

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Gestionale LM-31 – Percorso Finance



**Politecnico
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

Sostenibilità in azienda: la valutazione, il prodotto, la filiera produttiva e la schedulazione

Relatori:

Prof.ssa Arianna Alfieri

Prof.ssa Erica Pastore

Prof. Claudio Castiglione

Candidato:

Angelo Sergio

ottobre 2024

Anno Accademico: 2023-2024

1. Introduzione	1
1.1 Storia della sostenibilità.....	3
2. La valutazione e le performance di sostenibilità.....	13
2.1 Indicatori più utilizzati oggi.....	13
2.2 Procedura di valutazione della sostenibilità.....	22
2.3 Valutazione del valore aggiunto sostenibile	25
3. Il prodotto sostenibile.....	31
3.1 Progettazione del valore sostenibile del prodotto.....	31
3.2 Progettazione del ciclo di vita sostenibile del prodotto	33
3.2.1 Economia circolare	34
3.3 Analisi del ciclo di vita del prodotto	36
3.3.1 Analisi sostenibile del ciclo di vita del prodotto LCSA.....	36
3.4 Riciclaggio del prodotto.....	38
4. La gestione sostenibile della catena di fornitura	41
4.1 Produzione <i>lean</i>	41
4.2 Tecnologie e sostenibilità	50
4.2.1 Stagnazione salariale.....	50
4.2.2 Industria 4.0 e 5.0.....	52
5. La rigenerazione.....	55
5.1 Previsione della domanda netta.....	55
5.2 Schedulazione della rigenerazione	58
5.3 Pianificazione della capacità.....	67
5.4 Gestione del magazzino	71
5.5 Ergonomicità	76
6. Conclusioni.....	81
Bibliografia.....	82

1. Introduzione

Alexander Parkes nel 1862 inventò la prima plastica. Difficilmente avrebbe potuto prevedere le conseguenze della sua invenzione, della mole che se ne sarebbe prodotta oggi alla *Great Pacific Garbage Patch*: un continente di rifiuti di plastica nel Pacifico [56]; in figura 1.1 vi è una rappresentazione in scala di essa. Questa è formata da circa 79 mila tonnellate di plastica che galleggiano in un'area di 1,6 milioni km² [134] (l'Italia ha una superficie di 301.280 km² [135], quindi questa montagna è grande più di cinque volte il nostro Paese). La sopravvivenza di noi umani dipende dal continuo funzionamento del sistema naturale [133] e quindi da attività e da un contesto mondiale che siano sufficientemente sostenibili. Questo fenomeno ci riguarda da vicino anche economicamente: Banca d'Italia per il 2100 stima una riduzione del PIL pro capite tra il 2,8% e 9.5% se le temperature medie in quell'anno saranno più elevate di +1,5°C rispetto a oggi [172].

Lo sviluppo sostenibile è stato definito dalla *FAO* come “la gestione e conservazione delle risorse naturali, l'orientamento della tecnologia e il cambiamento istituzionale in modo tale da assicurarne il raggiungimento e il proseguimento della soddisfazione dei bisogni umani per le generazioni presenti e future. Tale sostenibile sviluppo (nei settori dell'agricoltura, della silvicoltura e della pesca) conserva terra, acqua, risorse genetiche vegetali e animali, è tecnicamente **non degradante dal punto di vista ambientale, economicamente sostenibile e socialmente accettabile**” (Consiglio *FAO*, 1989) [17].

La procedura *SAFA* (*Sustainability Assessment of Food and agriculture systems*) della *FAO* individua quattro dimensioni su cui valutare la sostenibilità: buona **politica**, integrità **ambientale**, resilienza **economica** e benessere **sociale**" [17] [19].

Per concretizzare maggiormente il concetto di sostenibilità si può ricorrere alla *triple bottom line* ideata da Elkington nel 1994 [183], ossia all'intersezione di tre cerchi. Ogni cerchio rappresenta il dominio di una dimensione della sostenibilità. La figura 1.2 è una *triple bottom line*.

Il *NIST* (*National Institute of Standards and Technology* degli USA [136] [116]) individua cinque livelli su cui agire per migliorare la sostenibilità. Un primo livello è di tipo legislativo; un secondo livello concerne i materiali e i prodotti; un terzo livello riguarda i mezzi di

produzione, un quarto livello la catena di fornitura e un ultimo livello l'armonizzazione [50][116]. Questi passi sono riportati in figura 1.3.

Lo scopo di questa tesi è illustrare come la sostenibilità è collegata ai processi aziendali. La sequenza di temi affrontati dalla presente tesi prende spunto dai cinque livelli sopra menzionati individuati dal *NIST*. In particolare, dopo una introduzione di carattere storico, si tratterà della sostenibilità da un punto di vista aziendale, suddividendo il lavoro in: valutazione e performance, prodotto, filiera di produzione, schedulazione della produzione.

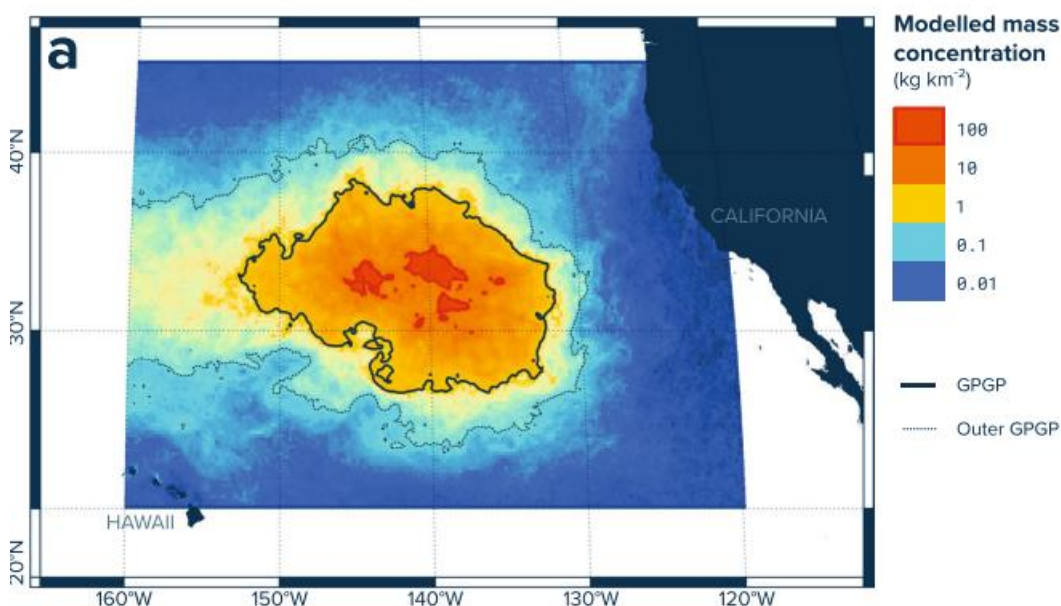


Figura 1.1: Concentrazioni di massa di plastica nell'oceano ad agosto 2015 [134]. A destra si nota può notare la California che in lunghezza sembra più piccola del *Great Pacific Garbage Patch*.



Figura 1.2: *triple bottom line* con *profit, people, planet* [184].



Figura 1.3: modi di procedere e classificare gli indici (Greiner 2001 [116] e NIST 2010 [50]).

1.1. Storia della sostenibilità

Nel 1804 il mondo ha raggiunto un miliardo di persone. Secondo alcune previsioni raggiungeremo 11 miliardi di persone entro la fine di questo secolo [9].

Il 22 aprile 1970 è stato inaugurato l'*International Earth Day* [18], in figura 1.4 è stata riportata la notizia nella prima pagina del *The New York Times*.



Figura 1.4: *The New York Times* del 23 aprile 1970 che celebra la nascita dell'*Earth day* [10]/[10].

Nel 1972 si è tenuta la prima conferenza delle Nazioni Unite a Stoccolma [21]. Parteciparono 114 Paesi [188]. Nello stesso anno la parola “sostenibilità” è usata per la prima volta. Nel 1978, "*sustainability*" è stata utilizzata per la prima volta in un documento delle Nazioni Unite [11].

Nel giugno 1992 si è tenuta a Rio de Janeiro il Summit che ha prodotto la Dichiarazione di Rio: un trattato quasi globale, firmato da oltre 175 paesi [187]. Si è poi creato, a dicembre dello stesso anno, il *Commission on Sustainable Development CSD* delle Nazioni Unite [20] [137].

Nel 1997 è stato siglato il Protocollo di Kyoto, entrato in vigore nel 2005 e valido fino al 2012. Ratificato da 57 Paesi [189], l'obiettivo della Convenzione era quello di stabilizzare il cambiamento climatico. Prevedeva degli obblighi tra cui quello della riduzione delle emissioni di gas serra del 5% rispetto al livello toccato nel 1990. Sebbene gli obblighi fossero impegnativi per i Paesi che avevano sottoscritto il Protocollo, questi non sarebbero stati sufficienti a raggiungere l'obiettivo: i Paesi erano infatti responsabili per meno del 50% delle emissioni globali [12].

Nel settembre 2001, i 193 Governi delle Nazioni Unite (*ONU*) si sono accordati sugli Obiettivi di Sviluppo del Millennio (*MDG*) con termine il 2015 [14]. Questi obiettivi avevano come baricentro la salute e la crescita delle società dei Paesi poveri [143].

Nel 2006 Andrew Simms del *New Economics Foundation* ha collaborato con *Global Footprint Network*: ne nasce il progetto e l'indicatore mondiale dell'*Earth Overshoot Day* (*EOD*). Il *WWF* partecipa all'*Earth Overshoot Day* dal 2007 [142] [149]. Il calcolo del giorno dell'*EOD* è costruito attraverso la seguente formula:

$$\text{Earth Overshoot Day (EOD)} = \frac{\text{Biocapacità della Terra} \times 365}{\text{Impronta ecologica dell'umanità}} \quad (1.1).$$

In figura 1.5 vi è l'andamento dell'*EOD*. Negli anni Settanta il rapporto tra domanda umana e rinnovo delle risorse da parte della Terra era pari a circa 1. Nel 2023 l'*EOD* è caduto il 2 agosto: servirebbero quindi 1,7 pianeti Terra per condurre lo stile di vita che il mondo ha condotto nel 2023 [23] [142].

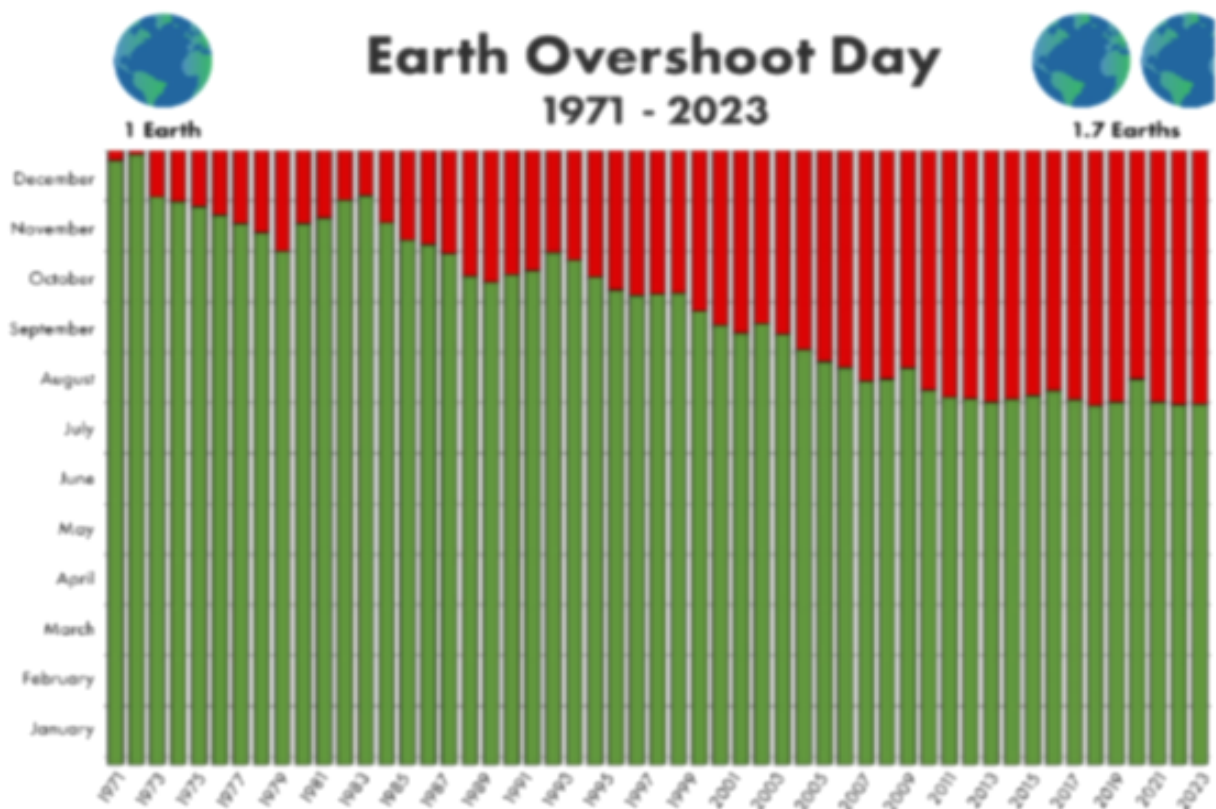


Figura 1.5: *Earth Overshoot Day* dal 1971 al 2023 (Global Footprint Network [149]). Si osserva un *trend* decrescente.

Importanti svolte sono arrivate dal giugno 2012, a partire dalla Conferenza Rio+20 delle Nazioni Unite dove i Paesi aderenti si sono accordati per 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (*SDG*) su scala globale.

C'è stata una successiva riunione a Doha nel 2012 per rinnovare gli accordi del Protocollo di Kyoto, ma solo 37 Paesi industrializzati hanno rinnovato gli obblighi fino al 2020 [189].

Il 28 ottobre 2013 la FAO ha introdotto la procedura di valutazione della sostenibilità SAFA [19].

Il 25 settembre 2015 tutti i 193 Stati delle Nazioni Unite hanno approvato l'Agenda 2030, ossia i 17 *SDG* [144] con termine il 2030 per il loro raggiungimento [15]. Gli obiettivi di sviluppo sostenibile *SDG* delle Nazioni Unite sono riportati in figura 1.6 [186].

Dal 4 novembre 2016 è diventato efficace l'Accordo di Parigi [12]. Il segretario generale delle Nazioni Unite Ban Ki Moon ha definito questo accordo "*storico*"; il Presidente della Repubblica francese lo ha definito "*il primo accordo universale sul clima*"; per *Greenpeace* "*questo accordo mette l'industria dei carburanti fossili dal lato sbagliato della storia*" e per

il WWF l'accordo è "un forte segnale che i governi si impegnano finalmente a rispettare i dati scientifici"; per "La Stampa" di Torino è un "momento di passaggio storico, lo spartiacque tra l'era dei combustibili fossili e quella delle energie pulite". L'accordo contempla tre finalità: la prima è frenare "l'aumento della temperatura media mondiale molto al di sotto dei 2°C del periodo preindustriale e di compiere tutti gli sforzi necessari per contenerlo a 1.5°C". La seconda strategia promuove "la cooperazione tra le Parti nei campi della sanità, dello sviluppo economico e produttivo, delle fonti energetiche, della dislocazione delle infrastrutture, della riconversione agricola e della produzione alimentare". La terza mira a favorire investimenti e flussi finanziari al fine di ridurre le emissioni di gas serra [12].



Figura 1.6: Gli obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite [186].

In figura 1.7 si riporta il trend italiano riguardo al raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile secondo il Report Eurostat del maggio 2023. Il rapporto mostra che l'Italia fa progressi tranne che per il punto 6 (*Clean water and sanitation*) anche se in questo è

superiore alla media europea. In oltre metà dei criteri *SDG* l'Italia è al di sotto la media europea.

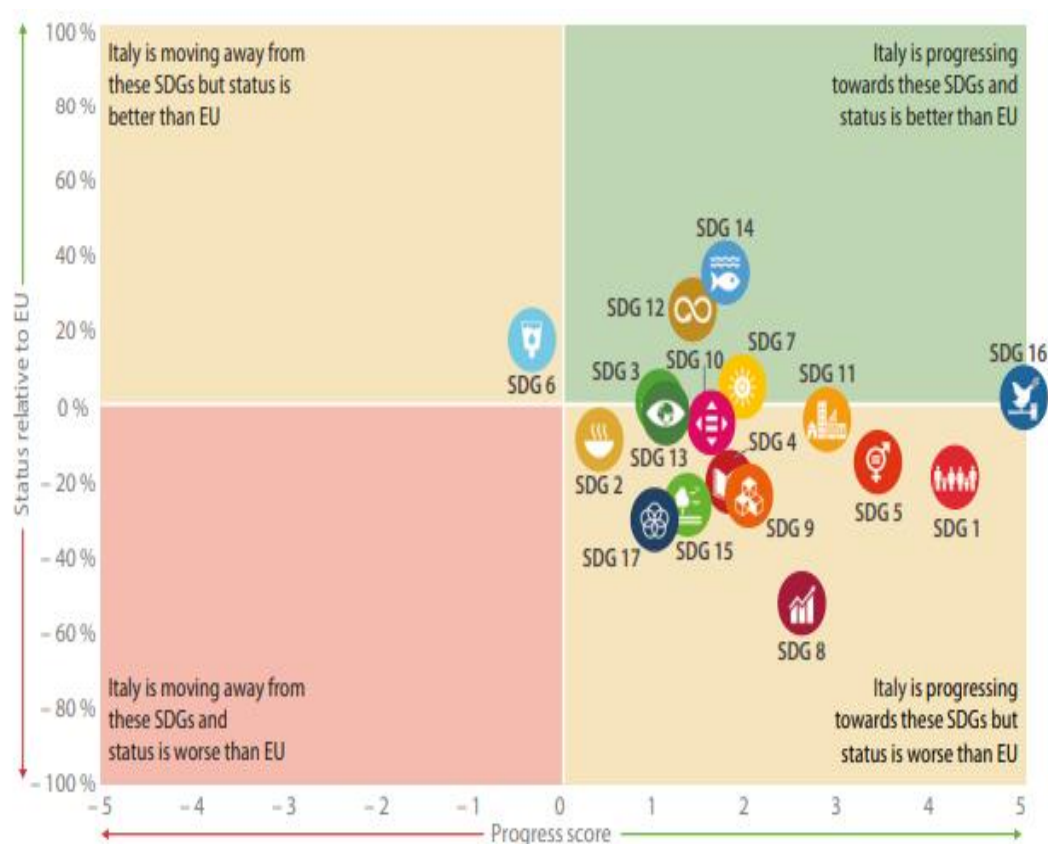


Figura 1.7: Mapa italiana dei criteri *SDG* dal 2017 al 2022. L'asse verticale è normalizzato all'andamento europeo. L'asse orizzontale mostra il progresso (fonte UE) 0. L'Italia fa progressi ovunque tranne nel punto 6 (dove è sopra la media europea). Tuttavia, è sotto la media europea in oltre metà degli obiettivi.

Per quanto riguarda la situazione a livello comunitario, si stanno facendo generalmente passi in avanti in ambito sociale (in particolare in quello lavorativo e contro la povertà), mentre non si sta facendo abbastanza per l'ambiente e nel partenariato. In figura 1.8 vi è l'andamento dal 2017 al 2022 a livello comunitario, mentre in figura 1.9 si mostra l'andamento delle performance degli *SDG* critici 13, 15, 17.

Per quanto concerne il punto 13 (*Climate action*) “sarà ancora necessario uno sforzo maggiore per raggiungere l'ambizioso obiettivo di ridurre le emissioni nette di gas serra del 55% entro il 2030”.

Sul punto 15 (*Life on land*) è stata registrata la presenza di concentrazione di inquinanti nei fiumi dell'UE. Inoltre, “gli indicatori sulla biodiversità delle specie mostrano un declino a lungo termine e continuo degli uccelli comuni e farfalle nei campi nell'UE” [138] 0.

La prestazione peggiore è quella relativa all’obiettivo 17 sulla cooperazione internazionale, fattore chiave per mitigare i cambiamenti climatici [145].

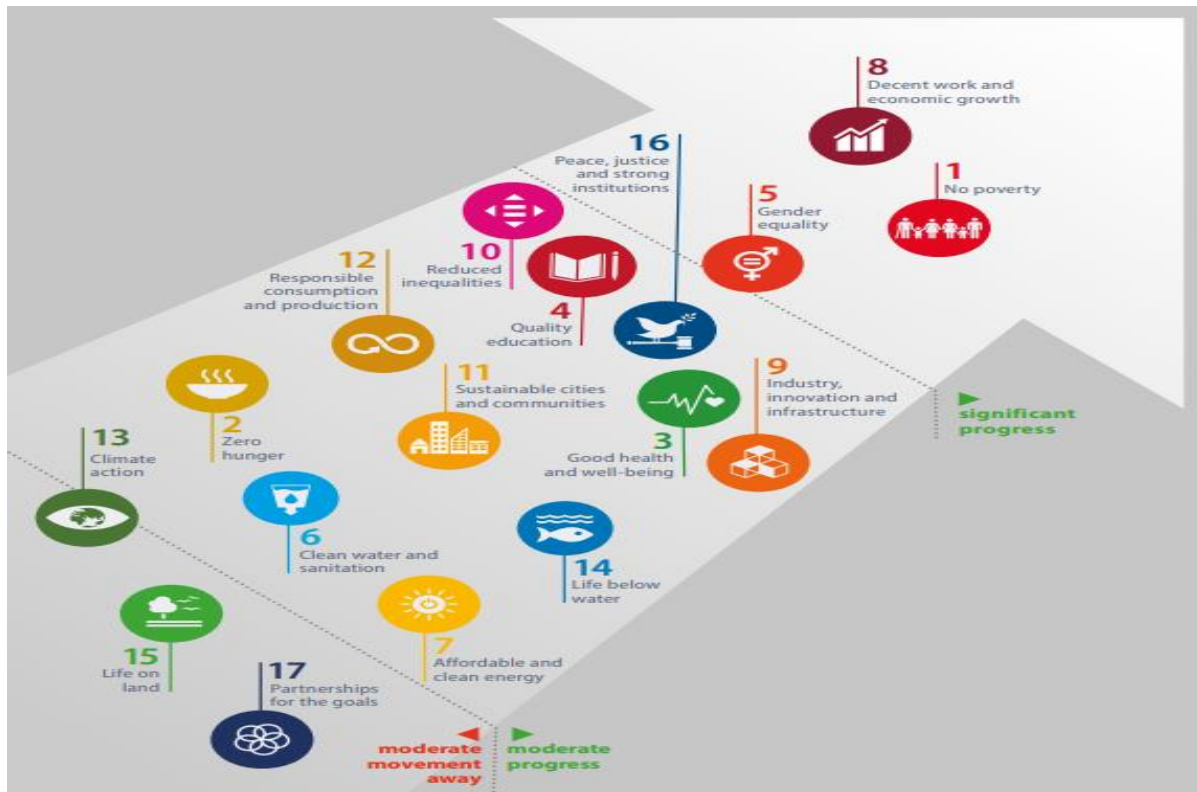


Figura 1.8: Andamento dell’UE negli *SDG* dal 2017 al 2022 (fonte UE 0). I punti migliori sono 8 e 1.



Figura 1.9: Andamento comunitario negli *SDG* 13,14,15 dal 2017 al 2022, il progresso è verso destra (fonte UE 0). Il punto 15 e 17 non raggiungendo la metà non fanno progressi.

Spostando l'attenzione al dominio mondiale, i report delle Nazioni Unite ammoniscono sul fatto che il mondo è in forte ritardo per raggiungere gli *SDG* entro il 2030 e che "il mondo è più fuori strada rispetto a quattro anni fa". A meno di drastici cambiamenti si potrebbe rischiare di vanificare quanto fatto, di aumentare le probabilità di farsi trovare esposti a crisi future e di avviare catene di sviluppo insostenibili 0 0.

In figura 1.10 e 1.11 si mostra in quale percentuale nel 2023 è stato compiuto il percorso per raggiungere l'obiettivo *SDG* e la distanza per raggiungere gli *SDG* del 2030 [148]0.

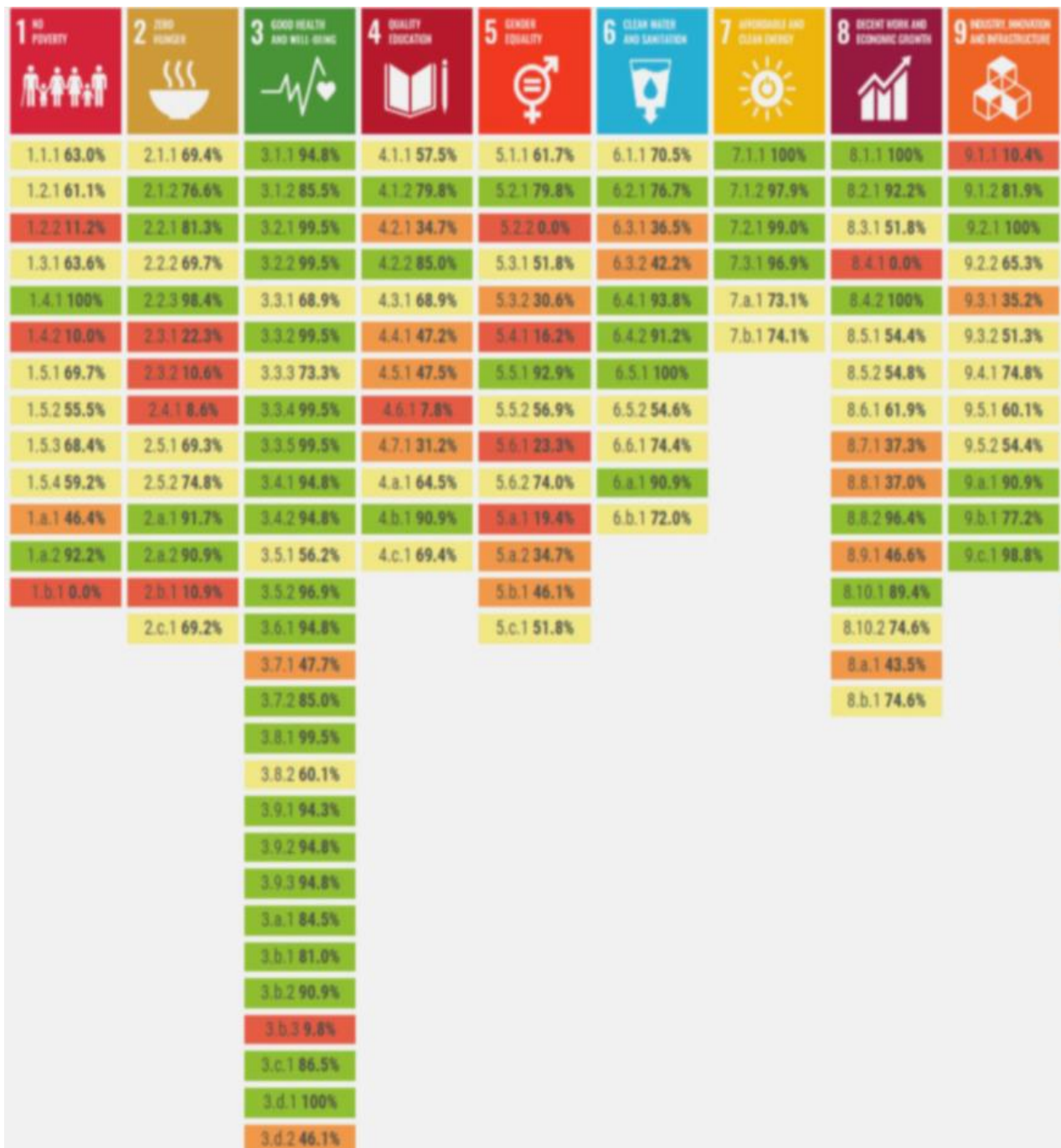


Figura 1.10: Percentuale di raggiungimento degli *SDG* 1-9 per tutti i Paesi del mondo con dati di almeno un anno dal 2015 ad agosto 2023 (fonte: Nazioni Unite 0). A livello mondiale il punto 1 è particolarmente non performante, il 3 e il 7 invece procede meglio.

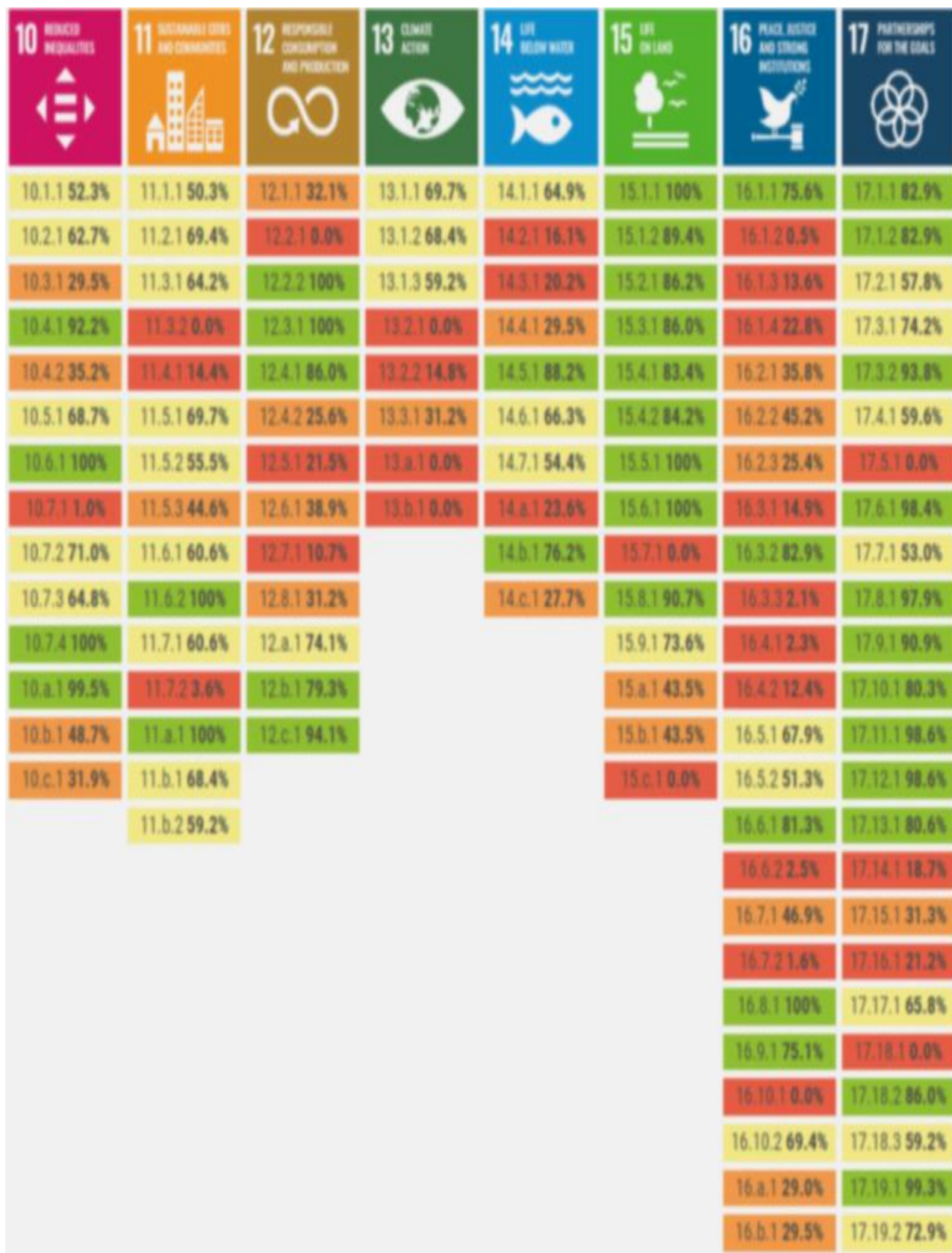


Figura 1.11: Percentuale di raggiungimento degli *SDG* 10-17 per tutti i Paesi del mondo con dati di almeno un anno dal 2015 ad agosto 2023 (fonte: Nazioni Unite 0). Alcuni indici sono a 0 e l'obiettivo 13 non ha un livello particolarmente alto.

In figura 1.12 vi è il grafico della temperatura media annuale globale dal 1850 al 2022 0.

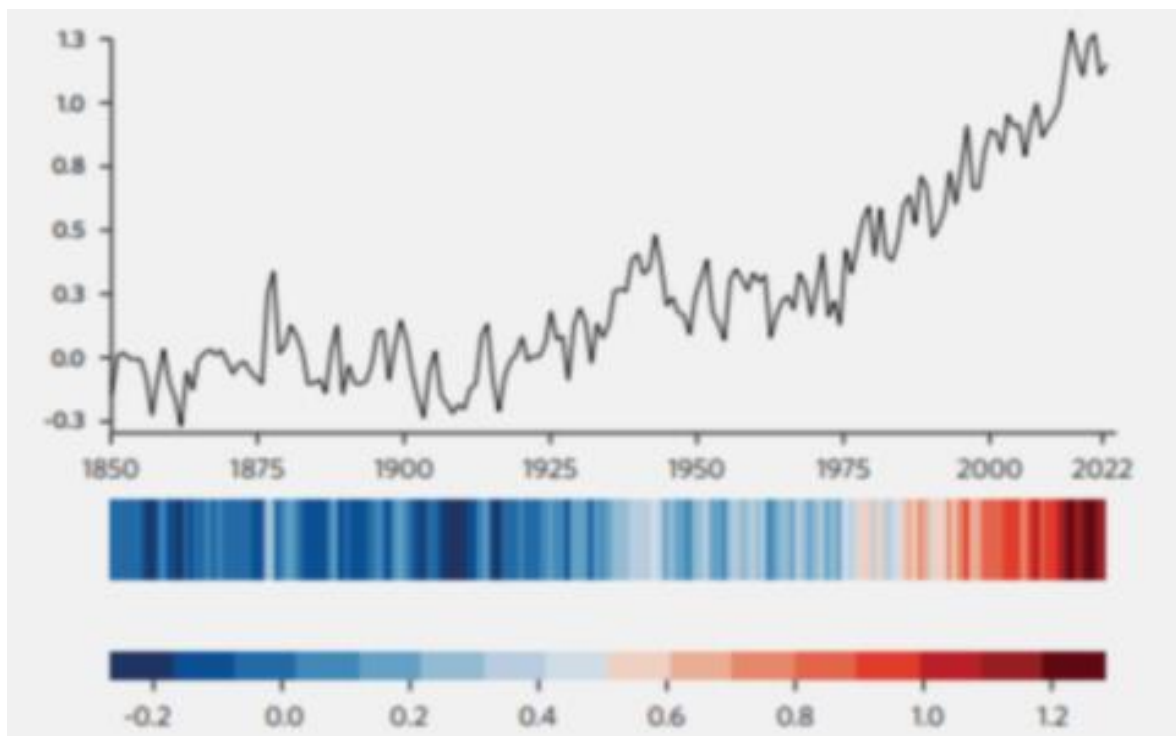


Figura 1.12: Andamento della temperatura media globale, dal 1975 vi è un *trend* crescente dal 1900 con un cambio di pendenza dal 1975 (fonte: Nazioni Unite 0).

L'aumento della temperatura terrestre è legato ai gas serra e nel 2019 il 75% dei gas serra è stato prodotto solo a causa della CO_2 . Globalmente il decennio tra il 2010 e il 2019 è stato in assoluto quello che ha prodotto più gas serra; tuttavia, il tasso di crescita di questo decennio è stato inferiore a quello tra il 2000 e il 2009.

Se si considerano le emissioni di gas serra fino all'ottobre 2021, è "**probabile che il riscaldamento supererà 1,5°C durante il XXI secolo**"; inoltre, secondo Jim Skea, se politicamente non si prenderanno provvedimenti "si prevede che le emissioni di gas serra aumenteranno oltre il 2025, portando a un riscaldamento globale medio di **3,2°C entro il 2100**".

Sempre secondo il medesimo accademico, impegnandosi potrebbe essere possibile avere emissioni nette zero di CO_2 nel settore secondario, in particolare occorrerà:

-una transizione verso processi di produzione elettrici, a idrogeno, a basse emissioni di gas serra e con bassa *carbon footprint*.

-miglioramento dell'efficienza nella gestione della domanda, dei materiali e dell'energia.

[145].

2. La valutazione e le performance di sostenibilità

In azienda gli indicatori sono utilizzati per capire e contestualizzare meglio il caso, per motivare una decisione e per stimare i progressi in relazione agli obiettivi concordati [116].

Alcuni studiosi consigliano l'utilizzo di un numero gestibile di indicatori chiave come tra 10 e 20 [117]. L'*OECD*, invece, propone di utilizzarne in base alle ambizioni aziendali: da 1 a 5 per iniziare, tra 6 e 12 e quella di oltre 13 indicatori monitorati per le organizzazioni più esperte [70]. Esistono indicatori generali o per uno specifico settore [69]. La determinazione degli indicatori è importante perché scelte differenti forniscono risultati diversi [19]. La selezione deve dipendere dal tipo di azienda e dai suoi obiettivi [24].

Fissando gli indicatori si determina anche il confine tra la competenza aziendale e la sfera temporale: ad esempio, una produzione annuale è soggetta a molto meno variabilità di una giornaliera. Inoltre, occorre concordare uno stadio di aggregazione dei dati e scegliere da che “altezze” vedere la situazione [50].

Joung, Che B. e altri hanno definito un elenco di criteri che un indicatore dovrebbe avere:

- misurabile: tramite strumenti sia quantitativi sia qualitativi;
- rilevante: in grado di dare informazioni sulla sostenibilità;
- comprensibile;
- affidabile: ossia che abbia informazioni attendibili;
- accessibile: con particolare riferimento all'organizzazione;
- tempestivo: occorre che sia misurabile in un arco temporale accettabile;
- orientato al lungo termine [67].

2.1 Gli indicatori ambientali più utilizzati oggi

Diversi autori suggeriscono che si possa misurare la sostenibilità [107],[108], altri invece scrivono di “*misurazione dell'incommensurabile*” [106],[109]. Come per altre parole astratte quali libertà, felicità, ecc., anche la sostenibilità non è misurabile; tuttavia, si possono costruire modelli su di essa [56].

Gli indicatori più utilizzati oggi per misurare la sostenibilità sono:

1) L'**energia grigia** o *embodied energy* [$\frac{J \text{ energia}}{kg \text{ di prodotto}}$]: di un prodotto è la quantità di energia totale (termica, elettrica, ...) necessaria per produrlo. Si considera anche quella per l'estrazione della materia prima e quella per il trasporto [190][83].

2) L'**impronta di carbonio** o *carbon footprint* di un prodotto [$\frac{kg \text{ di } CO_2}{kg \text{ di prodotto}}$]: è la quantità totale di CO_2 emessa per generare il prodotto. Anche qui considera tutto il ciclo di vita del prodotto. Nelle figure 2.1-2.7 sono rappresentati alcuni andamenti relativi alla CO_2 .

3) L'**impronta di acqua** o *water footprint* [$\frac{l \text{ litri}}{kg \text{ di prodotto}}$]: è la quantità totale di acqua necessaria durante tutto il ciclo di vita del prodotto (come l'acqua di processo e di lavaggio) [83]. In figura 2.8 vi è il grafico di uso di acqua a livello mondiale aggregato per regioni.

Hristov e Chirico propongono anche le emissioni di SO_x e NO_x , tassi di **utilizzo di energia rinnovabile**, **emissioni di gas serra**, **reddito mediano** e **utilizzo del suolo** (come la copertura di area naturale divisa per un fattore di normalizzazione come proposto anche dall'*OECD* [70]) [24]. La norma ISO 14031 considera anche indicatori su **rifiuti pericolosi** e rumori emessi.

Spangenberg e altri classificano l'utilizzo del terreno in quattro aree: classe I: sistemi antropici: ambiente totalmente edificati in cui l'uomo si sostituisce alla regolazione naturale; classe II: ecosistemi controllati dall'uomo, come l'agricoltura intensiva (ad alto input esterno); classe III: ecosistemi con bassi input esterni, come silvicoltura o pesca sostenibile; classe IV: ecosistemi protetti dall'uomo [108].

Slaper e altri considerano anche il reddito mediano e il **tasso di disoccupazione** [44]. Winroth e altri considerano anche il **valore aggiunto per dipendente** (per la dimensione economica) e **numero di incidenti all'anno** (per quella sociale) [29].

Equazioni per calcolare alcuni indici ambientali sono riportati in tabella 2.1

Tabella 2.1: equazioni per il calcolo di impatti ambientali.

Impatto	Sotto-impatto	Equazione	Fonte
Inquinamento	Tossicità		[154]

dell'aria		$X_{1ui} = LD_{50i} + TLV_i \times \ln(LC_{xi}) \quad (2.1)$ <p>LD_{50i} è la dose letale per il 50% dei soggetti, esempi di LD_{50i} variano da 1mg (pericolosamente tossico) a 15 mg (poco tossico) [159]</p> <p>TLV_i è la soglia del valore limite di esposizione di 8 ore in $\left[\text{ppm o } \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right]$ senza ricevere danni, per la CO_2 è $9000 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$.</p> <p>$\ln(LC_{xi})$ è il logaritmo naturale della concentrazione letale dei gas. i è il pedice per l'inquinante</p>	[58]
	Smog fotochimico	$X_{2ui} = \text{ozono parti per miliardo} \quad (2.2)$	[155], [157]
	Acidificazione	$X_{3ui} = \frac{\text{concentrazione inquinante in } \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}}{\text{livello critico pari a } 1.624,7r_{mi} - 9,04 \text{ (CL)}} \quad (2.3)$ <p>r_{mi}: resistenza del mesofillo all'inquinante</p> $= \frac{1}{(3.000/H_i^*) + 100f_{0i}} \quad (2.4)$ <p>f_{0i} misura la reattività dell'ossidazione biologica: 0.1lentamente reattivo e 1 altamente reattivo;</p> <p>H_i^* è la costante di Henry per il gas in $\left[\frac{M}{\text{atm}}\right]$</p>	[155] [155], [156], [157]
	Riscaldamento	$X_{4ui} = (\text{Warming})_i \times Q_i \quad \left[\frac{\text{anno}}{\text{cm}^2 \text{atm}}\right] \quad (2.5)$ <p>Q_i quantità di inquinante rilasciato;</p>	[158]

	globale	$(Warming)_i = \frac{\tau_i \times IR_{absi}}{MM_i} \left[\frac{\text{anno}}{\text{cm}^2 \text{g atm}} \right] \quad (2.6)$ <p>τ_i è la durata nell'atmosfera dell'inquinante;</p> <p>IR_{absi} è la radiazione infrarossa riemessa dai gas serra nell'atmosfera (radiazione che prima di arrivare ai gas serra, poi assorbita ed emessa dalla terra e infine arriva al gas serra);</p> <p>MM_i è la massa molecolare dell'inquinante i $\left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]$</p>	
	Buco dell'ozono	$X_{5ui} = OD_i \times \frac{Q_i}{MM_i} \quad (2.7)$ <p>OD_i: consumo di strato di ozono = $\tau_i \times (n_{Cl} + 30n_{Br}) \left[\frac{\text{anno}}{\text{molecola}} \right]$ (2.8)</p> <p>n_{Cl}, n_{Br} sono il numero di atomi di Cl e Br per molecola</p>	[158] [58]
Inquinamento dell'acqua	Metalli pesanti	$X_{6ui} = \text{quantità di metallo utilizzato}$	[58]
	NO_x	$X_{7ui} = \text{quantità di } NO_x \text{ emessa}$	[58]
Inquinamento del terreno	Pesticidi	$X_{8ui} = \text{quantità di pesticidi utilizzati}$	[58]
	Fertilizzanti	$X_{9ui} = \text{quantità di fertilizzanti utilizzati}$	[58]
Consumo delle risorse	Acqua	$X_{10ui} = \text{quantità di acqua utilizzata}$	[58]
	Materiali fisico	$X_{11ui} = \text{quantità di materiale utilizzato}$	[58]
	Materiale chimico	$X_{12ui} = \text{quantità di prodotti chimici utilizzati}$	[58]
	Gas naturale	$X_{13ui} = \text{quantità di gas naturale utilizzato}$	[58]
	Petrolio	$X_{14ui} = \text{quantità di petrolio utilizzato}$	[58]
	Carbone	$X_{15ui} = \text{quantità di carbone utilizzato}$	[58]

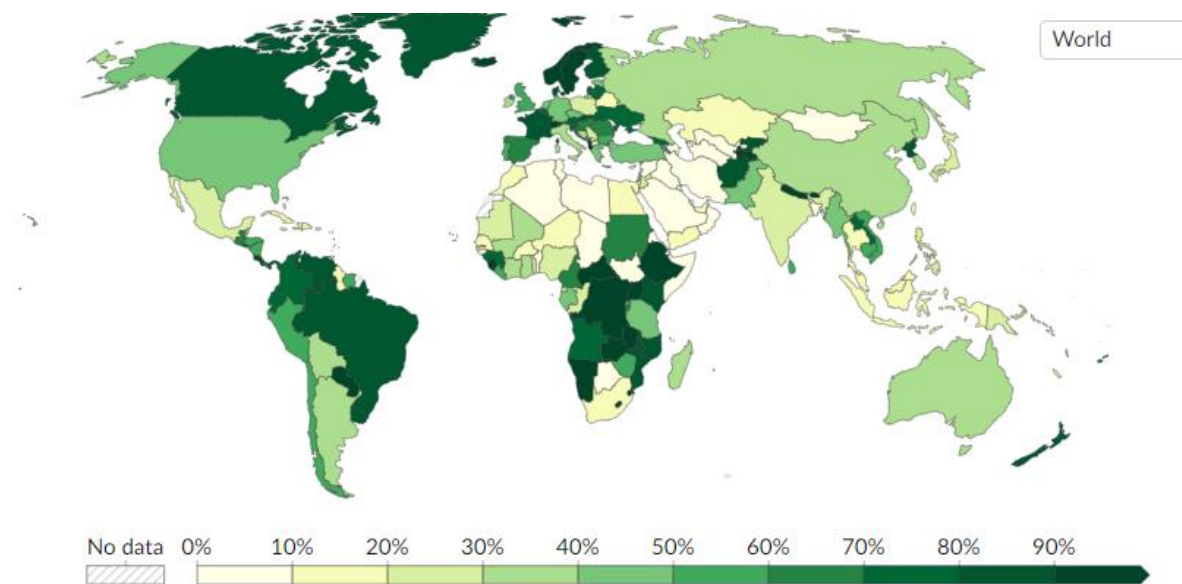


Figura 2.1: Uso di fonti a basso impatto di carbonio per l'energia elettrica nel mondo nel 2022 (*Our world in data*). Albania, Bhutan, Repubblica Centrafricana, Lesotho e Nepal sono gli unici stati che nel 2022 hanno utilizzato solo energia a basso impatto di carbonio. Nel 2022 la Francia ne ha utilizzato 87,85%, la Germania 49,22%, Gran Bretagna 56,27%, USA 40,48%, Cina 35,4% [3].

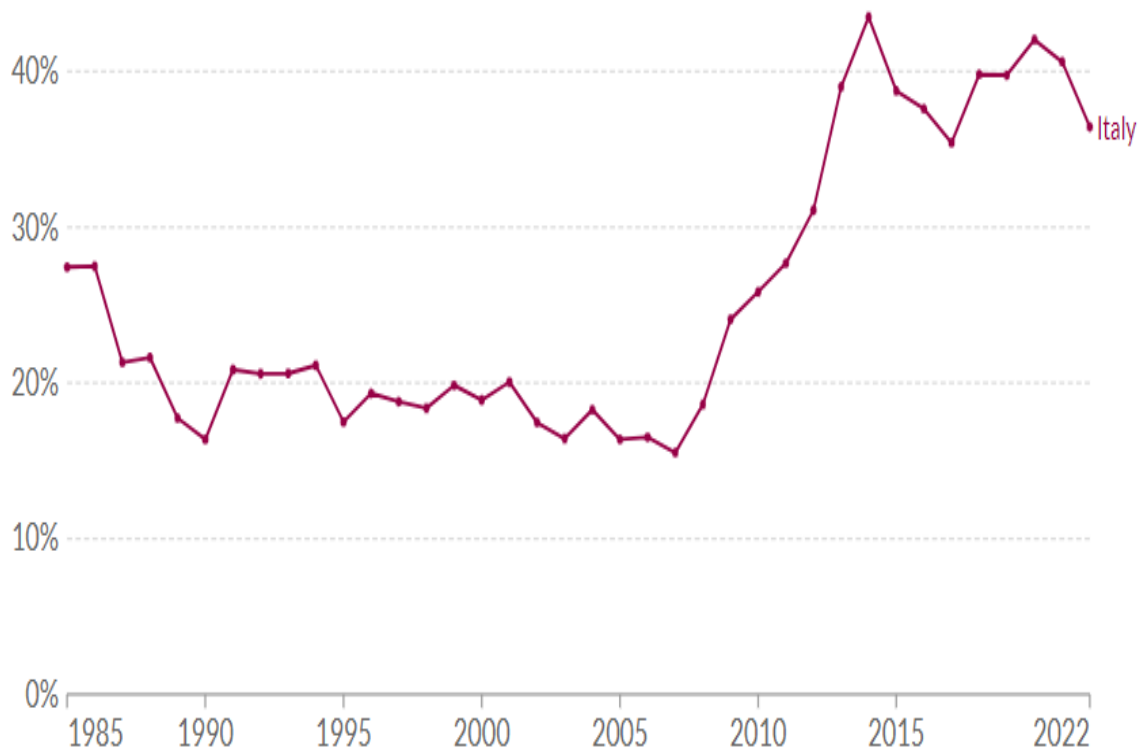


Figura 2.2: Uso di fonti a basso impatto di carbonio per l'energia elettrica in Italia (*Our world in data*). L'Italia nel 2015 ne ha utilizzato il 15,53. Si assiste poi a una crescita esponenziale arrivando a toccare 43,5% nel 2014. Nel 2022 ne ha utilizzato il 36,44% [6].

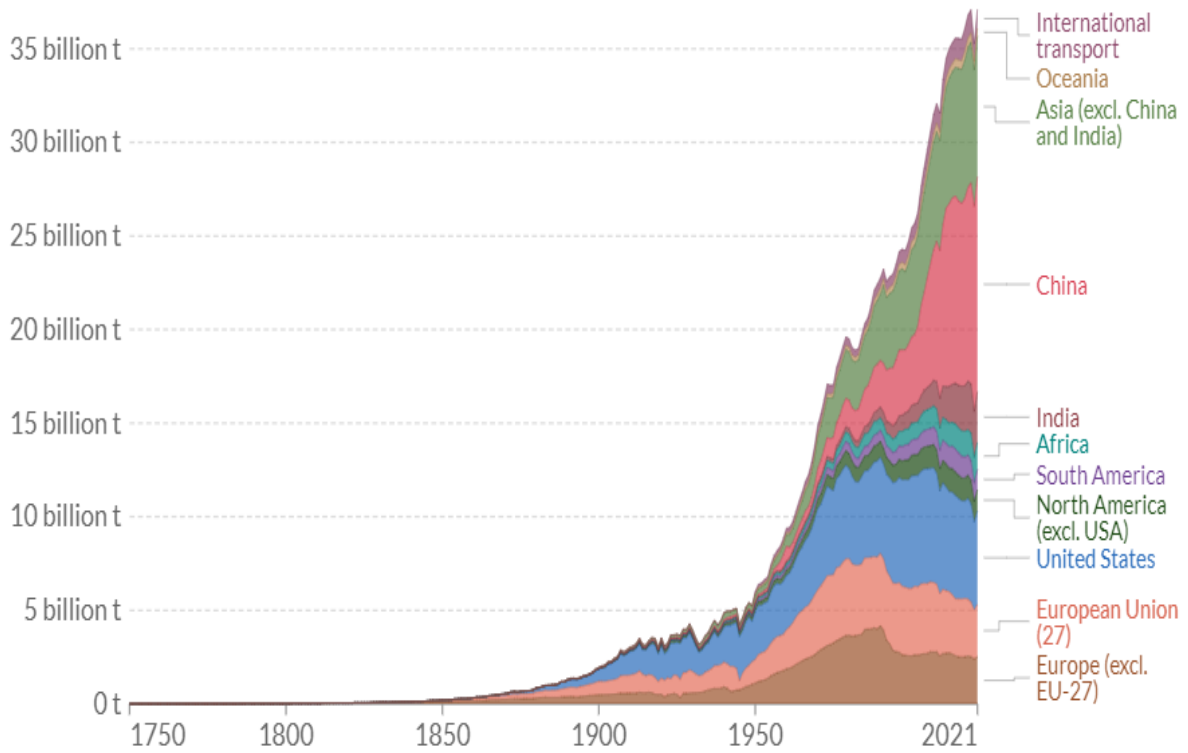
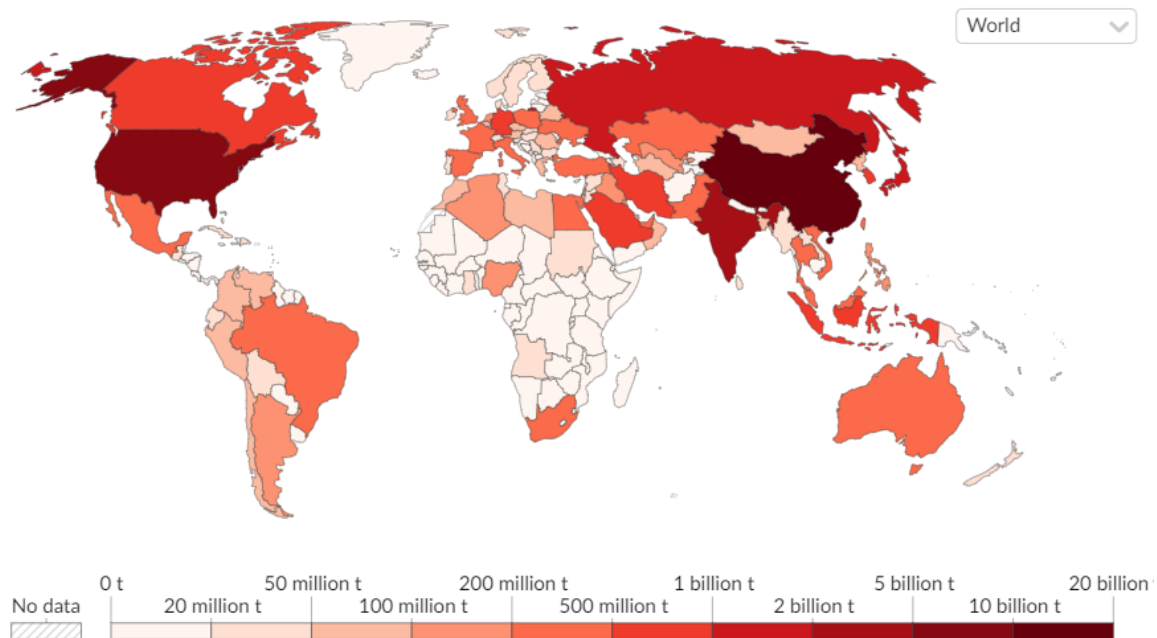


Figura 2.3: Emissioni annuali mondiali di CO_2 per Regioni del mondo (fonte: *Our world in data* e *Global Carbon Budget*) Nel 2021 sono state emesse 37.123.850.000.00 t di CO_2 [6].

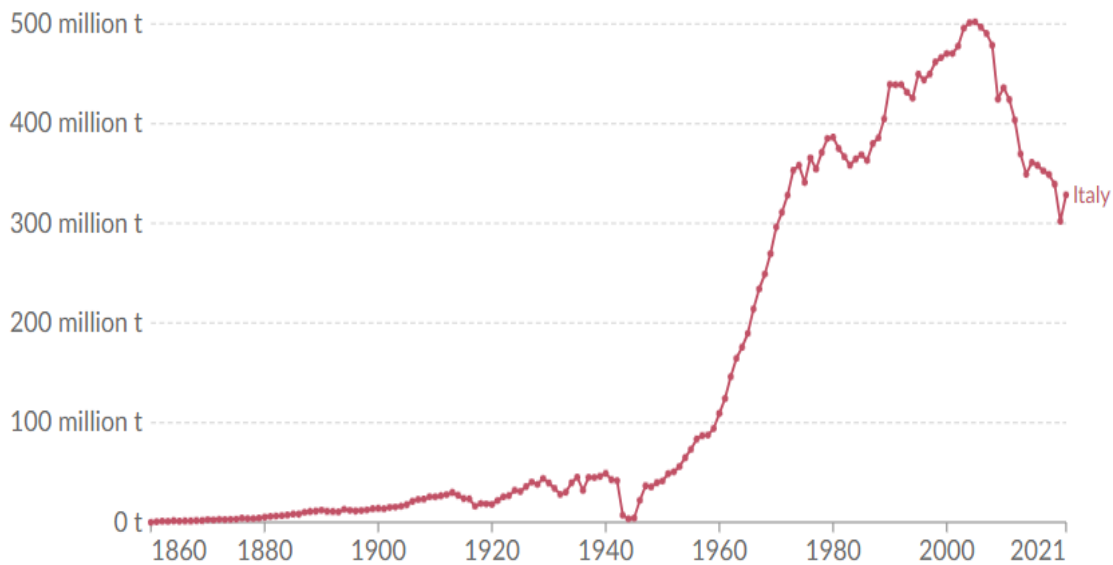
[2]



Source: Global Carbon Budget (2022)

OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions • CC BY

Figura 2.4: Emissioni mondiali di CO_2 da fonti fossili e industrie nel 2021 (fonte: *Our world in data* e *Global Carbon Budget*). La Cina ha emesso 11.47 miliardi di t di CO_2 , gli USA 5 miliardi di t, l'UE 2.8 miliardi di t di CO_2 **Error! Reference source not found.**



Source: Global Carbon Budget (2022)

OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions • CC BY

Figura 2.5: Emissioni annuali di CO₂ in Italia (fonte: *Our world in data* e *Global Carbon Budget*). Si è assistita a una crescita esponenziale dagli anni '60 fino al 2004 (501 milioni di t). Ci sono state quasi 329 milioni di t nel 2021 [2].

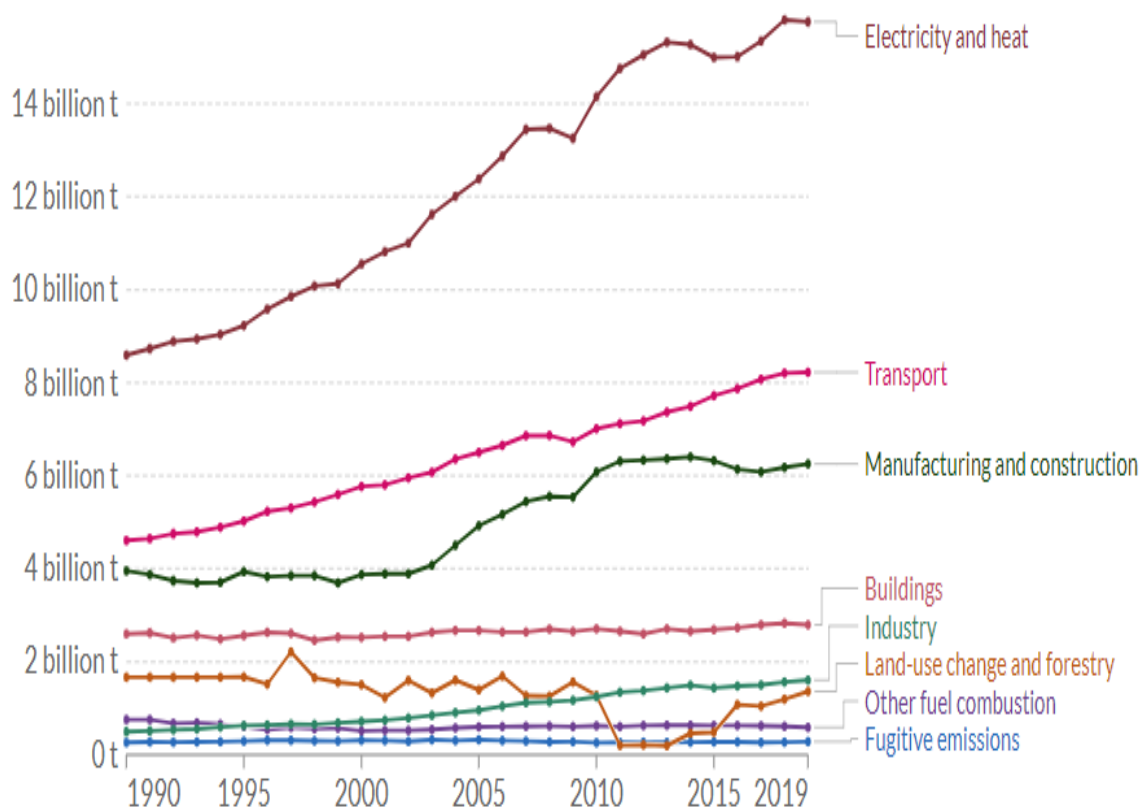
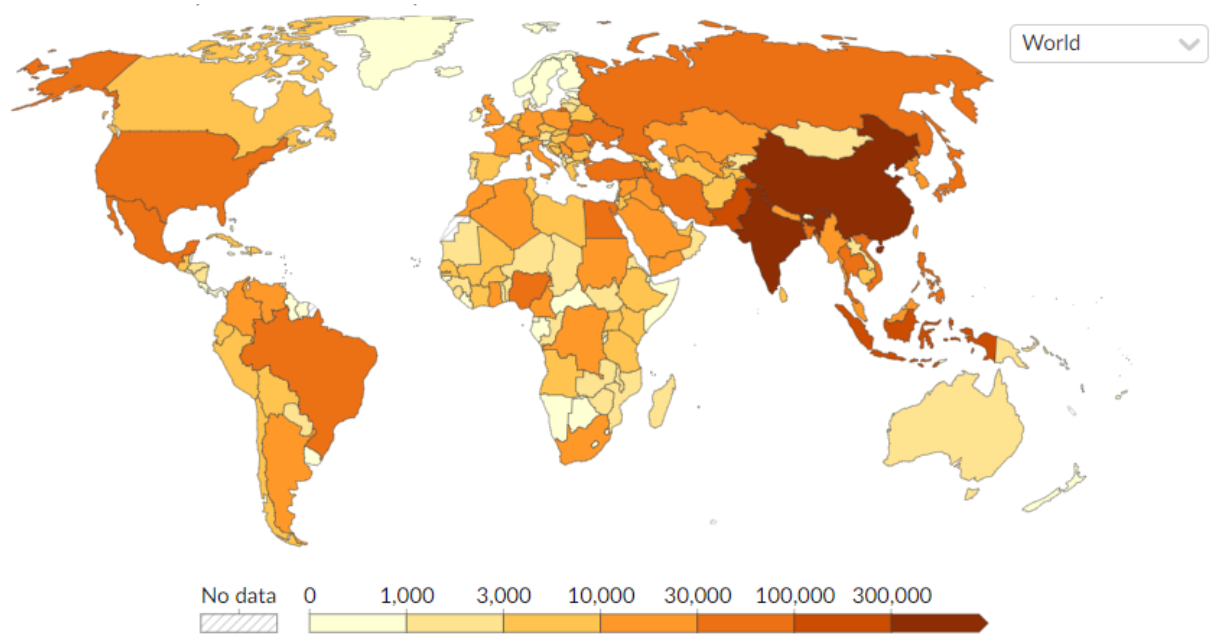


Figura 2.6: Emissioni mondiali di CO₂ per settore (fonte: *Our world in data*). Il settore dell'elettricità è quello più incisivo nell'emissione di anidride carbonica nel mondo [4].



Source: IHME, Global Burden of Disease (2019)

OurWorldInData.org/outdoor-air-pollution • CC BY

Figura 2.7: Morti per inquinamento per paese nel 2019 (fonte: *Our world in data* e *Global Burden of Disease*) [2]. In Cina sono state 1.423.633. L'Italia è 25^{esima} con 24.666. A San Marino 6. Gli unici due Paesi con 0 morti per inquinamento nel 2019 sono stati Niue e Tokelau.

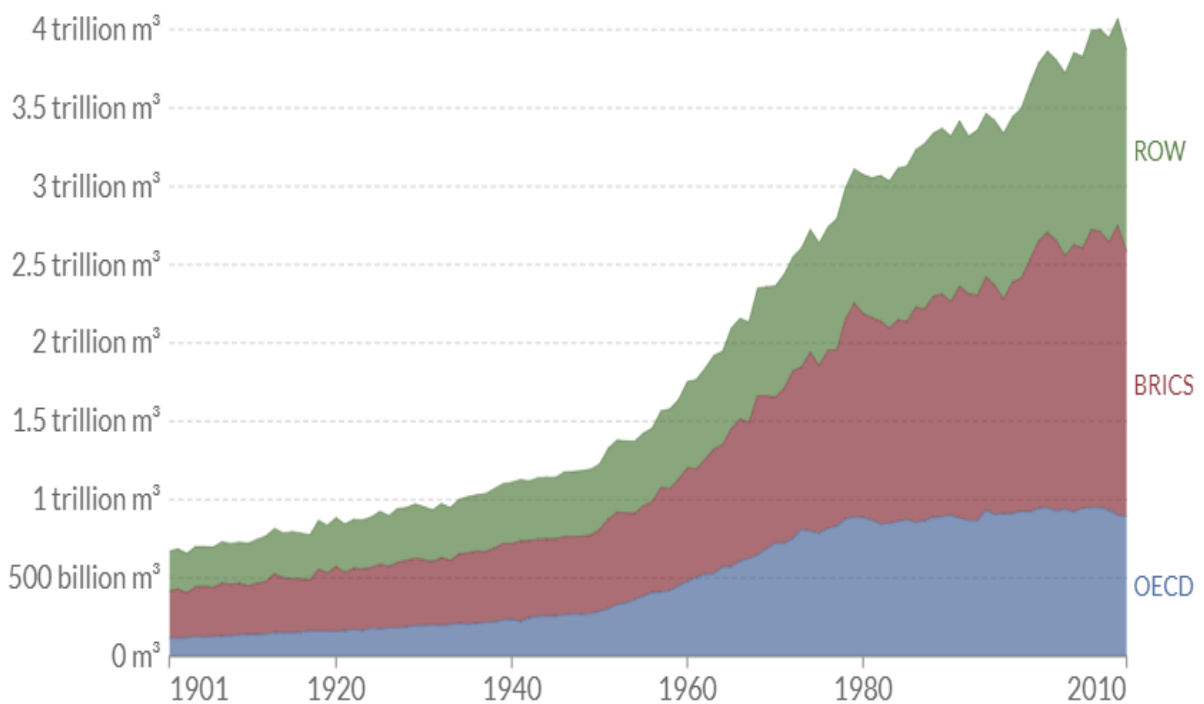


Figura 2.8: Uso di acqua a livello mondiale aggregato per regioni di *OECD*, *BRICS* (Brasile, Russia, India, Cina e Sud Africa) e *ROW* (Resto del Mondo) dal 1901 al 2010 (*Our world in data*) [8].

Joung, Che B. [67] e altri, l'*OECD* [70], la norma ISO 14031 [62] e il *NIST*[68] suggeriscono di considerare per i sistemi di produzione, oltre ai quattro pilastri della sostenibilità, altre due dimensioni che misurano indirettamente le tre estensioni tradizionali della sostenibilità [67].

La prima è la **performance manageriale** [67], che si suddivide in quattro sottocategorie:

- Conformità: è la capacità di un'organizzazione di soddisfare standards e raccomandazioni del settore e di raggiungere alti livelli di qualità [67] [68]. Si possono utilizzare come indicatori: il numero di azioni correttive, il costo delle multe, le frequenze di revisione e il numero di esercitazioni di emergenza [62].
- Performance finanziaria-ambientale: è l'andamento degli investimenti ambientali [67] [68]. Si possono usare come indicatori anche l'aumento delle vendite legato ai prodotti ecologici [62] [70]; il miglioramento dell'efficienza attraverso la riduzione degli sprechi; la riduzione della dipendenza da prodotti costosi o pericolosi tramite la sostituzione con altri più *green* [70], le passività di natura ambientale [62].
- Coinvolgimento della comunità [67] [68]. Si può ponderare con i progressi nelle attività di bonifica locale, le risorse applicate a sostegno di programmi ambientali comunitari, con il numero di programmi forniti alla comunità [62], una valutazione del morale dei dipendenti e della reputazione [70]. Questi ultimi due fattori, oltre ad avere fini sostenibili, hanno risvolti strategici: aumentano la produttività e migliorano la "cattura" del valore lungo la catena di fornitura (per esempio fornendo più potere contrattuale a monte e a valle dell'impresa).
- Indicatori di strategia: valutano l'efficacia dei programmi scelti dal management [67] [68]. Si possono soppesare con il numero di obiettivi raggiunti tenendo traccia di quanti di questi sono ambientali e con il numero di unità organizzative che vi hanno partecipato [62].

La seconda riguarda **il progresso tecnologico** [67] ed è classificabile in:

- Indicatori dei prodotti high-tech: si possono rilevare con la percentuale e i numeri di nuova tecnologia utilizzata, venduta e acquistata.
- Ricerca e sviluppo, schedabile in: personale di ricerca e sviluppo (per esempio in considerandone l'esperienza); spesa in ricerca e sviluppo; numero di brevetti e di articoli scientifici pubblicati [67] [68].

L'avanzamento tecnologico, oltre che a essere utile a raggiungere una maggiore sostenibilità, dà flessibilità all'azienda e può permettere di farsi trovare pronti ai cambiamenti, ottenendo

così un vantaggio competitivo e strategico.

In figura 2.1 vi è lo schema dei valori sostenibili tradizionali e aggiuntivi proposto dal *NIST*.

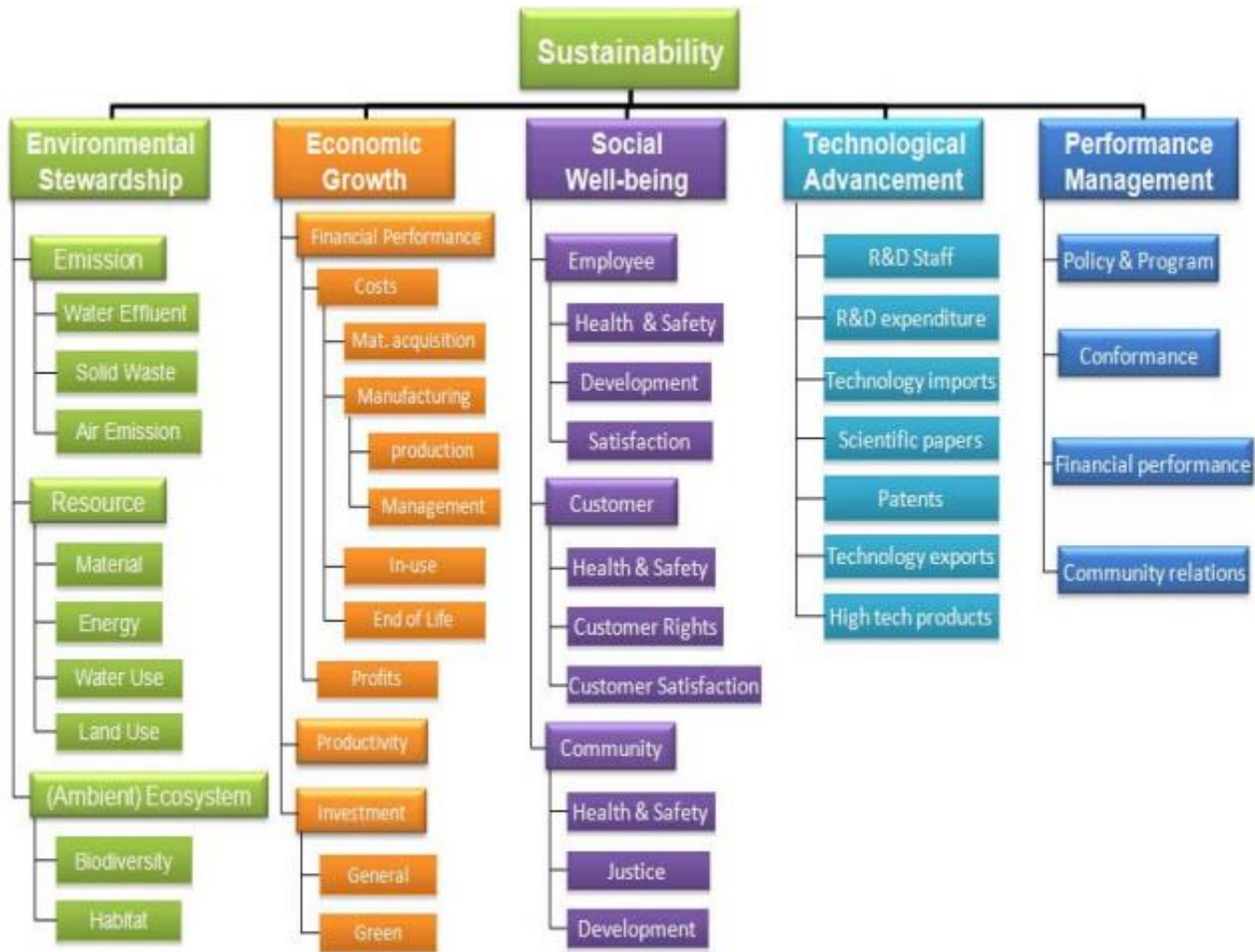


Figura 2.10: Mappa delle dimensioni sostenibili tradizionali e aggiuntive proposte dal *NIST* [68].

Anche il *Commission on Sustainable Development CSD* delle Nazioni unite [113] e il *Global Sustainability Standards Board* (con il *Global Reporting Initiative GRI*) [72] hanno proposto un elenco di indicatori di sviluppo sostenibile.

2.2 Procedura di valutazione della sostenibilità

Il primo passo è mappare le entità che hanno un impatto rilevante.

Occorre poi scegliere e contestualizzare l'indicatore in una applicazione, ossia fissare il luogo, l'unità di misura e l'unità di misura contestualizzata.

Un esempio di contestualizzazione è: *indicatore: stipendio mensile; contesto: Honduras 2019; unità di misura: percentuale di lavori dignitosi; unità di misura (contestualizzata): salari di almeno 620 USD al mese con un massimo di 48 ore settimanali* [19][192].

Nel terzo passo si scelgono gli strumenti, si raccolgono i dati e si calcola il punteggio di accuratezza di questi:

- 3 punti per dati primari e con massimo due anni;
- 2 punti: se il dato ha tra due e cinque anni o se è un dato secondario;
- 1 punto: se ha oltre cinque anni o è uno stimatore.

Nel quarto *step* si scelgono gli indicatori, che si pesano attraverso un coefficiente, si valutano e si aggregano. Si possono classificare gli indicatori in:

- Indicatori di prestazioni: misurano la performance di un'operazione, possono identificare delle tendenze e comunicare risultati. Possono assumere valutazioni con valori tra 1 e 5.
- Indicatori di pratica o prescrittivi o di processo. Non misurano ma “guardano” al sistema, per esempio all'esistenza di strumentazione per garantire sicurezza e altri fattori. La causa-effetto tra un dato di processo e un risultato non è mai preciso ed è accompagnato da un errore sostanziale. Sono valutabili con cifre tra 1 e 3.
- Indicatori di obiettivi: Si concentrano sugli esiti di piani, politiche o monitoraggi valutandone l'attuazione. Il dominio di valutazione ha valori compresi tra 1 e 3.

Si può ottenere la valutazione attraverso:

Punteggio finale

$$= \frac{\sum_{indicatori} (coefficiente_{indicatore} \cdot peso_{tipo\ indicatore} \cdot valutazione_{indicatore})}{\sum_{indicatori} (coefficiente_{indicatore} \cdot peso_{tipo\ indicatore} \cdot valutazione_{massima\ indicatore})} \quad (2.9)$$

Infine, si stila un report che consiste in:

- un diagramma circolare a settori fissi delle valutazioni degli indicatori, come in figura 2.11;
- una illustrazione dei problemi, dei vincoli, della qualità dei dati;
- una conclusione generale critica [19].

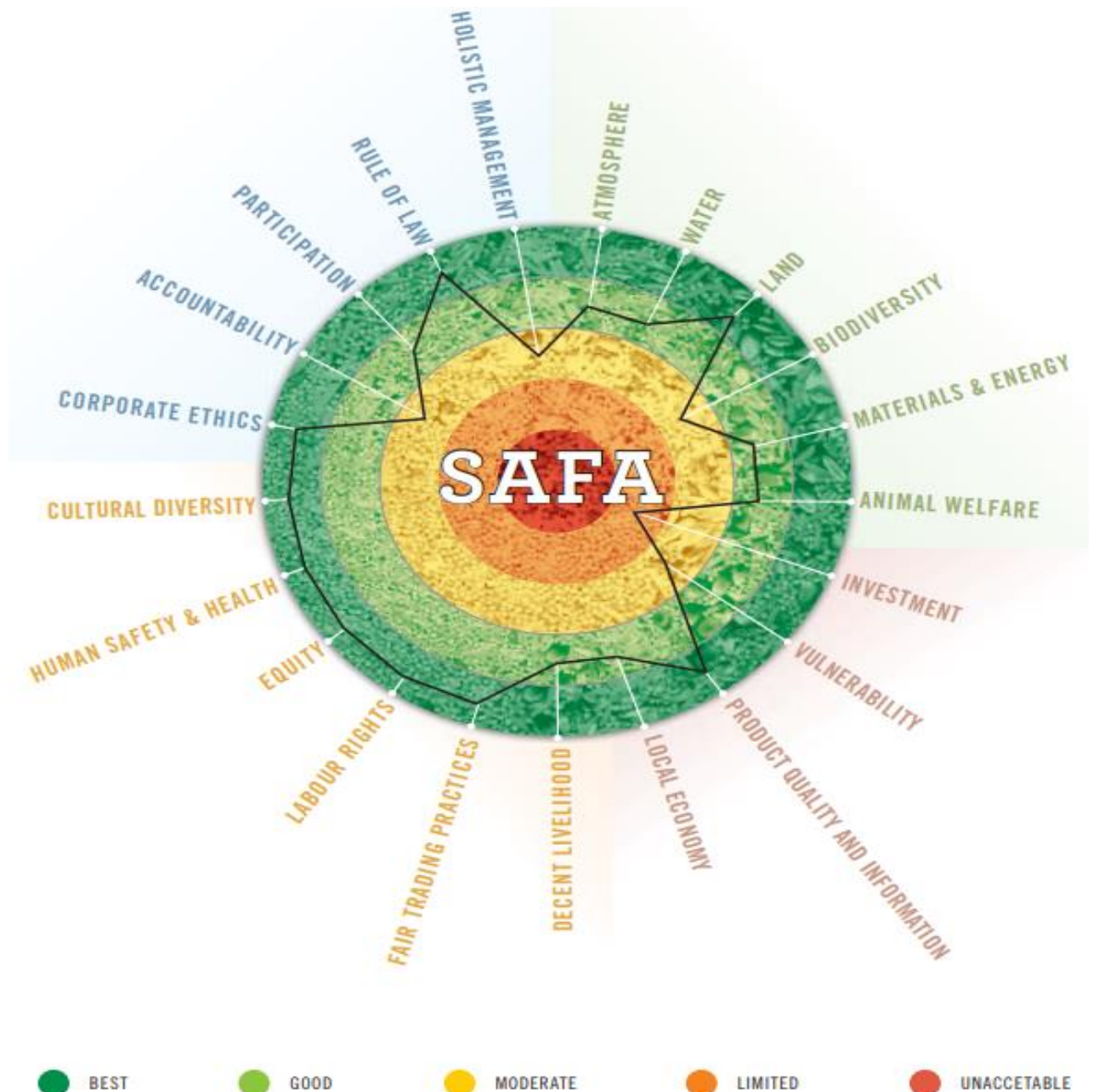


Figura 2.11: Diagramma circolare a settori fissi con indicatori del SAFA. L'area ambientale più appariscente e con un coefficiente di valutazione maggiore rispetto a quelli sociali [19].

Per gestire il sistema si può seguire la normativa ISO 14001 attraverso in modello iterativo che consiste di:

- plan*: stabilire obiettivi e processi ambientali.
- do*: implementare i processi come pianificato dal management.
- check*: monitorare e misurare i processi.
- act*: intraprendere azioni per migliorare continuamente [60].

2.3 Valutazione del valore aggiunto sostenibile

Il valore aggiunto (*VA*) in un'azienda è definito come differenza tra il fatturato e il costo dei beni e servizi acquistati dall'azienda. Lo specchio decisionale è raffigurato in tabella 2.3.

Si può rapportare il valore aggiunto agli impatti sociali e ambientali in modo assoluto o relativo.

Il modo assoluto, detto **valore aggiunto netto** o valore aggiunto verde, misura l'efficacia sostenibile, ossia l'effetto netto ed è la differenza tra benefici e costi interni ed esterni (formula 2.10):

$$\text{Valore aggiunto netto} = \text{benefici}_{\text{interni ed esterni}} - \text{costi}_{\text{interni ed esterni}} \quad (2.10)$$

L'ipotesi di danni ambientali e sociali monetizzati (che comprende la piena sostituibilità tra impatto sociale e ambientale) potrebbe essere difficile da valutare: consente di vedere se un'impresa raggiunge una certa soglia di sostenibilità (domanda if?).

La prospettiva relativa è detta **valore aggiunto sostenibile relativo**. Rileva l'efficienza sostenibile (ambientale e sociale) ossia i benefici per unità di impatto (il grado in cui un'azienda utilizza le risorse ambientali rispetto alla sua economia). La formula è:

$$\text{Valore aggiunto sostenibile relativo} = \frac{\text{Valore aggiunto}}{\text{Impatto totale ambientale (oppure impatto totale sociale) aggiunto (ITAA o ITSA)}} \quad (2.11)$$

L'*ITAA* rappresenta la nocività ambientale di tutti i flussi (di energia, di materiali etc.) aziendali. L'analogo per il danno sociale è l'*ITSA*.

Esistono due ostacoli all'uso di questa misura:

- non fornisce informazione sull'efficacia sostenibile in termini assoluti, per esempio quanta CO_2 si emette);
- è in dubbio la correttezza nell'integrare tutti gli impatti ambientali o sociali in un'unica unità comune di impatto aggiunto.

Se per esempio si convertono tutti gli impatti ambientali in CO_2 equivalente, allora *ITAA* sarebbe l'impronta di carbonio di tutti i processi.

L'efficienza sostenibile mostra quanto valore si crea per *ITAA* (o *ITSA*). Corrisponde anche al prezzo che un'azienda può al massimo pagare per convincere un'altra azienda a "rinunciare" alla risorsa impatto (per esempio approssimando convertendo *ITAA* nell'impronta di carbonio, l'efficienza sostenibile diventa il prezzo per emettere 1 kg di carbonio). L'efficienza sostenibile permette di riconoscere dove le risorse devono essere allocate per ottenere la massima sostenibilità (domanda: *where?*). Graficamente l'efficienza è la pendenza della retta passante per l'origine in cui l'asse verticale è il valore aggiunto e l'asse orizzontale l'impatto ambientale o sociale.

Un aumento dell'efficienza sostenibile può portare a una riduzione dell'efficacia sostenibile. Quindi si deve considerare simultaneamente l'efficienza (*dove?*) e l'efficacia sostenibile (*se?*). Lo si può fare attraverso il valore aggiunto sostenibile relativo:

$$\text{Valore aggiunto sostenibile assoluto} = \text{Valore aggiunto} + \\ - \text{costi esterni sociali e ambientali} + \text{Valore aggiunto sostenibile relativo} \quad (2.11)$$

Tabella 2.3: matrice del valore aggiunto sostenibile. In verticale *if?* In orizzontale *where?*

		Benefici > costi ? (<i>If?</i>)	
		considerato	non considerato
Beneficio massimo? (<i>Where?</i>)	considerato	valore aggiunto sostenibile assoluto o efficacia sostenibile	valore aggiunto sostenibile relativo o efficienza sostenibile
	non considerato	valore aggiunto netto	valore aggiunto (<i>VA</i>)

Il costo "opportunità" è il valore dovuto all'assegnazione delle risorse all'azienda piuttosto che all'alternativa (*benchmark*). Aziende meno efficienti accetteranno di vendere una risorsa se crea più valore che utilizzandola. Il prezzo totale pagato a causa degli impatti è l'efficienza sostenibile del *benchmark* ed è anche il costo opportunità.

È doveroso osservare che il costo opportunità in questo contesto **non** significa pagare le **vittime** di effetti esterni per fare accettare loro questo impatto, come invece accade negli approcci assoluti.

Se si considera come costo opportunità Ez_b l'efficienza sostenibile del PIL (ossia come l'economia nazionale usa efficientemente l'impatto), allora per diventare più sostenibili a livello nazionale dovrebbero impattare le aziende con più alta efficienza sostenibile rispetto agli utilizzatori (alle imprese che causano impatti) iniziali. Tuttavia, un'azienda è disposta ad acquistare un impatto limitatamente alla crescita economica aziendale. Questa condizione si può esprimere come:

$$VA_{t_1} - VA_{t_0} \geq Ez_b \cdot (ITAA_{t_1} - ITAA_{t_0}) \quad (2.12)$$

dove t_0 e t_1 indicano i periodi. Il Valore Aggiunto Sostenibile si crea se vi è valore aggiunto e l'impatto tra t_0 e t_1 sono compensati. Il Valore Aggiunto Sostenibile di singolo impatto si può anche esprimere: crescita economica meno il costo della compensazione, formula (2.13):

$$SusVA_{si} = CE - Ez_b \cdot (ITAA_{t_1} - ITAA_{t_0}) \quad (2.13)$$

dove $SusVA_{si}$ è Valore Aggiunto Sostenibile per il singolo caso di impatto.

$$CE = VA_{t_1} - VA_{t_0} \text{ è la crescita economica} \quad (2.14)$$

$$ITAA_{t_1} - ITAA_{t_0} \text{ l'impatto ambientali da compensare} \quad (2.15)$$

Se il valore Aggiunto Sostenibile (equazione 2.13) ha come Ez_b l'efficienza sostenibile del PIL, allora esprime in termini monetari quanto l'andamento di un'azienda in un periodo tra t_0 e t_1 ha contribuito a rendere più sostenibile l'economia nazionale; oppure anche quanto valore aggiunto ha creato a parità di impatto.

Nel caso di impatti multipli si distingue la sfera ambientale da quella sociale. Sia n il numero di impatti ambientali e m di quelli sociali, $EzE_{i,b}$ e $EzS_{j,b}$ l'eco-efficienza ecologica e sociale del *benchmark* per la risorsa ambientale i e la risorsa sociale j rispettivamente, EIA_{i,t_0} l'eco-efficacia e SIA_{j,t_1} l'efficacia sociale. Questi fanno riferimento tra un periodo tra t_0 e t_1 . Quindi si può impostare la disequazione in cui la crescita economica deve essere più grande del mix di effetti ambientali e sociali, ossia:

$$VA_{t_1} - VA_{t_0} \geq \frac{1}{n+m} \left[\sum_{i=1}^n EzE_{i,b} \cdot (EIA_{i,t_1} - EIA_{i,t_0}) + \sum_{j=1}^m EzS_{j,b} \cdot (SIA_{j,t_1} - SIA_{j,t_0}) \right] \quad (2.16)$$

Le efficienze si utilizzano per valutare i cambiamenti nell'efficacia sostenibile. Dividendo per il numero di impatti $n+m$, si ottiene la media ponderata. La formula del Valore Aggiunto Sostenibile per il caso a impatti multipli è:

$$SusVA \geq CE - \frac{1}{n+m} \left[\sum_{i=1}^n EzE_{i,b} \cdot (EIA_{i,t_1} - EIA_{i,t_0}) + \sum_{j=1}^m EzS_{j,b} \cdot (SIA_{j,t_1} - SIA_{j,t_0}) \right] \quad (2.17)$$

$$CE = VA_{t_1} - VA_{t_0} \text{ rappresenta la crescita economica} \quad (2.18)$$

Il Valore Aggiunto Sostenibile *multi-impatto* ($SusVA$) è dato dalla crescita economica depurato da costi e ricavi derivanti da variazioni dell'efficacia eco-sociale aziendale. Poiché $SusVA_{Si}$ può essere interpretato come crescita economica meno la somma di tutti i costi di compensazione, il Valore Aggiunto Sostenibile per il caso di impatti multipli può essere calcolato anche attraverso la formula (2.19).

$$SusVA \geq EG - \frac{1}{n+m} \left[\sum_{i=1}^n (CE - SusVA_{si}) + \sum_{j=1}^n (CE - SusVA_{sj}) \right] \quad (2.19)$$

I limiti di questo metodo riguardano la disponibilità di **fondi** sufficienti in azienda, poi la volontà di volere spendere questi fondi e infine l'esistenza o meno di un **mercato** commerciale per gli impatti ambientali e sociali [107].

3. Il prodotto

3.1 Progettazione del valore del prodotto sostenibile

I più importanti requisiti e variabili sostenibili da considerare al momento della progettazione di un prodotto sono:

La **qualità** del prodotto, che si divide in tre parti: qualità di prodotto minimo, cioè che sia idoneo all'uso; qualità di prodotto aspettato dal cliente (insieme di caratteristiche non necessarie al funzionamento, ma che il cliente si attende); qualità aumentate di prodotto (aggregato di attributi che il prodotto ha e che il cliente non si aspetta [152] come durata, affidabilità, prezzo di possibile rivendita, valore del marchio. La qualità del prodotto è il fattore più importante per fissare il prezzo con il cliente lungo la catena del valore, ma non è l'unico, per esempio può incidere anche il marchio, il marketing, la concorrenza, ecc.

I **servizi** sono offerti ai clienti prima e dopo l'acquisto sia per il prodotto sia per gli articoli di supporto (come esperienza di acquisto, politiche di reso, canali di distribuzione, metodi di pagamento, ecc.).

I **valori sociali** si riferiscono agli impatti sull'organizzazione (internamente ed esternamente), sui diritti commerciali (come i brevetti), sulla correttezza operativa, sul coinvolgimento e lo sviluppo della comunità e sui costi economici comprensivi di quelli esterni dovuti all'impatto sociale in modo totale.

I **costi** riguardano la progettazione, l'acquisto dei materiali, l'operatività (produzione); l'energia, la conversione, gli scarti, la distribuzione e la logistica, l'amministrazione e il supporto, lo smaltimento (tra questi rientra il costo contabile di inquinamento, disassemblaggio, ecc.). Le caratteristiche senza valore aggiunto dovrebbero essere eliminate.

Il **lead time** è il tempo necessario per immettere il prodotto nel mercato. Riguarda competenze organizzative di velocità.

L'**impatto ambientale** considera il costo economico inclusivo dei costi esterni per il consumo di risorse; la generazione di rifiuti; le emissioni e gli altri temi ambientali trattati nel capitolo 2 di questa tesi [35] [39].

Il valore aggiunto verde o valore aggiunto netto (ossia il valore aggiunto in una visione solo

assoluta) del prodotto è dato dall'insieme dei requisiti di prodotto effettivi (che potrebbero essere diversi da quelli di progetto) pesati (tramite una funzione). Più formalmente si può esprimere il valore aggiunto netto attraverso la formula (3.1) che è un adattamento di [39], [54] e [107]. In questa formula si intende il prodotto come insieme degli articoli e non come singola realizzazione.

Valore aggiunto verde

$$\begin{aligned}
 &= \text{prezzo} \cdot \text{quantità vendute} + \text{quantità prodotte} \cdot [f(\text{Qualità}) \\
 &+ g(\text{servizi}) + (-)h(\text{valori e impatti sociali}) - i(\text{costo}) \\
 &- l(\text{lead time}) - m(\text{impatto ambientale nel ciclo vita})] \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

Per valutare la sostenibilità di un prodotto si può verificare se il valore aggiunto generato durante tutto il suo ciclo di vita è maggiore dell'efficienza di un *benchmark* per l'impatto totale del prodotto nel ciclo di vita, in formula (3.4):

Valore aggiunto =

$$\text{prezzo} \cdot \text{quantità vendute} - \text{costo di produzione} \cdot \text{quantità prodotte} \quad (3.2)$$

$$\text{Efficienza o valore aggiunto relativo} = \frac{\text{valore aggiunto}}{\text{impatto totale}} \quad (3.3)$$

Valore aggiunto

$$\geq \text{Efficienza}_{\text{benchmark}} \cdot \text{Impatto_di_prodotto}_{\text{sociale e ambientale}} \quad (3.4)$$

L'efficienza del *benchmark* settore è la soglia sostenibile critica del compromesso tra competitività e sostenibilità.

Una alternativa è utilizzare il *benchmark* PIL, particolarmente indicato per le aziende molto inquinanti (come quelle del settore siderurgico).

Un limite della formula (3.4) è la non uniformità delle scritture contabili di bilancio (come

la valorizzazione del magazzino, dei crediti e della loro esigibilità, ecc.).

3.2 Progettazione del ciclo di vita sostenibile del prodotto

Studiato il valore, si procede con la progettazione del ciclo di vita del prodotto che tipicamente prevede queste fasi:

- estrazione dei materiali;
- produzione dei materiali;
- manifattura dei componenti, eventualmente con materiali riciclati forniti dal processo di recupero;
- assemblaggio del prodotto, in cui è possibile vi siano componenti riutilizzabili (altrimenti ci saranno solo elementi prodotti daccapo);
- trasporto all'utente finale;
- utilizzo;
- interruzione dell'utilizzo a causa dell'obsolescenza del prodotto o manutenzione programmata;
- smontaggio;
- ispezione;
- riciclaggio e/o smaltimento.

Infine, vi è la valutazione in base ai risultati della simulazione che generalmente includono: la domanda di risorse, la domanda di energia, la quantità di rifiuti, la quantità di emissioni, il tasso di recupero, il tasso di riciclo e riutilizzo, i costi dell'utente finale, i costi aziendali e i profitti aziendali [54] (oltre a parametri produttivi come varianze, medie, utilizzi, tempi di attività e non delle macchine e degli operatori).

Una simulazione consente di valutare meglio [55].

Dopo il fine vita si può avere: il ciclo ecologico se il prodotto ritorna in natura; il riciclo quando si rilavorano i materiali oppure si può avere il riutilizzo. Una rappresentazione del ciclo di vita è in figura 3.1 [83] [153].

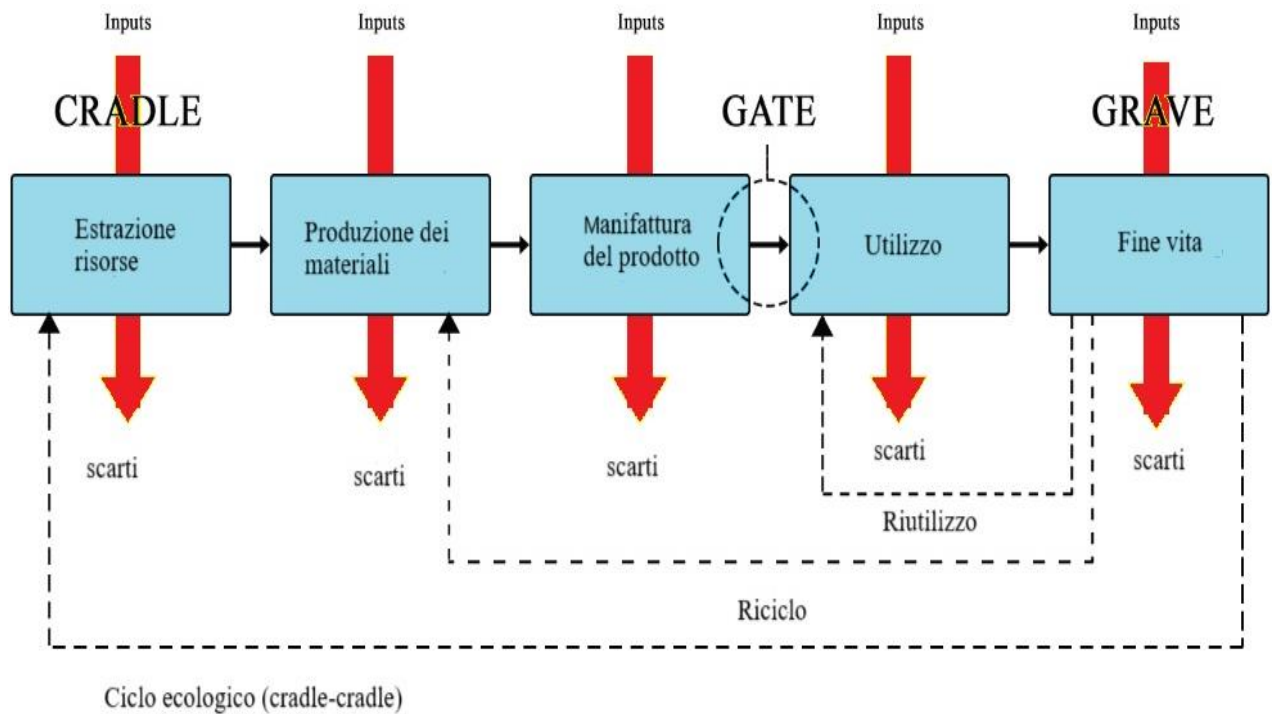


Figura 3.1: Ciclo di vita di un prodotto [153].

3.2.1 Economia circolare

Per sostenere un'economia che sia sempre più circolare e *green* occorre:

- Incentivare nuovi mercati per le materie prime riciclate;
 - Produrre merce con una vita più lunga (durabilità);
 - Progettare prodotti più facili da mantenere e da riciclare (*ecodesign*);
 - Utilizzare la minima quantità necessaria di materiali e di energia (efficienza);
 - Raggruppare le attività per evitare rifiuti (simbiosi industriale);
 - Incoraggiare il riuso e la riparazione;
 - Favorire il noleggio, il prestito e la condivisione di servizi salvaguardando i consumatori in costi, informazione, condizioni contrattuali, aspetti assicurativi.
 - Incentivare la raccolta differenziata (per esempio aumentando il numero di raccoglitori)
- [150].

Una rappresentazione dell'economia circolare è in figura 3.2.

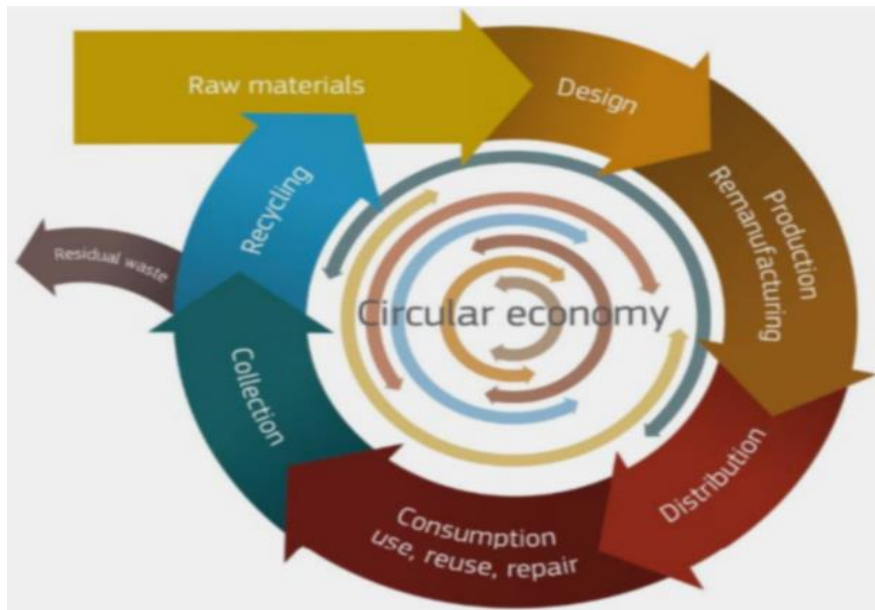


Figura 3.2: Step dell'economia circolare [150].

Esiste una gerarchia degli impatti ambientali e sociali che il fine vita di un prodotto causa.

La cosa migliore da fare, qualora sia possibile, consiste nel prevenire l'utilizzo in ogni operazione aziendale, in modo che non ci siano danni.

C'è poi il riutilizzo e il ciclo ecologico: questi hanno avuto solo in passato costi esterni ambientale, sono costi affondati del passato che all'atto risultano irrilevanti.

Vi è poi il riciclo che ha un impatto accettabile.

L'attività più impattante è lo smaltimento, che può essere totale o parziale, come rappresentato è in figura 3.3.

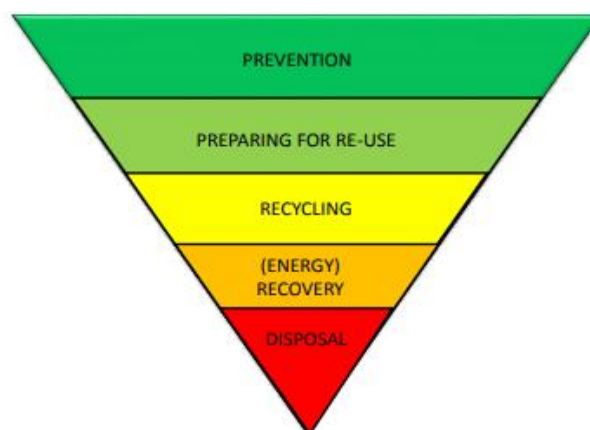


Figura 3.3: Gerarchia dello scarto [151].

3.3 Analisi del ciclo di vita del prodotto

La *Life Cycle Assessment (LCA)* è un metodo utilizzato per valutare la sostenibilità e l'impatto ambientale di un prodotto durante tutto il suo ciclo di vita [55] [83]. La definizione ISO di *LCA* è: "compilazione e valutazione degli input, degli output e dei potenziali impatti ambientali di un sistema di prodotto durante il suo ciclo di vita" [63]. La *LCA* prevede quattro fasi descritte negli standard ISO14040 e successivi [56]. Queste sono:

- 1) definizione degli obiettivi, ossia gli output. In particolare, si parte con degli input (come energia, materiali, risorse umane e finanziarie o di altra natura come acqua e suolo, informazioni, suolo ecc.) e si considerano tutti gli output relativi a ogni risorsa in ingresso.
- 2) analisi dell'inventario o *Life Cycle Inventory (LCI)*: costruzione del *flow chart* del processo e/o della catena causa-effetto di ogni output; studio sugli impatti per ogni output, raccolta dei dati sugli impatti, processamento dei dati (per esempio imponendo vincoli reali e normalizzando);
- 3) valutazione dell'impatto per categorie;
- 4) interpretazione [56] [90] [114] [191].

Un esempio di LCA è riportato di seguito.

Input: sostanze fisiche, output: emissioni.

Inventario: Emissioni di acqua, emissioni sulla terra, emissioni in aria. Nel caso dell'emissioni di aria gli agenti inquinanti sono tra CO₂, SO₂, NO_x.

Valutazione dell'impatto, considerando solo la CO₂: potenziale riscaldamento globale, potenziale aumento del buco nell'ozono, potenziale acidificazione delle acque.

Interpretazione: l'acidificazione sicuramente incide sulla qualità dell'ecosistema, il buco nell'ozono e il riscaldamento globale potenziali possono danneggiare la qualità dell'ecosistema e sicuramente incidono sulla salute umana [114].

3.3.1 Analisi sostenibile del ciclo di vita del prodotto LCSA

La *Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)* applica l'analisi sostenibile di sostenibilità durante il ciclo di vita del prodotto. Il limite della *LCA* riguarda il suo dominio meramente ambientale, per cui occorre ampliarlo con la dimensione sociale e quella economica.

L'analisi d'inventario si amplia con modelli fondati su diversi valori normativi e fatti empirici, i più importanti sono i seguenti.

Modelli **tecnici**: raccolgono le relazioni causali tra due attività economiche. Nella *LCA* dello standard *ISO 14040* i modelli tecnici hanno un ruolo dominante [56]. *Per esempio, tra disassemblaggio e riciclaggio l'analisi può vertere su uno studio dello sforzo di smontaggio espresso mediante un punteggio calcolato attraverso fattori come tempo, strumenti, accesso, ardua comprensione delle istruzioni, pericolo, requisiti di forza, grado di precisione richiesto; peso, dimensione, materiale e forma dei componenti da smontare ecc.* [90].

Modelli **fisici**: raggruppano i vincoli di un sistema tecnologico studiando i flussi di materiali (come fornitura e riciclaggio) ed energetici. Le disponibilità delle variabili di questa categoria sono legate ai modelli microeconomici. La norma *ISO-LCA* non contempla questi modelli.

Modelli **ambientali**: si devono esaminare le sostanze chimiche rilasciate nell'ambiente e i loro effetti tossici sugli organismi (si veda il capitolo 2). La norma *ISO-LCA* scandaglia i meccanismi ambientali.

Modelli **microeconomici**: ogni mercato è interconnesso a una dozzina di altri direttamente o indirettamente. La conoscenza dei loro funzionamenti è imprescindibile per valutare accuratamente la sostenibilità. Lo standard *ISO-LCA* non tiene conto delle relazioni microeconomiche.

Modelli **macroeconomici**: i modelli macroeconomici sono essenziali per studiare input di lavoro, reddito, capitale, produttività e tecnologia di una azienda e della società in cui opera. Questo aspetto non è menzionato nella *ISO-LCA*.

Modelli **culturali, istituzionali e politici**: la cultura di una comunità può influenzare i costi di *switching* relativi al lancio di una nuova tecnologia sul mercato. Potrebbe favorire le vendite di determinati segmenti di mercato piuttosto che altri e incidere sulla cattura del valore. A livello istituzionale potrebbero esserci restrizioni sui diritti di brevetto. In ambito politico possono verificarsi condizionamenti e restrizioni relativi ad effetti ambientali negativi come quelli derivanti dall'aumento della salvaguardia delle aree naturali.

Valori **etici e sociali**: influenzano le vendite; possono cambiare anche rapidamente.

Modelli per l'analisi ambientale, economica e sociale **integrata**: per avere una *LCA* come quadro integrativo [56].

Una formula concettuale per il calcolo della *LCSA* è la (3.5) ottenuta sommando le valutazioni di sostenibilità (sociale, ambientale ed economica) di ogni modello:

$$LCSA = \sum_{m=1}^{n \text{ modelli}} LCA_{ambientale_m} + LCA_{economica_m} + LCA_{sociale_m} \quad (3.5)$$

Con $LCA_{ambientale_m}$, $LCA_{economica_m}$ e $LCA_{sociale_m}$ sono i costi totali ambientali, economici o sociali che tengono conto di tutto il ciclo di vita del prodotto [56].

Tuttavia, il modello LCA e la $LCSA$ hanno ricevuto molte critiche, infatti:

- 1) I dati necessari possono non essere disponibili.
- 2) Le descrizioni teoriche dei processi possono non corrispondere alla pratica.
- 3) I dati "riservati" non sono per definizione verificabili e potrebbero essere errati.
- 4) Esiste un problema di monetizzabilità dei danni [57].

3.4 Riciclaggio del prodotto

Per analizzare la riciclabilità di materia Villalba e altri (2002, 2004) propongono un indice di **recupero percentuale** calcolato come percentuale tra la somma dei pesi W dei materiali i che hanno una riciclabilità R almeno pari a una percentuale x e il peso totale W_{total} :

$$Recupero\%_{R \geq x} = \frac{\sum_i^n W_{i,R \geq x}}{W_{total}} \times 100 \quad (3.6)$$

Esempio: il caso di una bilancia. La plastica pesa 685g e la percentuale in peso riciclabile (%Pr) è 68,2%; il materiale ferroso pesa 99,8g e la %Pr è 9,9%; i circuiti pesano 90g con %Pr=9%; i condensatori pesano 60 g e hanno %Pr di 6% l'alluminio pesa 65g con %Pr di 6,5%.

Il $Recupero\%_{R \geq x}$ in esempio è di 0.996, solo 4g che rappresentano lo 0,04% è altro materiale e non è riciclabile [94].

Per capire se **conviene smontare** un prodotto si può utilizzare l'equazione (3.7) e verificare se l'indice V_{ric} è positivo. I fattori che influenzano lo smontaggio sono:

C_{smonta} : Costi di smontaggio (manuale o meccanico), espresso in €.

$V_{prodotto}$: valore del prodotto prima del disassemblaggio, in €. Si può assumere pari alla voce di bilancio ossia al costo di produzione depurato dell'ammortamento oppure pari al valore di mercato.

C_{smalt_i} : Risparmio sui costi di smaltimento (non riciclaggio) del componente i del prodotto, in €/componente.

C_{ricicl_i} : Costo del riciclaggio per ogni componente i recuperato, in €/componente.

V_{post_i} : valore del componente i dopo il riciclaggio, in €/componente.

C_{opp} : costo opportunità dovuto al mancato guadagno per le spese di C_{smonta} e $\sum_{i=1}^n C_{ricicl_i}$, espresso in €.

n : numero totale di componenti i di cui è composto il prodotto.

i : indice per indicare il componente [94] [95].

$$V_{ric} = \sum_{i=1}^n V_{post_i} - C_{smonta} + \sum_{i=1}^n C_{smalt_i} - \sum_{i=1}^n C_{ricicl_i} - V_{prodotto} - C_{opp} \geq 0$$

(3.7)[94].

4. La gestione sostenibile della catena di fornitura

4.1 Produzione *lean*

La produzione *lean* si fonda sulla minimizzazione degli **sprechi**. Questi ultimi sono ravvisabili per: 1. La sovrapproduzione; 2. I difetti; 3. L'inventario; 4. L'elaborazione eccessiva; 5. Le attese; 6. I trasporti; 7. Le movimentazioni [45] 8. Il *muri* (sovraccarico di risorse o personale) [48]; 9. Il *mura* (irregolarità nelle operazioni, alta varianza) [48]; 10. creatività non utilizzata [167]. Ogni spreco comporta sicuramente sia un danno economico che ambientale [45].[79]

I **benefici** della gestione *lean* si riscontrano in ogni settore della sostenibilità. Socialmente si assiste a un miglioramento del morale e della salute dei dipendenti; della sicurezza (ci sono meno infortuni) e dell'ambiente di lavoro. L'impatto ambientale dovuto alle emissioni e al consumo di energia, a parità di domanda soddisfatta, è condotto verso il minimo assoluto. Vi è un aumento dei profitti grazie a una migliore:

- produttività;
- soddisfazione delle aspettative dei clienti;
- impegno e versatilità dei dipendenti;
- riduzione dei costi operativi (ci sono minori lotti di produzione e meno scorte);
- diminuzione del *lead time* (tempo di attraversamento della rete delle scorte). La *lean* presume la riduzione dell'orizzonte di pianificazione (e delle scorte di sicurezza);
- abbassamento dei *set up* esterni nella media e nella variabilità del tempo necessario (si richiede meno di fermare la macchina);
- standardizzazione del processo, rendendolo più affidabile;
- utilizzo delle macchine: non si lavora al limite di capacità produttiva. Questo permette di evitare di più lo *stock-out*; è particolarmente utile nei prodotti altamente differenziati;
- manutenzione: costa meno ed è effettuata in modo preventivo, affinché impatti il meno possibile sulla produzione. Ciò riduce la vulnerabilità all'inflazione [161] [45].

Le tecniche utilizzate nella gestione di una produzione *lean* sono:

1. **8S**: mettere in ordine (*systematize and set in order*), classificare (*sort*), brillare (*shine*), standardizzare (*standardize*), semplificare (*simplify*), autodisciplinare (*self-discipline*), potenziare sicurezza e spirito di squadra (*safety and spirit*), sostenere (*sustain*) [79] [163].

2. **Just in time** e la *production smoothing (Heijunka)*: si pianifica il processo di produzione in modo tale da ridurre al minimo l'inventario (quasi a zero); si minimizza il tempo restante tra la consegna e il termine del contratto in cui l'azienda si è impegnata, posticipando pertanto la produzione all'ultimo momento, ma in tempo per rispettare le scadenze [79] [160].

3. **Kanban**: è un sistema di controllo che lavora con la logica *just in time*. I pezzi sono immagazzinati e movimentati in contenitori standard; ai contenitori sono associati dei cartellini detti *kanban*, in quantità limitate per minimizzare il magazzino. Non è possibile produrre né in quantità diverse da quelle associate ai contenitori né se non si ha a disposizione un *kanban*.

La formula (4.11) determina un numero K di *kanban* per un sistema che deve soddisfare la domanda nel *lead time* LT più un'eventuale scorta di sicurezza:

$$K = \frac{LT \cdot \text{tasso di domanda} \cdot (1 + \alpha)}{\text{Capacità del contenitore}} \quad (4.11)$$

Dove α è il parametro che tiene conto delle incertezze di *lead time* e domanda [160].

Ci si coadiuva, inoltre, attraverso una "lavagna *kanban*" in cui si appendono dei cartellini per rappresentare il numero di beni: da fare, in progresso, da verificare, completati [79] [161].

Si possono effettuare estensioni a questo sistema attraverso l'utilizzo di:

- *kanban* che indicano l'urgenza dei componenti;
- *dual kanban*: due tipi di cartellini, uno per la produzione, l'altro per la movimentazione o il trasporto. In particolar modo si utilizza quando le linee di produzione sono distanti l'una dall'altra [160].

4. **Controllo visivo**: si creano indicatori semplici da considerare, in modo che i supervisori possano cogliere lo stato della linea di produzione e tenere traccia delle attività.

5. ***Kaizen***: è un metodo che mira a ottenere piccoli ma continui miglioramenti attraverso ambienti creativi e innovativi, ma senza effettuare grandi investimenti. Quando si trova un problema: si studia la causa, si propone una soluzione, la si implementa, la si monitora con range di accettabilità e si misura il guadagno. Una strategia fondata sull'innovazione, invece, richiede grandi investimenti [162] [79].

6. ***Poka-yoke***: si cerca di impedire che si verifichino errori o difetti concentrandosi sull'eliminazione a monte delle loro cause [126] [79].

7. ***Total productive maintenance***: si ottimizza l'utilizzo delle apparecchiature riducendo al minimo i tempi di inattività. La disponibilità è data dalle formule (4.12) e (4.13):

$$\text{disponibilità} = a = \frac{\text{tempo medio all'errore}}{\text{tempo medio tra errori}} \quad (4.12)$$

$$a = \frac{\text{tempo medio all'errore}}{\text{tempo medio all'errore} + \text{tempo medio di riparazione}} \quad (4.13)$$

Lo scopo è aumentare il *tempo medio all'errore* e diminuire il *tempo medio di riparazione*, ciò comporta un calo di scarti, rilavorazioni, sprechi di energia e di materie prime, rischi di lesioni: si migliora l'ambiente lavorativo aumentando pertanto la produttività. Lo si fa incentivando:

- la manutenzione autonoma: affidandosi all'operatore il quale esegue autonomamente l'ispezione, la pulizia, la lubrificazione, il serraggio, la regolazione.
- la manutenzione pianificata;
- la manutenzione della qualità;
- il miglioramento mirato: si elabora una struttura per mitigare le perdite;
- l'istruzione e formazione: si allineano gli obiettivi aziendali con la perizia dei dipendenti attraverso aggiornamenti periodici delle competenze;
- la sicurezza, salute e ambiente: cercando di eliminare gli incidenti e le lesioni;
- la creazione di un ufficio total productive maintenance: migliora la sinergia tra le varie funzioni aziendali ed elimina i problemi procedurali;

- la gestione dello sviluppo: avere in tempo nuove tecnologie permette di adattarsi ai cambiamenti e lo rende un vantaggio competitivo [121] [79] [164] [83].

8. **Single-minute exchange of die**: si riduce il tempo necessario per sostituire l'attrezzatura.

9. **Produzione a celle**: si raggruppano prodotti in famiglie e macchine in celle per ridurre il tempo, l'energia e lo sforzo [79]. Si inizia con la creazione della mappa funzionale del *layout* (tabella 4.1): una matrice (righe) *prodotto x risorse* (colonne) in cui si inserisce 1 se il prodotto p usa la risorsa r . Quindi si cerca di isolare i prodotti in famiglie e le macchine in celle (tabella 4.2) [124].

Continuando si può fare la mappa delle richieste di lavoro (tabella 4.3) inserendo la domanda di ogni prodotto in matrice al posto degli l . La risorsa con la domanda maggiore è il collo di bottiglia della produzione.

La mappa strutturale del *layout* (tabella 4.4) è una matrice $\text{risorsa}_i \times \text{risorsa}_j$. Nella cella della matrice si inseriscono le domande dei prodotti che usano prima la risorsa r_i e poi r_j e data una soglia permette di trovare i flussi critici [165].

Esempio: siano i flussi dei prodotti tra le macchine (m) e la relativa domanda (d): prodotto 1: m=1-2-4 d=20; prodotto 2: m=5-7 d=50; prodotto 3: m=3-8-2-7 d=400; prodotto 4: m=1-8-2-4 d=400; prodotto 5: m=3-8-5-7 d=150; prodotto 6: m=1-6-2-4 d=300.

Tabella 4.1: mappa funzionale del *layout* [165].

Colonna:Risorsa Riga: prodotto	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1		1				
2					1		1	
3		1	1				1	1
4	1	1		1				1
5			1		1		1	1
6	1	1		1		1		

Tabella 4.2: Mappa funzionale del layout in famiglie di prodotti e gruppo di macchinari. Vi è un primo gruppo evidenziato in verde, in blu un secondo gruppo. Quelli in giallo sono in dubbio: per questi si può valutare se comprare una ulteriore macchina e produrre in parallelo; potrebbe essere particolarmente conveniente sdoppiare se il flusso è critico o se le macchine sono i colli di bottiglia [165].

Colonna:Risorsa Riga: prodotto	1	4	6	2	8	3	5	7
1	1	1		1				
4	1	1		1	1			
6	1	1	1	1				
2				1	1		1	1
3					1	1		1
5						1	1	1

Tabella 4.3: Mappa delle richieste di lavoro [165].

Col:Risorsa Riga: prodotto	1	2	3	4	5	6	7	8
1	20	20		20				
2					50		50	
3		400	400				400	400
4	400	400		400				400
5			150		150		150	150
6	300	300		300		300		
totale	720	1120: collo di bottiglia	550	720	200	300	600	950

Tabella 4.4: Mappa strutturale del *layout*. Se per esempio la soglia considerata è il 50% della domanda, cioè 660 ossia la metà di 1320, allora i flussi critici sono da 8 a 2 e quello da 2 a 4 [165].

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		20				300		400
2				720			300	
3								550
4								
5							200	
6		300						
7								
8		800			150			

10. **Sei sigma:** migliora la qualità offerta e riduce la varianza delle operazioni. Raggiungere un livello sei sigma significa produrre *output* con meno di 3,4 *ppm* (parti per milione) difettosi [115] [79].

11. **Value stream map (VSM):** aiuta a comprendere il flusso del valore aggiunto e di altre variabili sostenibili e operative come: il *lead time*, l'andamento delle scorte in magazzino, l'energia, l'acqua, i gas serra, i rifiuti pericolosi, i materiali difettosi, il numero di incidenti (e altri indicatori indicati nel capitolo 2) [79] [164]. Potrebbe essere utilizzata per migliorare l'ergonomia, la salute e la sicurezza dei lavoratori (si veda il capitolo 5.3) [164]. Un esempio di *value stream map* è rappresentato in figura 4.1 [45].

La *VSM* può essere integrata con la *life cycle analysis (LCA)* in un modello di simulazione a eventi discreti consentendo l'analisi dinamica delle operazioni in una rete di fornitura [50].

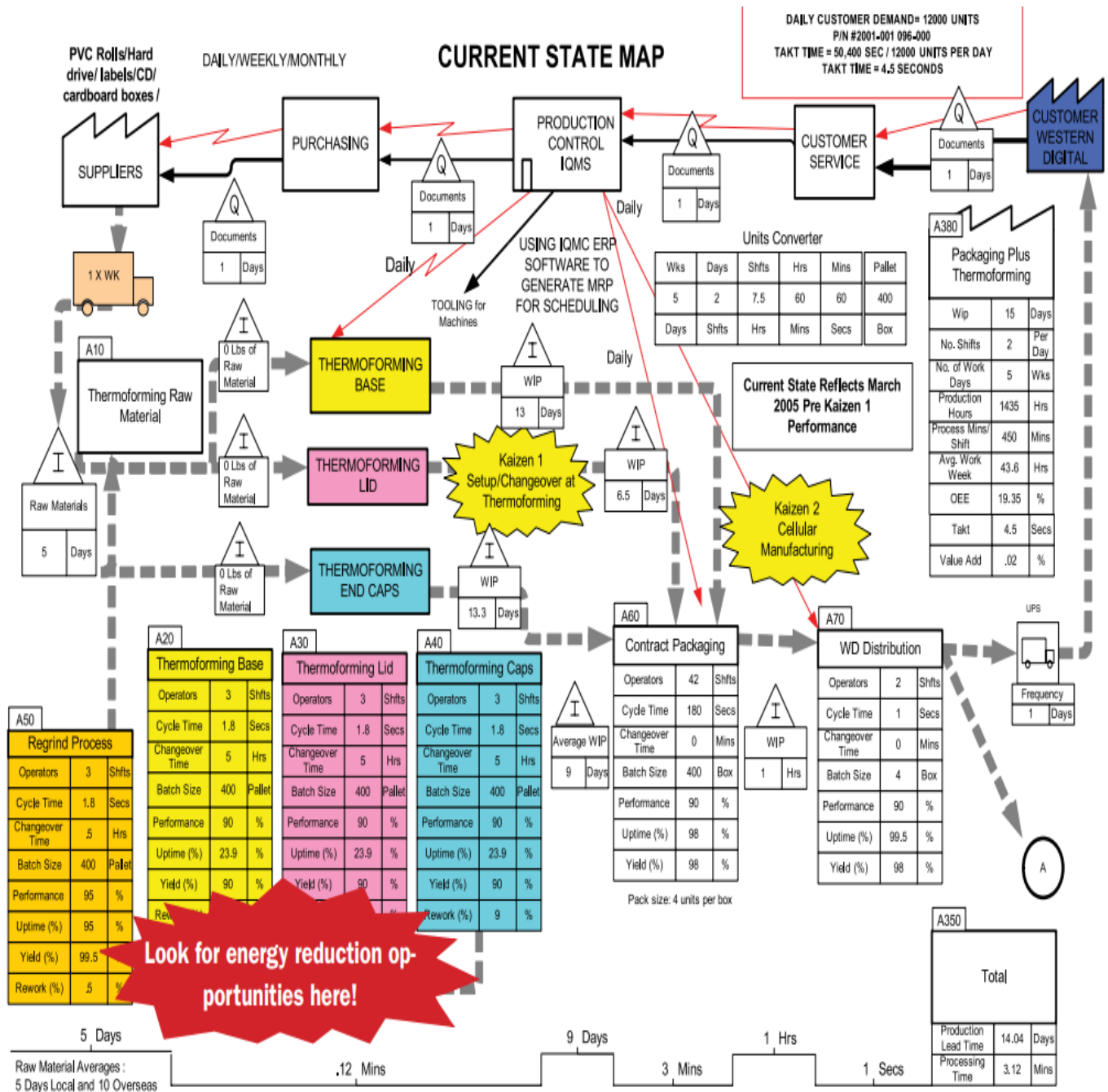


Figura 4.1: Value stream map (ma solo con indicatori operativi) [45].

12. Ci sono poi altri strumenti che possono essere messi a disposizione per analizzare la sostenibilità. Quelli a livello operativo sono:

- **5 perché:** stabilisce di chiedere cinque volte "perché" per esplorare la causa o per influenzare le relazioni alla base di un particolare problema 0.
- **Grafico di Pareto:** è un grafico a barre disposto in ordine decrescente di dimensione di importanza da sinistra a destra, un esempio è in figura 4.2 0.

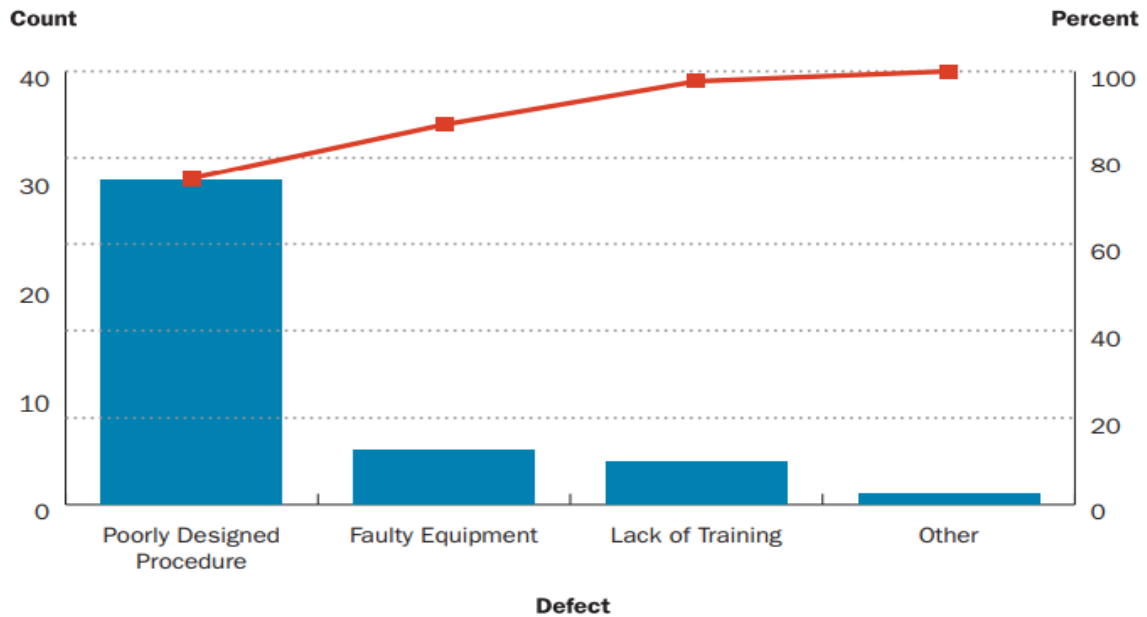


Figura 4.2: Esempio di grafico di Pareto che analizza le cause dei difetti: processi mal progettati (76%), equipaggiamento mal eseguito (13%), mancanza di formazione (8%), altro (3%) 0.

• **Diagramma di causa ed effetto:** anche noto come diagramma a lisca di pesce (esempio in figura 4.3); si elencano le cause e gli effetti dei problemi 0.

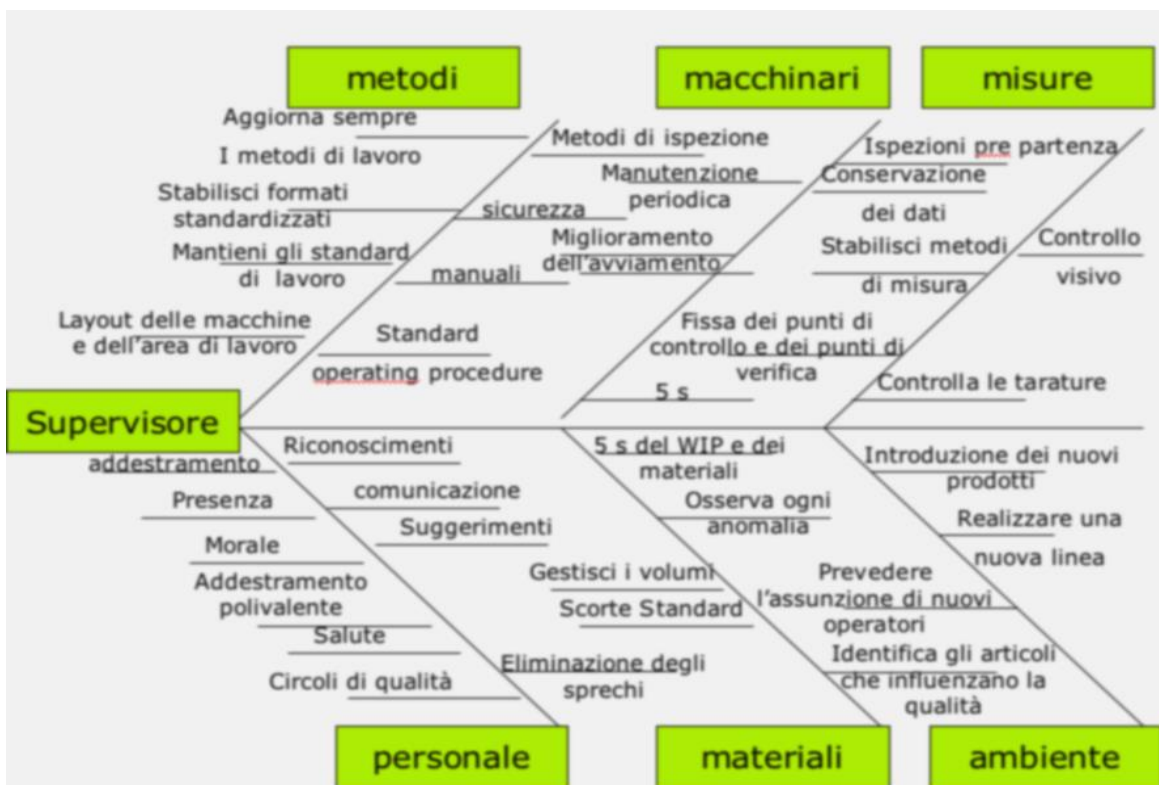


Figura 4.3: Esempio di diagramma causa-effetto, le cause analizzate per un supervisore sono: metodi, macchinari, misura, personale, materiale, ambiente [193].

A livello strategico può essere utile l'**analisi SWOT**: consiste nel creare un piano diviso in due colonne: vantaggioso, dannoso e da due colonne: minacce interne e minacce esterne. Un'alternativa è mettere per righe il tempo: lungo e breve termine.

Marketing: La variabile di *marketing* più studiata è il prezzo dei prodotti fabbricati e rigenerati. L'impostazione del prezzo può essere fatta in base ai costi o a fattori esterni.

Il prezzo in base ai costi può essere espresso tramite l'equazione (4.14):

$$\text{Costo unitario} = \text{costo variabile} + \frac{\text{costo fisso}}{\text{unità vendute}} \quad (4.14)$$

$$\text{Prezzo (ROI)} = \text{costo unitario} + \frac{\text{ROI} \cdot \text{investimento}}{\text{unità vendute}} \quad (4.15)$$

Il prezzo può, inoltre, essere impostate in base a fattori esterni:

$$\text{Markup in euro} = \text{prezzo di vendita} - \text{costo} \quad (4.16)$$

Il *markup* è solitamente espresso in percentuale; esistono due modi diversi per calcolare il *markup*: sul costo o sul prezzo di vendita:

$$\text{Markup percentuale sul costo} = \frac{\text{markup in euro}}{\text{costo}} \quad (4.17)$$

$$\text{Markup percentuale sul prezzo di vendita} = \frac{\text{markup in euro}}{\text{prezzo di vendita}} \quad (4.18)[127]$$

In figura 4.4 vi è una modellizzazione di una rete di distribuzione con le iterazioni tra gli attori e le entità principali. La freccia con il segno + rappresenta una relazione diretta.

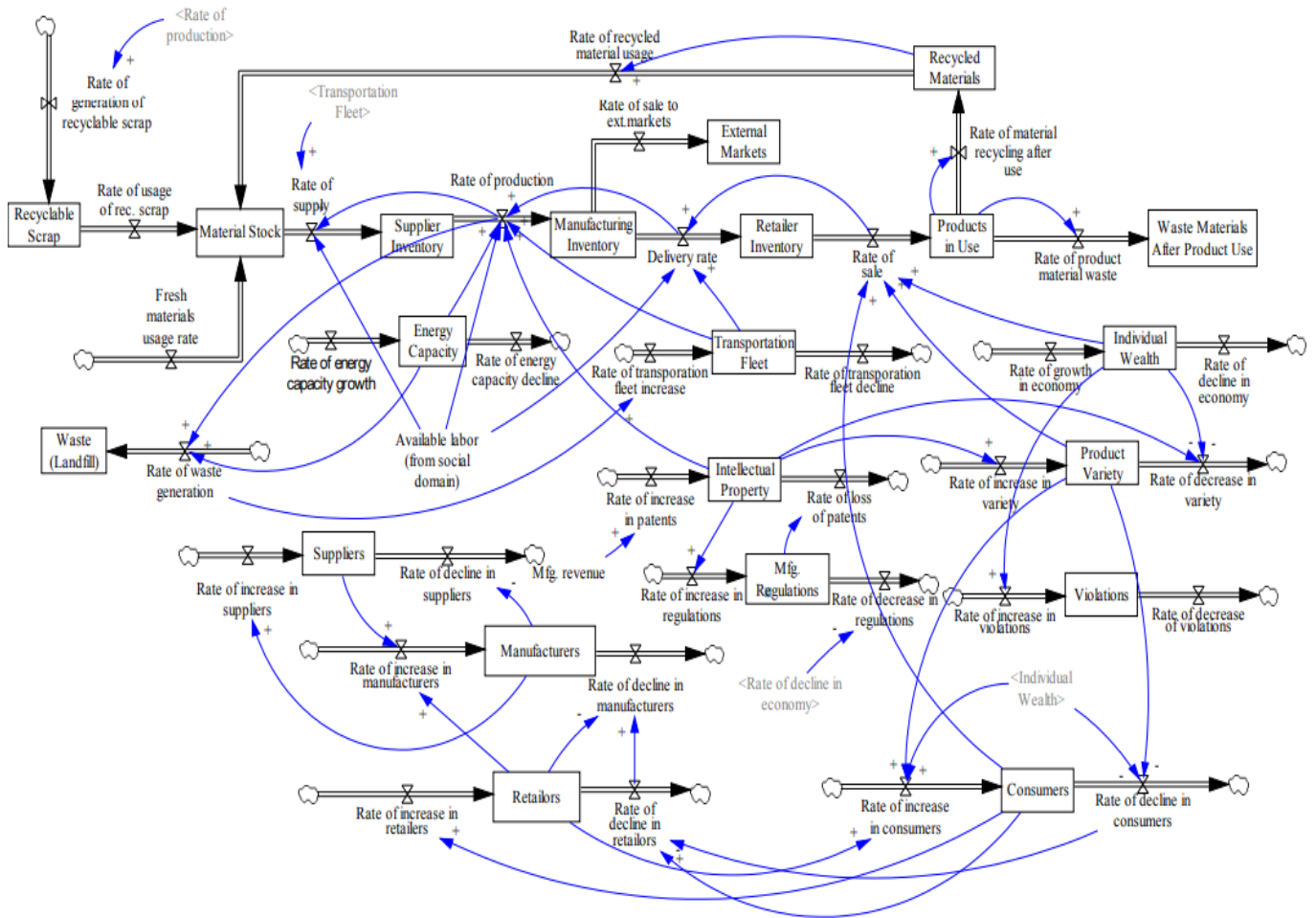


Figura 4.4: Modello del dominio di produzione 0.

4.2 Tecnologie e sostenibilità

4.2.1 Stagnazione salariale

Dal 1991 al 2022 l'Italia è l'unico Paese in UE in cui gli stipendi sono diminuiti [201].

Secondo la teoria economica neoclassica, all'equilibrio monetario, lavorativo e dei beni, i salari reali devono essere uguali alla produttività. Quest'ultima è definita come il rapporto tra la produzione e l'*input* di lavoro.

Nel 2019 l'Italia ha avuto una produttività di 56,1 \$/h, dietro Spagna: 56,3 \$/h, Francia: 68,6 \$/h, Germania: 68,9 \$/h, USA: 73,7 \$/h. Ma nel 1991 questo indice era per l'Italia: 37 \$/h, Spagna: 30,6 \$/h, Francia: 40,9 \$/h, Germania: 39 \$/h USA: 45,7 \$/h [196]. Nel 1990 l'Italia aveva una produttività migliore di quella tedesca. In figura 4.5 vi è il grafico della produttività italiana e di altri Paesi del 1991 e del 2022.

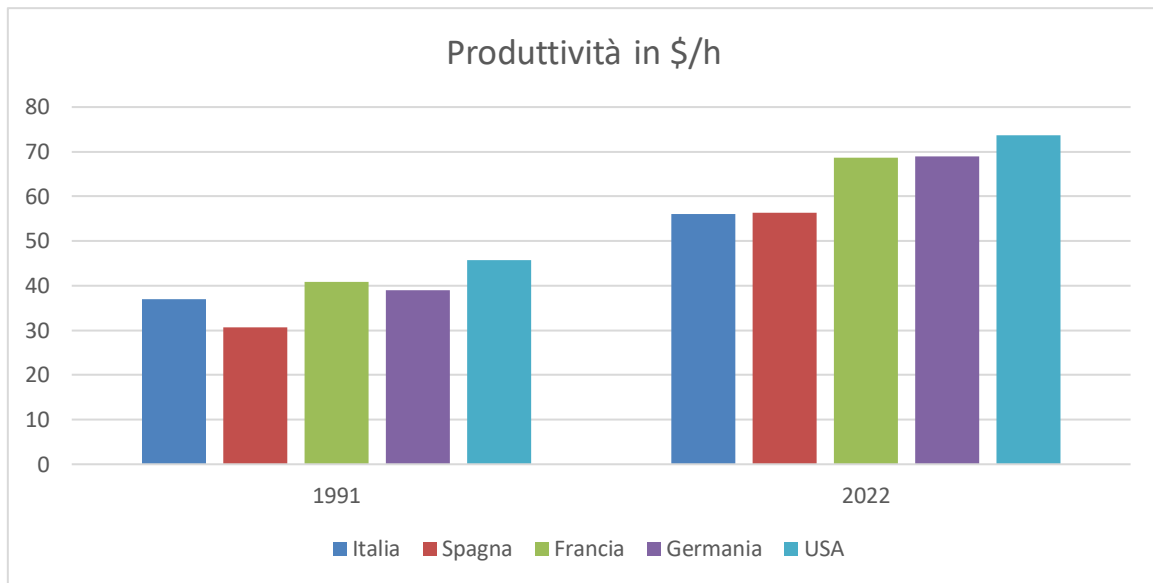


Figura 4.5: Confronto dell'andamento della produttività tra Italia e altri Paesi [196].

Il progresso tecnologico fa sicuramente aumentare la produttività, perché sposta le curve di isoquante: permette di produrre più *output* a parità di *input*.

Le spese di ricerca e sviluppo in rapporto al PIL in Italia sono state dell'1% nel 2000 e del 1,483% nel 2021. La Germania ha impiegato il 2,4 e il 3,134%; la Francia il 2% e il 2,3%, la Spagna il 0,883% e il 1,43%; gli USA il 2,6 e il 3,46% [194]. L'andamento del rapporto tra le spese in ricerca e sviluppo e il PIL dell'Italia è riportato in figura 4.5.

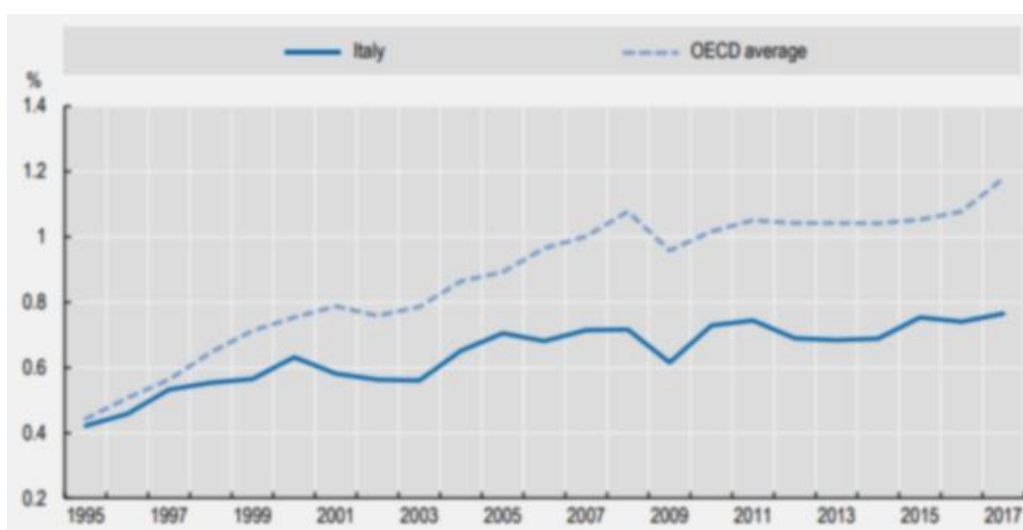


Figura 4.5: Rapporto tra spese in ricerca e sviluppo e PIL dell'Italia e dei Paesi *OECD* **Error!**
Reference source not found..

Se si considera la percentuale di lavoratori che riceve formazione nel 2012 l'Italia è penultima tra i Paesi *OECD* con il 33% (solo la Grecia fa peggio con il 30,3%). La media *OECD* è del 59,2% [199].

Il numero di brevetti italiani nel 2018 è stato di 4.582, quello francese di 9.314, quello tedesco di oltre 24.000 [198].

L'industria 4.0 è nata nel 2011 [202] mentre la 5.0 riporta il 2018 come anno di nascita [203].

Gli interventi politici (anche grazie a quelli comunitari) hanno avuto un lieve impatto positivo, ma la ricerca e sviluppo e l'implementazione dell'industria 4.0 e 5.0 in Italia soffre da tempo di *sottoinvestimenti* ed è sotto la media europea, in particolare nel campo degli **investimenti privati** [205]. Complessivamente le attuali iniziative sembrano incapaci di rilanciare la produttività e di ridurre il *gap* tecnologico dell'Italia con i Paesi sopra menzionati [204].

4.2.2 Industria 4.0 e 5.0

Mentre l'industria 4.0 è stata prevalentemente una spinta tecnologica e un fenomeno guidato dalla produttività, l'industria 5.0 si fonda sui valori sostenibili (sociali, ambientali ed economici): considera tutti gli *stakeholder* e non punta solo alla massimizzazione del profitto o del valore per gli azionisti [73] [74][75].

Le **tecnologie 5.0** sono:

- I sistemi cognitivi cyber-fisici (C-CCP): hanno quattro proprietà: auto-conoscenza, auto-monitoraggio, auto-consapevolezza e auto-informazione. Consentono al sistema di rispondere in modo proattivo in tutte le circostanze.
- L'intelligenza artificiale cognitiva (CAI): si tratta di computer dotati di intelligenza artificiale, in grado di comprendere sempre meglio il mondo esterno e di compiere azioni come pensare, riapprendere e agire da esseri umani. In azienda può aiutare a prendere decisioni migliori.
- Le tecnologie di interazione e riconoscimento umano (HIRT): mirano a interconnettere e integrare in modo ottimale gli esseri umani con le macchine. Esempi sono: la previsione della traiettoria e il riconoscimento vocale e gestuale multilingue.
- La realtà estesa (XR): offre un'esperienza e una diagnostica più immersiva.

- Industrial Smart Wearable (ISW): gli equipaggiamenti protettivi e gli esoscheletri migliorano le capacità, la forza, la velocità, la produttività, la stabilità e la sicurezza dei lavoratori dell'industria.
- I robot intelligenti o adattivi: a differenza dei robot tradizionali sono sicuri e senza barriere fisiche, ma a scapito di velocità e di carichi nominali. Sono particolarmente utili per l'assemblaggio di componenti di precisione e per il trasporto di parti.
- L'Intelligent Energy Management System (IEMS): è un sistema che promuove l'efficienza energetica.
- Le tecnologie Dynamic Simulation e Digital Twin (DSDT): abbinano mondi fisici e virtuali consentendo l'analisi proattiva dei dati e il monitoraggio di sistemi complessi. Consentono alle aziende di simulare e prevedere l'impronta socio-ambientale dei loro prodotti e dei loro servizi dalla progettazione al fine vita del prodotto.
- I sistemi Smart Product Lifecycle Management (SPLM): forniscono un'integrazione più ampia dei processi per ogni fase del ciclo di vita del prodotto.

I **principi tecnici** su cui ci basa l'industria 5.0 sono:

- Il decentramento: comporta flessibilità e autonomia.
- L'integrazione verticale: consiste nel collegare in rete e integrare tutti i processi e le unità aziendali di un'organizzazione.
- L'integrazione orizzontale: implica l'integrazione delle operazioni aziendali interne tra tutti i membri della catena del valore.
- L'interoperabilità: si permette ai componenti di sistemi informativi (come macchine ed esseri umani) di comunicare, impedendo l'isolamento di unità funzionali.
- La modularità: permette di scomporre la catena del valore in attività, offrendo più personalizzazione dei prodotti e flessibilità.
- La comunicazione in tempo reale: si offrono approcci più proficui e flessibili alle operazioni e alla manutenzione.
- L'assistenza tecnica: permette ai decisori di incrementare la quantità di lavoro, automatizzando compiti faticosi e poco ergonomici.
- La virtualizzazione: prevede la creazione di una replica digitale delle operazioni [75].

Le **funzioni** (le variabili) di una produzione sostenibile 5.0 sono:

- l'adattabilità strategica della produzione;
- la circolarità della produzione;
- la produttività;
- la resilienza della produzione: è la capacità di reagire alle difficoltà;
- la reattività di produzione: consente di abbattere *stock-out* lungo la *supply chain* e di ottenere una panoramica in tempo reale della domanda del mercato.
- l'integrazione delle fonti di energia rinnovabile nell'approvvigionamento energetico;
- L'innovazione del modello di business sostenibile: si personalizzano le proposte del valore e vi è la circolarità del prodotto.
- L'occupazione sostenibile: in particolare per ciò che concerne la *privacy*, la sicurezza e gli spostamenti.
- Lo sviluppo sostenibile delle competenze: riguarda sia i produttori della *supply chain* (che possono utilizzare l'intelligenza artificiale, la realtà estesa e i dispositivi *smart wearable*), sia i dipendenti (che possono usufruire di un ambiente aziendale digitalizzato e iperconnesso).
- La governance della tecnologia sostenibile: le decisioni sono coadiuvate da tecnologie incentrate sull'uomo.
- L'integrazione della rete del valore (integrazione verticale, integrazione orizzontale e interoperabilità).
- Possibilità di più smart working: si consente ai dipendenti di lavorare in modo più efficiente, produttivo e sicuro, adattando le tecnologie alle esigenze dei dipendenti [36]. A Giacarta (Indonesia) da fine agosto 2023 e per due mesi i dipendenti pubblici hanno lavorato in *smart working* per aiutare a “ripulire” l’aria [206].

5. La rigenerazione

La rigenerazione è un processo industriale che prevede la conversione di prodotti usati in condizioni pari al nuovo. Nella rigenerazione, i prodotti sono completamente disassemblati e alcune parti subiscono delle lavorazioni. Si suddividerà questo argomento in: previsione; pianificazione e programmazione della produzione; pianificazione della capacità; gestione delle scorte; un'ultima parte dedicata allo studio della qualità del lavoro e all'ergonomia degli sforzi dei lavoratori.

5.1 Previsione della domanda netta

La produzione e la rigenerazione devono soddisfare le richieste del cliente in termini di quantità e qualità: questi ultimi due fattori (e il prezzo) sono strettamente legati. Se i prodotti non sono differenziabili e dipendono solo dal prezzo sono detti *commodities* (per esempio l'acciaio).

Un metodo completo per prevedere la domanda del prodotto è quello dello **smorzamento esponenziale con trend e stagionalità**. La previsione si basa su una baseline B_t a cui si aggiungono h periodi alti T i quali sono relazionati alla stagionalità S_t in modo moltiplicativo (anche se è possibile quella additivo). Y_t è un dato passato. La previsione tra n periodi è $F_{t,h}$:

$$F_{t,h} = (B_t + hT_t)S_{t+h-s}^{\lfloor \frac{h-1}{s+1} \rfloor} \quad (5.1)$$

$$B_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(B_{t-1} + T_{t-1}) \quad (5.2)$$

$$T_t = \beta(B_t - B_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (5.3)$$

$$S_t = \gamma \frac{Y_t}{B_t} + (1 - \gamma)S_{t-s} \quad (5.4)$$

$$\alpha, \beta, \gamma \in [0,1] \quad (5.5)$$

$$T_0 = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \frac{Y_{s+1} - Y_i}{s} \quad (5.6)$$

$$B_0 = \frac{\sum_{i=1}^l Y_i - iT_0}{l} \quad (5.7)$$

$$S_{j-s} = \frac{\sum_{k=0}^{(l/s)-1} [Y_{j+ks} - (j+ks)T_0]}{lB_0/s}, j \text{ è l'indice della stagionalità da 1 a } (5.8)[171]$$

In realtà occorre considerare la **domanda netta**. Essa è la differenza tra la domanda e il numero di pezzi ritornati nello stabilimento [101]. Quindi sarà opportuno fare una previsione per stimare la domanda e una per calcolare quanti pezzi attendersi possano ritornare mediante una rete di raccolta[97].

Un metodo per legare pezzi recuperati con la domanda effettiva del mercato e per trovare la domanda netta, è quello basato sul comportamento medio [101][97]. Definendo P come la probabilità che un contenitore sarà restituito, $E(d_L)$ il valore atteso e $Var(d_L)$ la varianza della domanda nel *lead time* d_L . d_L è una variabile casuale binomiale. Fissando ER come il valore atteso del *lead time* di ritorno e VR come la varianza del *lead time* di ritorno, vale:

$$ER = P E(d_L) \quad (5.9)$$

$$VR(d_L) = Var(R) = P^2 Var(d_L) + P(1 - P)E(d_L) \quad (5.10)$$

La domanda netta nel *lead time* atteso ED , con il metodo del comportamento medio, è valore atteso della domanda nel *lead time* meno il valore atteso dei pezzi che ritornano, ossia:

$$ED = E(d_L) - ER = (1 - P)E(d_L) \quad (5.11)$$

La varianza della domanda netta nel *lead time* di ritorno VD (la dimostrazione è rimandata al lettore[101])

$$VD = (1 - P^2)Var(d_L) + P(1 - P)E(d_L) \quad (5.12)$$

Ci sono delle misure di **valutazione degli errori** di previsione. L'errore E_t è:

$$E_t = D_t - F_t \quad (5.13)$$

L'errore di previsione accumulato dal periodo T_A al periodo T è:

$$CFE_t = \sum_{i=T_A+1}^T E_i \quad (5.14)$$

L'errore medio (BIAS) dal periodo T_A al periodo T è detto ME :

$$ME = \frac{1}{T - T_A} \sum_{i=T_A+1}^T E_i \quad (5.15)$$

L'errore percentuale medio assoluto dal periodo T_A al periodo T è il $MAPE$ e vale:

$$MAPE = \frac{\sum_{i=T_A+1}^T |E_i|}{\sum_{i=T_A+1}^T |D_i|} \quad (5.16)$$

Per verificare se ci sono errori in un solo verso (magari dovuti a una cattiva taratura degli strumenti) si può ricorrere alla deviazione assoluta media MAD :

$$MAD = \frac{1}{T - T_A} \sum_{i=T_A+1}^T |E_i| \quad (5.17)$$

L'errore quadratico medio $RMSE$ è una misura che risente dei grandi errori in misura più forte e ha come formula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T - T_A} \sum_{i=T_A+1}^T E_i^2} \quad (5.18)$$

Esiste anche l'indice $RMSE\%$ dato dalla formula (5.19):

$$RMSE\% = 100 \frac{RMSE}{\text{media domanda}} \quad (5.19)[171]$$

5.2 Schedulazione della rigenerazione

Si sviluppa ora un modello di schedulazione per la rigenerazione determinando le quantità lavorate di prodotti e i numeri dell'*outsourcing*, ossia dei prodotti articoli acquistati da fornitori esterni. La funzione obiettivo massimizza il risparmio totale [91] [102].

Si ipotizza che il consumatore passi il materiale al centro raccolta.

Un'altra ipotesi è che il centro raccolta possa subaffittare la rigenerazione, smaltire gli scarti della produzione oppure disassemblare presso il centro raccolta stesso i pezzi riutilizzabili per poi riassembrarli nel medesimo centro. Vi è quindi un costo di magazzino.

Ci si concentra poi sul magazzino del produttore: il magazzino delle parti, in cui si possono comprare parti nuove da un fornitore esterno, può ricevere i pezzi rigenerati dal subappaltatore oppure dal centro riassettaggio del centro raccolta. Anche il produttore sostiene un costo di mantenimento.

In figura 5.1 vi è la raffigurazione del flusso per la rigenerazione.

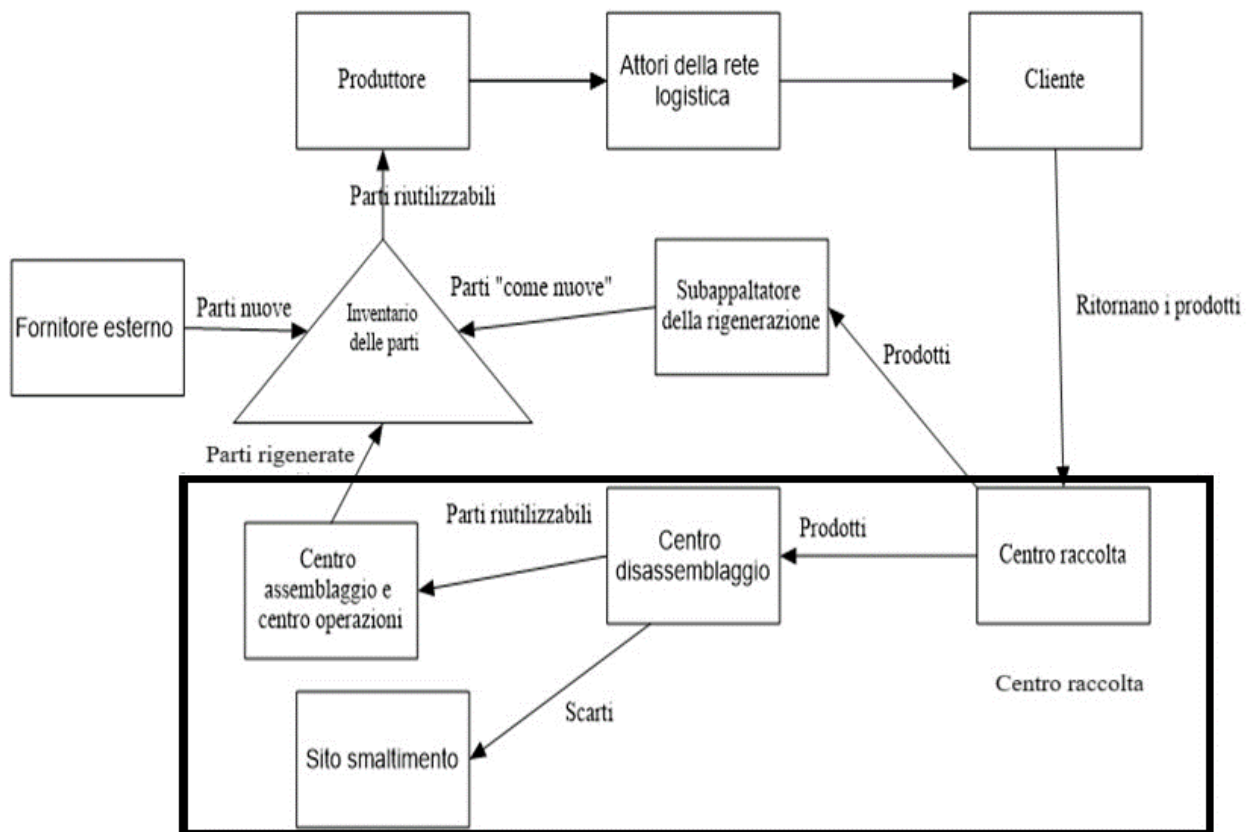


Figura 5.1: flusso per la pianificazione della rigenerazione [102]

La nomenclatura del modello è:

Indici

p : indice del prodotto, $p = \{1, \dots, P\}$;

i : indice della parte, $i = \{1, \dots, I\}$;

t : indice di tempo, $t = \{1, \dots, T\}$, (T : orizzonte di pianificazione);

l : macchina di lavorazione, $l = \{1, \dots, L\}$ (per esempio una delle tre che fa fusione, o quella della tornitura etc.).

e : fonte di energia, $e = \{1 \dots E\}$ (per esempio eolica, a carbone etc.).

Parametri

R_{it} : la quantità richiesta della parte i durante tempo t ;

CP_{pt} : la quantità di prodotto p raccolta per il tempo t ;

BOM_{pi} : il numero di parti i previsto dalla *bill of material* derivanti dal disassemblaggio di un'unità di prodotto p ;

$CSCp_p$: la capacità del processo nel sito di raccolta;

RCp_i : la capacità del centro assemblaggio considerata fissa (senza pedice t);

DCp_p : la capacità del centro disassemblaggio considerata fissa (non dipendente dal tempo t);

LCp_i : la capacità del centro delle operazioni della lavorazione l , è considerata fissa senza pedice t ;

$VPart_i$: il volume occupato da una unità della parte i ;

$FaRiLa_{il}$: fattore di riempimento della lavorazione, ossia quanto il tipo di pezzo i occupa la capacità della lavorazione l , per esempio può essere in volume per i forni o a pezzi per i torni;

$PICp$: la capacità dell'inventario delle parti;

λ_i : il limite superiore del tasso di smaltimento per la parte i disassemblata;

$CPIC_p$: il costo unitario di mantenimento del prodotto raccolto p nel sito di raccolta;

$DspC_i$: il costo che tiene conto nelle tre dimensioni della sostenibilità nello smaltimento della parte i disassemblata;

$DSUC_p$: il costo di *set up* per iniziare il disassemblaggio del prodotto raccolto p ;

$DSVC_p$: il costo unitario dell'operazione per il disassemblaggio del prodotto raccolto p ;

CSL_i : costo di *set up* per passare alla lavorazione l ;

a_1 : tassa *pigouviana* della CO_2 , trasforma 1 kg di CO_2 in €;

a_2 : tassa *pigouviana* del consumo di acqua, trasforma 1 m^3 di acqua consumata in €;

s_1 : peso della prima variabile (inquinamento acustico) della combinazione lineare SL_{ilt} (costo orario sociale), s_1 vale 1 ed è espressa solo per evidenziare meglio la forma di combinazione lineare di SL_{ilt} ;

$COdueEquiv_e$: vettore che permette di trasformare in CO_2 il consumo di energia di tipo e ;

$OUTC_p$: il costo di manodopera per il prodotto p ;

RSC_i : il costo di *set up* per passare all'assemblaggio della parte i disassemblata;

RVC_i : il costo operativo unitario della ristrutturazione della parte i disassemblata;

PIC_i : il costo unitario di mantenimento della parte i nel magazzino delle parti;

PPC_i : il costo unitario di acquisto della parte i dal fornitore che coincide con il prezzo di vendita del fornitore i ;

$DIDC$: il costo inattivo del reparto di disassemblaggio;

$RIDC$: il costo inattivo del reparto di assemblaggio;

$LIDC$: il costo inattivo del reparto di lavorazione;

Variabili decisionali

DP_{pt} : il numero di prodotti p disassemblati nel tempo t ;

$RPart_{it}$: il numero di parti rinnovate i nel il tempo t ;

$WPart_{it}$: il numero di parti i smaltite nel tempo t ;

$LPart_{ilt}$: il numero di parti i che hanno subito la lavorazione l nel tempo t

$$RPart_{it} = DP_{pt} - WPart_{it} \quad (5.20);$$

CPI_{pt} : il livello delle scorte del prodotto p per il tempo t ;

$DPart_{it}$: il numero della parte i disassemblata nel tempo t ,

$$DPart_{it} = \sum_{p=1}^P BOM_{pi} DP_{pt} \quad (5.21);$$

PI_{it} : il livello delle scorte della parte i nel tempo t ;

$PPart_{it}$: il numero di parti i acquistata nel tempo t ;

RSU_{it} : la variabile binaria per l'impostazione della ristrutturazione della parte i lungo il tempo t ;

DSU_{pt} : la variabile binaria per l'impostazione del prodotto di disassemblaggio p nel tempo

t ;

LSU_{ilt} : la variabile binaria se esiste *set up* per la lavorazione della parte i nel tempo t ;

$DispLav_{lt}$: la variabile binaria che indica se una lavorazione l è disponibile nel tempo t ;

OUT_{pt} : il numero di prodotti di outsourcing p nel tempo t ;

$OPart_{it}$: il numero di parti i dal subappaltatore nel tempo t ,

$$OPart_{it} = \sum_{p=1}^P BOM_{pi} OUT_{pt} \quad (5.22)$$

CL_{ilt} : costo orario di sostenibilità della lavorazione del pezzo i per fare la lavorazione con il mezzo l al tempo t ;

EL_{ilt} : costo orario economico del pezzo i per fare la lavorazione l durante il tempo t ;

AL_{ilt} : costo orario ambientale del pezzo i per fare la lavorazione l durante il tempo t ;

SL_{ilt} : costo orario sociale del pezzo i per fare la lavorazione l al tempo t (è una combinazione lineare di parametro per variabile sostenibile sociale);

$EnergICons_{elt}$: energia di tipo e utilizzata da una lavorazione l durante il tempo t ;

$EnergCons_{eit}$: energia di tipo e utilizzata da un pezzo i in una lavorazione l durante il tempo t ;

$CO_{2\ itt}$: kg di CO_2 utilizzata dal pezzo i nella lavorazione l durante il tempo t ;

$ACQUA_{ilt}$: quantità di acqua in m^3 usata dal pezzo i nella lavorazione l durante il tempo t ;

$freqAc_{lt}$: consumo di acqua in m^3 utilizzata dalla lavorazione l durante il tempo t ;

$CNoize_{ilt}$: costo *pigouviano* del pezzo i durante la lavorazione l durante il tempo t ;

$NumPers_{lt}$: numero di persone che subiscono il danno biologico della lavorazione l durante il tempo t ;

$LavSveglia_{lt}$: variabile binaria la quale vale 1 se esiste almeno una persona che subisce il danno biologico dalla lavorazione l durante il tempo t ; si potrebbe considerare per l'inquinamento acustico l'esistenza di un suono superiore a 60 dB a 5 metri dall'azienda durante il tempo t .

Modello per la rigenerazione:

$$\begin{aligned} \text{Massimizzazione } & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I PPC_i R_{it} - \{ \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P (CPI C_{p,t} CPI_{pt} + OUT C_p OUT_{pt} + \\ & DSUC_p DSU_{pt} + DSVC_p DP_{pt}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I [Dsp C_i WPart_{it} + RSC_i RSU_{it} + \\ & RVC_i RPart_{it} + PIC_i PI_{it} + PPC_i PPart_{it} + \sum_{l=1}^L (CSL_{ilt} LSU_{ilt} + \\ & LSU_{ilt} LPart_{ilt} CL_{ilt} (1 - DispLav_{it}))] + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P (1 - DSU_{pt}) DIDC + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (1 - RSU_{it}) RIDC + \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I (1 - LSU_{ilt}) LIDC \} \quad (5.23) \end{aligned}$$

$$DPart_{it} = \sum_{p=1}^P BOM_{pi} DP_{pt} \quad \forall i, t \quad (5.24)$$

$$OPart_{it} = \sum_{p=1}^P BOM_{pi} OUT_{pt} \quad \forall i, t \quad (5.25)$$

$$CP_{pt} + CPI_{p,t-1} = OUT_{pt} + DP_{pt} + CPI_{pt} \quad \forall p, t \quad (5.26)$$

$$RPart_{it} + WPart_{it} = DPart_{it} \quad \forall i, t \quad (5.27)$$

$$RPart_{it} + PPart_{it} + OPart_{it} + PI_{i,t-1} = R_{it} + PI_{i,t} \quad \forall i, t \quad (5.28)$$

$$\sum_{i=1}^I VPart_i PI_{i,t} \leq PIC_p \quad \forall t \quad (5.29)$$

$$OUT_{pt} + DP_{pt} \leq CSCp_p \quad \forall p, t \quad (5.30)$$

$$DP_{pt} \leq DCp_p \quad \forall p, t \quad (5.31)$$

$$RPart_{it} \leq RCp_i \quad \forall i, t \quad (5.32)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T FaRiLa_{il} \times LPart_{ilt} \times DispLav_{lt} \leq LCp_l \quad \forall l \quad (5.33)$$

$$RPart_{it} \leq M \cdot RSU_{it} \quad \forall i, t \quad (5.34)$$

$$DP_{pt} \leq M \cdot DSU_{pt} \quad \forall p, t \quad (5.35)$$

$$LPart_{ilt} \leq M \cdot LSU_{ilt} \quad \forall i, l, t \quad (5.36)$$

$$\sum_{t=1}^T WPart_{it} \leq \lambda_i \sum_{t=1}^T DPart_{it} \quad \forall i \quad (5.37)$$

$$CL_{ilt} = EL_{ilt} + AL_{ilt} + SL_{ilt} \quad (5.38)$$

$$AL_{ilt} = a_1 CO_{2ilt} + a_2 ACQUA_{ilt} \quad (5.39)$$

$$EnerglCons_{elt} = \sum_{t=1}^T [PO_{elt} + g(PZ_{elt})] \quad \forall e, l \quad (5.40)$$

$$EnerglCons_{eilt} = \frac{EnerglCons_{elt}}{\sum_i^I LPart_{ilt}} \quad \forall e, l \quad (5.41)$$

$$CO_{2\,ilt} = \sum_{e=1}^E (CO_{due} Equiv_e \times EnergCons_{eilt}) \quad \forall l \quad (5.42)$$

$$ACQUA_{ilt} = \frac{\sum_{t=1}^T [freqAc_{lt}]}{\sum_{i=1}^I LPart_{ilt}} \quad \forall l \quad (5.43)$$

$$SL_{ilt} = s_1 CNoize_{ilt} \quad (5.44) [180]$$

$$CNoize_{ilt} = \sum_{t=1}^T \frac{50,79\text{€} \times NumPers_{lt} \times LavSveglia_{lt}}{\sum_{i=1}^I LPart_{ilt}} \quad \forall l \quad (5.45)[182]$$

$$RSU_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, t \quad (5.46) [102]$$

$$DSU_{pt} \in \{0,1\} \quad \forall p, t \quad (5.47)$$

$$LSU_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, l, t \quad (5.48)$$

$$DispLav_{lt}, NumPers_{lt}, LavSveglia_{lt} \in \{0,1\} \quad \forall l, t \quad (5.49)$$

$$OUT_{pt}, DP_{pt}, CPI_{pt} \geq 0 \quad \forall p, t \quad (5.50)$$

$$RPart_{it}, PPart_{it}, OPart_{it}, WPart_{it}, PI_{i,t} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (5.51)$$

$$LPart_{i,l,t} \geq 0 \quad \forall i, l, t \quad (5.52)$$

La funzione obiettivo (5.23) massimizza il risparmio. Misura la differenza tra il fatturato, ossia prezzo per quantità comprate dal fornitore, e il costo di rigenerazione sopportato dal centro raccolta e dalla ditta di produzione. Questo costo è composto dai costi di:

mantenimento al centro raccolta, subcontracto in *outsourcing*, *set up* per il disassemblaggio, disassemblaggio, smaltimento di pezzi disassemblati, *set up* per l'assemblaggio, assemblaggio, *set up* per passare all'operazione l se esiste, costo orario di fare la lavorazione se esiste (per esistere occorre che si sia fatto il *set up* e che non sia disponibile, infatti, se è disponibile allora non sta consumando, ma è un'approssimazione perché potrebbe essere in *stand-by* e inquinare), costo di mantenimento al magazzino (del produttore), di acquisto esterno (del produttore), costo opportunità del disassemblaggio, dell'assemblaggio e della lavorazione.

I vincoli (5.24) e (5.25) calcolano il numero di parti smontando i prodotti nel sito di raccolta e del subappaltatore. Si ipotizza che non si perdano pezzi e che quindi i numeri delle parti sia quello previsto dalla *bill of material*.

I vincoli (5.26), (5.27) e (5.28) rappresentano le equazioni di bilancio di inventario dei prodotti, delle parti ottenute tramite disassemblaggio e smaltimento, e di inventario delle parti.

Il vincolo (5.29) garantisce che le quantità di inventario delle parti non possano superare la capacità predeterminata dell'inventario della parte ($PICp$).

Il vincolo (5.30) garantisce che il numero di prodotti nel sito di raccolta non possa superare la sua capacità.

I vincoli (5.31), (5.32), (5.33) garantiscono che la quantità di disassemblaggio, assemblaggio e lavorazione non possano superare la capacità del sito di disassemblaggio, assemblaggio e lavorazione, rispettivamente. L'equazione (5.33) può permettere di lavorare con un mezzo l anche se la sua capacità lavorativa non è piena e, inoltre, permette di non fare la lavorazione l anche se esiste capacità della lavorazione (ossia se $FaRiLa \times LPart$ è inferiore di LCp) per via di una mancata disponibilità

I vincoli (5.34), (5.35) e (5.36) sono vincoli per l'esistenza del disassemblaggio dei prodotti, assemblaggio e lavorazione delle parti.

Il vincolo (5.37) mostra che le aziende produttrici non possono superare la percentuale predeterminata λ_i di parti smontate da smaltire.

Il vincolo (5.38) calcola il costo orario di sostenibilità CL_{ilt} ;

Il vincolo (5.39) e (5.40) esprimono rispettivamente il costo *pigouviano* ambientale e sociale come combinazione lineare di parametro a_i (nel caso ambientale) o s_i (nel caso sociale) e

variabile sostenibile. I parametri a_i ed s_i trasformano l'unità di misura della variabile sostenibile in €.

Il vincolo (5.41) calcola l'energia di tipo e utilizzata da una lavorazione l durante il tempo t ;

Il vincolo (5.42) calcola l'energia di tipo e utilizzata da un pezzo i in una lavorazione l durante il tempo t ;

Il vincolo (5.43) dà i kg di CO_2 emessi dal pezzo i nella lavorazione l durante il tempo t ;

Il vincolo (5.44) informa sulla quantità di acqua in m^3 usata dal pezzo i nella lavorazione l durante il tempo t ;

Il vincolo (5.45) realizza il costo *pigouviano* del danno biologico, prima (e unica) variabile sostenibile sociale espressa nel modello, è il costo giornaliero di danno biologico per il pezzo i dovuta alla sua lavorazione l e nasce se nel tempo t accade che supera la soglia $LavSveglia_{it}$ (per esempio i 60 dB nel caso di inquinamento acustico) e pagata a un numero $NumPers_{it}$ di persone. Il modello si potrebbe ampliare per esempio sulla somma dei danni biologici, invece, nel modello il danno biologico è unico per periodo t e fisso a 50,79€/persona. Il modello sarebbe da adattare in base alla legge vigente in cui l'impianto di lavorazione si trova.

I set di vincoli (5.46), (5.47), (5.48) e (5.49) danno il dominio alle variabili binarie.

I vincoli (5.50), (5.51), (5.52) controllano la non negatività delle variabili decisionali [102]

Il modello di rigenerazione è inoltre sviluppabile con il metodo della simulazione a eventi discreti (*DES*).

5.3 Pianificazione della capacità

Il piano di produzione è ha un orizzonte di lungo termine (1 anno). La visione temporale del *Master Production Schedule (MPS)* è di livello intermedio (trimestrale o settimanale, per esempio). Il piano *MPS* ha come limite l'ipotesi di capacità infinita. Un *RCCP* verifica se è disponibile una capacità sufficiente in termini di lavoratori, macchine, impianti per periodo di tempo; fornisce quindi una conferma della fattibilità della schedulazione *MPS*. Gli effetti di un *MPS* irrealizzabile saranno quelli di un accumulo di scorte (*WIP*), scadenze non rispettate e tempi di produzione più lunghi. Se un *MPS* non è fattibile allora nessuna manipolazione del *MRP* (pianificazione dei fabbisogni materiali) potrà rendere praticabile il piano di produzione[103].

Un **MPS** si può modellizzare come:

$$\text{Previsione} - \text{magazzino} = \text{ordini di produzione MPS} \quad (5.53)$$

Prodotti che si possono promettere =

$$\text{magazzino} + \text{ordini di produzione MPS} - \sum \text{ordini} \quad (5.54)[174]$$

Un **MRP** calcola il fabbisogno lordo, il saldo movimenti, gli ordini pianificati; può essere modellizzato come:

NR = fabbisogni netti (*net requirements*) dal *MPS*;

GR = fabbisogni lordi (*gross requirements*);

SR = *scheduled receipts*, ordini schedulati (ne è prevista la consegna);

PAB = *projected available balance*, scorta alla fine del *time bucket*;

SS = *safety stock*, scorte di sicurezza;

PO = ordine pianificato (*planned order*)

L = *lead time*;

T = *time bucket* in considerazione;

MLS = *minimum lot size*, lotto minimo.

$$NR_t = \max \{0, GR_T\} - SR_T - (PAB_{T-1} - SS) \quad (5.55)$$

$$PO_{T-L} \max \{MLS, NR_T\} \text{ se } NR_T > 0; \quad PO_{T-L} = 0 \text{ altrimenti} \quad (5.56)$$

$$PAB_T = PAB_{T-1} + SR_T + PO_{T-L} - GR_T \quad (5.57) [173]$$

Esistono tre tecniche principali per **RCCP**: l'approccio *bill of resource (BOR)*, *capacity*

planning overall factor (CPOF) e l'approccio dei profili delle risorse. La tecnica dei profili delle risorse non è ora presa in considerazione a causa della elevata incertezza dei tempi di consegna. Il *CPOF* è insensibile ai cambiamenti del *mix* di prodotti. A causa di questi inconvenienti, il metodo *RCCP* sviluppato è quello *BOR*.

La capacità disponibile può essere espressa come:

$$C_{ik} = T_{ik} * E_i * U_i \quad (5.58)$$

dove: C_{ik} : capacità disponibile del centro nel periodo temporale k .

T_{ik} : tempo disponibile nel centro nel periodo temporale k .

E_i : efficienza del centro in $\left[\frac{\text{ore standard prodotte}}{\text{ore lavorate}}\right]$, le ore standard sono il periodo di tempo che dovrebbe essere richiesto sia impostare una determinata macchina e sia poi per eseguire una parte di tale operazione.

U_i : utilizzo nel centro in $\left[\frac{\text{ore disponibili}}{\text{ore perse}}\right]$.

Prima di iniziare un *RCCP* occorre standardizzare tempi e percorsi. I tempi standard necessari per completare i prodotti (con i loro componenti) possono essere espressi come in tabella 5.1.

Tabella 5.1: esempio di dati sul tempo

Centro	Parte	Tempo di lavorazione/pezzo	Tempo di set-up/lotto	Dimensione lotto	Fattore di occorrenza
1	A3001	0,50	3	10	0.75

Dove il tempo di esecuzione per pezzo e il tempo di *set up* per lotto sono espressi come tempi standard. Il tempo standard rappresenta il tempo medio necessario per completare un'operazione. Il tempo standard deve essere sempre aggiornato perché deve riflettere la produzione. L_{ij} tempo di operazione per il prodotto j nel centro i è:

Tempo di operazione per pezzo

$$L_{ij} = \text{tempo di esecuzione per pezzo} + \frac{\text{tempo di setup per lotto}}{\text{dimensione media del lotto}} \quad (5.59)$$

Per evitare di esplicitare i percorsi che possono essere condizionale o probabilistici, si utilizzano i fattori di occorrenza OF che sono la percentuale di tempo in cui è richiesta una particolare operazione, valgono:

$$OF_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^N R_{ijm}}{N_j} \quad (5.60)$$

dove: j indica la parte, i indica il centro; $R_{ijm} = 1$ se la parte j è instradata al centro i , 0 altrimenti, $m=1,2, \dots, N$ e N_j è il numero totale di tipi di parti inviati per l'elaborazione. I fattori di occorrenza cambiano con il trascorrere del tempo poiché il materiale invecchia ed è soggetto ad alcune operazioni con maggiore frequenza.

Un altro fattore con cui le industrie di rigenerazione devono confrontarsi sono i fattori di recuperabilità dei materiali MRR , frequenza con cui il materiale recuperato è riparabile. Il tasso equivalente di materiale da rigenerare MRR_j è espresso come:

$$MRR_j = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n S_{tj}}{I_j} \quad (5.61)$$

dove j è la parte, S_{tj} è il numero di unità j rottamate durante il periodo di tempo t ($t=1,2,3, \dots, n$), I_j è numero totale di unità di tipo j . L'aggiornamento degli MRR dovrebbe essere continuo.

Definendo M_{jk} la quantità di produzione per il prodotto j ($j=1,2, \dots, r$) nella settimana k , dato dalla moltiplicazione della quantità di schedulazione MPS_k per il tasso effettivo di prodotto da rigenerare MRR_j , tale che:

$$M_{jk} = MPS_k \times MRR_j \quad (5.62)$$

L'approccio *modified Bill Of Resource* calcola la capacità richiesta dal centro i nel periodo k come [103]:

$$C_{ik} = \sum_{j=1}^r [(M_{jk} \times L_{ij}) \times O_{ij}] \quad (5.63)$$

5.4 Gestione del magazzino

La gestione del magazzino è fondamentale per ottimizzare i costi e avere un basso impatto ambientale.

I prodotti con un alto grado di differenziazione non possono permettersi *stock out*, mentre per i prodotti *commodities* l'ottimizzazione delle scorte potrebbe permettere di abbattere i costi, il prezzo ed essere competitivi nel mercato.

Esistono modelli deterministici e stocastici. Quando la domanda è stazionaria si usano modelli come l'*EOQ*. Quando la domanda è dinamica si usa la programmazione lineare (modelli di Wagner Whitin, Floarian-Klein). Quando la domanda è stocastica, o se il *lead time* non è deterministico, ci sono due categorie di modelli: quelli a revisione periodica e quelli a revisione continua.

Il lotto di quantità pari all'*EOQ* risulta ottimo quando la domanda è stazionaria e deterministica. L'andamento del magazzino con una domanda lineare e un lotto di riordino pari all'*Economic Order Quantity* è rappresentato in figura 5.2.

La formula dell'*EOQ* è riportata nell'equazione (5.64).

Sia d è il tasso di domanda (costante), A è il costo fisso di riordino, h è il costo del mantenimento della scorta in magazzino e vale il costo unitario di integrazione per il tasso di nell'unità di tempo, L è il *lead time*. La quantità di riordino ottima quando la domanda stazionaria è:

$$EOQ = q^* = \sqrt{\frac{2Ad}{h}} \quad (5.64)$$

L'*EOQ* è una soluzione robusta, cioè permette di lavorare bene nonostante la presenza di piccoli errori, ovviamente non in modo ottimale. Il livello medio del magazzino è la metà dell'*EOQ*.

Il periodo ottimo di riordino è dato da:

$$T^* = \frac{q^*}{d} \quad (5.65)$$

Il turnover ratio vale:

$$RT = \sqrt{\frac{2d}{hA}} \quad (5.66)$$

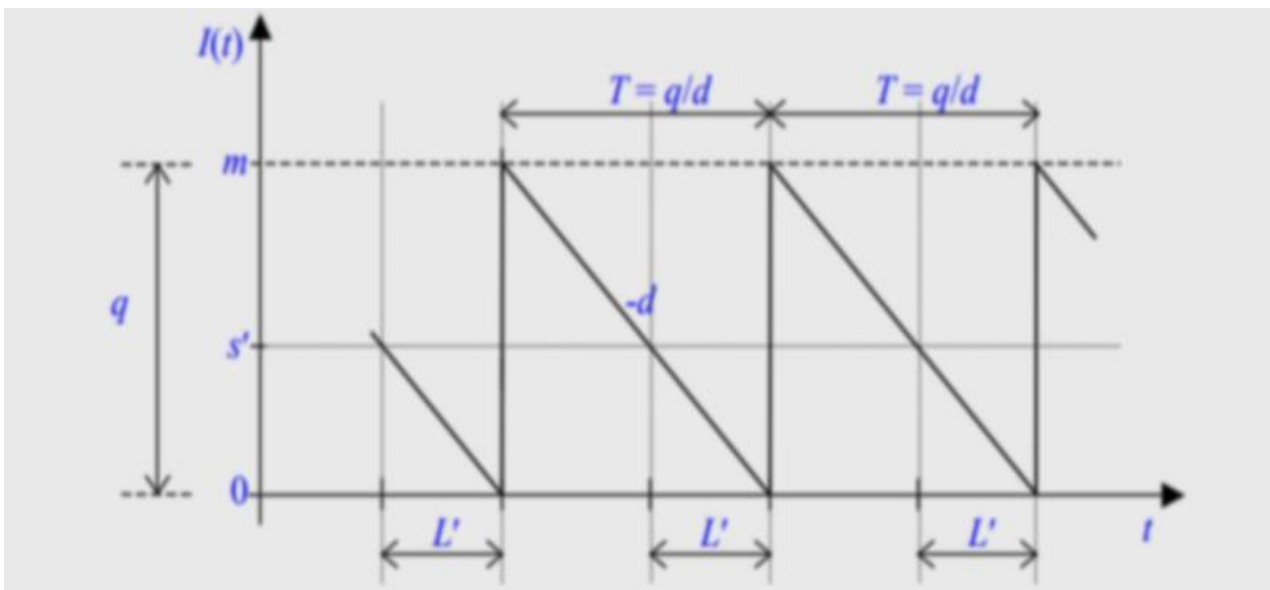


Figura 5.2: Andamento del magazzino con EOQ e domanda stazionaria [128].

La figura 5.3 rappresenta l'andamento del magazzino deterministico con *backlog*.

Nel caso di *backlog* gli ordini non soddisfatti per tempo non sono eliminati e rimangono da essere soddisfatti: l'inventario è come se scendesse sotto lo zero.

Definendo u : costo di backlog per unità di prodotto, v : costo di *backlog* per unità di prodotto e unità di tempo, σ il massimo backlog, r è tasso di reintegro, il periodo di reintegro (tra lo 0 e il livello massimo livello), T_1 : il tempo per far passare le scorte dal livello minimo allo 0; T_2 : il tempo per far passare le scorte da 0 al livello massimo m , il T_r : tempo di reintegro (per far passare le scorte dal minimo al livello massimo m) vale:

$$T_r = T_1 + T_2 = \frac{q}{r} \quad (5.67)$$

Il punto di riordino s vale:

$$s = Ld - \sigma \quad (5.68)$$

Il massimo livello di inventario è:

$$m = (r - d)T_r - \sigma = \left(1 - \frac{d}{r}\right)r T_r - \sigma = \left(1 - \frac{d}{r}\right)q - \sigma \quad (5.69)$$

Il costo medio totale di gestione delle scorte nell'unità di tempo è:

$$\mu(q, \sigma) = \frac{A + cq + hIT + u\sigma + vST}{T} \quad (5.70)$$

$A+cq$: è il costo fisso di riordino a cui si aggiunge il costo variabile di approvvigionamento nel periodo T .

$h \cdot I \cdot T$: è il costo di magazzino nel periodo T .

$u \cdot \sigma + v \cdot S \cdot T$: è il costo fisso e variabile di *backlog* nel periodo T .

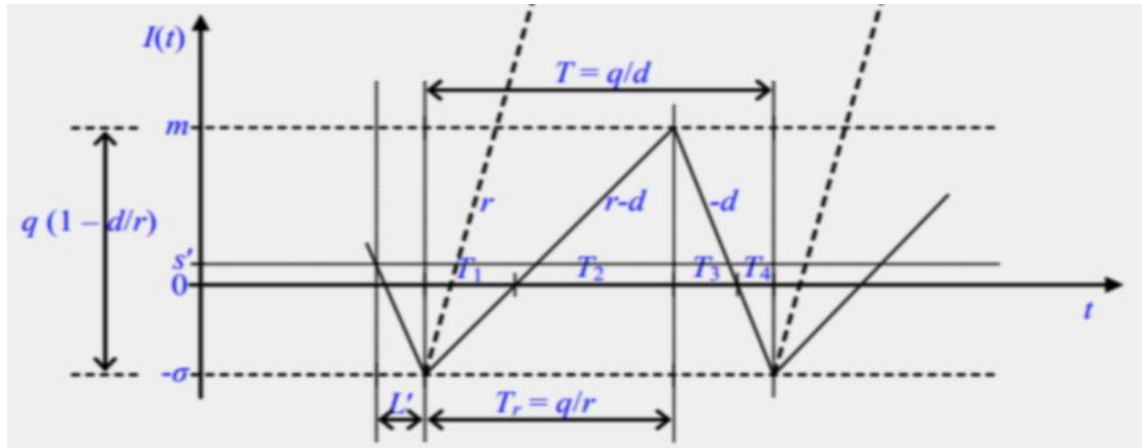


Figura 5.3: Andamento del magazzino deterministico con *backlog* [128].

La gestione del magazzino, nel caso di domanda deterministica ma dinamica, si può controllare con il modello di Wagner-Whitin. Sia I_0 il livello iniziale del magazzino e assunto pari a 0; t il time bucket che compreso tra 1 all'altra pianificazione τ ; M un valore grande almeno pari alla domanda per l'orizzonte temporale; c_t il costo unitario di approvvigionamento; y_t una variabile binaria per legare i costi in caso di riordino; q_t la quantità riordinata; K_t il costo fisso di approvvigionamento $\sqrt{\frac{A}{2hT}}$; il modello è:

$$\min \sum_{t=1}^{\tau} (K_t y_t + c_t q_t + h_t I_t) \quad (5.71)$$

$$q_t + I_{t-1} = d_t + I_t, \quad t \text{ da } 1 \text{ a } \tau \quad (5.72)$$

$$q_t \leq M y_t \quad (5.73)$$

$$q_t, I_t \geq 0 \quad (5.74)$$

$$y_t \in \{0,1\} \quad (5.75)[129]$$

In figura 5.4 vi è l'andamento del magazzino in cui la domanda non è stazionaria (senza *backlog*). Il punto di riordino è s , I_s è la scorta di sicurezza. Ci sono tre principali politiche per i magazzini dalla domanda stocastica: a quantità fissa, periodo fisso, (s,S).

Politica della quantità fissa: Si ordina una quantità fissa q di prodotto (per esempio $q=EOQ$) ogni volta che l'inventario (scorte in magazzino più quelle scorte in transito) scende sotto il punto di riordino s .

I vantaggi sono il contenimento costi e una maggiore efficienza. Gli svantaggi riguardano: la necessità di un controllo continuo; la possibilità di non aggregare gli ordini e abbattere il costo fisso di ordinazione dato che gli ordini possono essere emessi in qualsiasi istante.

Il punto di riordino s corrisponde alla minima quantità di scorte (in magazzino più quelle in transito) necessaria per soddisfare la domanda durante il *lead time* L con una certa probabilità α . In particolare, se I_s è la scorta di sicurra allora s vale:

$$s = dL + I_s \quad (5.76)$$

Politica a periodo fisso: si effettuano gli ordini con cadenza fissa (per es. ogni T dell'*EOQ*); si ordina una quantità variabile sufficiente a riportare la posizione di inventario al livello S tale da soddisfare con probabilità α ($prob\{z \leq z_\alpha\} = \alpha$, in cui z è il percentile della distribuzione Normale standardizzata) la domanda totale che si presenta fino all'arrivo della merce del successivo ordine ossia nel periodo $L+T$.

I vantaggi sono dal punto di vista organizzativo, infatti non è necessario alcun controllo continuo, si possono aggregare gli ordini di più beni ma lo svantaggio sono costi superiori e minor efficienza.

$$S = d(L + T) + I_s \quad (5.77)$$

Se il *lead time* L è noto con certezza, allora $I_s = z_\alpha \sigma_d \sqrt{L + T}$ (5.78)

Se il *lead time* L è aleatorio, allora $I_s = z_\alpha \sqrt{\sigma_d^2(\bar{L} + T) + \sigma_L^2 \bar{d}^2}$ (5.79)

Politica (s, S) : si revisiona la posizione d'inventario periodicamente con periodo T e risulta che il livello d'inventario è inferiore a una soglia minima s , si emette un ordine q tale da riportare la posizione d'inventario al massimo valore S .

In pratica, se $T \rightarrow 0$ e $S = s + q$ la politica (s, S) tende a quella a quantità fissa; se $s \rightarrow S$ la politica (s, S) tende a quella a periodo fisso. La politica (s, S) può considerarsi come soluzione di compromesso tra la politica a periodo fisso e quella a quantità fissa [40].

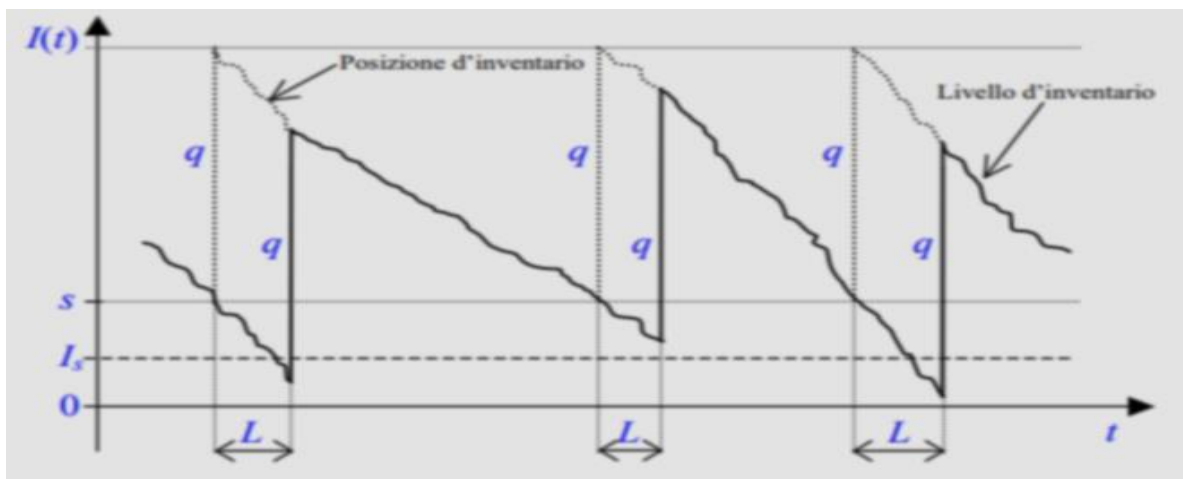


Figura 5.4: Andamento del magazzino con domanda stocastica a quantità fissa o a periodo fisso [40].

5.5 Ergonomia

Il 30% dei lavoratori edili supera un livello accettabile di fatica fisiologica [175][82]. Gli sforzi eccessivi causano non solo affaticamento fisico dei lavoratori e disturbi muscoloscheletrici legati al lavoro (*WMSD*), ovvero rischi ergonomici, ma portano anche a problemi di scarsa qualità del lavoro e a una riduzione della produttività lavorativa [176][82].

Le misure che si possono prendere sono la riprogettazione, la modifica delle postazioni di lavoro, la sostituzione degli strumenti, la rotazione dei lavoratori in diverse postazioni: quest'ultimo (anche detto *job rotation*) aiuta a combattere l'alienazione del lavoratore [178]. La valutazione si focalizzerà su tre variabili: l'affaticamento, il rischio e la produttività.

Il **dispendio energetico**: sensori e modelli matematici possono misurare la fatica. Questa valutazione utilizza indici muscolari e indici di dispendio metabolico. L'indice muscolare si riferisce alla forza muscolare di specifiche parti del corpo, stimato come percentuale della

massima contrazione volontaria (%MVC), ma questo indice non riflettere direttamente il livello di fatica di un organismo nella sua interezza. La fatica di un lavoratore può essere quantificata attraverso:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda(EER) \times t} \quad (5.80)$$

$$R(\tau) = F(t) \times e^{-\mu(MERR) \times \tau} \quad (5.81)$$

dove: $F(t)$ è il livello di fatica accumulato dal tempo di lavoro t , τ è il tempo di riposo e $R(\tau)$ è il livello di fatica residuo dopo riposo del tempo τ . $\lambda(EER)$ è il parametro di fatica; $\mu(MERR)$ è il parametro di recupero. Valori più alti di $\lambda(EER)$ e $\mu(MERR)$ significano accumulo e recupero della fatica più rapidi. I periodi di riposo sono in modo da consentire il pieno recupero difficilmente può verificarsi.

La figura 5.5 illustra l'accumulo e il recupero di fatica del lavoratore.

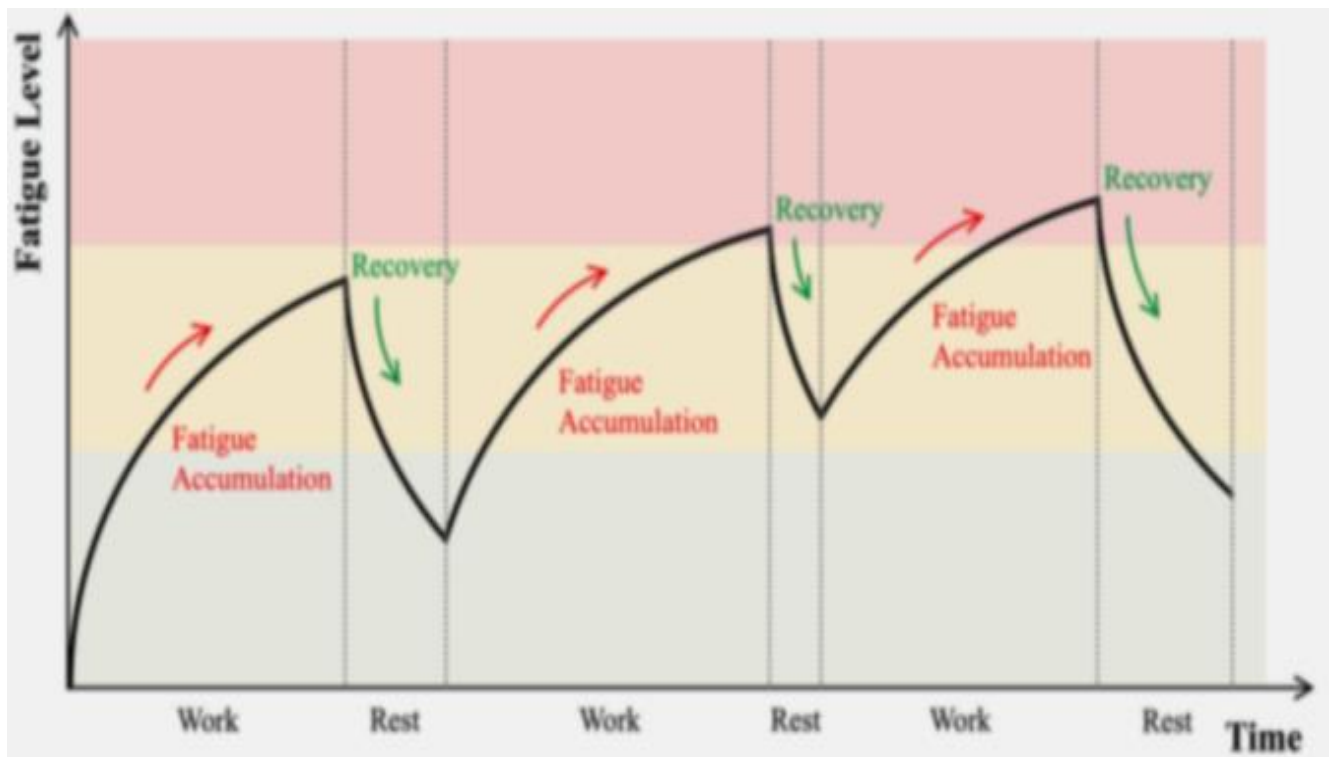


Figura 5.5: Affaticamento di un lavoratore, nel tempo si susseguono lavoro e riposo [82].

La fatica e la fatica residua $R(\bullet)$ al ciclo successivo t_{j+1} e τ_{j+1} hanno come equazioni:

$$F(t_{j+1}) = R(\tau_{j+1}) + [1 - R(\tau_j)] \times [1 - e^{-\lambda(\text{EER}) \times t_{j+1}}] \quad (5.82)$$

$$R(\tau) = F(t_{j+1}) \times e^{-\mu(\text{MEER}) \times \tau_j} \quad (5.83)$$

I **livelli di rischio *WMSD* Work-Related Musculoskeletal Disorders**: Oltre alla fatica dinamica, si possono avere *WMSD*, ossia danni nel lungo termine. Il rischio di *WMSD* è correlato positivamente alla frequenza delle posture. Le posture di lavoro si possono definire tramite un codice a quattro cifre che descrive rispettivamente le posture di schiena, braccia e gambe, nonché una stima del carico o dell'uso della forza, come mostrato in figura 5.6.

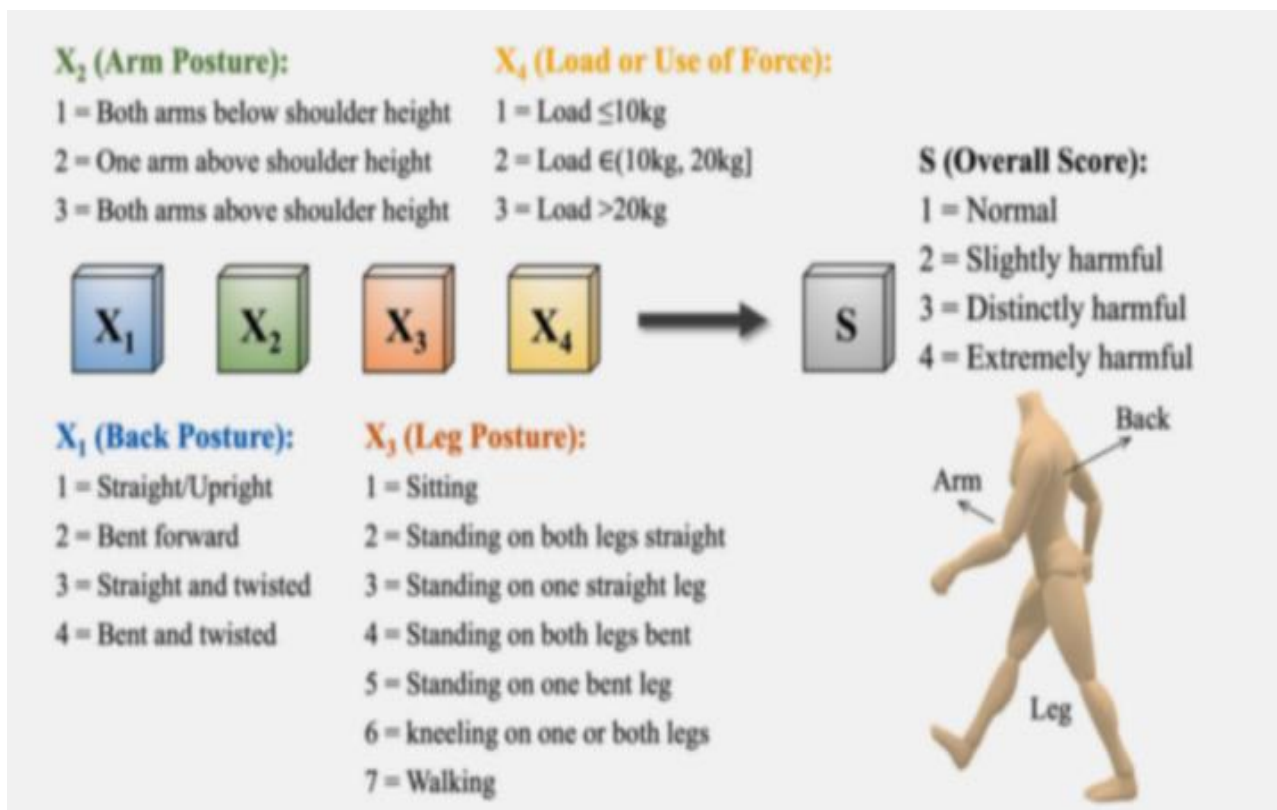


Figura 5.6: Codifica delle posture del corpo [82].

Per classificare il rischio si assegna un punteggio complessivo S in cui si possono individuare

quattro livelli: se $S = 1$, le posture non hanno particolari effetti dannosi; $S = 2$, le posture hanno un effetto leggermente dannoso; se $S = 3$, le posture hanno un effetto decisamente dannoso; se $S = 4$, le posture hanno un effetto estremamente dannoso.

Il livello di rischio *WMSD (LWR)* può essere calcolato sotto forma di media ponderata:

$$LWR = \frac{\sum_{S=1}^4 S \times t(P_S)}{\sum_{S=1}^4 t(P_S)} \quad (5.84)$$

dove P_S indica la postura del punteggio S , e $t(P_S)$ è il tempo totale trascorso operando con quella postura.

La **produttività** del lavoratore: le operazioni ripetitive non solo affaticano i dipendenti, ma comportano anche una riduzione della loro produttività. Quest'ultima si può misurare attraverso l'indice di rapporto di produttività PR_i che relaziona la fatica e la produttività di una persona:

$$\begin{aligned} PR_i = \{ & 100\% \text{ se } \widetilde{F}_i(\bullet) \text{ o } \widetilde{R}_i(\bullet) \leq 0.5; \\ & 90\% \text{ se } \widetilde{F}_i(\bullet) \text{ o } \widetilde{R}_i(\bullet) \leq 0.56; \\ & 80\% \text{ se } \widetilde{F}_i(\bullet) \text{ o } \widetilde{R}_i(\bullet) \leq 0.62 \\ & 65\% \text{ se } \widetilde{F}_i(\bullet) \text{ o } \widetilde{R}_i(\bullet) \leq 0.7 \\ & 50\% \text{ altrimenti} \} \end{aligned} \quad (5.85)$$

dove $\widetilde{F}_i(\bullet)$ o $\widetilde{R}_i(\bullet)$ è il livello di fatica del lavoratore i in un determinato momento.

Inoltre, altri fattori che possono influenzare l'indice di produttività, come l'esperienza accumulabile, il fenomeno dell'oblio dell'apprendimento e le competenze del lavoratore, ma non sono considerati specificamente nell'equazione 5.85.

La simulazione a eventi discreti *DES* è utilizzata per sviluppare la piattaforma per modellazione dei rischi ergonomici e dei piani di controllo manageriale [82].

6. Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di illustrare il mondo della sostenibilità nel contesto aziendale. In particolare, si sono approfonditi alcuni aspetti toccati dal professore Jim Skea (presentati a valle del capitolo introduttivo 1.1) sull'innovazione dei processi tecnologici (come il capitolo sull'industria 5.0) e sul potenziamento dell'efficienza della gestione della domanda, dei materiali e dell'energia. Inizialmente si sono forniti gli strumenti su cosa è sostenibile. Quindi si sono sviluppati aspetti aziendali interni ed esterni in modo tale da ottimizzare la sostenibilità nei processi di un'impresa, in particolare quello sul riutilizzo e la rigenerazione dei materiali.

Un risultato emerso è che in azienda per fare un'analisi completa si devono considerare le quattro aree della sostenibilità: oltre al campo economico si devono includere i costi esterni ambientali, sociali e politici.

Un altro aspetto emerso è quello relativo alla vasta mole di definizioni di sostenibilità. Ciò è dovuto al fatto che il problema della sostenibilità si è posto relativamente da poco e anche perché la sostenibilità è costituita da dimensioni che non sono scienze esatte.

Un altro risultato che si è delineato riguarda la necessità di approssimare alcuni aspetti del contesto. Gli esempi che si possono riscontrare in questo lavoro sono: i requisiti del valore di un prodotto durante la progettazione; i modelli su cui effettuare l'analisi del ciclo di vita del prodotto sostenibile (capitolo 3.3.1); $DspC_i$, cioè il costo che tiene conto della sostenibilità nello smaltimento della parte i smontata (capitolo 5.2.2 sulla pianificazione della rigenerazione); il costo di lavorazione che non tiene in considerazione il costo totale di sostenibilità dello stand-by sempre nello stesso capitolo.

Un altro esito evidenziato è lo strettissimo ma spesso trascurato legame tra lo sviluppo sostenibile e l'innovazione tecnologica (capitolo 2.1 e 4.2).

Un mondo più sostenibile deve contemplare lo studio non solo della sfera ambientale, ma anche di quella economica e sociale. Ciò permetterà un continuo miglioramento della vita quotidiana.

Le foto e le tabelle rispettano l'articolo 70 comma 1 bis LdA.

Bibliografia

- [1] <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?tab=map> ; fonte: Our world in data e Global Carbon Budget: <https://globalcarbonbudget.org/>
- [2] <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?country=~ITA> ; fonte: Our world in data e Global Carbon Budget: <https://globalcarbonbudget.org/>
- [3] <https://ourworldindata.org/grapher/absolute-number-of-deaths-from-outdoor-air-pollution> ; fonte Our world in data, IHME, Global Burden of Disease (2019)
- [4] <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-low-carbon> fonti: Ember's Yearly Electricity Data; Ember's European Electricity Review; Energy Institute Statistical Review of World Energy; OurWorldInData.org/low-carbon-electricity-by-country
- [5] <https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-by-sector> ; fonti Our World in Data based on Climate Analysis Indicators Tool (CAIT); OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions
- [6] <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co-emissions-by-region> ; fonte: Our world in data e Global Carbon Budget: <https://globalcarbonbudget.org/>
- [7] <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-low-carbon?tab=chart&country=~ITA> ; fonti: Ember's Yearly Electricity Data; Ember's European Electricity Review; Energy Institute Statistical Review of World Energy; OurWorldInData.org/low-carbon-electricity-by-country
- [8] <https://ourworldindata.org/water-use-stress> ; fonti: Global International Geosphere-Biosphere Programme (IGB); OurWorldInData.org/water-use-stress
- [9] Kuhleemann, K. "Any size population will do?": The fallacy of aiming for stabilization of human numbers." *The Ecological Citizen* 1.2 (2018): 181-189.
- [10] <https://www.nytimes.com/2020/04/21/climate/NYT-first-earth-day.html>
- [11] Kidd, Charles V. "The evolution of sustainability." *Journal of Agricultural and Environmental Ethics* 5 (1992): 1-26.
- [12] Nespor, Stefano. "La lunga marcia per un accordo globale sul clima: dal Protocollo di

- Kyoto all'Accordo di Parigi." *Rivista trimestrale di diritto pubblico* 1 (2016): 81-121.
- [13] Brocchieri, Federico, and Lucia Perugini. "DA KYOTO A PARIGI: LE REGOLE DI MONITORAGGIO E RENDICONTAZIONE COME ELEMENTI CHIAVE PER COMPRENDERE L'ATTUALE NEGOZIATO SUL CLIMA." *Ingegneria dell'Ambiente* 7.3 (2020).
- [14] Fehling, Maya, Brett D. Nelson, and Sridhar Venkatapuram. "Limitations of the Millennium Development Goals: a literature review." *Global public health* 8.10 (2013): 1109-1122.
- [15] Leal Filho, Walter, et al. "Reinvigorating the sustainable development research agenda: the role of the sustainable development goals (SDG)." *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 25.2 (2018): 131-142.
- [16] <https://www.un.org/en/sustainable-development-goals>
- [17] Leknoi, Unruan, Peter Rosset, and Suched Likitlersuang. "Multi-criteria social sustainability assessment of highland maize monoculture in Northern Thailand using the SAFA tool." *Resources, Environment and Sustainability* 13 (2023): 100115.
- [18] Sykes, Leanne M. "International Earth Day-22 April." *South African Dental Journal* 76.3 (2021): 117-117.
- [19] <https://www.fao.org/nr/sustainability/sustainability-assessments-safa/en/> Sito FAO delle Nazioni Unite
- [20] Viñuales, Jorge E., ed. *The Rio declaration on environment and development: A commentary*. Oxford Commentaries on Interna, 2015.
- [21] <https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972>
- [22] <https://www.fao.org/home/en>
- [23] <https://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day/>
- [24] Hristov, Ivo, and Antonio Chirico. "The role of sustainability key performance indicators (KPIs) in implementing sustainable strategies." *Sustainability* 11.20 (2019): 5742.
- [25] Sohnius, Felix, et al. "Quantification of sustainability in production systems through a conceptual input-output model." *Procedia CIRP* 118 (2023): 1016-1021.
- [26] Morella, Paula, et al. "Evaluating the impact of new trends in urban freight transportation attending the triple bottom line: A case study." *Computers & Industrial Engineering* 174

- (2022): 108756.
- [27] Um, Jumyung, Adam Gontarz, and Ian Stroud. "Developing energy estimation model based on Sustainability KPI of machine tools." *Procedia Cirp* 26 (2015): 217-222.
- [28] Huang, Aihua, and Fazleena Badurdeen. "Metrics-based approach to evaluate sustainable manufacturing performance at the production line and plant levels." *Journal of Cleaner Production* 192 (2018): 462-476.
- [29] Winroth, Mats, Peter Almström, and Carin Andersson. "Sustainable production indicators at factory level." *Journal of Manufacturing Technology Management* 27.6 (2016): 842-873.
- [30] Zarte, Maximilian, Agnes Pechmann, and Isabel L. Nunes. "Indicator framework for sustainable production planning and controlling." *International Journal of Sustainable Engineering* 12.3 (2019): 149-158.
- [31] Salvador, Rodrigo, Cassiano Moro Piekarski, and Antonio Carlos de Francisco. "Approach of the two-way influence between lean and green manufacturing and its connection to related organisational areas." *International Journal of Production Management and Engineering* 5.2 (2017): 73-83.
- [32] <https://climateactiontracker.org/>
- [33] Akbar, Muhammad, and Takashi Irohara. "Scheduling for sustainable manufacturing: A review." *Journal of cleaner production* 205 (2018): 866-883.
- [34] Bruzzone, Alessandro AG, et al. "Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for flexible flow shops." *CIRP annals* 61.1 (2012): 459-462.
- [35] Hariyani, Dharmendra, et al. "Drivers and motives for sustainable manufacturing system." *Innovation and Green Development* 2.1 (2023): 100031.
- [36] Ghobakhloo, Morteza, et al. "Industry 5.0 implications for inclusive sustainable manufacturing: An evidence-knowledge-based strategic roadmap." *Journal of Cleaner Production* (2023): 138023.
- [37] van Erp, Tim, et al. "Designing sustainable innovations in manufacturing: A systems engineering approach." *Sustainable Production and Consumption* 37 (2023): 96-111.
- [38] Haleem, Abid, et al. "A pervasive study on Green Manufacturing towards attaining

- sustainability." *Green Technologies and Sustainability* (2023): 100018.
- [39] Hariyani, Dharmendra, et al. "Organizational barriers to the sustainable manufacturing system: A literature review." *Environmental Challenges* (2022): 100606.
- [40] Slide di logistica del Professore Stefano Giordani dell'università Uniroma2 [http://people.uniroma2.it/stefano.giordani/didattica/logistica/Dispense/8.GestioneInventario\(Stocast\).pdf](http://people.uniroma2.it/stefano.giordani/didattica/logistica/Dispense/8.GestioneInventario(Stocast).pdf)
- [41] Castiglione, Claudio, Erica Pastore, and Arianna Alfieri. "Technical, economic, and environmental performance assessment of manufacturing systems: the multi-layer enterprise input-output formalization method." *Production Planning & Control* (2022): 1-18.
- [42] Singh, Rajesh Kumar, et al. "An overview of sustainability assessment methodologies." *Ecological indicators* 15.1 (2012): 281-299.
- [43] Bendig, David, Lucas Kleine-Stegemann, and Kristin Gisa. "The green manufacturing framework—A systematic literature review." *Cleaner Engineering and Technology* (2023): 100613.
- [44] Slaper, Timothy F., and Tanya J. Hall. "The triple bottom line: What is it and how does it work." *Indiana business review* 86.1 (2011): 4-8.
- [45] Documento "The Lean, Energy and Climate Toolkit" dello United States Environmental Protection Agency <https://www.epa.gov/sustainability/lean-energy-and-climate-toolkit>
- [46] <https://www.business2community.com/customer-experience/six-sigma-8-types-of-waste-in-customer-service-0514882>
- [47] Marinelli, Marina. "Human–robot collaboration and lean waste elimination: Conceptual analogies and practical synergies in industrialized construction." *Buildings* 12.12 (2022): 2057.
- [48] Smith, Scott. "Muda, muri and mura." *Lean & Six Sigma Review* 13.2 (2014): 36.
- [49] Rehman, Minhaj AA, and R. L. Shrivastava. "Green manufacturing (GM): past, present and future (a state of art review)." *World Review of Science, Technology and Sustainable Development* 10.1-2-3 (2013): 17-55.
- [50] Paju, Marja, et al. "Framework and indicators for a sustainable manufacturing mapping methodology." *Proceedings of the 2010 winter simulation conference*. IEEE, 2010.
- [51] Documento del The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) sulla sostenibilità

<https://www.epa.gov/sites/default/files/2013-10/documents/enviro-prof-guide-six-sigma.pdf>

- [52] Vinodh, S., R. Ben Ruben, and P. Asokan. "Life cycle assessment integrated value stream mapping framework to ensure sustainable manufacturing: a case study." *Clean Technologies and Environmental Policy* 18 (2016): 279-295.
- [53] Rink, David R., and John E. Swan. "Product life cycle research: A literature review." *Journal of business Research* 7.3 (1979): 219-242.
- [54] Tao, Jing, and Suiran Yu. "Product life cycle design for sustainable value creation: methods of sustainable product development in the context of high value engineering." *Procedia CIRP* 69 (2018): 25-30.
- [55] Chiu, Ming-Chuan, and Chih-Hsing Chu. "Review of sustainable product design from life cycle perspectives." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 13 (2012): 1259-1272.
- [56] Heijungs, Reinout, Gjalt Huppes, and Jeroen B. Guinée. "Life cycle assessment and sustainability analysis of products, materials and technologies. Toward a scientific framework for sustainability life cycle analysis." *Polymer degradation and stability* 95.3 (2010): 422-428.
- [57] Ayres, Robert U. "Life cycle analysis: A critique." *Resources, conservation and recycling* 14.3-4 (1995): 199-223.
- [58] Shokravi, Samaneh, and Sherah Kurnia. "A step towards developing a sustainability performance measure within industrial networks." *Sustainability* 6.4 (2014): 2201-2222.
- [59] Pun, K. F., and Ip Kee Hui. "An analytical hierarchy process assessment of the ISO 14001 environmental management system." *Integrated Manufacturing Systems* 12.5 (2001): 333-345.
- [60] <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14001:ed-3:v1:en>
- [61] O'Reilly, Mark, David Wathey, and Matthias Gelber. "ISO 14031: Effective mechanism to environmental performance evaluation." *Corporate Environmental Strategy* 7.3 (2000): 267-275.
- [62] <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14031:ed-3:v1:en>
- [63] <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>

- [64] <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>
- [65] Pryshlakivsky, Jonathan, and Cory Searcy. "Fifteen years of ISO 14040: a review." *Journal of Cleaner Production* 57 (2013): 115-123.
- [66] <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/1547/attachments/1/translations/en/renditions/native>
- [67] Joung, Che B., et al. "Categorization of indicators for sustainable manufacturing." *Ecological indicators* 24 (2013): 148-157.
- [68] Sarkar, Prabir, et al. "Sustainable manufacturing indicator repository." *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Vol. 54792. 2011.
- <https://www.nist.gov/publications/sustainable-manufacturing-indicator-repository#:~:text=The%20purpose%20of%20the%20SMIR%20is%20to%20provide,accessible%20by%20small%20and%20median%20size%20manufacturing%20enterprises>.
- [69] <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/1547/attachments/1/translations/en/renditions/native>
- [70] Strumenti per la produzione sostenibile secondo l'OECD
- <https://www.oecd.org/innovation/green/toolkit/48704993.pdf>
- [71] https://greengrowthindex.gggi.org/wp-content/uploads/2019/12/Green-Growth-Index-Technical-Report_20191213.pdf Global e corporate
- [72] <https://www.globalreporting.org/>
- [73] Huang, Sihan, et al. "Industry 5.0 and Society 5.0—Comparison, complementation and co-evolution." *Journal of manufacturing systems* 64 (2022): 424-428.
- [74] Xu, Xun, et al. "Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception." *Journal of Manufacturing Systems* 61 (2021): 530-535.
- [75] Ghobakhloo, Morteza, et al. "Behind the definition of Industry 5.0: a systematic review of technologies, principles, components, and values." *Journal of Industrial and Production Engineering* (2023): 1-16.
- [76] <https://www.econopoly.ilsole24ore.com/2023/06/09/servitizzazione-industria-manifatturiera/>

- [77] Baruah, Sanjoy, and Alan Burns. "Sustainable scheduling analysis." *2006 27th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS'06)*. IEEE, 2006.
- [78] Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., Petrovic, S., Gindy, N. (2014). An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops. *Journal of Cleaner Production*, 65, 87-96.
- [79] Naeemah, Ali Jaber, and Kuan Yew Wong. "Sustainability metrics and a hybrid decision-making model for selecting lean manufacturing tools." *Resources, Environment and Sustainability* 13 (2023): 100120.
- [80] Lu, Chao, et al. "Sustainable scheduling of distributed permutation flow-shop with non-identical factory using a knowledge-based multi-objective memetic optimization algorithm." *Swarm and Evolutionary Computation* 60 (2021): 100803.
- [81] Eriksson, Kristina, et al. "Conceptual framework of scheduling applying discrete event simulation as an environment for deep reinforcement learning." *Procedia CIRP* 107 (2022): 955-960.
- [82] Zhang, Hong, and Yilei Lin. "Modeling and evaluation of ergonomic risks and controlling plans through discrete-event simulation." *Automation in Construction* 152 (2023): 104920.
- [83] Appunti della prof.ssa Alfieri dell'insegnamento di "Analisi e gestione dei sistemi produttivi" - Principi di produzione sostenibile - a.a. 2022-2023, Politecnico di Torino
- [84] Widok, Andi H., Volker Wohlgemuth, and Bernd Page. "Combining sustainability criteria with discrete event simulation." *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, 2011.
- [85] Wang, Shijin, et al. "Bi-objective optimization of a single machine batch scheduling problem with energy cost consideration." *Journal of cleaner production* 137 (2016): 1205-1215.
- [86] Liu, Ying, et al. "An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops." *Journal of Cleaner Production* 65 (2014): 87-96.
- [87] Klöpffer, Walter. "Life cycle sustainability assessment of products: (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95)." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13 (2008): 89-95.

- [88] Giret, Adriana, Damien Trentesaux, and Vittal Prabhu. "Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review." *Journal of Manufacturing Systems* 37 (2015): 126-140.
- [89] Shrouf, Fadi, et al. "Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs." *Journal of Cleaner Production* 67 (2014): 197-207.
- [90] Zhang, Y. "Green QFD-II: a life cycle approach for environmentally conscious manufacturing by integrating LCA and LCC into QFD matrices." *International Journal of Production Research* 37.5 (1999): 1075-1091.
- [91] Ilgin, Mehmet Ali, and Surendra M. Gupta. "Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art." *Journal of environmental management* 91.3 (2010): 563-591.
- [92] Himmiche, Sara, et al. "Robust production scheduling under machine failures-A DES based evaluation approach." *IFAC-PapersOnLine* 51.7 (2018): 271-276.
- [93] Tseng, Hwai-En, Chien-Chen Chang, and Jia-Diann Li. "Modular design to support green life-cycle engineering." *Expert systems with applications* 34.4 (2008): 2524-2537.
- [94] Villalba, G., Segarra, M., Chimenos, J.M., Espiell, F., 2004. Using the recyclability index of materials as a tool for design for disassembly. *Ecological Economics* 50, 195–200.
- [95] Villalba, G., Segarra, M., Ferná'ndez, A.I., Chimenos, J.M., Espiell, F., 2002. A proposal for quantifying the recyclability of materials. *Resources, Conservation and Recycling* 37, 39–53
- [96] Kuo, Tsai-C., Samuel H. Huang, and Hong-C. Zhang. "Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives." *Computers & industrial engineering* 41.3 (2001): 241-260.
- [97] Listeş, Ovidiu. "A generic stochastic model for supply-and-return network design." *Computers & Operations Research* 34.2 (2007): 417-442.
- [98] Tseng, Hwai-En, Chien-Chen Chang, and Jia-Diann Li. "Modular design to support green life-cycle engineering." *Expert systems with applications* 34.4 (2008): 2524-2537.
- [99] Louwers, Dirk, et al. "A facility location allocation model for reusing carpet materials." *Computers & industrial engineering* 36.4 (1999): 855-869.

- [100] Mojtahedi, Mohammad, et al. "Sustainable vehicle routing problem for coordinated solid waste management." *Journal of industrial information integration* 23 (2021): 100220.
- [101] Kelle, Peter, and Edward A. Silver. "Forecasting the returns of reusable containers." *Journal of Operations Management* 8.1 (1989): 17-35.
- [102] Kim, Kibum, et al. "Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment." *Computers & Industrial Engineering* 51.2 (2006): 279-287.
- [103] Daniel, V., R. Guide Jr, and M. S. Spencer. "Rough-cut capacity planning for remanufacturing firms." *Production Planning & Control* 8.3 (1997): 237-244.
- [104] Kongar, Elif, and Surendra M. Gupta. "Disassembly to order system under uncertainty." *Omega* 34.6 (2006): 550-561.
- [105] Gungor, Askiner, and Surenda M. Gupta. "A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures." *International journal of production research* 39.7 (2001): 1427-1467.
- [106] Simon Bell and Stephen Morse- "Sustainability Indicators. Measuring the Immeasurable?" Earthscan, Londra, seconda edizione, 2008.
- [107] Figge, Frank, and Tobias Hahn. "Sustainable value added—measuring corporate contributions to sustainability beyond eco-efficiency." *Ecological economics* 48.2 (2004): 173-187.
- [108] Spangenberg, Joachim H. "Environmental space and the prism of sustainability: frameworks for indicators measuring sustainable development." *Ecological indicators* 2.3 (2002): 295-309.
- [109] Böhringer, Christoph, and Patrick EP Jochem. "Measuring the immeasurable—A survey of sustainability indices." *Ecological economics* 63.1 (2007): 1-8.
- [110] Habersatter, K. and Widmer, F., 1991. Ecobalance of Packaging Materials State of 1990, Environmental Series (132). Swiss Federal Office of Environment, Forest and Landscape, Zurich, February 1991.
- [111] Boustead, I., 1972. The Milk Bottle, Open University Press, Milton Keynes, UK.
- [112] Tellus Institute, 1992. CSG/Tellus Packaging Study: Inventory of Material and Energy Use and Air and Water Emissions from the Production of Packaging Materials,

- Technical Report (89-024/2), Tellus Institute, Boston MA, May 1992 (prepared for the Council of State Governments and the United States Environmental Protection Agency).
- [113] United Nation Guidelines and Methodologies for Indicators of Sustainable Development
- [114] Hutchins, Margot J., and John W. Sutherland. "An exploration of measures of social sustainability and their application to supply chain decisions." *Journal of cleaner production* 16.15 (2008): 1688-1698.
- [115] Tjahjono, Benny, et al. "Six Sigma: a literature review." *International Journal of Lean Six Sigma* 1.3 (2010): 216-233.
- [116] Greiner, Timothy J., and Greiner Environmental. "Indicators of sustainable production—tracking progress." *A case study on measuring eco-sustainability at Guilford of Maine, Inc* 1 (2001).
- [117] Krajnc, Damjan, and Peter Glavič. "Indicators of sustainable production." *Clean technologies and environmental policy* 5 (2003): 279-288 e la Scottish Executive Central Research Unit nel 2001.
- [118] <https://www.sketchbubble.com/en/presentation-7s-in-manufacturing.html>
- [119] Müller, Egon, Juri Tolujew, and Florian Kienzle. "Push-Kanban—a kanban-based production control concept for job shops." *Production Planning & Control* 25.5 (2014): 401-413.
- [120] <https://www.headvisor.it/poka-yoke>
- [121] Ahuja, Inderpreet P. Singh, and Jaimal Singh Khamba. "Total productive maintenance: literature review and directions." *International journal of quality & reliability management* 25.7 (2008): 709-756.
- [122] <https://www.lean6sigmapro.com/knowledgebase/heijunka>
- [123] Da Silva, Iris Bento, and Moacir Godinho Filho. "Single-minute exchange of die (SMED): a state-of-the-art literature review." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102 (2019): 4289-4307.
- [124] Heragu, Sunderesh S. "Group technology and cellular manufacturing." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 24.2 (1994): 203-215.
- [125] <https://rollformingmagazine.com/continuous-improvement-kaizen-putting-it-into->

practice/

- [126] Soni, Pankaj, and Tarun Yadav. "Review Paper on "Productivity Improvement by using Poka-Yoke"." *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 5.12 (2018): 2395-0056.
- [127] Kotler, Philip, and Gary M. Armstrong. *Principles of marketing*. Pearson Education India, 2010, pag A12,A13
- [128] Slide di logistica del Professore Stefano Giordani dell'università Uniroma2 [http://people.uniroma2.it/stefano.giordani/didattica/logistica/Dispense/7.GestioneInventari o\(Determ\).pdf](http://people.uniroma2.it/stefano.giordani/didattica/logistica/Dispense/7.GestioneInventari%20(Determ).pdf)
- [129] Slide di logistica del Professore Stefano Giordani dell'università Uniroma2 [http://people.uniroma2.it/stefano.giordani/didattica/logistica/Dispense/9.GestioneInventari o\(LotSizing\).pdf](http://people.uniroma2.it/stefano.giordani/didattica/logistica/Dispense/9.GestioneInventari%20(LotSizing).pdf)
- [130] Tang, Ying, MengChu Zhou, and Reggie J. Caudill. "An integrated approach to disassembly planning and demanufacturing operation." *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 17.6 (2001): 773-784.
- [131] Tafti, M. Pour Massahian, Matthieu Godichaud, and Lionel Amodeo. "Models for the single product disassembly lot sizing problem with disposal." *IFAC-PapersOnLine* 52.13 (2019): 547-552.
- [132] Goli, Farzaneh, Yongjing Wang, and Mozafar Saadat. "Perspective of self-learning robotics for disassembly automation." *2022 27th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. IEEE, 2022.
- [133] Kuhlman, Tom, and John Farrington. "What is sustainability?." *Sustainability* 2.11 (2010): 3436-3448.
- [134] Lebreton, Laurent, et al. "Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic." *Scientific reports* 8.1 (2018): 1-15.
- [135] Surian, Nicola, and Massimo Rinaldi. "Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy." *Geomorphology* 50.4 (2003): 307-326.
- [136] <https://www.nist.gov/> sito del NIST
- [137] Parris, Thomas M., and Robert W. Kates. "Characterizing and measuring sustainable development." *Annual Review of environment and resources* 28.1 (2003): 559-586.

- [138] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_2887 Report Eurostat sugli SDG
- [139] Report dell'UE sugli SDG, edizione del 2023
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-flagship-publications/w/ks-04-23-184>
- [140] Report nazioni unite sui Sustainable Development Goals – edizione speciale 2023
<https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023.pdf>
- [141] Report nazioni unite sui Sustainable Development Goals - edizione 2023
<https://sdgs.un.org/sites/default/files/2023-06/Advance%20unedited%20GSDR%2014June2023.pdf>
- [142] <https://www.overshootday.org/about-earth-overshoot-day/>
- [143] Glaser, Gisbert. "Base sustainable development goals on science." *Nature* 491.7422 (2012): 35-35.
- [144] Bettelli, Paola. "What the world learned setting development goals." *International Institute for Sustainable Development, BRIEF* 10 (2021).
- [145] Skea, Jim, et al. "Summary for policymakers." *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2022.
- [146] Opschoor, H., Reinders, L., 1991. Towards sustainable development indicators. In: Kuik, O., Verbruggen, H. (Eds.), *In search of indicators of Sustainable Development*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 7–27.
- [147] Meadowcroft, James, Katharine N. Farrell, and Joachim Spangenberg. "Developing a framework for sustainability governance in the European Union." *International Journal of Sustainable Development* 8.1-2 (2005): 3-11.
- [148] <https://unstats.un.org/sdgs/dataportal/analytics/DataAvailability>
- [149] <https://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day/> overshoot day del Global footprint network.
- [150] https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:aa88c66d-4553-11e4-a0cb-01aa75ed71a1.0022.03/DOC_1&format=PDF Comunicazione Commissione europea 2014

sull'economia circolare con obiettivo zero rifiuti.

- [151] <https://www.europarl.europa.eu/EPRS/EPRS-Briefing-573936-Circular-economy-package-FINAL.pdf> Comunicazione del Parlamento europea del 2016 sull'economia circolare.
- [152] Discussione del caso Ikea della Harvard business school
<https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=50922>
- [153] Immagine del ciclo di vita del prodotto:
https://it.wikipedia.org/wiki/Analisi_del_ciclo_di_vita#/media/File:Example_Life_Cycle_Assessment_Stages_diagram.png
- [154] Crowl, D.; Louvar, J.F. *Chemical Process Safety: Fundamentals With Applications*; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2001.
- [155] Hatakeyama, S.; Akimoto, H.; Washida, N. Effect of temperature on the formation of photochemical ozone in a propene NO_x air irradiation system. *Environ. Sci. Technol.* 1991, 25, 1884–1890.
- [156] Wesely, M.L. Parameterisation of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. *Atmos. Environ.* 1989, 23, 1293–1304.
- [157] Gunasekera, M.; Edwards, D. Estimating the environmental impact of catastrophic chemical releases to the atmosphere an index method for ranking alternative chemical process routes. *Process Saf. Environ. Protect.* 2003, 81, 463–474.
- [158] Verschueren, K. *Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals*; Van Nostrand Reinhold: New York, NY, USA, 1996.
- [159] N. Irving Sax, *Dangerous Properties of Industrial Materials* (New York: Van Nostrand Reinhold, 1984), p. 1.
- [160] Slides del professore Ghirardi Marco del Politecnico di Torino dell'insegnamento "pianificazione dei processi industriali" a.a. 2004/05.
- [161] Slides del professore Zenezini Giovanni del Politecnico di Torino dell'insegnamento "gestione dei progetti" a.a.2022/23.
- [162] Niranjana Sundararajan, Ravi Terkar, Improving productivity in fastener manufacturing through the application of Lean-Kaizen principles, *Materials Today: Proceedings*, Volume 62, Part 2, 2022, Pages 1169-1178, ISSN 2214-7853,

- [163] Vinodh, S., K. R. Arvind, and M. Somanaathan. "Tools and techniques for enabling sustainability through lean initiatives." *Clean Technologies and Environmental Policy* 13 (2011): 469-479.
- [164] Cherrafi, Anass, et al. "The integration of lean manufacturing, Six Sigma and sustainability: A literature review and future research directions for developing a specific model." *Journal of Cleaner Production* 139 (2016): 828-846.
- [165] Appunti dell'insegnamento "Analisi e gestione dei sistemi produttivi" della professoressa Alfieri e della professoressa Pastore del Politecnico di Torino, a.a. "2022/23"
- [166] Card, Alan J. "The problem with '5 whys'." *BMJ quality & safety* 26.8 (2017): 671-677.
- [167] Chiarini, Andrea. "Sustainable manufacturing-greening processes using specific Lean Production tools: an empirical observation from European motorcycle component manufacturers." *Journal of Cleaner Production* 85 (2014): 226-233.
- [168] Palomares, Iván, et al. "A panoramic view and swot analysis of artificial intelligence for achieving the sustainable development goals by 2030: Progress and prospects." *Applied Intelligence* 51 (2021): 6497-6527.
- [169] Organization for Economic Cooperation and Development. 2009. Overview of the OECD Sustainable Manufacturing Toolkit Prototype.
<https://www.oecd.org/industry/ind/44280332.pdf>
- [170] Kibira, Deogratias, Sanjay Jain, and Charles McLean. "A system dynamics modeling framework for sustainable manufacturing." *Proceedings of the 27th annual system dynamics society conference*. Vol. 301. 2009.
- [171] Slides "Demand Forecast" dell'insegnamento Advanced automotive logistics del professore Eugenio Morello del Politecnico di Torino- A.A.2013/14.
- [172] https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/qef/2023-0787/QEF_787_23.pdf
- [173] Slides del professore Andrea Grassi dell'università di Napoli Federico II dell'insegnamento di logistica industriale anno 2021,
<https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/34433111>
- [174] Slides di economia aziendale dell'università di Trieste aa.2014/2015
https://moodle2.units.it/pluginfile.php/19282/mod_folder/content/0/LEZIONE%208_Le_ar

ee_funzionali_dell_impresa_parte_1_.pptx?forcedownload=1

- [175] Abdelhamid, Tariq S., and John G. Everett. "Physiological demands during construction work." *Journal of construction engineering and management* 128.5 (2002): 427-437.
- [176] Hsie, Machine, et al. "A model used in creating a work-rest schedule for laborers." *Automation in Construction* 18.6 (2009): 762-769.
- [177] Jaber, Mohamad Y., Z. S. Givi, and W. Patrick Neumann. "Incorporating human fatigue and recovery into the learning-forgetting process." *Applied mathematical modelling* 37.12-13 (2013): 7287-7299.
- [178] Van Wyk, Anna Elizabeth, Ilze Swarts, and Chipo Mukonza. "The influence of the implementation of job rotation on employees' perceived job satisfaction." *International Journal of Business and Management* 13.11 (2018): 89-101.
- [179] <https://www.theguardian.com/environment/2023/jul/26/jim-skea-to-take-helm-at-ipcc-as-world-enters-crucial-climate-decade>
- [180] Coca, Germán, et al. "Sustainable evaluation of environmental and occupational risks scheduling flexible job shop manufacturing systems." *Journal of Cleaner Production* 209 (2019): 146-168.
- [181] <https://www.epicentro.iss.it/ambiente/rumoreNotturmo#:~:text=Decibel%20e%20conseguenze%20sulla%20salute&text=fino%20a%2030%20decibel%3A%20non,ne%20risentano%20in%20misura%20maggiore>
- [182] https://www.mimit.gov.it/images/stories/normativa/DM_microlesioni_08062022.pdf
- [183] Elkington, John. "25 years ago I coined the phrase “triple bottom line.” Here’s why it’s time to rethink it." *Harvard business review* 25 (2018): 2-5.
- [184] <https://www.flickr.com/photos/wheatfields/5164198566>
- [185] Andamento degli SDG UN ad agosto 2023 per tutti i Paesi con dati di almeno un anno dal 2015.
- <https://unstats.un.org/sdgs/dataportal/analytics/CountryWiseIndicator?&dataPointType=1&countryId=0&natureOfData=All&countryName=All%20countries%20or%20areas&dataPointTextPart=Data%20for%20at%20least%20one%20year%20since%202015%22%20frameborder=%22%22%20marginheight=%220%22%20marginwidth=%220%22%3E%3C/>

iframe%3E

- [186] Obiettivi di sviluppo sostenibili delle Nazioni Unite <https://unric.org/it/agenda-2030/>
- [187] Kovar, Jeffrey D. "A short guide to the Rio declaration." *Colo. J. Int'l Envtl. L. & Pol'y* 4 (1993): 119.
- [188] Sullivan, E. Thomas. "The Stockholm conference: A step toward global environmental cooperation and involvement." *Ind. L. Rev.* 6 (1972): 267.
- [189] Barone, G., and Stefano Caserini. "La Conferenza delle Nazioni Unite sulle variazioni climatiche." *RENDICONTI LINCEI. SCIENZE FISICHE E NATURALI* 90 (2013): 29-35.
- [190] Grosso, Mario. "Energia ed edilizia." *ARKETIPO* 62 (2012): 120-123.
- [191] Lee, Kun-Mo, and Atsushi Inaba. *Life cycle assessment: best practices of ISO 14040 series*. Center for Ecodesign and LCA (CEL), Ajou University, 2004. (Ministry of Commerce, Industry and Energy Republic of Korea)
- [192] Mendoza, Luis. "Bargaining for Decent Work and Beyond." (2022).
- [193] <https://impresaefficace.it/il-diagramma-causa-effetto/>
- [194] <https://data.oecd.org/rd/gross-domestic-spending-on-r-d.htm>
- [195] <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/3197152b-en.pdf?expires=1693635236&id=id&accname=guest&checksum=CA800AFA57D741F450FEEB86409087E9> Education at a glance 2022 p 114
- [196] <https://ourworldindata.org/grapher/productivity-vs-annual-hours-worked> produttività annuale, fonte: Our world in data; Feenstra et al. (2015); Penn World Table (2021)
- [197] <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/e33c281e-en.pdf?expires=1693636209&id=id&accname=guest&checksum=0AEB82997E95AC1B7CBECDAFFB7C16FF> p. 17
- [198] https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=PATS_IPC
- [199] <https://goingdigital.oecd.org/en/indicator/44>
- [200] <https://www.oecd.org/skills/nationalskillsstrategies/Diagnostic-report-Italy.pdf>
- [201] https://stats.oecd.org/index.aspx?DataSetCode=AV_AN_WAGE
- [202] Meindl, Benjamin, et al. "The four smarts of Industry 4.0: Evolution of ten years of research and future perspectives." *Technological Forecasting and Social Change* 168

(2021): 120784.

- [203] Özdemir, Vural, and Nezir Hekim. "Birth of industry 5.0: Making sense of big data with artificial intelligence, "the internet of things" and next-generation technology policy." *Omics: a journal of integrative biology* 22.1 (2018): 65-76.
- [204] Lucchese, Matteo, Leopoldo Nascia, and Mario Pianta. "Industrial policy and technology in Italy." *Economia e politica industriale* 43 (2016): 233-260.
- [205] Moncada-Paternò-Castello, Pietro, and Nicola Grassano. "Innovation, competitiveness and growth without R&D? Analysis of corporate R&D investment-A country approach: Italy." *JRC Policy Brief*. European Commission, 2014.
- [206] <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-08-21/jakarta-sends-civil-servants-to-work-from-home-to-clear-smog>