara, S., Sun, M., 2003. Sustainable product development and manufacturing by considering environmental requirements. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 19, 461–468.
- Kalmykova, Y., Sadagopan, M., Rosado, L., 2018. Circular economy—From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resour. Conserv. Recycl.* 135, 190–201.
- Kamble, S.S., Gunasekaran, A., Gawankar, S.A., 2018. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Saf. Environ. Prot.* 117, 408–425.
- Kleindorfer, P.R., Singhal, K., Van Wassenhove, L.N., 2005. Sustainable operations management. *Prod. Oper. Manag.* 14, 482–492.
- Korhonen, J., Nuur, C., Feldmann, A., Birkie, S.E., 2018. Circular economy as an essentially contested concept. *J. Clean. Prod.* 175, 544–552.

- Kristoffersen, E., Blomsma, F., Mikalef, P., Li, J., 2020. The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. *J. Bus. Res.* 120, 241–261.
- Kurdve, M., Bellgran, M., 2021. Green lean operationalisation of the circular economy concept on production shop floor level. *J. Clean. Prod.* 278, 123223.
- Kusiak, A., 2018. Smart manufacturing. *Int. J. Prod. Res.* 56, 508–517.
- Labuschagne, C., Brent, A.C., 2005. Sustainable project life cycle management: the need to integrate life cycles in the manufacturing sector. *Int. J. Proj. Manag.* 23, 159–168.
- Labuschagne, C., Brent, A.C., Van Erck, R.P.G., 2005. Assessing the sustainability performances of industries. *J. Clean. Prod.* 13, 373–385.
- Le Bourhis, F., Kerbrat, O., Hascoet, J.-Y., Mognol, P., 2013. Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 69, 1927–1939.
- Leng, J., Ruan, G., Jiang, P., Xu, K., Liu, Q., Zhou, X., Liu, C., 2020. Blockchain-empowered sustainable manufacturing and product lifecycle management in industry 4.0: A survey. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 132, 110112.
- Leong, W.D., Teng, S.Y., How, B.S., Ngan, S.L., Abd Rahman, A., Tan, C.P., Ponnambalam, S.G., Lam, H.L., 2020. Enhancing the adaptability: Lean and green strategy towards the Industry Revolution 4.0. *J. Clean. Prod.* 273, 122870.
- Leung, D.Y.C., Caramanna, G., Maroto-Valer, M.M., 2014. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39, 426–443.
- Lieder, M., Rashid, A., 2016. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *J. Clean. Prod.* 115, 36–51.
- Liu, Y., Zhu, Q., Seuring, S., 2020. New technologies in operations and supply chains: Implications for sustainability. *Int. J. Prod. Econ.* 229, 107889.
- Lu, L.Y.Y., Wu, C.H., Kuo, T.-C., 2007. Environmental principles applicable to green supplier evaluation by using multi-objective decision analysis. *Int. J. Prod. Res.* 45, 4317–4331.
- Macchi, M., Savino, M., Roda, I., 2020. Analysing the support of sustainability within the manufacturing strategy through multiple perspectives of different business functions. *J. Clean. Prod.* 258, 120771.
- Mangla, S.K., Kumar, P., Barua, M.K., 2015. Risk analysis in green supply chain using fuzzy AHP approach: A case study. *Resour. Conserv. Recycl.* 104, 375–390.
- McDowall, W., Geng, Y., Huang, B., Barteková, E., Bleischwitz, R., Türkeli, S., Kemp, R., Doménech, T., 2017. Circular economy policies in China and Europe. *J. Ind. Ecol.* 21, 651–661.
- Mian, S.H., Salah, B., Ameen, W., Moiduddin, K., Alkhalefah, H., 2020. Adapting Universities for Sustainability Education in Industry 4.0: Channel of Challenges and Opportunities. *Sustainability* 12, 6100.
- Moldavska, A., 2016. Model-based sustainability assessment—an enabler for transition to sustainable manufacturing. *Procedia Cirp* 48, 413–418.
- Müller, J.M., Kiel, D., Voigt, K.-I., 2018. What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability* 10, 247.
- Murray, A., Skene, K., Haynes, K., 2017. The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *J. Bus. ethics* 140, 369–380.
- Murugesan, S., 2008. Harnessing green IT: Principles and practices. *IT Prof.* 10, 24–33.
- Nascimento, D.L.M., Alencastro, V., Quelhas, O.L.G., Caiado, R.G.G., Garza-Reyes, J.A., Rocha-Lona, L., Tortorella, G., 2019. Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context. *J. Manuf. Technol. Manag.*
- Nidumolu, R., Prahalad, C.K., Rangaswami, M.R., 2009. Why sustainability is now the key driver of innovation. *Harv. Bus. Rev.* 87, 56–64.
- Noci, G., 1997. Designing 'green' vendor rating systems for the assessment of a supplier's environmental performance. *Eur. J. Purch. Supply Manag.* 3, 103–114.
- Nujoom, R., Mohammed, A., Wang, Q., Bennett, N., 2016. The multi-objective optimization model for a sustainable manufacturing system design, in: 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). IEEE, pp. 1134–1140.

- O'Rourke, D., 2014. The science of sustainable supply chains. *Science* (80- ). 344, 1124–1127.
- Pathak, P., Singh, M.P., Badhotiya, G.K., 2020. Performance obstacles in sustainable manufacturing—model building and validation. *J. Adv. Manag. Res.*
- Peattie, K., Crane, A., 2005. Green marketing: legend, myth, farce or prophesy? *Qual. Mark. Res. an Int. J.*
- Pickett-Baker, J., Ozaki, R., 2008. Pro-environmental products: marketing influence on consumer purchase decision. *J. Consum. Mark.*
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., Ormazabal, M., 2018. Towards a consensus on the circular economy. *J. Clean. Prod.* 179, 605–615.
- Pujari, D., 2006. Eco-innovation and new product development: understanding the influences on market performance. *Technovation* 26, 76–85.
- Ragauskas, A.J., Williams, C.K., Davison, B.H., Britovsek, G., Cairney, J., Eckert, C.A., Frederick, W.J., Hallett, J.P., Leak, D.J., Liotta, C.L., 2006. The path forward for biofuels and biomaterials. *Science* (80- ). 311, 484–489.
- Ramani, K., Ramanujan, D., Bernstein, W.Z., Zhao, F., Sutherland, J., Handwerker, C., Choi, J.-K., Kim, H., Thurston, D., 2010. Integrated sustainable life cycle design: a review. *J. Mech. Des.* 132.
- Rasmussen, J., 2020. The Role of Structural Context in Making Business Sense of Investments for Sustainability—A Case Study. *Sustainability* 12, 7006.
- Roblek, V., Meško, M., Krapež, A., 2016. A complex view of industry 4.0. *Sage Open* 6, 2158244016653987.
- Rosen, M.A., Kishawy, H.A., 2012. Sustainable manufacturing and design: Concepts, practices and needs. *Sustainability* 4, 154–174.
- Roy, S., Das, M., Ali, S.M., Raihan, A., Paul, S., Kabir, G., 2020. Evaluating Strategies for Environmental Sustainability in a Supply Chain of an Emerging Economy. *J. Clean. Prod.* 262, 121389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121389>
- Ruben, B., Vinodh, S., P., A., 2018. State of art perspectives of lean and sustainable manufacturing. *Int. J. Lean Six Sigma* 10. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-11-2016-0070>
- Rusinko, C., 2007. Green manufacturing: an evaluation of environmentally sustainable manufacturing practices and their impact on competitive outcomes. *IEEE Trans. Eng. Manag.* 54, 445–454.
- Sarkis, J., 2001. Manufacturing's role in corporate environmental sustainability—Concerns for the new millennium. *Int. J. Oper. Prod. Manag.*
- Sauvé, S., Bernard, S., Sloan, P., 2016. Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environ. Dev.* 17, 48–56.
- Saxena, P., Stavropoulos, P., Kechagias, J., Salonitis, K., 2020. Sustainability assessment for manufacturing operations. *Energies* 13, 2730.
- Schrettle, S., Hinz, A., Scherrer-Rathje, M., Friedli, T., 2014. Turning sustainability into action: Explaining firms' sustainability efforts and their impact on firm performance. *Int. J. Prod. Econ.* 147, 73–84.
- Seuring, S., Sarkis, J., Müller, M., Rao, P., 2008. Sustainability and supply chain management—an introduction to the special issue.
- Shankar, K.M., Kannan, D., Kumar, P.U., 2017. Analyzing sustainable manufacturing practices—A case study in Indian context. *J. Clean. Prod.* 164, 1332–1343.
- Sharma, A., Iyer, G.R., Mehrotra, A., Krishnan, R., 2010. Sustainability and business-to-business marketing: A framework and implications. *Ind. Mark. Manag.* 39, 330–341.
- Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S., Kohl, H., 2018. Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. *Process Saf. Environ. Prot.* 118, 254–267.
- Stock, T., Seliger, G., 2016. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia Cirp* 40, 536–541.
- Tanaka, K., 2011. Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector. *Energy Policy* 39, 6532–6550.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., Sui, F., 2018. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94, 3563–3576.
- Tasdemir, C., Gazo, R., 2020. Integrating sustainability into higher education curriculum through a transdisciplinary perspective. *J. Clean. Prod.* 265, 121759.
- Tasdemir, C., Gazo, R., Quesada, H.J., 2019. Sustainability benchmarking tool (SBT): theoretical and conceptual model proposition of a composite framework. *Environ. Dev. Sustain.* 1–43.

- Tiwari, K., Khan, M.S., 2020. Sustainability accounting and reporting in the industry 4.0. *J. Clean. Prod.* 258, 120783.
- Tolio, T., Ceglarek, D., ElMaraghy, H.A., Fischer, A., Hu, S.J., Laperrière, L., Newman, S.T., Váncza, J., 2010. SPECIES—Co-evolution of products, processes and production systems. *CIRP Ann.* 59, 672–693.
- Tseng, M.-L., Tan, R.R., Chiu, A.S.F., Chien, C.-F., Kuo, T.C., 2018. Circular economy meets industry 4.0: can big data drive industrial symbiosis? *Resour. Conserv. Recycl.* 131, 146–147.
- Ueda, K., Takenaka, T., Váncza, J., Monostori, L., 2009. Value creation and decision-making in sustainable society. *CIRP Ann.* 58, 681–700.
- Vachon, S., Klassen, R.D., 2008. Environmental management and manufacturing performance: The role of collaboration in the supply chain. *Int. J. Prod. Econ.* 111, 299–315.
- Vargas-Berrones, K.X., Sarmiento, R., Whelan, G., 2020. Can you have your cake and eat it? Investigating trade-offs in the implementation of green initiatives. *Prod. Plan. Control* 31, 845–860.
- Waage, S.A., 2007. Re-considering product design: a practical “road-map” for integration of sustainability issues. *J. Clean. Prod.* 15, 638–649.
- Waggoner, P.E., Ausubel, J.H., 2002. A framework for sustainability science: A renovated IPAT identity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 99, 7860–7865.
- Wagner, M., 2005. How to reconcile environmental and economic performance to improve corporate sustainability: corporate environmental strategies in the European paper industry. *J. Environ. Manage.* 76, 105–118.
- Wan, J., Cai, H., Zhou, K., 2015. Industrie 4.0: enabling technologies, in: *Proceedings of 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things*. IEEE, pp. 135–140.
- Wang, H., Pan, C., Wang, Q., Zhou, P., 2020. Assessing sustainability performance of global supply chains: An input-output modeling approach. *Eur. J. Oper. Res.* 285, 393–404.
- Witjes, S., Lozano, R., 2016. Towards a more Circular Economy: Proposing a framework linking sustainable public procurement and sustainable business models. *Resour. Conserv. Recycl.* 112, 37–44.
- Wu, C., Lin, C., Barnes, D., Zhang, Y., 2020. Partner selection in sustainable supply chains: A fuzzy ensemble learning model. *J. Clean. Prod.* 275, 123165.
- Yadav, G., Kumar, A., Luthra, S., Garza-Reyes, J.A., Kumar, V., Batista, L., 2020. A framework to achieve sustainability in manufacturing organisations of developing economies using industry 4.0 technologies’ enablers. *Comput. Ind.* 122, 103280.
- Yoon, H.-S., Lee, J.-Y., Kim, H.-S., Kim, M.-S., Kim, E.-S., Shin, Y.-J., Chu, W.-S., Ahn, S.-H., 2014. A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.* 1, 261–279.
- Zheng, M., Li, W., Liu, Y., Liu, X., 2020. A Lagrangian heuristic algorithm for sustainable supply chain network considering CO2 emission. *J. Clean. Prod.* 270, 122409.
- Zhu, Q., Sarkis, J., 2007. The moderating effects of institutional pressures on emergent green supply chain practices and performance. *Int. J. Prod. Res.* 45, 4333–4355.
- Zink, T., Geyer, R., 2017. Circular economy rebound. *J. Ind. Ecol.* 21, 593–602.
- Zofio, J.L., Prieto, A.M., 2001. Environmental efficiency and regulatory standards: the case of CO2 emissions from OECD industries. *Resour. Energy Econ.* 23, 63–83.

### *Fonti secondarie (tratte dagli articoli analizzati)*

- Alcacer, V., Cruz-Machado, V., 2019. Scanning the industry 4.0: a literature review on technologies for manufacturing systems, engineering science and technology. *Int. J.* 22, 899-919 (Elsevier)
- Alwitt, L.F. and Berger, I.E. (1993), “Understanding the link between environmental attitudes and consumer product usage: measuring the moderating role of attitude strength”, *Advances in Consumer Research*, Vol. 20 No. 1, pp. 189-94.
- Anbumozhi V, Kanda Y. Greening the production and supply chains in Asia: is there a role for voluntarily initiatives? IGES Kansai Research Center Discussion Paper, KRC-2005, No. 6E; 2005.

- Appraisal: Quantitative Methods and Mathematical Techniques for Environmental Performance Evaluation. Springer Berlin Heidelberg, pp. 141-166
- Azzone, G., Bianchi, R., Mauri, R. and Noci, G. (1997), "Defining operating environmental strategies: programmes and plans within Italian industries", *Environmental Management and Health*, Vol. 8 No. 1, pp. 4-19.
- Banaeian, N., Mobli, H., Fahimnia, B., Nielsen, I.E., Omid, M., 2018. Green supplier selection using fuzzy group decision making methods: a case study from the agri-food industry. *Comput. Oper. Res.* 89, 337e347.
- Barton, D., 2018. *The Future of Finance: How FinTech, AI & Blockchain Will Shape Our Future*. IBM Watson.
- Bashtannyk, V. , Buryk, Z. , Kokhan, M. , Vlasenko, T. , Skryl, V. ,2020. Financial, Eco- nomic and Sustainable Development of States Within the Conditions of Industry 4.0. *International Journal of Management* 11 (4), 406–413 .
- Bastein, T., E. Roelofs, E. Rietveld, and A. Hoogendoorn. 2013. *Opportunities for a Circular Economy in the Netherlands*. TNO,
- Belz, F. M., & Peattie, K. (2012). *Sustainability marketing: A global perspective*. London: John Wiley & Sons.
- Bhanot, N., Rao, P.V., Deshmukh, S.G., 2017. An integrated approach for analysing the enablers and barriers of sustainable manufacturing. *J. Clean. Prod.* 142, 4412e4439.
- Bi Z, Cochran D (2014) Big data analytics with applications. *J Manag Anal* 1(4):249–265
- Black, J.S., Stern, P.C. and Elworth, J.T. (1985), "Personal and contextual influences on household energy adaptations", *Journal of Applied Psychology*, Vol. 70 No. 1, pp. 3-21
- Brundtland Commission, 1987. *Our common future, report of the World Commission on Environment and Development*. Annex to General Assembly document A/42/427, Development and International Co-operation: Environment. World Commission on Environment and Development.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ),2016. *Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung*, <http://www.bmz.de/de/>
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., Garrett, B., 2011. *Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*. Strategic Foresight Initiative. Atlantic Council.
- Carroll, A. B. (1991). The pyramid of corporate social responsibility: Toward the moral management of organizational stakeholders. *Business Horizons*, 34(4), 39–48.
- Chopra S, Meindl P. *Supply chain management: strategy, planning, and operation*. 4th ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education,Inc; 2010.
- Coskun, S.; Kayıkcı, Y.; Gençay, E. Adapting Engineering Education to Industry 4.0 Vision. *Technologies* **2019**,7, 10.
- Crosby, M., Pattanayak, P., Verma, S., Kalyanaraman, V., 2016. Blockchain technology: beyond Bitcoin. *Appl. Innov.* 2, 6–10
- Davies, R., Coole, T., Smith, Alistair, 2017. Review of socio-technical considerations to ensure successful implementation of Industry 4.0. *Procedia Manuf.* 11,1288-1295.
- Dean J (1950) Pricing policies for new products. *Harv Bus Rev* 28(6):45–53
- Demir, E., Huang, Y., Scholts, S., Van Woensel, T., 2015. A selected review on the negative externalities of the freight transportation: modeling and pricing. *Transport. Res. E Logist. Transport. Rev.* 77, 95e114.
- Dennis, P., 2007. *Lean Production Simplified*. Productivity Press, New York
- Diabat A, Govindan K. An analysis of drivers affecting the implementation of green supply chain management. *Resour Conserv Recycl* 2011;55(6):659–67.
- Dijcks J-P (2013) *Oracle: big data for the enterprise*. Redwood Shores, Oracle
- DiMaggio, P.J., Powell, W.W., 1983. The iron cage revisited: institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields. *Am. Socio. Rev.* 48, 147e160.
- Dwartzan, M. (1998), "The greening of industrial parks", *MIT's Technology Review*, Vol. 100 No. 9, pp. 18-19.

- Dyer JH, Singh H. The relational view: cooperative strategy and sources of interorganizational competitive advantage. *Academy of Management Review* 1998; 23: 660-679.
- EEA, 2011. EEA Greenhouse Gas Data (2008). <<http://dataservice.eea.europa.eu/PivotApp/pivot.aspx?pivotid=475>>
- Ellen MacArthur Foundation, 2019. Completing the picture: How the circular economy tackles climate change. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/completing-the-picture-climate-change>
- EMAF (Ellen MacArthur Foundation), 2012. *Towards the Circular Economy*, London.
- EMAF (Ellen MacArthur Foundation), 2013. *Towards the Circular Economy*, London.
- EMAF (Ellen MacArthur Foundation), 2015. *Growth within: a Circular Economy Vision for a Competitive Europe*, London. 2013. *Towards the Circular Economy*, London.
- EMF, 2015a. *Delivering the Circular Economy a Toolkit for Policymakers*. <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/>
- EPRI, 1999. *Towards Environmental Pressure Indicators for the EU*, Environment and Energy Paper Theme 8, Luxembourg, European Commission, [http://biogov.cpdf.ucl.ac.be/communication/papers/tepi99rp\\_EN105.pdf](http://biogov.cpdf.ucl.ac.be/communication/papers/tepi99rp_EN105.pdf).
- Eslami, Y., Dassisti, M., Lezoche, M., Panetto, H., 2018. A survey on sustainability in manufacturing organisations: dimensions and future insights. *Int. J. Prod. Res.* 1-21.
- European Commission, 2019. *On the implementation of the Circular Economy Action Plan*. COM, Brussels 190 final.. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019DC0190&from=ES>.
- European Commission, 2020. *A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe*. COM, Brussels 98 final: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF).
- European Commission. 2014. [http://ec.europa.eu/economy\\_finance/publications/european\\_economy/2014/pdf/ee7\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/economy_finance/publications/european_economy/2014/pdf/ee7_en.pdf)
- Faber, N., R. Jorna, and J. O. van Engelen. 2005. The sustainability of “sustainability”—A study into the conceptual foundations of the notion of “sustainability”. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 7(1): 1–33.
- Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S., Iribarne, M., 2015. Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyp.* 21 (1), 14-33.
- FAO, 2009. *How to feed the world in 2050*. Food and Agriculture Organization of United Nations. [http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert\\_paper/How\\_to\\_Feed\\_the\\_World\\_in\\_2050.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf).
- Fishbein, M. 1967. An investigation of relationship between beliefs about an object and the attitude toward the object. *Human Relations* 16 233–240
- Flammer G. Corporate social responsibility and shareholder reaction: the environmental awareness of investors. *Academy of Management Journal* 2013; 56(3): 758-781.
- Foretica (2018), Informe sobre la evolución de la RSE y la sostenibilidad, available at: [https://www.foretica.org/informe\\_foretica\\_2018.pdf](https://www.foretica.org/informe_foretica_2018.pdf)
- Franceschini, F., Galetto, M., & Maisano, D. (2007). *Management by measurement: Designing key indicators and performance measurement systems*. Springer Science & Business Media.
- Franceschini, F., Galetto, M., & Maisano, D. (2019). *Designing Performance Measurement Systems*. Management for Professionals. Springer Nature.
- G. Mattana (2005), *Qualità, affidabilità, certificazione. Strategie, tecniche e opportunità per il miglioramento dei prodotti, dei servizi, delle organizzazioni*, Franco Angeli Editore
- Gallup International Institute. 1992. *The Health of the Planet Survey*. Gallup International Institute, Princeton, NJ.
- Geoffrey, J.L.F., Hagelaar, J.G. and van der Vorst, A.J., Environmental supply chain management: using life cycle assessment to structure supply chains. *Int. Food & Agribusi. Manage. Rev.*, 2002, 4, 399–412
- Georgescu-Roegen, N., 1971. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge Mass. Harvard University Press.

Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., 2010. Additive Manufacturing Technologies e Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer.

Golini, R., Longoni, A., Cagliano, R., 2014. Developing sustainability in global manufacturing networks: the role of site competence on sustainability performance. *Int. J. Prod. Econ.* 147 (Part B), 448-459 (Elsevier).

Govindan, K., 2017. Sustainable consumption and production in the food supply chain: a conceptual framework. *Int. J. Prod. Econ.* 1016/j.ijpe.2017.03.003.

Govindan, K., Rajendran, S., Sarkis, J., Murugesan, P., 2015. Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: a literature review. *J. Clean. Prod.* 98, 66e83.

Granly BM. 2013. Towards a Context-specific Roadmap for Sustainable Manufacturing: Evidences from Practices in Norwegian SMEs. in Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Design and Materials NTNU.

Gutowski, T.; Jiang, S.; Cooper, D.; Corman, G.; Hausmann, M.; Manson, J.-A.; Schudeleit, T.; Wegener, K.; Sabelle, M.; Ramos-Grez, J.; et al. Note on the Rate and Energy Efficiency Limits for Additive Manufacturing: Rate and Energy Efficiency Limits for AM. *J. Ind. Ecol.* **2017**, 21, S69–S79.

Halog A, Manik Y. 2011. Advancing Integrated Systems Modelling Framework for Life Cycle Sustainability Assessment. *Sustainability* 3(2), pp. 469.

Hart, S. (2005), "Innovation, creative destruction and sustainability", *Research Technology Management*, September-October, pp. 21-7.

Hart, S.L. (1995), "A natural-resource-based view of the firm", *Academy of Management Review*, Vol. 20 No. 4, pp. 986-1014.

Herrmann, C., Schmidt, C., Kurle, D., Blume, S., Thiede, S., 2014. Sustainability in manufacturing and factories of the future. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol.* 1 (4), 283-292 (Springer).

Holmström, J., Holweg, M., Khajavi, S.H., Partanen, J., 2016. The direct digital manufacturing (r) evolution: definition of a research agenda. *Oper. Manag. Res.* 9 (1–2), 1–10.

Hopkinson, N., Hague, R.J.M., Dickens, P.M, 2006. Rapid Manufacturing. An industrial Revolution for the Digital Age. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, West Sussex. UK.

<http://www.qualitiamo.com/guru/riassunto.html>

<https://climateclock.world/>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Earth\\_Overshoot\\_Day](https://it.wikipedia.org/wiki/Earth_Overshoot_Day)

[https://it.wikipedia.org/wiki/Stati\\_per\\_emissioni\\_di\\_CO2](https://it.wikipedia.org/wiki/Stati_per_emissioni_di_CO2)

<https://www.oxfam.org/en/research/time-care>

Hungerland, F., Quitzau, J., Zuber, C., Ehrlich, L., Growitsch, C., Rische, M. C., & Has, H. J. (2015). The digital economy (No. 21e). *Strategy 2030—Wealth and Life in the Next Generation*.

IMS2020. 2010. "Roadmap on Innovation, Competence Development and Education." IMS 2020 Supporting Gloable Research for IMS2020 Vision.

International Energy Agency (IEA). World energy outlook, 2015. IEA/Organization for Economic Cooperation and Development (OCED). Paris (France). Available from: <http://www.worldenergyoutlook.org/>.

IPCC, 2018. Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.

IPCC, C.C., 2014. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

- Irani, Z., & Sharif, A. M. (2018). Food security across the enterprise: A puzzle, problem or mess for a circular economy? *Journal of Enterprise Information Management*, 31, 2–9
- Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., Werner, F., Ivanova, M., 2016. A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory Industry 4.0. *Int. J. Prod. Res.* 54 (2),
- Jasiulewicz-Kaczmarek, M., 2014. Integrating lean and green paradigms in maintenance management. *IFAC Proceedings Volumes* 47 (3), 4471-4476.
- Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Drozyner, P., 2013a. The role of maintenance in reducing the negative impact of a business on the environment. In: *Sustainability*
- Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Drozyner, P., 2011. Maintenance management initiatives towards achieving sustainable development. In: *Information Technologies in Environmental Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 707-721.
- Jelinski, L.W., Graedel, T.E., Laudise, W.D., McCall, D.W. and Patel, K.N. (1992), "Industrial ecology: concepts and approaches", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 89, February, 793-7.
- Kaebnick H. *Green manufacturing, fundamentals and applications* edited by David A. Dornfeld. New York: Springer, 2012, 289 pp., e-book, ISBN 978-1-4419-6016-0, \$69.95. *J Ind Ecol* 2014;18(Aug (4)):591–2.
- Kagermann, H., Lukas, W.-D., 2011. *Industrie 4.0*, VDI Nachrichten.
- Kannan, D., 2018. Role of multiple stakeholders and the critical success factor theory for the sustainable supplier selection process. *Int. J. Prod. Econ.* 195, 391e418.
- Khan, S.A.R., Zhang, Y., Anees, M., Golpîra, H., Lahmar, A., Qianli, D., 2018. Green supply chain management, economic growth and environment: a GMM based evidence. *J. Clean. Prod.* 185, 588e599.
- Kilbourne, W. E., & Thyroff, A. (2020). STIRPAT for marketing: An introduction, expansion, and suggestions for future use. *Journal of Business Research*, 108, 351–361.
- Kitazawa, S. and Sarkis, J. (1998), "The relationship between ISO 14001 and continuous source reduction programs", working paper, Clark University, Worcester, MA.
- Lancaster, K. 1966. A new approach to consumer theory. *J. Political Econom.* 74 132–157.
- Lash, J., & Wellington, F. (2007). Competitive advantage on a warming climate. *Harvard Business Review*, 85(3), 94–103.
- Laukkanen, M., Patala, S., 2014. Analysing barriers to sustainable business model innovations: innovation systems approach. *Int. J. Innov. Manag.* 18 (06), 1440010
- Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.A., 2015. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manuf. Lett.* 3, 18–23.
- Linton, J.D., Klassen, R., Jayaraman, V., 2007. Sustainable supply chains: an introduction. *J. Oper. Manag.* 25 (6), 1075e1082.
- MacArthur, E. 2017a. Bringing Printing as a Service to the Home. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/case-studies/bringing-printing-as-a-service-to-the-home>
- MacArthur, E. 2017b. Short-Loop Recycling of Plastics in Vehicle Manufacturing. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/case-studies/short-loop-recycling-of-plastics-in-vehicle-manufacturing>
- Mangla S, Madaan J, Chan FTS. Analysis of flexible decision strategies for sustainability-focused green product recovery system. *Int J Prod Res* 2013b;51(11):3443–62
- Mangla S, Madaan J, Sarma PRS, Gupta MP. Multi-objective decision modelling using interpretive structural modelling for green supply chains. *Int J Logist Syst Manage* 2014a;17(2):125–42.
- Mangla SK, Kumar P, Barua MK. Flexible decision approach for analysing performance of sustainable supply chains under risks/uncertainty. *Global J Flex Syst Manage* 2014c;15(2):113–30.
- Mangla, S.K., Kumar, P., Barua, M.K., 2014. Flexible decision approach for analysing performance of sustainable supply chains under risks/uncertainty. *Global J. Flex. Syst. Manag.* 15 (2), 113e130.

- McKinsey Global Institute, 2013. *Disruptive Technologies: Advances That Will Transform Life, Business and the Global Economy*. McKinsey Global Institute & Company, Seoul/South Korea.
- Mitchell, P. , James, K. WRAP, 2015. Economic growth potential of more circular economies. Waste and Resources Action Programme Report 1–45 .
- Modgil, S., Gupta, S., Bhushan, B., 2020. Building a living economy through modern information decision support systems and UN sustainable development goals. *Production Planning & Control* 1–21. doi: 10.1080/09537287.2019.1695916
- Moldavska A, Welo T. 2015. On the Applicability of Sustainability Assessment Tools in Manufacturing. *Procedia CIRP* 29(0), pp. 621-6.
- Mollenkopf, D., Stolze, H., Tate, W., Ueltschy, M., 2010. Green, lean, and global supply chains. *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.* 40 (1/2), 14-41.
- Morgan, A., 2015. The True cost. <https://www.imdb.com/title/tt3162938/>.
- Mourtzis, D., Vlachou, E., Milas, N., 2016. Industrial big data as a result of IoT adoption in manufacturing. In: *Procedia CIRP*.
- Mourtzis, D.; Vlachou, E.; Dimitrakopoulos, G.; Zogopoulos, V. Cyber-Physical Systems and Education 4.0–The Teaching Factory 4.0 Concept. *Procedia Manuf.* **2018**, 23, 129–134.
- Naidoo, M., Gasparatos, A., 2018. Corporate environmental sustainability in the retail sector : drivers , strategies and performance measurement. *J. Clean. Prod.* 203, 125e142.
- Nederland Circulair. 2015. The Potential for High Value Reuse in a Circular Economy. <https://www.circulairondernemen.nl/uploads/27102a5465b3589c6b52f8e43ba9fd72.pdf>
- Ng, R., Low, J.S.C., Song, B., 2015. Integrating and implementing lean and green practices based on proposition of Carbon-Value Efficiency metric. *J. Clean. Prod.* 95, 242-255.
- OECD (2002), *Towards Sustainable Household Consumption? Trends and Policies in OECD Countries*, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris.
- Oelze, N., 2017. Sustainable supply chain management implementation-enablers and barriers in the textile industry. *Sustainability* 9 (8), 1435.
- Okoh, P., Haugen, S., 2014. A study of maintenance-related major accident cases in the 21st century. *Process Saf. Environ. Protect.* 92 (4), 346-356.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (1985), *Environmental Policy and Technological Change*, OECD, Paris.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (1995), *Technologies for Cleaner Production and Products*, OECD, Paris.
- Oxford Economics, 2019. *How Robots Change the World What Automation Really Means for Jobs and Productivity*. Report, 1–64
- Paju, M., Heilala, J., Hentual, M., Heikkila, A., Johansson, B., Leong, S., Lyons, S., 2010. Framework and indicators for a sustainable manufacturing mapping methodology. In: *Proceedings of the 2010 Winter Simulations Conference*, December 5-8, Baltimore, Maryland, pp. 3411-3422
- Palanivelu, P., Dhawan, M., 2011. *Green Logistics*. White Paper Tata Consulting Systems.
- Papetti, A., Marconi, M., Rossi, M., Germani, M., 2019. Web-based platform for eco-sustainable supply chain management. *Sustain Prod Consum* 17, 215e228
- Perez-Sanchez, D., Barton, R. and Bower, D. (2003), "Implementing environmental management in SMEs", *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, Vol. 10 No. 2, pp. 67-77.
- Phung, C.G. , 2019. Implications of the circular economy and digital transition on skills and green jobs in the plastics industry. *Field Actions Science Report* 2019, 100–107 .
- Pieroni, M.P., McAlone, T., Pigosso, D.A., 2019. Business model innovation for circular economy and sustainability: a review of approaches. *J. Clean. Prod.* 215, 198e216.

- Porter, M. E. 1996. "What is strategy?" Harvard Business Review November–December: 61–78.
- Porter, M.E., *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*, 1985 (The Free Press: New York, NY).
- Porter, M.E., van der Linde, C., 1995. Green and competitive: Ending the stalemate. Harvard Business Review 73 (5), 120–133.
- Porter, Michael E., Kramer, Mark R., 2011. Creating shared value. J. Harv. Bus. Rev. 89 (1/2), 62-77.
- Prahinski, C., Kocabasoglu, C., 2006. Empirical research opportunities in reverse supply chain. Omega 34 (6), 519–532.
- Prevedouros P D, Mitropoulos L and Zhang G 2018 Undergraduate Courses and Senior Year Track on Sustainability in Civil Engineering. In: *International Conference on Transportation and Development*, (Pittsburgh, Pennsylvania pp 213-22)
- Qianlei L. The study on the risk management of agricultural products green supply chain based on systematic analysis. In: IEEE 2nd international conference in business computing and global informatization (BCGIN); 2012. p. 250–3
- Rachuri S, Sriram RD, Narayanan A, Sarkar P, Lee JH, Lyons KW, Srinivasan V, Kemmerer SJ. Summary of the NIST Workshop on Sustainable Manufacturing: Metrics Standards, and Infrastructure. International Journal of Sustainable Manufacturing 2011. August. Inderscience Publishers.
- Rao, P., 2002. Greening the supply chain: a new initiative in South East Asia. Int. J. Oper. Prod. Manag. 22 (6), 632-655
- Rayome, A.D., 2019. Top 10 Emerging Technologies of 2019. TechRepublic
- Reinhart, G. (Ed.), 2017. *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. Carl Hanser Verlag, Ciando, München München. Report commissioned by the Netherlands Ministry of Infrastructure and Environment
- Ritchie, J.R.B. and McDougall, G.H.G. (1985), "Designing and marketing consumer energy conservation policies and programs: Implications from a decade of research", *Journal of Public Policy & Marketing*, Vol. 4 No. 1, pp. 14-32.
- Ritchie, J.R.B., McDougall, G.H.G. and Claxton, J.D. (1981), "Complexities of household energy consumption and conservation", *Journal of Consumer Research*, Vol. 8 No. 3, pp. 233-42.
- Roberts, J. A. (1995). Profiling levels of socially responsible consumer behavior: A cluster analytic approach and its implications for marketing. *Journal of Marketing Theory and Practice*, 3, 97–117.
- Russell, R.S., Taylor, B.W., 2000. *Operations Management*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Salem, M.A., Khatib, J.I., 2004. *An Introduction to Open-source Hardware Development*. EETimes.
- Sarkis J, editor. *Greening the supply chain*. London: Springer; 2006.
- Seuring, S., Sarkis, J., Muller, M., Rao, P., 2008. Sustainability and supply chain management: an introduction to the special issue. *J. Clean. Prod.* 16 (14), 1545e1551.
- Shrivastava, P. (1995), "Ecocentric management for a risk society", *Academy of Management Review*, Vol. 20 No. 1, pp. 118-37.
- Simpson, B. J. K., & Radford, S. K. (2014). Situational variables and sustainability in multi-attribute decision-making. *European Journal of Marketing*, 48(5/6), 1046–1069.
- Skinner, W. 1969. "Manufacturing-Missing Link in Corporate Strategy." Harvard Business Review 47 (3): 136–145.
- Skinner, W. 1974. "The Focused Factory." Harvard Business Review 52 (3):113–121.
- Skinner, W. 1992. "Missing the Links in Manufacturing Strategy." In *Manufacturing Strategy: Process and Content*, edited by C. A. Voss, 13–25.
- Skinner, W. 1996. "Manufacturing Strategy on the "S" Curve." *Production and Operations Management* 5 (1): 3–14.
- Snir, E.M., 2001. Liability as a catalyst for product stewardship. *Production and Operations Management* 10 (2), 190–206.
- Starik, M. (1995), "Should trees have managerial standing?: Toward stakeholder status for non-human nature", *Journal of Business Ethics*, Vol. 15, pp. 207-8.
- Stern, N., 2006. *The Stern Review: The Economics of Climate Change*. HM Treasury, London.
- Stern, P.C. (1992), "What psychology knows about energy conservation", *American Psychologist*, Vol. 47 No. 10, pp. 1224-32.

- Stern, P.C. and Gardner, G.T. (1981), "Psychological research and energy policy", *American Psychologist*, Vol. 36 No. 4, pp. 329-42.
- Strohmeier, K., 2017. *Industrie 4.0: Virtueller Zwilling steuert die Produktion*
- Svensson, G., Høgevoid, N., Ferro, C., Varela, J. C. S., Padin, C., & Wagner, B. (2016). A triple bottom line dominant logic for business sustainability: Framework and empirical findings. *Journal of Business-to-Business Marketing*, 23(2), 153–188.
- Thomas, I., 2009. Critical thinking, transformative learning, sustainable education, and problem-based learning in universities. *J. Transformative Educ.* 7, 245-264.
- Toke LK, Gupta RC, Dandekar M. An empirical study of green supply chain management in Indian perspective. *Int J Appl Sci Eng Res* 2012;1(2):372–83.
- Tuck C, Hague R, Burns N (2007) Rapid manufacturing: impact on supply chain methodologies and practice. *IJSOM* 3:1–22
- UN, 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations, A/RES/70/1, Agenda items 15 and 116, 1–35.
- UNEP (2007), *Global Environment Outlook (GEO 4): Environment for Development*, United Nations Environment Programme (UNEP) Report
- United Nations Environment Programme, 2011. *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*, Nairobi Kenya, p. 630.
- Vimal, K. E. K., Vinodh, S., & Gurumurthy, A. (2017). Modelling and analysis of sustainable manufacturing system using a digraph-based approach. *International Journal of Sustainable Engineering*, 7038, 1–15.
- Wals, A.E.J., Tassone, V.C., Hampson, G.P., Reams, J., 2015. In: Barth, M., Michelsen, G., Rieckmann, M., Thomas, I. (Eds.), *Learning for Walking the Change: Eco-Social Innovation through Sustainability-Oriented Higher Education* in *Routledge Handbook of Higher Education for Sustainable Development*. Routledge
- Walton SV, Handfield RB, Melnyk SA. The green supply chain: integrating suppliers into environmental management process. *International Journal of Purchasing and Materials Management* 1998;34(2):2–11.
- Wang, L., Thorngren, M., Onori, M., 2015a. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *J. Manuf. Syst.* 37 (Pt. 2), 517–527
- Wang, Z., Subramanian, N., Abdulrahman, M., & Liu, C. (2013). Composite practices to improve sustainability: A framework and evidence from Chinese auto-parts company. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*.
- Wang, Z., Wei, S.-. J., Yu, X., & Zhu, K. (2017b). *Measures of participation in global value chains and global business cycles* . National Bureau of Economic Research *Working Paper Series*, No. 23222 .
- Webb, D. J., Mohr, L. A., & Harris, K. E. (2008). A re-examination of socially responsible consumption and its measurement. *Journal of Business Research*, 61(2), 91–98.
- Webster, F. E., Jr. (1975). Determining the characteristics of the socially conscious consumer. *Journal of Consumer Research*, 2, 188–196.
- White M (2012) Digital workplaces: vision and reality. *Bus Inf Rev* 29(4):205–214
- WTO. (2015). *World trade organization: International trade statistics 2015*.
- Wu, H.J. and Dunn, S., Environmentally responsible logistics systems. *Int. J. Physics Distrib. & Logist. Manage.*, 1995, 25(2), 20–38.
- Yang ZK, Li J. Assessment of green supply chain risk based on circular economy. In: *IEEE 17th international conference on industrial engineering and engineering management (IE&EM)*; 2010. p. 1276–80.
- Zsidisin GA, Siferd SP. Environmental purchasing: a framework for theory development. *European Journal of Purchasing & Supply Management* 2001;7(1):61–73.