



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**  
**DIPARTIMENTO DI SCIENZE ECONOMICHE ED AZIENDALI**  
**"M. FANNO"**

**CORSO DI LAUREA IN ECONOMIA**

**PROVA FINALE**

**"GLI IMPATTI AMBIENTALI DELLA TRASFORMAZIONE DIGITALE"**

**RELATORE:**

**CH.MO PROF. CESARE DOSI**

**LAUREANDA: IRENE RUGHI**

**MATRICOLA N. 2000737**

**ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023**

Dichiaro di aver preso visione del “Regolamento antiplagio” approvato dal Consiglio del Dipartimento di Scienze Economiche e Aziendali e, consapevole delle conseguenze derivanti da dichiarazioni mendaci, dichiaro che il presente lavoro non è già stato sottoposto, in tutto o in parte, per il conseguimento di un titolo accademico in altre Università italiane o straniere. Dichiaro inoltre che tutte le fonti utilizzate per la realizzazione del presente lavoro, inclusi i materiali digitali, sono state correttamente citate nel corpo del testo e nella sezione ‘Riferimenti bibliografici’.

*I hereby declare that I have read and understood the “Anti-plagiarism rules and regulations” approved by the Council of the Department of Economics and Management and I am aware of the consequences of making false statements. I declare that this piece of work has not been previously submitted – either fully or partially – for fulfilling the requirements of an academic degree, whether in Italy or abroad. Furthermore, I declare that the references used for this work – including the digital materials – have been appropriately cited and acknowledged in the text and in the section ‘References’.*

Firma (signature)

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Simone Ruffi". The signature is written in a cursive style with some loops and flourishes.

# Indice

<b>Introduzione</b> .....	1
<b>1. La trasformazione digitale e l’ambiente: un quadro generale</b> .....	2
1.1 L’importanza della trasformazione digitale .....	2
1.2 Relazione con l’ambiente .....	4
<b>2. Impatti positivi</b> .....	8
2.1 Efficienza energetica .....	9
2.2 Industria 4.0 e Industria 5.0 .....	10
2.2.1 Produzione additiva .....	12
2.2.2 Cambiamento settoriale: digital servitization .....	14
2.3 Iniziative green .....	14
2.3.1 CodeCarbon.....	15
2.3.2 CO2Web: un progetto di ReteClima.....	16
<b>3. Impatti negativi</b> .....	18
3.1 Consumo di energia ed emissioni di gas serra.....	18
3.1.1 Data center.....	19
3.2 Rebound effect: effetto rimbalzo dell’efficienza energetica .....	21
3.3 Metalli rari .....	22
3.4 Rifiuti elettronici.....	25
3.5 Approcci per mitigare gli impatti ambientali.....	28
<b>Considerazioni finali</b> .....	31
<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	32

# Introduzione

Questo lavoro esamina gli impatti ambientali della trasformazione digitale e cerca di valutare le possibili soluzioni per ridurre gli impatti negativi. Avvalendoci di vari contributi, vengono esplorati i principali fattori che contribuiscono agli impatti ambientali della trasformazione digitale, come il crescente consumo energetico, l'accumulo di rifiuti elettronici e l'efficienza energetica data dalle innovazioni in campo industriale.

La scelta di affrontare questo argomento è motivata dalla sua importanza e attualità. La trasformazione digitale, infatti, è un fenomeno sempre più rilevante nel contesto sociale ed economico attuale, e comprendere i suoi impatti ambientali è di grande rilevanza per affrontare le sfide della sostenibilità nel XXI secolo.

Gli obiettivi dell'elaborato sono essenzialmente due. Da un lato, evidenziare, senza alcuna pretesa di esaustività, alcuni impatti positivi e negativi della “digitalizzazione”, concentrando l'attenzione su quelli più significativi e rappresentativi. Dall'altro, indagare su possibili soluzioni per mitigare gli impatti negativi, promuovendo una maggiore consapevolezza sulle scelte da intraprendere per favorire una trasformazione digitale più sostenibile.

Il lavoro si articola in tre capitoli. Nel primo tenteremo di tracciare un quadro generale della trasformazione digitale e dei suoi legami con l'ambiente. Nel secondo e nel terzo presenteremo, rispettivamente, alcuni impatti positivi e negativi e, con riferimento a questi ultimi, possibili azioni di mitigazione. Il lavoro si conclude con una sintesi dei principali risultati dell'indagine.

# Capitolo 1

## La trasformazione digitale e l'ambiente: un quadro generale

Nel presente capitolo, si vuole proporre una visione generale sull'importanza della trasformazione digitale e sulle molteplici forme che essa può assumere. Date le molte sfaccettature del concetto di trasformazione digitale, talvolta risulta difficile cogliere appieno tutti i suoi impatti ambientali, alcuni dei quali possono non essere immediatamente evidenti.

Successivamente, verrà analizzata la relazione che sussiste tra trasformazione digitale e ambiente, presentando alcuni esempi di impatti ambientali positivi e negativi.

Nel contesto attuale, “digitalizzazione” e “sostenibilità” sono diventati termini cruciali che non possono essere trascurati. Secondo i rapporti della Banca Mondiale, senza interventi urgenti per ridurre l'inquinamento ambientale, il cambiamento climatico potrebbe spingere ulteriori 100 milioni di individui nella povertà entro il 2030 (Lokuge e al., 2020).

Per raggiungere gli obiettivi ambientali ed evitare di superare i limiti planetari, i fattori che influiscono negativamente sull'ambiente devono diminuire in modo significativo. Ad esempio, le emissioni di gas serra (GHG) devono diminuire del 45% entro il 2030 rispetto ai livelli del 2010, raggiungendo lo zero netto intorno al 2050 per mantenere l'obiettivo di limitare l'aumento della temperatura globale a 1,5 °C. Le emissioni globali nette di gas serra antropogenici sono state stimate essere di  $59 \pm 6,6$  GtCO<sub>2</sub>-eq nel 2019, circa il 12% in più rispetto al 2010 e il 54% in più rispetto al 1990 (IPCC, 2023).

La criticità dell'attuale situazione ambientale non fa che aumentare la preoccupazione in merito. Se da una parte la digitalizzazione può essere vista come una soluzione per affrontare, o almeno mitigare, le sempre più urgenti questioni ambientali, è altrettanto fondamentale esaminare come la trasformazione digitale possa contribuire a impatti ambientali sfavorevoli.

### 1.1 L'importanza della trasformazione digitale

Secondo Vial (si vedano Lokuge e al., 2020, p.3), la “trasformazione digitale” può essere sinteticamente descritta come:

*“a process that aims to improve an entity by triggering significant changes to its properties through combinations of information, computing, communication, and connectivity technologies.”*

Ancora, Paavola (vedi Feroz e al., 2021, p.2) definisce trasformazione digitale come:

*“the use of new digital technologies to enable major business improvements in operations and markets such as enhancing customer experience, streamlining operations or creating new business models”.*

In base alle definizioni presentate, la trasformazione digitale si configura come il processo di cambiamento dei metodi di lavoro, dei ruoli e delle offerte di business, derivante dall'adozione delle tecnologie digitali all'interno di un'organizzazione (Parviainen e al., 2017).

La trasformazione digitale coinvolge dunque una serie di cambiamenti positivi che si manifestano a livello operativo, organizzativo, settoriale e sociale. Ad esempio (v. Parviainen e al., 2017):

- a livello operativo, consente, potenzialmente, una ottimizzazione dei processi mediante una riduzione della attività manuali;
- a livello organizzativo comporta una maggiore capacità decisionale, miglioramenti delle strutture di comunicazione e una maggiore disponibilità di canali per raggiungere clienti e fornitori.
- a livello settoriale si possono verificare modifiche nei ruoli e nelle catene del valore all'interno degli ecosistemi aziendali;
- a livello sociale implica cambiamenti nelle strutture sociali, come ad esempio il tipo di lavoro svolto e i mezzi utilizzati per influenzare la presa di decisioni.

Come già accennato, la trasformazione digitale può influire anche sull'ambiente, sia positivamente che negativamente, apportando miglioramenti o peggioramenti rispetto allo status quo. Da un lato, le nuove tecnologie alla base della trasformazione digitale svolgono un ruolo significativo nell'iniziativa e nella gestione della sostenibilità ambientale. Di fatti, queste tecnologie, come *l'Internet of Things* (Internet delle cose, IOT), favoriscono la raccolta di dati precisi ed utilizzabili, creano consapevolezza e promuovono collaborazioni tramite i social media, sviluppano modelli di previsione migliori attraverso l'intelligenza artificiale e implementano soluzioni tramite strumenti mobili accessibili. Indirettamente, le iniziative di trasformazione digitale contribuiscono alla sostenibilità ambientale mediante il supporto a pratiche di logistica e di gestione della supply chain che riducono l'impronta di carbonio, offrendo soluzioni avanzate per la gestione dei rifiuti e diminuendo i requisiti di produzione tramite l'impiego della stampa tridimensionale (Lokuge e al., 2020).

In aggiunta, la digitalizzazione può portare a miglioramenti nell'efficienza energetica, riducendo il consumo di energia per la produzione di beni e servizi, oppure creando nuovi prodotti e servizi che richiedono meno energia. Questo può avvenire attraverso l'ottimizzazione dei processi esistenti o l'introduzione di nuove tecnologie e industrie meno energivore.

Tuttavia, l'abbondante disponibilità di tecnologie a costi contenuti ha sollevato preoccupazioni riguardo ai potenziali impatti ambientali negativi della trasformazione digitale (Lokuge e al., 2020). Essa, infatti, implica anche l'utilizzo di macchinari e dispositivi che possono generare impatti ambientali negativi riguardanti, per esempio, il prelievo e lo smaltimento delle risorse necessarie per la produzione di queste tecnologie. Pertanto, è fondamentale valutare attentamente gli effetti positivi e negativi delle innovazioni di processo e di prodotto derivanti dalla digitalizzazione.

La trasformazione digitale va oltre la semplice digitalizzazione o la dematerializzazione dei processi, anche se questi costituiscono elementi significativi di tale processo di transizione (Sorice, 2022). La digitalizzazione implica l'integrazione di elementi digitali nelle offerte di prodotti o servizi, mentre la trasformazione digitale è un processo più ampio che porta a cambiamenti fondamentali all'interno delle organizzazioni, introducendo nuovi modelli di business e piattaforme digitali. Inoltre, la trasformazione digitale non si limita a coinvolgere singole organizzazioni, ma è un fenomeno che genera cambiamenti a livello di settore e nella società nel suo complesso (Feroz e al., 2021).

Solo recentemente, dopo la pandemia da Covid-19, se ne è compresa la drammatica attualità e la necessità di una modernizzazione tecnologica favorita dalla transizione tecnologico-digitale. Proprio per questo motivo, tale transizione, assieme a quella ecologica, rappresenta uno dei punti fondamentali del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (Pnrr) (Sorice, 2022).

Tra le principali tecnologie digitali "rivoluzionarie" troviamo l'"*Internet of Things*" (IoT), le tecnologie di comunicazione wireless (ad esempio, il 5G), la robotizzazione, le piattaforme digitali, le tecnologie blockchain, l'intelligenza artificiale e la produzione additiva o "*additive manufacturing*", comunemente conosciuta come stampa 3D (Eerola e al., 2021).

## **1.2 Relazione con l'ambiente**

Anche se le tecnologie digitali sono spesso percepite come soluzioni non-materiali, fanno affidamento a hardware e hanno una propria impronta ambientale (Eerola e al., 2021). Per comprendere maggiormente la relazione tra ambiente e trasformazione digitale, occorre analizzare le funzioni dell'ambiente.

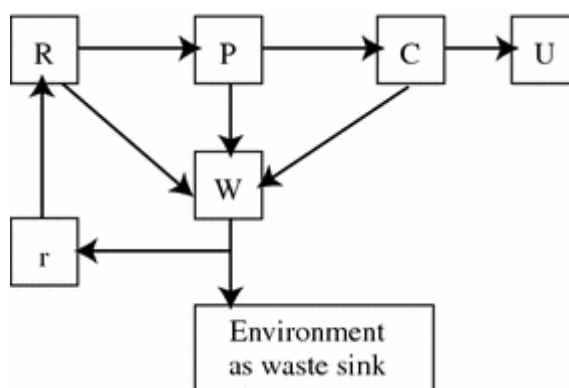
L'ambiente svolge essenzialmente 3 funzioni economiche fondamentali:

1. fornisce materie prime e risorse naturali rinnovabili e non, utilizzabili nei processi produttivi.

2. Agisce da assimilatore di rifiuti rilasciati dagli organismi viventi, attenuandone “la contaminazione mediante la riduzione delle emissioni inquinanti ed il riciclaggio dei rifiuti” (Pireddu 2002, p.2).
3. Rappresenta una fonte diretta di utilità, fornendo beni estetici e risorse ricreative come parchi nazionali, rifugi, aree protette e specie vegetali e animali endemiche.

Queste funzioni dell’ambiente possono essere sinteticamente descritte utilizzando il modello di economia circolare (Pearce e Turner, 1989) che offre un’immagine stilizzata delle interazioni tra l’economia (le attività umane, tra cui il processo di digitalizzazione) e l’ambiente, come mostrato in figura 1.

Figura 1: *Economia circolare semplificata*<sup>1</sup>



Fonte: Pearce e Turner 1989, *Economics of natural resources and the environment*

Se non consideriamo l’ambiente, il sistema economico appare come un insieme di relazioni lineari tra input e output, in cui la produzione porta alla creazione di beni da cui i consumatori poi derivano utilità. Prendendo in considerazione l’ambiente, invece, il modello di economia circolare diventa più complesso: il sistema economico preleva risorse e materie prime dall’ambiente e le converte in beni e servizi durante i processi di produzione e consumo.

Il processo di digitalizzazione prevede l’utilizzo di materie prime quali metalli e minerali per la creazione di dispositivi elettronici come smartphone, tablet, PC, ma è principalmente alimentato dal consumo di energia. La maggior parte delle materie prime minerali necessarie alla società sono prodotte mediante processi di estrazione mineraria e raffinazione, e in misura minore attraverso il riciclaggio. Molto spesso, infatti, risulta difficile perseguire i principi di economia circolare poiché il recupero e il riciclaggio dei metalli può risultare costoso e richiedere elevate risorse energetiche e tecnologiche a causa del loro utilizzo in quantità ridotte o in complesse leghe metalliche (Eerola e al., 2021).

<sup>1</sup> R = risorse; P = produzione; C = consumo; U = Utilità; r = recycling/ elementi riciclati; w = waste/ rifiuti



Successivamente, le risorse sono “restituite” all’ambiente come rifiuti e sostanze inquinanti, le quali possono in parte essere assorbite dall’ambiente stesso. Il riciclaggio dei rifiuti e un rigoroso controllo delle emissioni inquinanti possono contribuire a ridurre il livello di contaminazione dell’ambiente ed il prelievo indiscriminato di risorse (Pireddu, 2002).

I principali elementi che determinano l’impronta ambientale del settore delle ICT (Information and Communication Technology) sono le emissioni di gas serra derivanti dal consumo di energia e le emissioni di sostanze inquinanti nel suolo e nell’acqua.

Oltre alle risorse naturali in senso stretto, come ad esempio l’energia e i metalli rari, la digitalizzazione sfrutta anche la capacità assimilativa dell’ambiente, una risorsa finita che può essere danneggiata se la quantità di rifiuti è tale da non poter essere assimilata e restituita completamente al sistema economico. Ciò comporta delle conseguenze negative anche sulla terza funzione dell’ambiente, ovvero quella di fornire utilità nella forma di “piacere estetico”.

A tal proposito, l’"Earth Overshoot Day" (letteralmente, il giorno del superamento della capacità della Terra) segna la data in cui la richiesta da parte dell’umanità di risorse ecologiche e servizi in un determinato anno supera ciò che la Terra può rigenerare in quell’anno. Nel 2023, l’EOD cade il 2 agosto.

Il calcolo dell’Earth Overshoot Day avviene dividendo la biocapacità del pianeta (ossia la quantità di risorse ecologiche che la Terra è in grado di generare in quell’anno) per l’impronta ecologica dell’umanità (ovvero la richiesta di risorse dell’umanità per quell’anno) e moltiplicando il risultato per 365, il numero di giorni in un anno (Earth Overshoot Day, 2023).

Il modello di economia circolare proposto da Pearce e Turner è applicabile principalmente a uno scenario di partenza, in cui la produzione di beni e servizi deve ancora iniziare. Tuttavia, nell’attuale contesto, l’economia già fornisce beni e servizi, e la trasformazione digitale sta alterando il processo di produzione. Queste modifiche includono la produzione degli stessi beni in modi diversi (innovazione di processo) o la creazione di nuovi prodotti (innovazione di prodotto) e possono condurre a miglioramenti di efficienza in base alle circostanze.

La trasformazione digitale, dunque, gioca un ruolo di fondamentale importanza nel ridurre gli impatti ambientali, per esempio tramite l’uso di energia e di materie prime in modo più efficiente.

Lokuge e al. (2020) distinguono due diversi tipi di relazione tra sostenibilità ambientale e trasformazione digitale: la sostenibilità ambientale attraverso l’utilizzo dell’IT (information technology) e l’IT stesso come strumento a basso impatto ambientale. Nel primo caso ci si concentra principalmente sul rendere i processi produttivi più ecologici con l’obiettivo di applicare pratiche sostenibili dal punto di vista ambientale sfruttando la potenzialità dell’IT. Ad esempio, un approccio innovativo è rappresentato dall’introduzione di software per misurare le

emissioni di carbonio dei dipendenti. D'altra parte, l'IT sostenibile per l'ambiente si concentra su come rendere l'IT stesso più ecologico. Ciò include, ad esempio, l'attenzione verso data center a basso impatto ambientale e la riduzione di emissioni di gas serra.

## Capitolo 2

### Impatti positivi

Negli ultimi tempi, la sostenibilità sta attirando sempre più attenzione a livello globale. La definizione più ampiamente adottata di “sviluppo sostenibile” proviene dal Rapporto Brundtland del 1987 (v. Chen e al., 2020, p.2):

*"development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs".*

Pertanto, la sostenibilità ambientale può essere definita come lo sviluppo di soddisfare i bisogni di risorse e servizi delle generazioni attuali e future senza compromettere la salute degli ecosistemi che li forniscono (Chen e al., 2020).

Il concetto di produzione sostenibile è stato definito dal Dipartimento del Commercio degli Stati Uniti (v. Chen e al., 2020, p.2) come:

*"the creation of manufactured products that use processes that minimize negative environmental impact, conserve energy and natural resources, are safe for employees, communities, and consumers and are economically sound".*

Nel settore manifatturiero, la trasformazione digitale consente ai processi produttivi di essere completamente integrati, automatizzati e ottimizzati, apportando benefici alle aziende manifatturiere in termini di produttività, crescita del fatturato, occupazione e investimenti. Allo stesso tempo, lo sviluppo verso la digitalizzazione contribuisce positivamente alla sostenibilità ambientale attraverso l'aumento dell'efficienza delle risorse e delle informazioni grazie all'applicazione delle tecnologie dell'Industria 4.0 lungo l'intero ciclo di vita del prodotto.

La sostenibilità ambientale nella produzione implica il raggiungimento di un equilibrio stabile tra le attività manifatturiere e il loro impatto sull'ambiente naturale. I legami tra le operazioni di produzione e l'ambiente naturale stanno diventando sempre più riconosciuti, spingendo i produttori a dare priorità alla sostenibilità ambientale nella loro strategia operativa. Al tempo stesso, lo sviluppo della digitalizzazione aumenta la pressione competitiva all'interno delle aziende manifatturiere, poiché la tecnologia garantisce una maggiore qualità, costi inferiori e tempi di consegna più brevi. Ciò eleva gli standard industriali e richiede alle aziende di andare oltre l'implementazione di filosofie gestionali basate esclusivamente sull'efficienza. Di conseguenza, le aziende manifatturiere stanno sempre più integrando le questioni ambientali

nello sviluppo delle loro strategie, promuovendo processi di produzione che riducono l'impatto ambientale (Chen e al., 2020).

Statisticamente, come dichiarato dall'Associazione degli Ingegneri Tedeschi (v. Chen e al., 2020), la digitalizzazione potrebbe portare a un aumento dell'efficienza delle risorse del 25%.

Secondo quanto risulta dagli studi di Schulte e al. (2016), la digitalizzazione potrebbe potenzialmente ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>, a condizione che l'elettricità aggiuntiva necessaria sia fornita da fonti rinnovabili e che si riduca l'uso di altri combustibili, attualmente ancora largamente prevalenti nel fuel mix globale.

## **2.1 Efficienza energetica**

Tra il 1990 e il 2016, l'efficienza energetica dei settori di utilizzo finale (end-use) nell'UE è migliorata del 30% con un tasso medio annuo del 1,4%. Tutti i settori hanno contribuito a questo miglioramento, ma i maggiori progressi sono stati registrati nell'industria, che ha ottenuto un miglioramento complessivo del 38% all'anno (tasso medio annuo del 1,8%). Tuttavia, dal 2005 si è verificato un rallentamento netto nel miglioramento dell'efficienza energetica delle industrie (1,2% all'anno rispetto al precedente 2,2% all'anno). Ci sono stati miglioramenti in tutti i settori industriali, ma sono stati considerevolmente inferiori nei settori più intensivi dal punto di vista energetico (Breque e al., 2021).

L'efficienza energetica nel settore delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) è aumentata negli ultimi decenni. Alcuni studi (si vedano Lange e al., 2020) dimostrano la potenzialità dei servizi ICT nel ridurre il consumo di energia. Potenziali risparmi energetici possono essere ricavati grazie alla fatturazione elettronica (risparmio energetico annuo stimato di circa 1.400 TJ), passando dai giornali tradizionali a quelli online (risparmio energetico del 60%) e dalla consegna di CD fisici al download di musica online. Koomey e al. (2010) mostrano che i processori sono diventati più efficienti, e affermano che dal 1975 al 2009, il consumo di energia per unità di elaborazione si dimezzava circa ogni 1,5 anni. Allo stesso modo, il consumo di energia per la trasmissione dei dati è diminuito e si prevede che continuerà a diminuire. Esistono anche argomenti teorici secondo cui la digitalizzazione può comportare benefici ambientali e risparmi energetici. Berkhout e Hertin (si vedano Lange e al., 2020) identificano cinque ambiti in cui le ICT possono contribuire a ottimizzare il processo produttivo e ridurre così il consumo di energia:

1. Simulazione dei processi produttivi;
2. progettazione e gestione intelligente di prodotti e servizi;

3. distribuzione e logistica intelligente, ad esempio efficienza della supply chain o alternative alle strutture di distribuzione;
4. cambiamento delle relazioni venditore-acquirente, ad esempio personalizzazione di massa;
5. organizzazione del lavoro, ad esempio smart working.

## 2.2 Industria 4.0 e Industria 5.0

L'evoluzione dell'industria verso la quarta generazione (Industria 4.0) ha rappresentato e continua a rappresentare la transizione verso la digitalizzazione e la produzione intelligente, che mira a raggiungere livelli di efficienza e produttività superiori con minori input e costi ridotti. L'Industria 4.0 è supportata dai progressi delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) e dello storage dei dati (Chen e al., 2020).

L'espressione "Industria 4.0" è stata introdotta per la prima volta alla Fiera di Hannover nel 2011 in Germania. Si tratta di un approccio promettente per migliorare le prestazioni operative complessive integrando i processi di produzione e di business. Allo stesso tempo, l'Industria 4.0 può offrire molte opportunità per la sostenibilità ambientale, andando oltre ai benefici economici. Questo è reso possibile grazie a una digitalizzazione completa che fornisce dati più accurati e di alta qualità, nonché una gestione degli eventi in tempo reale (Chen e al., 2020). Le tecnologie digitali che permettono di realizzare appieno il potenziale della produzione verde sono le seguenti (come mostrato anche in [figura 2](#)) (si vedano Chen e al., 2020 e Dilberoglu e al., 2017):

- **L'Internet of Things (IoT)** permette il monitoraggio in tempo reale e l'acquisizione di dati affidabili sul consumo energetico, ottimizzando e risparmiando energia nella produzione. Le informazioni estratte dai prodotti, dalle macchine o dalle linee di produzione prendono il nome di **Big Data** e costituiscono una quantità considerevole di dati statistici da scambiare e analizzare;
- la **stampa 3D**, nota anche come **produzione additiva (additive manufacturing)**, è una tecnologia trasformativa che consente la progettazione e produzione personalizzate, contribuendo alla riduzione delle risorse e degli sprechi, anche attraverso una produzione just-in-time più vicina all'utente finale;
- i **sistemi ciberfisici (CPS)** consentono la creazione di una rete di produzione trasparente e flessibile con una comunicazione efficiente attraverso il monitoraggio in tempo reale dei consumi di risorse, riducendo così le emissioni attribuibili ai trasporti risparmiati;

- la **robotica intelligente** aumenta la produttività e stabilizza la qualità nella produzione, portando a una maggiore efficienza delle risorse con meno sprechi;
- il **cloud computing** è un modello che consente l'accesso onnipresente, conveniente e on-demand a una risorsa di calcolo condivisa e configurabile, che può essere prontamente fornita e rilasciata con un minimo sforzo di gestione o interazione con il fornitore di servizi;
- l'**intelligenza artificiale (IA)** mira a rilevare e gestire i problemi nascosti all'interno di un sistema industriale, evitandoli mentre rimangono non visibili e agendo come un controllo di supervisione;
- piattaforme assistite dalla **realtà virtuale (VR) o aumentata (AR)** come strumento di supporto decisionale, possono essere utilizzate per la prototipazione nella fase di progettazione, eliminando le risorse e l'energia necessarie per la produzione di prototipi fisici.

Figura 2: Le principali tecnologie alla base dell'industria 4.0



Fonte: The Boston Consulting Group

Tuttavia, uno studio recente condotto da Brozzi e al. (vedi Chen e al., 2020) mostra che le aziende tendono a considerare l'Industria 4.0 come vantaggiosa principalmente per le opportunità economiche, trascurando i benefici legati alla sostenibilità ambientale.

Affinché l'industria possa continuare a portare prosperità, è necessario che si adatti continuamente per affrontare le sfide in continua evoluzione. Solo attraverso un processo di innovazione continuo sarà possibile mantenere questa capacità di adattamento. Tuttavia, il cambiamento dell'industria ha effetti che si estendono ben oltre la semplice trasformazione tecnologica sul luogo di lavoro. Una trasformazione dell'industria ha un impatto anche sulla

società. Questo vale in particolare per i lavoratori dell'industria, che potrebbero vedere cambiamenti o addirittura minacce al proprio ruolo. I cambiamenti nei ruoli e una maggiore dipendenza da tecnologie complesse richiedono nuove competenze. Per questo motivo i lavoratori potrebbero non essere attratti a lavorare in nuovi ambienti ad alta tecnologia (Breque e al., 2021).

A dieci anni dall'introduzione dell'Industria 4.0, la Commissione Europea ha annunciato l'Industria 5.0. Durante i suoi primi dieci anni di vita, l'Industria 4.0 si è concentrata meno sui principi originali di equità sociale e sostenibilità, focalizzandosi invece sulla digitalizzazione e sulle tecnologie basate sull'IA per aumentare l'efficienza e la flessibilità della produzione. Il concetto di Industria 5.0 offre un focus differente e sottolinea l'importanza della ricerca e dell'innovazione nel sostenere l'industria nel suo servizio a lungo termine all'umanità all'interno dei limiti planetari (Breque e al., 2021). Il concetto di Industria 5.0 si muove in una direzione più “umano-centrica”, ponendo il benessere del lavoratore industriale al centro del processo produttivo.

È importante sottolineare che l'Industria 5.0 non deve essere intesa come una continuazione cronologica o un'alternativa al paradigma esistente dell'Industria 4.0. Si tratta del risultato di un esercizio di prospettiva, un modo di delineare come l'industria europea e le tendenze emergenti della società coesisteranno. Pertanto, l'Industria 5.0 integra ed estende le caratteristiche distintive dell'Industria 4.0 (Breque e al., 2021).

### **2.2.1 Produzione additiva**

La quarta rivoluzione industriale, nota come Industria 4.0, sta incoraggiando l'integrazione di sistemi di produzione intelligenti e tecnologie dell'informazione avanzate. La produzione additiva (*additive manufacturing*), che comprende la stampa 3D, la scansione 3D e il software personalizzato e autonomo associato, è considerata un elemento essenziale in questo nuovo processo.

A causa della necessità di personalizzazione di massa nell'Industria 4.0, è necessario sviluppare metodi di produzione non tradizionali. Pertanto, la produzione additiva può diventare una tecnologia chiave per la fabbricazione di prodotti personalizzati grazie alla sua capacità di creare oggetti sofisticati con forme complesse e attributi avanzati con elevata precisione (Dilberoglu e al., 2017). Questa tecnologia consente infatti di differenziare i prodotti senza la necessità di attrezzature o linee di assemblaggio, al fine di soddisfare al meglio le esigenze individuali dei consumatori diretti (Javaid e al., 2021).

La produzione additiva è in grado di produrre un oggetto tramite l'aggiunta di materiale grezzo, strato dopo strato, ricevendo input attraverso un modello di progettazione assistita dal computer (CAD) (Javaid e al., 2021). Essa trova applicazione non solo nella prototipazione, ma anche nella produzione di pezzi finali e di ricambio.

Grazie all'aumento della qualità del prodotto, la stampa 3D viene attualmente utilizzata in vari settori come l'aerospaziale, il biomedicale e la manifattura (Dilberoglu e al., 2017), nonché nella costruzione di infrastrutture come ponti ed edifici. Inoltre, durante la pandemia di COVID-19, molte carenze nella catena di approvvigionamento medico e sfide logistiche sono state affrontate con successo grazie a queste tecnologie (Javaid e al., 2021).

Oltre ai benefici riguardanti i processi di produzione (richiede meno risorse materiali e umane, riduce il costo di produzione e di distribuzione, consente di risparmiare tempo, può migliorare la pianificazione di un progetto e minimizza gli errori durante la produzione), la produzione additiva permette anche di ridurre gli impatti ambientali riducendo le emissioni di CO<sub>2</sub> del processo e la domanda di energia durante il ciclo di vita del prodotto. Rispetto al processo di produzione sottrattiva convenzionale, in cui il materiale in eccesso talvolta deve essere rimosso anziché incorporare solo il materiale richiesto, le tecnologie di produzione additiva riducono il consumo di materie prime e utilizzano materiali innovativi e intelligenti, ottenendo un minor consumo energetico e un ridotto spreco di materiale (Javaid e al., 2021).

La stampa 3D non solo riduce gli sprechi, ma permette anche il riciclo e il riutilizzo. In particolare, i metalli possono essere riciclati sotto forma di polvere, minimizzando lo spreco di questa risorsa preziosa. Difatti, a causa delle loro caratteristiche meccaniche favorevoli, i metalli sono forse i materiali più comuni nell'ingegneria. Di conseguenza, l'industria della produzione additiva cerca soluzioni innovative per creare parti metalliche che possano sostituire i loro equivalenti prodotti in modo convenzionale. I recenti sviluppi nella tecnologia di stampa 3D hanno portato alla nascita della manifattura additiva di metalli, che consente la produzione di molti componenti metallici mediante tecniche di stampa 3D utilizzando alluminio, titanio, acciaio inossidabile, e così via, come costituente principale nel processo (Dilberoglu e al. 2017). In questo modo, metalli rari come il germanio, il gallio e l'indio, possono essere preservati, contribuendo così alla sostenibilità ambientale e riducendo l'uso di risorse primarie critiche.

Nella produzione tradizionale, lo spostamento delle materie prime all'interno di un impianto produttivo e dei prodotti finiti richiede più energia e un sistema di trasporto per i componenti, il che provoca inquinamento atmosferico. La produzione additiva permette di evitare tutto ciò, ottenendo ottimi risultati in termini di sostenibilità ambientale. Inoltre, alcune tecnologie di stampa 3D sono ora utilizzate per riciclare plastica monouso per utilizzi successivi da parte dei



consumatori, ad esempio bottiglie d'acqua, trasformandole in materie prime per un ulteriore utilizzo (Javaid e al., 2021).

## **2.2.2 Cambiamento settoriale: digital servitization**

La trasformazione digitale molto spesso è accompagnata da un cambiamento settoriale che porta allo sviluppo della servitizzazione, o terziarizzazione. Il concetto di servitizzazione si basa sul passaggio da prodotto a servizio. Infatti, il concetto di *Internet of Things* (IoT) è stato recentemente affiancato dal nuovo concetto di “*Internet of Services*”. La *digital servitization* permette ai servizi come il supporto al cliente e l’ottimizzazione aziendale e dei processi basati sull’IoT di emergere e assumere sempre più importanza (Benetello, 2019).

La servitizzazione permette una riduzione del consumo di energia poiché l’intensità energetica dei servizi è solitamente inferiore a quella della produzione industriale (Lange e al., 2020).

Un concetto importante che collega il cambiamento settoriale agli aspetti ambientali è la Curva di Kuznets Ambientale (EKC). Questa curva suggerisce che gli impatti ambientali aumentano e poi diminuiscono nelle economie in crescita. La spiegazione centrale di questo fenomeno è che le emissioni sono basse nelle economie agricole, aumentano nel processo di industrializzazione e poi diminuiscono nuovamente durante la transizione verso un’economia basata sui servizi (Lange e al., 2020).

## **2.3 Iniziative green**

Le evidenze empiriche indicano che le iniziative di sostenibilità offrono alle organizzazioni l’opportunità di adottare un approccio innovativo. Settori come quello delle compagnie aeree e del turismo dimostrano che i clienti sono disposti a pagare un sovrapprezzo per prodotti o servizi che vengono etichettati come sostenibili (vedi Ryanair che offre la possibilità di compensare il proprio impatto ambientale donando una piccola somma ad enti non a scopo di lucro per la difesa dell’ambiente e ad ONG selezionate). Inoltre, molti governi stanno attuando importanti iniziative per fornire incentivi ai programmi di sostenibilità. Non a caso, le organizzazioni che seguono attivamente pratiche ambientalmente sostenibili hanno maggiori probabilità di ottenere supporto esterno da parte dei governi, delle organizzazioni non governative e del pubblico in generale, poiché danno priorità alle preoccupazioni ambientali (Lokuge e al., 2020).

Sono molte le iniziative, spesso promosse da organizzazioni no-profit, che mirano a mitigare gli impatti ambientali della trasformazione digitale, tra cui *CodeCarbon* e *CO<sub>2</sub>Web* (di

ReteClima), due progetti che nascono con l'obiettivo di ridurre l'impronta ambientale del web e spingere le aziende verso forme più "sostenibili" di diffusione delle informazioni attraverso la rete.

### 2.3.1 CodeCarbon

L'intelligenza artificiale può portare numerosi benefici alla società, tuttavia le elevate esigenze energetiche necessarie per supportare il calcolo dell'intelligenza artificiale comportano un alto costo ambientale.

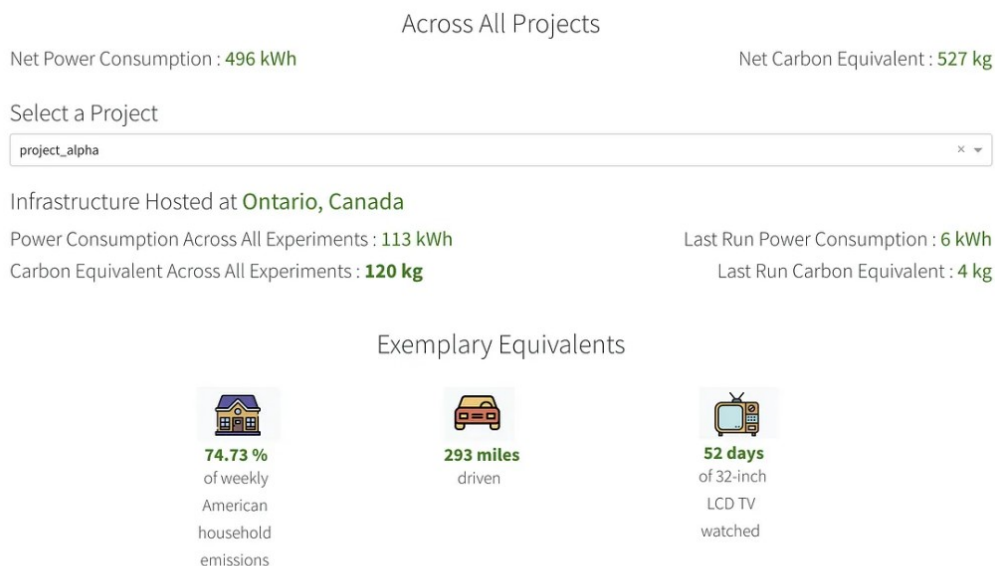
Secondo Goyal (2020), esistono tre fattori principali che influenzano l'impatto ambientale dell'intelligenza artificiale, e i data scientist possono avere un impatto diretto sulle emissioni di CO<sub>2</sub> facendo scelte informate su ciascuno di essi:

1. **Composizione dell'energia elettrica:** L'elettricità utilizzata dall'infrastruttura hardware può provenire da una combinazione di diverse fonti energetiche (carbone, petrolio, gas naturale, fonti a basse emissioni di carbonio). La combinazione utilizzata può determinare una significativa variazione nelle emissioni medie in una determinata regione. La scelta della regione del server cloud in cui eseguire gli algoritmi è la decisione più importante per limitare l'impatto ambientale.
2. **Tempo di calcolo:** L'addestramento di un potente algoritmo di machine learning può richiedere l'esecuzione di più macchine per giorni, se non settimane.
3. **Scelta dell'hardware:** Al posto di utilizzare chip tradizionali, i data scientist possono ridurre l'impatto ambientale optando per nuove generazioni di hardware di calcolo, come le GPU e le unità di elaborazione tensore (TPU), appositamente progettate per i calcoli paralleli necessari per l'addestramento delle reti neurali. L'utilizzo di queste soluzioni hardware può migliorare l'efficienza nell'addestramento dei modelli di machine learning, ridurre il tempo e l'energia impiegati, e quindi limitare l'impatto sul clima.

CodeCarbon è un progetto che sviluppa un pacchetto software leggero, open source e gratuito, in grado di monitorare le emissioni in base al consumo energetico e alla posizione del server. Utilizzando dati provenienti da fonti pubblicamente disponibili, CodeCarbon si integra facilmente nel codice Python e permette di stimare la quantità di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) prodotta dalle risorse di calcolo cloud o personali utilizzate per eseguire il codice, le quali fanno riferimento all'intensità carbonica della miscela energetica della rete elettrica a cui l'hardware è collegato. Un'altra funzione di CodeCarbon è quella di rendere tangibile l'entità delle emissioni mostrando equivalenti come il numero di chilometri percorsi in auto, le ore di visione

televisiva e il consumo energetico giornaliero di un'abitazione media negli Stati Uniti, come mostrato nella [figura 3](#). Inoltre, mostra agli sviluppatori come possono ridurre le emissioni ottimizzando il proprio codice o scegliendo di ospitare l'infrastruttura cloud in regioni geografiche che utilizzano fonti di energia rinnovabile (CodeCarbon, 2021).

Figura 3: Emissioni del progetto ed equivalenti esemplificativi



Project Emissions and Exemplary Equivalents

Fonte: Goyal, 2020

### 2.3.2 CO2Web: un progetto di ReteClima

CO<sub>2</sub>Web è un progetto di ReteClima®, un “ente no-profit che sviluppa azioni di tutela ambientale in modo trasparente e tracciabile” (CO<sub>2</sub>Web, 2014). Tale progetto mira a rendere il web più sostenibile e climate friendly e consente di:

1. **Calcolare le emissioni di CO<sub>2</sub>** generate dagli accessi al proprio sito aziendale o blog tramite una metodologia verificata da ICMQ. È possibile selezionare le pageview mensili per ottenere una stima delle emissioni di CO<sub>2</sub> correlate all'utilizzo del sito.
2. **Compensare le emissioni di CO<sub>2</sub>** del proprio sito web attraverso progetti di carbon offset internazionali, come per esempio i progetti forestali italiani ed i progetti di forestazione internazionale. La compensazione richiede il pagamento di una piccola quota, che corrisponde indicativamente a 150 euro all'anno per 100.000 pageview al mese, equivalenti a 976,9 Kg di CO<sub>2</sub> all'anno. Questa quota permette di compensare l'utilizzo del proprio sito per un anno.

3. **Comunicare il proprio impegno** attraverso un attestato, un green label per il proprio sito, evidenziando il proprio contributo alla sostenibilità ambientale.

I progetti internazionali di compensazione delle emissioni di carbonio permettono l'annullamento di crediti di carbonio con il fine di prevenire la degradazione forestale e la deforestazione, tutelare la foresta amazzonica e promuovere la realizzazione di impianti idroelettrici in Brasile. In aggiunta al supporto a progetti esteri certificati, i siti web che partecipano al progetto CO<sub>2</sub>Web sostengono la posa di alberi in Italia, nell'area metropolitana milanese. Gli alberi piantati in queste zone contribuiscono alla rinaturalizzazione di aree urbane e periurbane, migliorando il territorio locale e offrendo servizi ecosistemici per la città ed i suoi abitanti (CO<sub>2</sub>Web, 2014).

## Capitolo 3

### Impatti negativi

La relazione tra digitalizzazione e consumo di energia gioca un ruolo cruciale nel determinare se la trasformazione digitale contribuisce o ostacola la sostenibilità ambientale, in particolare per quanto riguarda il cambiamento climatico. Negli ultimi decenni, con la diffusione sempre più ampia di dispositivi digitali, si sono intensificati gli effetti negativi diretti della digitalizzazione, come le emissioni dovute all'aumento della produzione, dell'uso e dello smaltimento delle ICT. Affinché la digitalizzazione possa realmente contribuire alla decarbonizzazione, è fondamentale che i suoi effetti positivi, come l'efficienza energetica e la promozione dell'uso di energie rinnovabili, prevalgano sugli effetti negativi (Lange e al., 2020). Di seguito è proposta una rassegna di esempi di impatti ambientali negativi della trasformazione digitale.

#### 3.1 Consumo di energia ed emissioni di gas serra

La letteratura sul rapporto complessivo tra le tecnologie ICT e il consumo di energia indica una relazione positiva: una maggiore digitalizzazione comporta un maggiore consumo di elettricità. Un'analisi dei dati relativi ai paesi dell'OCSE mostra che, nel lungo periodo, un aumento dell'1% degli utenti Internet porta ad un incremento del consumo di elettricità pro capite dello 0,026%. Allo stesso modo, un'indagine sulle economie emergenti evidenzia che un aumento dell'1% degli utenti Internet aumenta il consumo di elettricità pro capite fino allo 0,108% (Lange e al., 2020).

Secondo Schulte e al. (2016) nel loro studio, la digitalizzazione potrebbe potenzialmente contribuire alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, a condizione che l'elettricità aggiuntiva necessaria sia fornita da fonti rinnovabili e che diminuisca l'uso di altri combustibili.

Secondo quanto riportato da Eerola e al. (2021), si prevedeva che il traffico Internet globale sarebbe raddoppiato raggiungendo 4,2 ZB (zettabyte) tra il 2019 e il 2022. Questo sta comportando un drastico aumento nella creazione e memorizzazione di dati. Inoltre, il crescente numero di connessioni, la quantità di dati creati e memorizzati e il numero di dispositivi stanno contribuendo ad aumentare la produzione di attrezzature per gli utenti finali e l'infrastruttura di supporto, come ad esempio i data center. Questi sviluppi porteranno a un aumento del consumo

di elettricità, del consumo di materie prime e delle emissioni se gli effetti non saranno compensati con innovazioni tecnologiche e politiche volte ad aumentare l'efficienza dei materiali e dell'energia delle tecnologie ICT (Eerola e al., 2021).

Diverse stime indicano che l'economia digitale consuma dal 5,4% all'8% dell'energia totale utilizzata. Per quanto riguarda l'utilizzo di elettricità del settore, sono state presentate stime che vanno dallo 0,5% al 6,4% del consumo totale per i paesi europei (Eerola e al., 2021). Nel corso degli ultimi decenni, il consumo di energia e le emissioni dell'economia digitale sono aumentati costantemente. In particolare, per l'Europa occidentale, è stato riportato un aumento consensuale pari al 30% nel consumo di energia tra il 2010 e il 2020. Quanto alle emissioni globali di gas serra, diverse stime mostrano che l'economia digitale contribuisce dal 2,6% al 5% alle emissioni globali totali (Eerola e al., 2021).

### **3.1.1 Data center**

I data center sono strutture fisiche centralizzate che contengono apparecchiature informatiche come server, dispositivi di rete e di archiviazione, utilizzati per elaborare e memorizzare dati, e per supportare le comunicazioni di rete. Costituiscono il sistema nervoso centrale delle reti informatiche in tutto il mondo e includono ampie infrastrutture di supporto necessarie per alimentare e garantire il raffreddamento dell'attrezzatura informatica (Whitehead e al., 2014).

Sempre Whitehead e al. (2014) indicano le diverse funzioni che i data center possono svolgere:

- fornire alloggio fisico per apparecchiature informatiche come computer, server, router, dispositivi di storage dati, rack e altre attrezzature correlate.
- gestire, memorizzare, elaborare e scambiare dati digitali.
- offrire servizi applicativi o di gestione per l'elaborazione dati, come web hosting, Internet, intranet e telecomunicazioni.

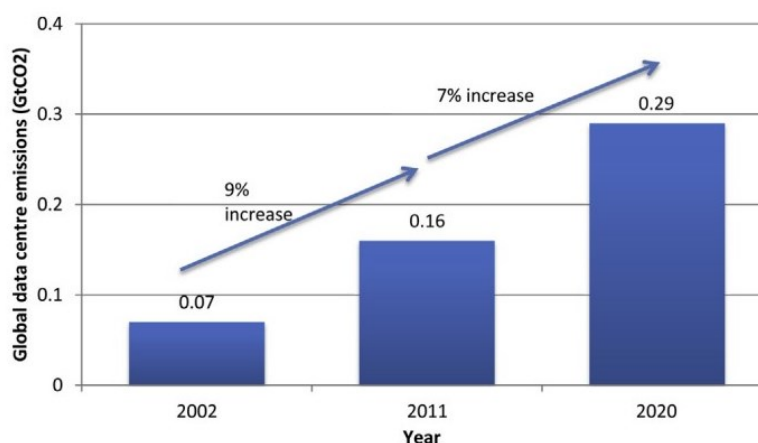
I data center possono variare notevolmente in dimensioni, passando da un singolo rack ospitato in un armadio server, fino a enormi "server farm" con superfici di pavimento che raggiungono i 150.000 m<sup>2</sup>. Nonostante le dimensioni estese di alcuni data center, la loro capacità di occupazione è relativamente bassa. Possono essere pubblici (accessibili a tutti, come quelli per le ricerche su Google) o privati (destinati a memorizzare le informazioni aziendali su drive di rete) (Whitehead e al., 2014).

I data center sono grandi consumatori di energia, sia per l'alimentazione elettrica che per dissipare il calore generato dalle apparecchiature IT. Nel 2007, si stimava che l'industria ICT rappresentasse il 10% del consumo totale di elettricità nel Regno Unito e il 2% delle emissioni

globali di CO<sub>2</sub> di origine antropica, approssimativamente equivalenti alle emissioni dirette dell'industria dell'aviazione (Whitehead e al., 2014).

Con l'aumento dell'accesso globale a Internet e il crescente spostamento delle attività aziendali online, la domanda di attrezzature ICT aumenta e, di conseguenza, sono necessari più data center. Secondo uno studio di Whitehead e al. (2014), alla fine del 2012, il 34,3% della popolazione globale era composta da utenti di Internet. Nel 2008, uno studio di GeSI (citato in Whitehead e al., 2014) stimò che l'ICT fosse responsabile del 2% dell'impronta globale di gas serra e che sarebbe aumentata al 2,8% entro il 2020. Tuttavia, nel 2011, grazie a dati più accurati e cambiamenti nel comportamento dell'industria, si scoprì che la quota totale dell'impronta era in realtà “solo” dell'1,9%. Dei tre principali settori dell'industria ICT, si prevedeva che i data center avrebbero avuto il tasso di crescita delle emissioni di gas serra più veloce, pari al 7% annuo, portando le emissioni a 0,29 GtCO<sub>2</sub>e nel 2020 (v. [figura 4](#)).

Figura 4: Aumento delle emissioni di gas serra dei data center dal 2002 al 2020

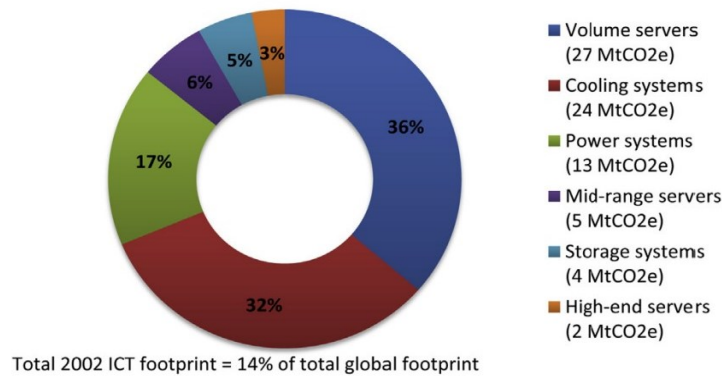


Fonte: Whitehead e al. 2014

Inoltre, è stato rilevato che nel 2002, i server e il raffreddamento erano responsabili del 14% delle emissioni di anidride carbonica. Di questa percentuale, i server voluminosi e obsoleti contribuivano a oltre un terzo dell'impatto complessivo, come evidenziato nella [figura 5](#) (v. Whitehead e al., 2014).

Un recente studio condotto da Lokuge e al. (2020) prevede che l'uso di energia dei data center aumenterà di circa 15 volte entro il 2030, raggiungendo l'8% della prevista domanda globale di elettricità. Questa crescente domanda di energia e le emissioni di gas serra dei data center hanno suscitato una maggiore consapevolezza riguardo al loro impatto sul cambiamento climatico.

Figura 5: Composizione dell'impronta globale dei data center nel 2002



Fonte: Whitehead e al. 2014

### 3.2 Rebound effect: effetto rimbalzo dell'efficienza energetica

I potenziali benefici economici e sociali della digitalizzazione sono spesso oggetto di discussione, poiché l'aumento dell'efficienza energetica non si traduce sempre in una riduzione proporzionale del consumo di energia. È emerso infatti che i benefici iniziali, come l'aumento dell'efficienza o un migliore accesso alle informazioni, possono spesso portare a effetti indiretti, che possono ridurre o addirittura invertire il suo impatto positivo. Questi effetti indesiderati sono noti come "effetti rimbalzo". In breve, gli effetti rimbalzo si verificano quando gli effetti positivi iniziali rendono un prodotto o un servizio più attrattivo, grazie a prezzi più bassi o benefici aggiuntivi. Di conseguenza, la domanda per quello stesso bene o servizio, ma anche per altri prodotti, potrebbe aumentare poiché le persone hanno a disposizione più reddito o tempo. Ciò, a sua volta, stimola un maggiore consumo di energia e risorse, portando ad un aumento dell'inquinamento e quindi riducendo l'effetto positivo iniziale o, nel peggiore dei casi, addirittura superandolo (Coroamă e Mattern, 2019). Sembra quindi evidente che gli aumenti nella produzione spesso bilanciano gli aumenti nell'efficienza energetica (Lange e al., 2020). Secondo vari autori (Lange e al., 2020), il settore delle ICT è particolarmente incline a forti effetti rimbalzo o addirittura controproduzione. Alcuni esempi pratici di effetto rimbalzo si possono riscontrare negli e-book o nello streaming video. In generale, il numero di libri stampati non sta diminuendo, nonostante l'aumento degli e-book e della lettura online su siti web. Inoltre, lo streaming video può risparmiare energia rispetto all'acquisto di DVD o al noleggio da negozi, ma l'aumento rapido delle ore di streaming e del traffico dati associato allo streaming video probabilmente compensa tali potenzialità di risparmio.



### 3.3 Metalli rari

La trasformazione digitale è uno dei principali processi che fa uso di materie prime critiche come i metalli rari. La criticità e la scarsità dei metalli rari derivano dagli usi alternativi che se ne possono fare nei diversi settori e dalla loro difficile individuazione ed estrazione. Tali risorse primarie, infatti, sono caratterizzate dal fatto che il processo che le porta a disposizione del consumatore finale si protrae per un lungo periodo di tempo, caratteristica che solitamente non viene percepita dal pubblico a causa della scarsa trasparenza. I depositi minerari si sono formati milioni o addirittura miliardi di anni fa attraverso processi geologici molto particolari e in condizioni favorevoli per la loro generazione. Spesso, ciò è avvenuto in profondità nella crosta terrestre. Affinché possano essere esposti o presentarsi più vicini alla superficie, consentendo la loro esplorazione ed estrazione, è trascorso un altro lungo periodo di tempo con una significativa erosione. Di conseguenza, i depositi minerali non si trovano ovunque, ma in determinati luoghi che devono essere individuati. La loro individuazione risulta pertanto complicata, implica enormi investimenti e richiede un lungo processo di autorizzazione nel caso in cui si voglia stabilire una miniera. Non a caso, il tasso di successo medio nell'esplorazione mineraria è solo di uno su mille (Eerola e al., 2021).

Le tecnologie digitali contengono la maggior parte degli elementi del sistema periodico, con una presenza particolarmente elevata di elementi come gallio, germanio, indio, terre rare (REEs), selenio, tellurio e tantalio, definiti dall'UNCTAD (2020) come "elementi ICT". Questi elementi sono essenziali per la costruzione dei componenti hardware di tutte le tecnologie dell'informazione e della comunicazione, come i microchip e i circuiti integrati (vedi [tabella 1](#)).

Tabella 1: Elementi ICT e il loro principale utilizzo

Element	Mobile phones	PCs	Flat screen TVs	Laptops and notebooks	5G networks	Rechargeable batteries	Fiberoptics	Main ICT usage
Gallium	X	X	X	X			X	LED, microchips, photovoltaics
Germanium	X	X		X			X	Infrared optics, fibre optics, solar
Indium	X	X	X	X				Flatscreens, photovoltaics, solder, semiconductors
REEs	X	X	X	X	X			Magnets, displays, LED
Selenium						X		Electronics
Tantalum	X		X	X				Capacitors, "sputter targets"
Tellurium						X		Solar, thermoelectrics

Fonte: UNCTAD, 2020

In particolare, il tantalio, con una domanda che cresce di circa il 5% all'anno dal 1990, è il metallo più prezioso contenuto nel coltan, le cui miniere nella parte orientale della Repubblica Democratica del Congo (RDC) sono oggetto di crimini di guerra e abusi dei diritti umani (Sutherland, 2011).

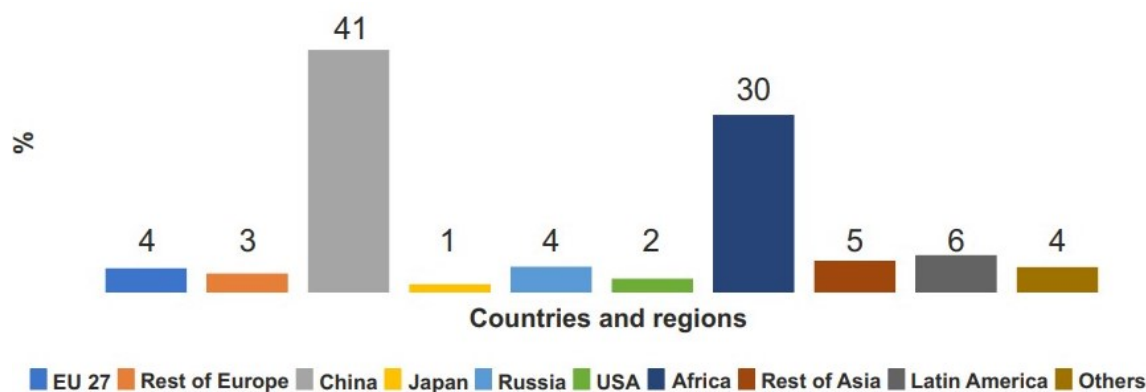
Un'indagine condotta da Malmödin e al. (2018) rivela come l'economia digitale, in particolare i settori delle ICT e dei media elettronici, consumi circa lo 0,5% di tutte le materie prime e l'80-90% di metalli rari come il gallio, il germanio e l'indio. L'utilizzo di materiali in questi settori corrisponde a circa lo 0,9% dell'impronta di carbonio per gli elementi ICT e a circa lo 0,1% dell'impronta di carbonio globale totale.

Il valore totale di tutta la produzione di metalli (nella fase di estrazione) nel 2018 era di circa 660 miliardi di dollari e gli elementi ICT identificati insieme rappresentavano solo lo 0,77% (5 miliardi di dollari) (UNCTAD, 2020). Gli elementi ICT rappresentano quindi solo una piccolissima frazione dell'uso totale di tutti i metalli.

Come già accennato nel primo capitolo, poiché molte materie prime vengono utilizzate in quantità ridotte e in complesse leghe metalliche, il recupero e il riciclaggio di molti di questi metalli, sebbene sia di fondamentale importanza, risulta costoso, richiede elevate risorse energetiche e tecnologiche o può persino essere impossibile. Pertanto, attualmente il riciclaggio non può eliminare completamente la necessità di ulteriori risorse primarie. Difatti, il riciclaggio copre una percentuale variabile della domanda globale totale di metalli, oscillando tra circa il 2% e il 35%. A seconda del metallo considerato, il tasso di riciclaggio alla fine del ciclo di vita del prodotto varia dal 0% (per il silicio) al 90% (per l'alluminio). Tuttavia, i metalli presentano una vasta gamma di proprietà che li rendono resistenti e per lo più riparabili, oltre ad essere recuperabili e riciclabili, ad esempio attraverso processi pirometallurgici o idrometallurgici. I metalli possono essere considerati materiali permanenti grazie alla possibilità di un riciclo potenzialmente infinito senza perdere le loro proprietà e prestazioni (Eerola e al., 2021).

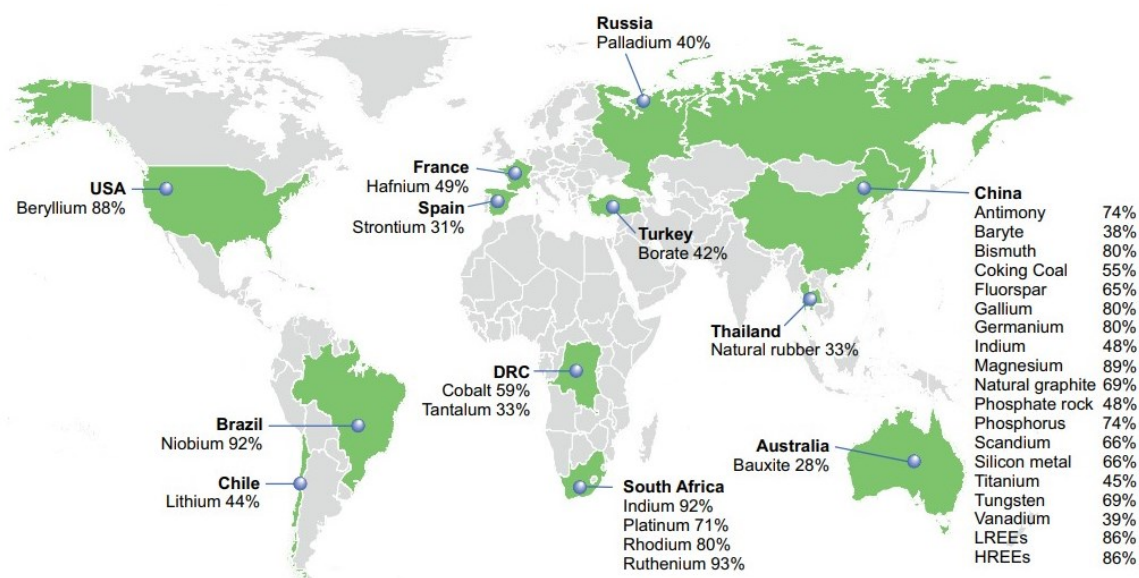
Nell'economia digitale, molti dei metalli grezzi richiesti sono CRM (*critical raw materials*), principalmente prodotti da Cina, Sud Africa e Russia. La Cina (41%) e i paesi africani (30%) sono i principali fornitori di diverse materie prime necessarie per la digitalizzazione (figura 6 e 7).

Figura 6: Produttori globali di materie prime digitali e la loro quota di mercato



Fonte: Eerola e al., 2021

Figura 7: I principali produttori di CRM e la loro quota di produzione globale<sup>2</sup>

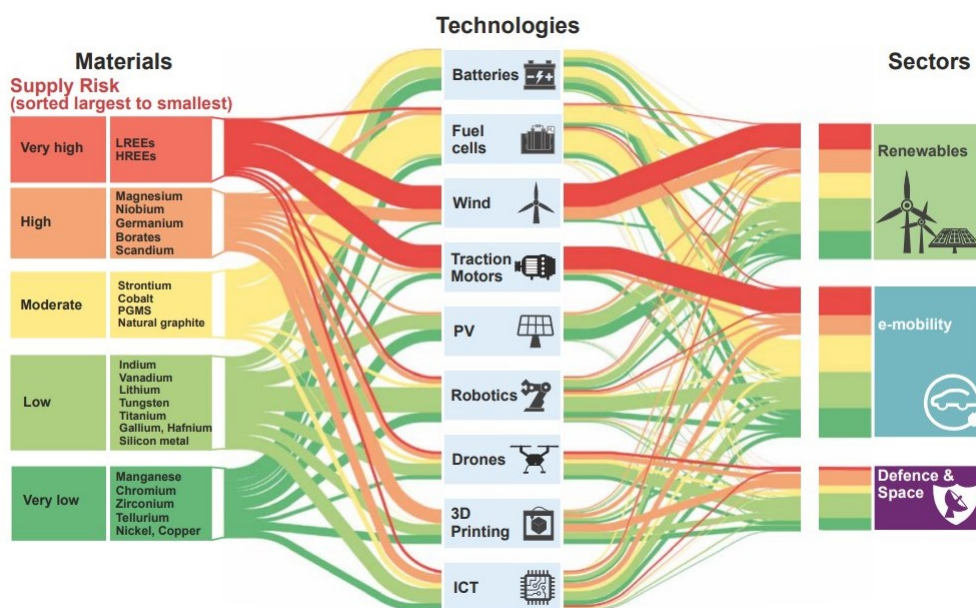


Fonte: Eerola e al., 2021

È fondamentale tenere presente che altri settori competono con quello delle ICT per le stesse materie prime, materiali lavorati e componenti (figura 8). Poiché tali materiali sono scambiati su mercati internazionali, e poiché anche altri paesi chiave come gli Stati Uniti e la Cina dipendono dalle importazioni per alcuni di questi materiali (ad esempio niobio, cromo, tantalio), la loro disponibilità per l'UE potrebbe essere compromessa (Eerola e al., 2021).

<sup>2</sup> Questi dati riguardano le CRM per l'UE. È importante notare che questa mappa presenta dati del 2016 e da allora sono avvenute alcune importanti modifiche. Ad esempio, l'Australia ha superato il Cile come maggiore produttore di litio e la quota di produzione di terre rare (REE) da parte della Cina è diminuita fino a circa il 65%.

Figura 8: Rappresentazione semi-quantitativa dei flussi di materie prime e dei rischi attuali di approvvigionamento per le nove tecnologie e i tre settori selezionati



Fonte: Eerola e al., 2021

I problemi di approvvigionamento potrebbero aumentare anche a causa del potenziale di riciclo limitato dei CRM dalle tecnologie ICT, come indicato in precedenza. Tuttavia, dal punto di vista geologico, non vi è scarsità degli elementi ICT nella crosta terrestre. Inoltre, è importante considerare che, anche se le ICT competono con altri settori per le stesse materie prime, la quantità necessaria per le ICT rappresenta solo lo 0,5%. Questo è dovuto alle piccole quantità di queste materie prime utilizzate nei dispositivi ICT. Pertanto, il problema riguardante la disponibilità di materie prime per le ICT è la forte dipendenza dalle importazioni da poche fonti principali. Questo è stato dimostrato a livello globale dall'ostruzione del Canale di Suez nel 2021, la quale ha interrotto l'approvvigionamento di microchip per le industrie manifatturiere globali, anche se il blocco è durato solo un paio di settimane (Eerola e al., 2021).

### 3.4 Rifiuti elettronici

Come affermato nel primo capitolo, una delle funzioni svolte dall'ambiente è quella di assimilatore di rifiuti prodotti dagli organismi viventi. La trasformazione digitale e l'uso delle tecnologie digitali comportano la produzione di una particolare categoria di rifiuti: i rifiuti elettronici.

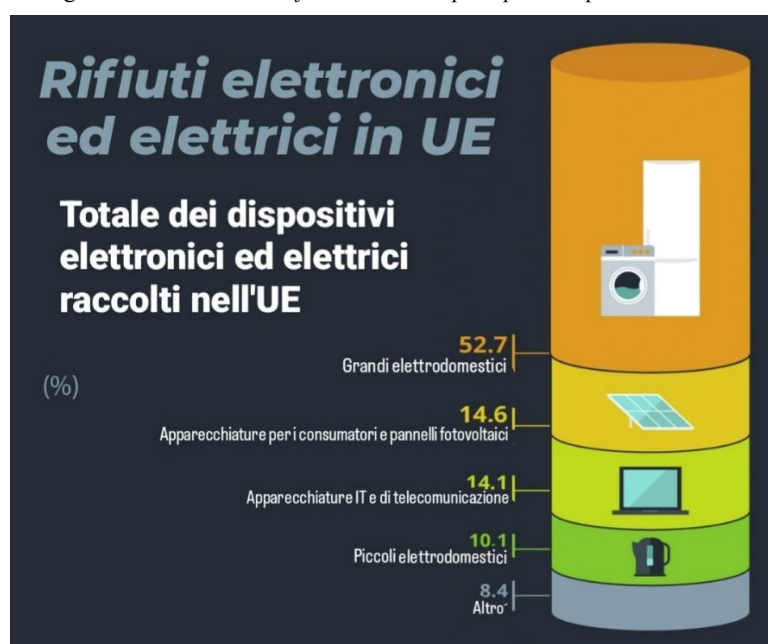
I dispositivi elettronici ed elettrici (*electronic and electrical equipment*, EEE) diventano rifiuti elettronici (WEEE) quando vengono scartati dal proprietario senza l'intenzione di riutilizzarli. Il termine WEEE comprende tutti i tipi di EEE e le relative parti. La quantità di EEE è in

costante aumento e questi dispositivi vengono sostituiti, prima o poi, a causa di difetti, obsolescenza tecnica o vari altri motivi (Eerola e al., 2021).

Uno studio condotto da Leroy (si vedano Eerola e al., 2021) rivela che una famiglia europea possiede in media 72 dispositivi EEE, di cui 11 sono guasti o non utilizzati. È stato inoltre dimostrato (Eerola e al., 2021) che nel 2015 sono stati dismessi 42 milioni di tonnellate (Mt) di rifiuti elettronici in tutto il mondo e nel 2019 è stata raggiunta la quota di 53,6 milioni. La ricerca condotta da Lange e Santarius (2020) dimostra che tale quantitativo di rifiuti elettronici è paragonabile a dismettere circa 46 milioni di auto in un solo anno, vale a dire tutti i veicoli circolanti attualmente in Germania.

Come accennato in precedenza, molto spesso risulta difficile riciclare tutti i componenti e i materiali che formano i dispositivi elettronici a causa del costo e consumo di energia eccessivo e delle tecnologie insufficienti. La raccolta e il riciclaggio documentati hanno totalizzato 93 Mt, pari al 17,4% dei rifiuti elettronici generati. Secondo uno studio del Parlamento Europeo (2020), nell'UE il tasso di riciclaggio è stimato essere inferiore al 40% e i rifiuti elettronici rappresentano il flusso di rifiuti a più rapida crescita. L'UE è in prima posizione per i rifiuti elettronici documentati, seguita dall'Asia (11,7%), le Americhe (9,4%), l'Oceania (8,8%) e l'Africa (0,9%) (Forti e al., 2020). Nell'UE, i rifiuti elettronici raccolti comprendono grandi elettrodomestici (52,7%), apparecchiature per i consumatori e pannelli fotovoltaici (14,6%), apparecchiature IT e di telecomunicazione (14,1%), piccoli elettrodomestici (10,1%) e altre apparecchiature elettroniche (8,4%), come mostrato in figura 9. Il tasso di riciclaggio dei rifiuti elettronici nell'UE varia dall'81,3% in Croazia al 20,8% a Malta (Parlamento Europeo, 2020).

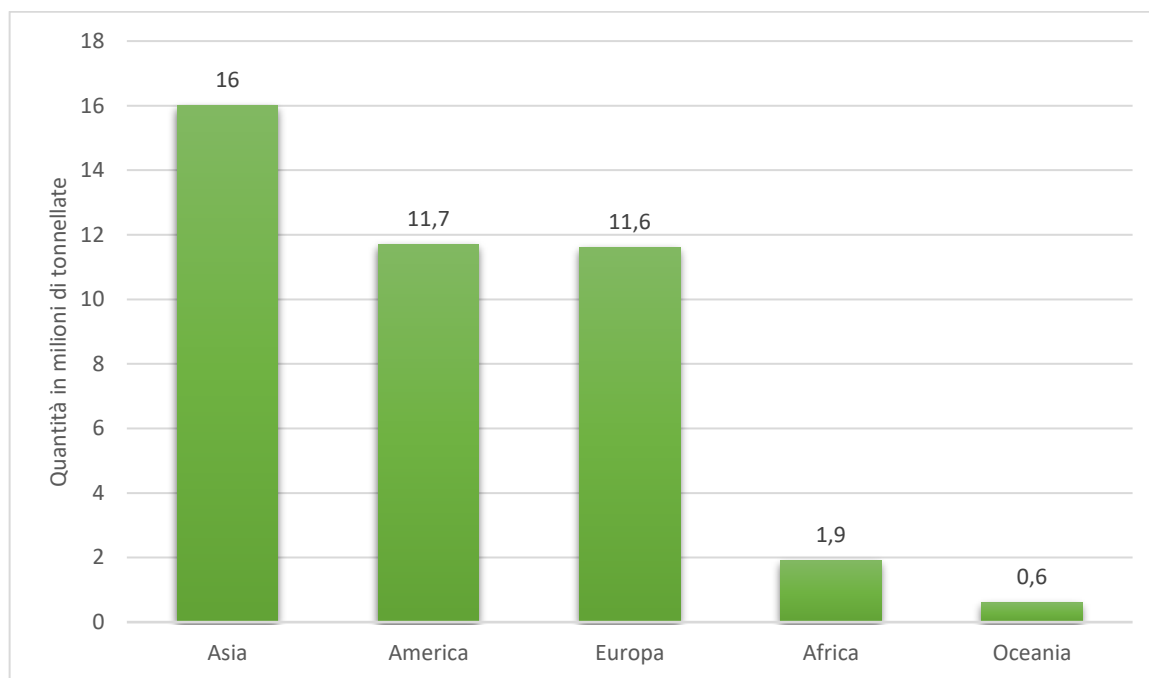
Figura 9: Percentuale di rifiuti elettronici per tipo di dispositivo nell'UE



Fonte: Parlamento Europeo, 2020, nostra elaborazione

Secondo le stime annuali del 2016, l'Asia è stata il continente che ha generato la maggior quantità di rifiuti elettronici, con 16 milioni di tonnellate, mentre l'America, l'Europa, l'Africa e l'Oceania hanno generato rispettivamente 11,7 Mt, 11,6 Mt, 1,9 Mt, 0,6 Mt, come illustrato nella [figura 10](#).

Figura 10: *Quantità di rifiuti elettronici prodotti nei vari continenti (dati del 2016)*



Fonte: Kumar e al., 2017, nostra elaborazione

I principali fattori che contribuiscono alla generazione dei rifiuti elettronici includono livelli più elevati di reddito disponibile, urbanizzazione, industrializzazione, maggiori tassi di consumo di EEE, cicli di vita brevi e poche opzioni di riparazione disponibili.

La rapida obsolescenza dei dispositivi elettronici ha portato ad un aumento dei rifiuti elettronici, i quali rappresentano uno dei flussi più problematici a causa del loro volume considerevole e del contenuto in parte pericoloso (Eerola e al., 2021). Essi possono contenere varie sostanze tossiche come metalli, plastica e ossidi refrattari, che rappresentano un rischio per l'ambiente e per la salute umana. Uno dei percorsi più importanti attraverso cui le sostanze chimiche tossiche presenti nei rifiuti elettronici entrano nel corpo umano è la via suolo-cultura-cibo. Pertanto, la gestione adeguata dei rifiuti elettronici è essenziale (Islam e al., 2020).

Molto spesso dispositivi elettronici quali smartphones e PC hanno una durata breve e sono frequentemente progettati per l'obsolescenza programmata, ovvero con l'intenzione di avere un ciclo di vita breve. Inoltre, in caso di guasto, potrebbe non essere possibile riparare il dispositivo o i costi di riparazione potrebbero equivalere al prezzo di un nuovo dispositivo. Di conseguenza, si rende necessario l'acquisto di un nuovo dispositivo, mentre quello vecchio potrebbe essere

abbandonato o scartato dal consumatore, comportando la perdita di preziose materie prime dopo un breve utilizzo. Per di più, parte dei rifiuti elettronici viene trasportata nei paesi in via di sviluppo attraverso il commercio legale o illegale di rifiuti, dove non esiste alcuna garanzia sulle condizioni in cui vengono trattati e quindi portando spesso all'esposizione e alla contaminazione umana locali (Eerola e al., 2021).

Per far sì che i dispositivi elettronici rimangano in linea con il concetto di economia circolare e sostenibilità, è necessario considerare questi aspetti per tutto il loro ciclo di vita, sin dalle prime fasi e in particolare nelle fasi di progettazione e sviluppo dei materiali. Infatti, è stato dimostrato (Eerola e al., 2021) che l'80% degli impatti relativi all'intero ciclo di vita dei dispositivi viene determinato in questa fase.

### **3.5 Approcci per mitigare gli impatti ambientali**

L'aumento della produzione industriale solitamente comporta un maggiore consumo di energia e un aumento delle emissioni di carbonio. L'innovazione alla base della trasformazione digitale può invertire questa tendenza attraverso una pianificazione della produzione più intelligente e l'utilizzo di tecnologie più efficienti dal punto di vista energetico (Breque e al., 2021). A tal proposito, la domanda che ci si pone per puntare alla sostenibilità ambientale è: quali sono le capacità richieste dalle organizzazioni per far sì che la trasformazione digitale abbia un impatto ambientale positivo piuttosto che negativo?

Quando ci si concentra sulla trasformazione digitale sostenibile dal punto di vista ambientale, le capacità IT di un'organizzazione giocano un ruolo fondamentale. Bharadwaj e al. (vedi Lokuge e al., 2020) definiscono le capacità IT come la capacità dell'azienda di mobilitare e impiegare le proprie risorse basate sull'IT per creare valore in combinazione con altre risorse e abilità. Queste competenze includono anche la conoscenza specifica dell'IT all'interno dell'azienda e le procedure che migliorano il valore delle risorse non IT.

Un ulteriore aspetto cruciale affinché le organizzazioni possano sviluppare una trasformazione digitale e strategie IT sostenibili, è lo sviluppo di *dynamic capabilities* (capacità dinamiche). Teece (1997) definisce le *dynamic capabilities* come:

*“the firm’s ability to integrate, build, and reconfigure internal and external competences to address rapidly changing environments”.*

Grazie al crescente progresso delle tecnologie digitali, le organizzazioni hanno accesso a enormi quantità di dati provenienti da diverse fonti, tra cui utenti, prodotti e servizi. Tuttavia, spesso questi dati non vengono sfruttati per trarre informazioni utili per iniziative green e sostenibili, ma solo per scopi strategici che mirano solamente alla massimizzazione del profitto.

Inoltre, molte organizzazioni considerano la sostenibilità ambientale e la gestione green più come una responsabilità o un obbligo di conformità anziché come un'opportunità. Pertanto, le organizzazioni dovrebbero sfruttare l'opportunità di esplorare nuovi percorsi per raggiungere i propri obiettivi di sostenibilità. A tal riguardo, le continue pressioni da parte dei clienti, dei gruppi ambientalisti, delle politiche pubbliche e dei mandati globali stanno spingendo sempre di più le organizzazioni a adottare operazioni e strategie di business compatibili con la sostenibilità ambientale, in ogni caso senza compromettere l'efficienza e la redditività dell'azienda (Lokuge e al., 2020).

Il processo decisionale è una fase critica nei progetti di trasformazione digitale. Tradizionalmente, i decisori adottano approcci come la valutazione del ciclo di vita e il valore attuale netto per valutare il grado di sostenibilità ambientale delle decisioni. Tuttavia, si è osservato che questo tipo di approccio retrospettivo nelle decisioni raramente favorisce la sostenibilità ambientale. In particolare, è stato dimostrato che i manager di livello medio e quelli responsabili delle linee di business sono meno propensi ad avviare programmi di sostenibilità ambientale a discapito dell'efficienza e della redditività. Per garantire il successo dei progetti ambientalmente sostenibili, è essenziale che le direttive e il supporto provengano dai manager di livello esecutivo. Una volta garantito il supporto della direzione e quando la sostenibilità ambientale è ben radicata nella politica e nelle procedure aziendali, i manager delle linee di business possono avviare, perfezionare e gestire le iniziative di sostenibilità (Lokuge e al., 2020).

Le decisioni prese a livello organizzativo riguardo alla produzione e, in particolare, l'utilizzo di risorse primarie critiche e il trattamento dei rifiuti elettronici, hanno un impatto significativo sul ciclo di vita dei dispositivi. In effetti, come già evidenziato nel paragrafo precedente, l'80% degli impatti complessivi è determinato nelle fasi di progettazione e sviluppo dei materiali. Le scelte di design possono influenzare la necessità di aumentare il volume e il numero di materie prime nelle prime fasi del processo produttivo. È possibile favorire l'estensione della vita utile dei prodotti e la chiusura dei cicli di materiale attraverso queste scelte. Le azioni cruciali per promuovere la sostenibilità lungo il ciclo di vita dei dispositivi ICT partono dai punti critici di design dei materiali. Queste azioni includono la sostituzione di materiali compositi o tossici e leghe difficili da riciclare, la rivalutazione dei materiali, delle giunzioni e dei componenti per facilitare la riparabilità e l'utilizzo di materiali riciclati (Eerola e al., 2021).

Il design permette anche lo sviluppo e il mantenimento di passaporti digitali per tracciare i prodotti lungo il loro ciclo di vita. Questi passaporti possono supportare le opzioni di riciclaggio preliminare dei materiali e gli approcci di "design-for-X", cioè l'opportunità di riutilizzare o riparare dispositivi o componenti prima del riciclaggio dei materiali (Eerola e al., 2021).



La sostituzione di materiali e composti può essere considerata una soluzione di design per ridurre la domanda di materie prime critiche e mitigare i rischi di approvvigionamento. Tuttavia, per comprendere appieno gli impatti più ampi delle scelte di design lungo il ciclo di vita del prodotto e lungo le altre catene del valore, sarebbe necessaria una valutazione a livello di sistema (Eerola e al., 2021).

Attualmente, solo circa il 12% dei materiali e delle risorse secondarie viene reintegrato nell'economia, percentuale che può sicuramente migliorare. Il concetto di economia circolare rappresenta una base per una nuova economia, che offre vantaggi economici sia a breve che a lungo termine, e gode di un ampio sostegno pubblico. Tuttavia, per ottenere risultati significativi, l'industria deve andare oltre l'ottimizzazione delle soluzioni tecno-economiche esistenti e intraprendere un cambiamento di paradigma, mettendo in pratica nuove soluzioni e comprendendo le implicazioni della rielaborazione dei propri modelli di business (Breque e al., 2021).

Alcuni materiali si adattano facilmente al concetto di economia circolare, mentre altri (come i materiali compositi, le plastiche rinforzate con fibre, i rifiuti metallurgici, ecc.) presentano una sfida più complessa e richiedono ulteriori ricerche. Molte aziende europee riconoscono già che l'ecologia industriale e, in particolare, la simbiosi industriale (che prevede la condivisione e il riutilizzo di risorse e sottoprodotti secondari) sono vantaggiose, non solo per l'ambiente, ma anche per mantenere la competitività a lungo termine delle industrie nei mercati globali (Breque e al., 2021).

## Considerazioni finali

Nelle pagine precedenti, è stata presentata una panoramica degli impatti positivi e negativi della trasformazione digitale sull'ambiente.

Nel primo capitolo è stata fornita una definizione di trasformazione digitale, esaminando i suoi driver e le sue principali manifestazioni. Con l'aiuto del modello di economia circolare, è stata analizzata la relazione tra ambiente e trasformazione digitale, sottolineando l'importanza di quest'ultima per la sostenibilità ambientale e come essa possa influire positivamente su quest'ultima.

Nel secondo capitolo, sono stati individuati diversi impatti ambientali positivi della trasformazione digitale, concentrandosi sull'efficienza energetica, sull'evoluzione delle industrie 4.0 e 5.0 e sulle loro conseguenze, tra cui la produzione additiva o stampa 3D, e il cambiamento settoriale caratterizzato dalla “*digital servitization*”. La digitalizzazione, infatti, può contribuire positivamente alla sostenibilità ambientale attraverso l'aumento dell'efficienza delle risorse e delle informazioni grazie all'applicazione delle tecnologie delle industrie 4.0 e 5.0 lungo l'intero ciclo di vita del prodotto.

Sono poi stati presentati alcuni esempi di iniziative “green” che possono contribuire a mitigare gli impatti ambientali negativi della digitalizzazione e a diminuire la sua impronta ecologica, per esempio piantando alberi per compensare le emissioni di CO<sub>2</sub> generate dall'uso di dispositivi digitali o da siti web.

Tuttavia, se da una parte la trasformazione digitale può portare ad un aumento dell'efficienza energetica, dall'altra, può anche portare ad un maggiore consumo energetico a causa della conseguente riduzione dei prezzi. Questo fenomeno è noto come effetto rimbalzo (rebound effect) dell'efficienza energetica. Il terzo capitolo si occupa di analizzare questo e altri esempi di impatti negativi ambientali, come le emissioni di gas serra e il consumo di energia, con un'attenzione particolare ai data center. Vengono inoltre analizzati gli effetti della trasformazione digitale sulle risorse primarie, in particolare sui metalli rari, di cui l'economia digitale consuma circa l'80-90%, e infine vengono esaminati gli effetti dei rifiuti elettronici sull'ambiente.

In conclusione, sono state suggerite diverse strategie che le organizzazioni possono adottare per mitigare questi ed altri impatti ambientali negativi, focalizzandosi sullo sviluppo di competenze cruciali, come le capacità IT o le capacità dinamiche, al fine di garantire che la trasformazione digitale abbia un impatto ambientale positivo anziché negativo.

## Riferimenti bibliografici

Benetello, M., 2019. *Industry 4.0 e digital servitization: casi ed esempi italiani*. Prova finale, Università di Padova, Facoltà di Economia.

Breque, M., De Nul, L., Petridis, 2021. *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. Publications Office of the European Union.

Chen, X., Despeisse, M., & Johansson, B., 2020. *Environmental sustainability of digitalization in manufacturing: A review* [online]. *Sustainability*, 12(24). Disponibile su <<https://doi.org/10.3390/su122410298>> [Data di accesso: 15/07/2023]

CodeCarbon, 2021. *CodeCarbon* [Online]. Disponibile su <<https://codecarbon.io/index.html>> [Data di accesso: 13/07/2023]

Coroamă, V. C., & Mattern, F., 2019, giugno. *Digital rebound—why digitalization will not redeem us our environmental sins*. In *Proceedings 6th international conference on ICT for sustainability*. Lappeenranta. (Vol. 2382).

CO2Web, 2014. *CO2Web, un progetto di ReteClima per il web sostenibile* [Online] Disponibile su: <<https://www.co2web.it/>> [Data di accesso: 14/07/2023]

Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M., 2017. *The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0*. *Procedia manufacturing*, 11, 545-554.

Earth Overshoot Day, 2023. *Earth Overshoot Day* [online]. Disponibile su: <<https://www.overshootday.org/about/>> [Data di accesso: 07/08/2023]

Eerola, T., Eilu, P., Hanski, J., Horn, S., Judl, J., Karhu, M., ... & Långbacka, B., 2021. *Digitalization and natural resources*. Geologica 1 Survey of Finland. Open File Research Rep, 50, 2021.

European Parliament, 2020. *E-waste in the EU: facts and figures* [online]. Eur. Parliam. News. Disponibile su: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20201208STO93325/e-waste-in-the-eu-facts-and-figures-infographic> [Data di accesso: 05/07/2023]

Feroz, A. K., Zo, H., & Chiravuri, A., 2021. *Digital transformation and environmental sustainability: A review and research agenda*. Sustainability, 13(3).

Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G., 2020. *The global e-waste monitor 2020*. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 120.

Goyal K., 2020. *AI Computing Emits CO2. We Started Measuring How Much*. Pubblicato in GAMMA-Part of BCG X. Medium. Disponibile su: <https://medium.com/bcggamma/ai-computing-emits-co%E2%82%82-we-started-measuring-how-much-807dec8c35e3> [Data di accesso: 13/07/2023]

Islam, A., Ahmed, T., Awual, M. R., Rahman, A., Sultana, M., Abd Aziz, A., ... & Hasan, M., 2020. *Advances in sustainable approaches to recover metals from e-waste- A review*. Journal of Cleaner Production, 244, 118815.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Rab, S., 2021. *Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability*. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 4(4), 312-322.

Koomey, J., Berard, S., Sanchez, M., & Wong, H., 2010. *Implications of historical trends in the electrical efficiency of computing*. IEEE Annals of the History of Computing, 33(3), 46-54.

Kumar, A., Holuszko, M., & Espinosa, D. C. R., 2017. *E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices*. Resources, Conservation and Recycling, 122, 32-42.

Lange, S., Pohl, J., & Santarius, T., 2020. *Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?*. Ecological economics, 176, 106760.

Lokuge, S., Sedera, D., Cooper, V., & Burstein, F., 2020. *Digital transformation: Environmental friend or foe? panel discussion at the australasian conference on information systems 2019*. arXiv preprint arXiv:2010.12034.

Malmodin, J., Bergmark, P., & Matinfar, S., 2018. *A high-level estimate of the material footprints of the ICT and the E&M sector*. In ICT4S, 168-186.

Parviainen, P., Tihinen, M., Kääriäinen, J., & Teppola, S., 2017. *Tackling the digitalization challenge: how to benefit from digitalization in practice*. International journal of information systems and project management, 5(1), 63-77.

Pearce, D. W., & Turner, R. K., 1989. *Economics of natural resources and the environment*. Johns Hopkins University Press.

Pireddu, G., 2002. *Economia dell'ambiente*. Apogeo Editore. p. 2.

Schulte, P., Welsch, H., & Rexhäuser, S., 2016. *ICT and the Demand for Energy: Evidence from OECD Countries*. Environmental and resource economics, 63, 119-146.

Sorice, M., 2022. *La transizione tecnologico-digitale*. In La grande transizione. Rapporto ISPI 2022. Milano: Ledizioni. 97-108.

Sutherland, E., 2011. *Coltan, the Congo and your cell phone*. SSRN 1752822.

Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A., 1997. *Dynamic capabilities and strategic management*. Strategic management journal, 18(7), 509-533.

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. Disponibile su <<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>> [Data di accesso: 19/07/2023]

UNCTAD, 2020. *Digital economy growth and mineral resources. Implications for developing countries*. UNCTAD Technical Notes on ICT for Development 16. Disponibile su <[Digital economy growth and mineral resources: implications for developing countries \(unctad.org\)](https://unctad.org/)> [Data di accesso: 26/07/2023]

Whitehead, B., Andrews, D., Shah, A., & Maidment, G., 2014. *Assessing the environmental impact of data centres part 1: Background, energy use and metrics*. Building and Environment, 82, 151-159.

**Totale parole: 9613**