

## ARTICLE INFO

Received	04 April 2023
Revised	02 May 2023
Accepted	09 May 2023
Published	30 June 2023

## DESIGN SULL'ESPERIENZA DELL'UTENTE E SOSTENIBILITÀ DEGLI OGGETTI CON INTELLIGENZA ARTIFICIALE

### USER EXPERIENCE DESIGN AND SUSTAINABILITY OF AI-INFUSED OBJECTS

Venanzio Arquilla, Alice Paracolli

#### ABSTRACT

Gli oggetti con intelligenza artificiale fanno ormai parte integrante della vita quotidiana di un numero sempre maggiore di utenti generando indubbi benefici ma anche potenziali criticità derivanti dal loro impatto ambientale. Il paper descrive questi oggetti e l'ecosistema che creano, presentando un modello interpretativo in cui vengono analizzate le tre principali componenti: fisica, digitale e d'uso. Riferendosi alla 'sostenibilità' il Design generalmente analizza gli impatti ambientali legati alla componente fisica, mentre l'Ingegneria si occupa della valutazione degli impatti della componente digitale; queste analisi sono solitamente dissociate e non coprono gli impatti legati all'uso. L'approccio che si presenta propone di integrare le diverse metodologie per far emergere gli impatti legati all'esperienza d'uso per generare maggiore consapevolezza già nella fase progettuale.

AI-infused Objects have become an integral part of the daily lives of an increasing number of users. While these objects offer undeniable benefits, they also raise concerns due to their environmental impact. This paper explores the characteristics of these objects and the ecosystem they create, presenting an interpretive model that examines three primary components: physical, digital, and usage. When it comes to 'sustainability', Design generally focuses on environmental impacts related to the physical component, while Engineering evaluates the impacts of the digital component. However, these assessments are often disconnected and fail to encompass the impacts associated with usage. The proposed approach seeks to integrate diverse methodologies to elicit the impacts related to the user experience and generate greater awareness already in the design phase.

#### KEYWORDS

esperienza d'uso, design, sostenibilità, intelligenza artificiale, internet delle cose

user experience, design, sustainability, artificial intelligence, internet of things

**Venanzio Arquilla**, Associate Professor of Industrial Design, is the Head of the Product Design Course at the School of Design of Politecnico di Milano (Italy) and the Director of the Experience Design Academy, POLI.design. He conducts research on tools and methodologies for design innovation, user experience, service design, design policies, making, and digital fabrication at national and international levels. Mob. +39 348/292.41.22 | Email: venanzio.arquilla@polimi.it

**Alice Paracolli** is a PhD Candidate in User Experience Design at Politecnico di Milano (Italy). Her research interests include the relationship between sustainability and user experience to improve human-computer interaction for current and future generations. Mob. +39 375/669.48.30 | Email: alice.paracolli@polimi.it



Assistiamo a una diffusione sempre più ampia di oggetti digitali e connessi che hanno un impatto sempre più importante sulle nostre vite (Ashri, 2020); da un lato questi migliorano la qualità della nostra esistenza, dall'altro diventa sempre più evidente che potrebbero avere un effetto negativo sull'ecosistema, a causa dell'elevato impatto ambientale che essi generano nelle diverse fasi del loro complesso ciclo di vita (progettazione, sviluppo, produzione, gestione, manutenzione e aggiornamento). Se nel corso degli anni la transizione digitale è stata vista come inevitabile – abbiamo assistito a una apparentemente necessaria digitalizzazione di oggetti o processi della nostra vita quotidiana (Epifani, 2020) – oggi iniziamo a riflettere sull'opportunità e il valore di questo processo. Quattro fenomeni tecnologici interdipendenti sono il punto di partenza della transizione digitale, il Cyber-Physical Production System, l'Internet of Things, la Smart Factory e l'Internet of Service (Hermann, Pentek and Otto, 2016) che hanno cambiato sia le aspettative che le routine degli utenti.

Ma occorre porci delle domande. Il continuo monitoraggio digitale di ogni aspetto della nostra esistenza e di ogni nostra azione ha senso? Ci libera o ci rende schiavi? In questo scenario è opportuno evidenziare come la priorità dello User Experience Design sia rendere questa transizione il più naturale possibile per l'utente, concentrandosi però sulla creazione di esperienze digitali positive e significative (Hassenzahl, Burmester and Koller, 2021). In quest'ottica l'articolo presenta gli esiti di un'attività di ricerca che, constatata la complessità della situazione attuale, mira a mettere insieme le logiche dell'esperienza d'uso con quelle della sostenibilità per orientare la società verso una transizione digitale matura e sensata. Nello specifico saranno affrontati il ruolo e la prospettiva dello User Experience Designer nello sviluppo di ecosistemi dotati di Intelligenza Artificiale (IA) sostenibili e desiderabili. La ricerca parte dall'analisi dell'impatto che nel quotidiano hanno gli oggetti con intelligenza artificiale (AI-infused Objects), oggetti 'cyber-physical', connessi, che di solito fanno parte di un ecosistema di 'oggetti intelligenti' tra i quali i contatori, gli orologi o gli assistenti vocali (Vitali, Paracolli and Arquilla, 2022; Figg. 1-3).

Il Design da sempre adotta approcci legati alla sostenibilità che negli anni sono evoluti e sono passati dal cradle-to-cradle (Braungart, McDonough and Bollinger, 2007), all'Emotionally Durable Design (Mugge, 2007; Chapman, 2009), all'eco-design (Charter and Tischner, 2001; Vezzoli and Manzini, 2008) fino al Product / Service System Design for Sustainability (Vezzoli, 2007; Vezzoli, Delfino and Ambole, 2014; Tukker and Tischner, 2006). Analogamente l'ingegneria adotta metodi per valutare gli impatti legati alla componente digitale di questi ecosistemi; nello specifico i loro impatti possono essere diretti, come il consumo di energia statica, dinamica e d'inferenza (Ligozat, 2021, 2022) o indiretti, come gli effetti di rimbalzo della IA (Pohl, Hilty and Finkbeiner, 2019). A queste misure quantitative si sommano le strategie derivanti dalla psicologia comportamentale e della tecnologia persuasiva (Fogg, 2002; Midden, Kaiser and McCalley, 2007; Midden and Ham, 2018). Se si intende affrontare la valutazione in una logica eco-sistemica, questi elementi, tutti importanti, vanno integrati e occorre inserire nel processo di valutazione anche la com-

ponente d'uso per cui la User Experience può assumere un ruolo rilevante nella definizione a monte di prodotti e servizi che utilizzano l'IA.

In questo senso Bertoni (2017) revisiona 'le modalità di integrazione della sostenibilità' come 'valore' individuando i livelli 'meta', 'strategico', 'tattico' e 'operativo'. Gli strumenti dei primi tre livelli sembrano più definiti ed è chiaro che sia socialmente, eticamente e politicamente necessario orientare la produzione, il consumo e i beni in una prospettiva sostenibile. Mancano però strumenti di progettazione che siano applicabili e trasversali come dimostrato dalla letteratura sul tema che appare frammentata e non sempre coerente con le reali esigenze dei progettisti.

In risposta a questa criticità, il contributo propone una prospettiva di analisi della sostenibilità che parta dalla componente d'uso dell'oggetto e dalla esperienza effettiva dell'utente, andando a ritroso nel ricostruire gli aspetti fisici e digitali e non viceversa, con l'obiettivo di trovare il giusto equilibrio tra una esperienza dell'utente positiva, il livello di intelligenza ad esso legata e la conseguente ma necessaria minimizzazione dell'impatto ambientale, considerando sempre che sistemi inutilizzati e / o che non utilizzino a pieno le loro potenzialità (ad esempio disperdendo o raccogliendo dati inutili) generano solo entropia negativa per l'ecosistema sia ambientale che sociale (McGovern, 2020).

Il contributo quindi, a partire dalla definizione del contesto, delle caratteristiche degli AI-infused Objects e delle loro diverse componenti (fisica, digitale e d'uso), attraverso un'analisi della letteratura di riferimento, riflette sul ruolo della User Experience come prospettiva centrale da cui parte l'analisi dell'impatto dell'oggetto. Le conclusioni evidenziano le criticità attuali di relazione tra gli AI-infused Objects, la User Experience e la sostenibilità ambientale, aprendo a un potenziale ambito di interesse per il Design. L'analisi è riferita a una ricerca dottorale in via di sviluppo, in collaborazione con un'azienda multinazionale tecnologica, in cui detti presupposti saranno validati attraverso l'analisi e la comparazione di casi reali su ecosistemi di prodotti/servizi digitali.

### Gli AI-infused Objects e il loro impatto ambientale

Questi particolari oggetti, che rientrano nel più ampio insieme dell'IoT, sono da anni sempre più diffusi nel mercato e portano nelle case e nella vita delle persone sistemi che utilizzano IA per svolgere mansioni ordinarie (Ashri, 2020). Entro il 2030 si prevede che il numero di dispositivi IoT in tutto il mondo superi i 29 miliardi, quasi triplicando la quota del 2020 di 9,7 miliardi (Vailshery, 2022; Fig. 4). Gli AI-infused Objects sono 'cyber physical', ovvero hanno sia un corpo fisico con cui l'utente può interagire direttamente sia una rappresentazione digitale di loro stessi; l'interazione con l'utente può avvenire su più dispositivi, può essere multimodale attraverso più interfacce e avere comandi fisici e digitali (Maass and Janzen, 2007).

Gli AI-infused Objects sono dotati di un ID specifico che li rende accessibili e controllabili anche da remoto tramite un indirizzo IP durante il loro intero ciclo di vita (Gutiérrez et alii, 2013; Kärkkäinen et alii, 2003); infine possono collegarsi ad altri oggetti, creando così un vero e proprio ecosistema di oggetti connessi (Abramovici, 2019; Greengard,

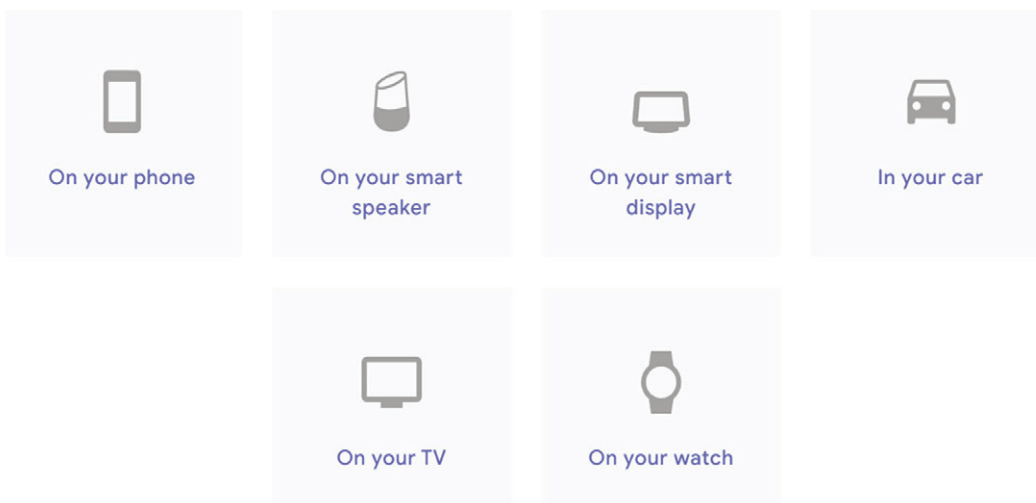
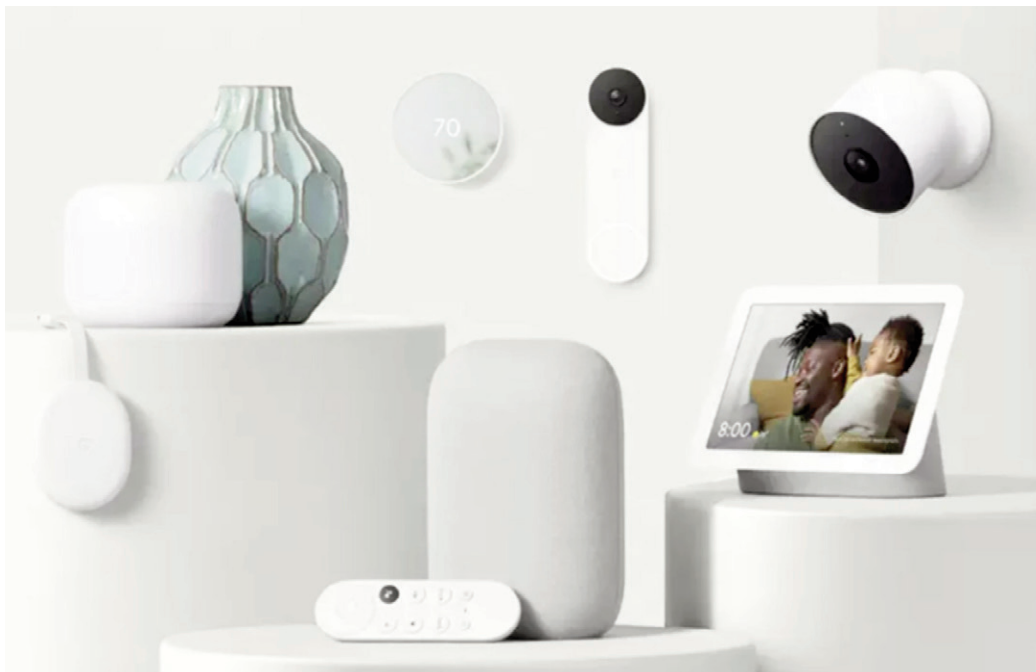
2015). Poiché la connessione internet li rende parte di una rete più grande di oggetti, persone e servizi, il loro impatto va oltre il consumo energetico diretto visibile sulla bolletta dell'utente e comprende i costi computazionali legati ai dati<sup>1</sup>. Altra caratteristica peculiare è che questi oggetti posseggono una IA, processori e microprocessori capaci di analizzare, gestire, trasformare i dati in informazioni supportando l'utente nel prendere decisioni specifiche, funzionalità tutte non necessariamente svolte in locale ma che spesso vengono gestite in 'cloud' (Meyer, Främpling and Holmström, 2009).

In ambito accademico, essendo in una fase esplorativa delle potenzialità e di fascinazione tecnologica, la ricerca è rivolta a rendere più efficiente la tecnologia, mentre meno attenzione viene data al suo effettivo impatto ambientale (Kaack et alii, 2022). Aimee van Wynsberghe (2021), esperta accademica della relazione tra IA e sostenibilità, ha riconosciuto due possibili punti di vista alternativi: AI for Sustainability e Sustainability for AI. La ricercatrice rileva che esiste un movimento crescente il quale intende utilizzare l'IA per scopi 'buoni' e per obiettivi di sviluppo sostenibile (ad esempio AI4Good); un esempio di AI for Sustainability è riportato da Zaffagnini e Morganti (2022) secondo i quali il binomio dati / macchinari industriali può ridurre l'impatto ambientale dei prodotti con un approccio basato sulla LCA.

Allo stesso tempo però occorrerebbe affrontare il tema della sostenibilità dello sviluppo e dell'uso dei sistemi di IA in quanto tali. Un contributo rilevante su questo aspetto è quello proposto da Crawford e Joler (2018) con Anatomy of AI (Fig. 5), esposto in diverse mostre internazionali e oggetto di numerose pubblicazioni in quanto primo tentativo di analisi del 'lato oscuro' della tecnologia IA. Gli autori individuano i costi nascosti dietro l'apparente semplificazione della qualità della vita degli utenti: costi riferibili alle infrastrutture, alle tecnologie, al traffico dei dati ma anche e soprattutto al lavoro umano connesso all'implementazione di questi sistemi, quindi costi diretti, legati ai prodotti e alle infrastrutture, costi legati al flusso di dati e alla loro analisi e costi sociali legati al lavoro per progettare ed educare questi sistemi.

L'utilizzo di questi ecosistemi è spesso inteso dagli utenti come un aiuto per la propria esistenza; in una dimensione egoriferita può anche essere vero, mentre in ottica di responsabilità collettiva occorrerebbe tenere in maggiore considerazione anche gli aspetti indiretti e andrebbero verificate le diverse condizioni di uso. Un dispositivo medico sempre connesso per un paziente può essere utile e potrebbe salvargli la vita in caso di necessità, uno smartwatch al polso di un teenager in piena salute che non sta facendo allenamento specifico genera gli stessi dati e impatti, ma ha molto meno senso (Figg. 6, 7). Quindi occorrerebbe tenere in stretta considerazione questi aspetti in fase progettuale per evidenziare la responsabilità di chi progetta e gestisce i sistemi; emergono inoltre ulteriori possibili pericoli legati all'etica dei dati, che possono generare o rafforzare pregiudizi danneggiando alcune categorie di utenti. Queste sono alcune delle criticità evidenziate nel report di Mozilla<sup>2</sup>, nel quale si mette in luce anche la disparità di potere tra chi beneficia dell'IA e chi ne è danneggiato.

**Le componenti ecosistemiche degli AI-infused Objects** | L'IA rende gli AI-infused Objects pro-



**Fig. 1** | British Gas Smart Energy Monitor: the device visualises consumption data and provides a cost breakdown to encourage users to consume less (source: britishgas.co.uk).

**Fig. 2** | Google Home Ecosystem (credit: Google, 2023).

**Fig. 3** | Different types of devices that can interact with Google Assistant (credit: Google, 2023).

attivi e capaci di prendere decisioni motivate anche senza la diretta richiesta dell'utente; ne è esempio Nest (Fig. 8), un termostato digitale che regola autonomamente la temperatura di una abitazione in base alla presenza o meno di persone e alla temperatura esterna. Questa 'relazione' funziona con una triangolazione tra utente, che fornisce i dati, quadri di comando fisici e digitali con cui l'utente stesso interagisce e il servizio attivato con IA che genera feedback e comportamenti personalizzati sui dati dell'utente nel quotidiano.

Per analizzare la dimensione di impatto degli AI-infused Objects bisogna considerare le tre componenti principali dell'ecosistema: 1) le componenti fisiche dell'oggetto, cioè i quadri di comando fisici con cui l'utente interagisce ovvero l'oggetto stesso (ad esempio se si considera l'impatto generato da uno frigorifero smart, sarebbe il frigorifero stesso) e i relativi componenti intelligenti (schermi, touchscreen, altoparlanti, sensori, ecc.; Figg. 9, 10); 2) le componenti digitali, cioè tutto ciò che un oggetto dotato di IA deve avere per mostrare abilità 'intelligenti' e differenziarsi da un oggetto convenzionale, ovvero i requisiti di connettività (per connettersi alla rete internet e ad altri oggetti) e la capacità di calcolo dell'IA (ad esempio l'elaborazione di dati durante l'inferenza dell'oggetto); 3) la componente d'uso (come viene utilizzato), ovvero gli impatti derivanti dalle interazioni dirette dell'utente (ad esempio il numero di utilizzi all'ora) e i relativi impatti derivanti dai cambiamenti nell'atteggiamento degli utenti, cioè come il loro quotidiano cambia utilizzando un determinato AI-infused Object rispetto a prima.

**La metodologia di ricerca** | Per l'identificazione di queste tre componenti è stata effettuata una revisione sistematica della letteratura, integrando fonti da tre diversi ambiti: relazione tra il Design e la Sostenibilità, per investigare la componente fisica; relazione tra Sostenibilità e Intelligenza Artificiale, per quella digitale; relazione tra Comportamento d'Uso e Potenziali Impatti Ricorsivi. In particolare, la ricerca ha riguardato l'identificazione delle principali pratiche e delle linee guida per la valutazione della sostenibilità degli oggetti con IA considerando il modello PICO (Nishikawa-Pacher, 2022) che vede: come Popolazione, i prodotti con AI-infused Object diffusi in ambito domestico; come Intervento, le metodologie di valutazione degli impatti ambientali già adottate sia dal Design che dall'Ingegneria; come Raffronto, gli studi presenti in letteratura che riguardano la comparazione tra diverse metodologie per lo stesso scopo e/o la comparazione di AI-infused Objects e la loro versione convenzionale o analogica; come Risultato auspicato, la definizione di una metodologia specifica utilizzabile dai progettisti che approcciano questa tipologia di prodotti.

I database utilizzati per la ricerca sono stati Web of Science, Scopus, IEEE Xplore; i risultati sono stati esaminati utilizzando criteri di inclusione ed esclusione basati sulla pertinenza al quadro PICO (Ranganathan and Aggarwal, 2020).

**Componente fisica e analisi dell'impatto ambientale** | La stringa per la ricerca della componente fisica degli AI-infused Objects nei database ha compreso le parole chiave 'sustainability', 'life cycle', 'design' e 'smart objects' al fine di comprendere cosa nel Design è già stato fatto per analiz-

zare le componenti fisiche dei quadri di comando degli AI-infused Objects. La ricerca ha generato 5.500 risultati, ulteriormente filtrati per argomenti trattati dalla disciplina del Design. Tra le 149 risorse selezionate soltanto 45 interessano l'analisi del ciclo di vita integrale degli oggetti intelligenti e/o studi che considerano le strategie di compensazione per il cambiamento del comportamento messe in atto da questi oggetti per stimolare l'utente a un comportamento più sostenibile.

Dall'analisi della letteratura sul tema emerge che i primi approcci di valutazione della sostenibilità nel Design sono stati l'Eco-design (Charter and Tischner, 2001; Vezzoli and Manzini, 2008), che mira a minimizzare l'impatto ambientale dei prodotti durante tutto il loro ciclo di vita, e il 'cradle-to-cradle' (Braungart, McDonough and Bollinger, 2007), finalizzato a realizzare i prodotti riciclabili e compostabili all'interno di un ciclo di vita chiuso, circolare e sostenibile. Altro approccio è quello dell'Emotionally Durable Design (Mugge, 2007; Chapman, 2009) che rileva l'importanza di prodotti durevoli, in grado di soddisfare le esigenze emotive dei consumatori nel tempo. Per la prima volta si va oltre le caratteristiche fisiche del prodotto per analizzarne l'aspetto sostenibile, focalizzando l'attenzione del progettista su come l'oggetto viene percepito dall'utente, in risposta al fenomeno dell'obsolescenza psicologica (Cooper, 2004) specifica dell'epoca che stiamo vivendo e partendo dall'analisi dell'utente.

L'approccio più recente che unisce le riflessioni legate a come l'utente percepisce l'oggetto e da cosa deriva la sua soddisfazione, l'analisi dell'intero ciclo di vita dell'oggetto integrando aspetti sociali, ambientali ed economici nella progettazione dei prodotti e dei sistemi è il Product / Service System Design for Sustainability (Tukker and Tischner, 2006; Vezzoli, 2007; Vezzoli, Delfino and Ambole, 2014). Questo approccio considera i prodotti come parte di sistemi più ampi, cerca di creare prodotti e servizi sostenibili che soddisfino le esigenze degli utenti e allo stesso tempo abbiano un impatto ambientale ridotto. Generalmente gli strumenti di valutazione a disposizione del Design si concentrano principalmente sull'approccio strategico, nella fase preliminare del progetto, mentre pochi supportano il progettista durante la fase esecutiva.

In aggiunta la valutazione sulla sostenibilità di un AI-infused Object non prende in esame né l'impatto della connettività né quello dell'IA dell'oggetto mentre analizza gli impatti diretti dell'oggetto: viene considerata la quantità di energia necessaria per tenere l'oggetto attivo, ma non l'energia impiegata nel processo di ideazione, progettazione e gestione dell'IA (Bracquené, De Bock and Duflo, 2020; Rizwan et alii, 2022). Diversi sono gli strumenti a disposizione del designer per valutare l'impatto ambientale della componente fisica degli AI-infused Objects (Vezzoli, Macrì and Takacs, 2022; Vezzoli, Garcia Parra and Kohtala, 2021) e tra questi il Life Cycle Assessment dell'oggetto stesso e delle componenti necessarie a renderlo 'intelligente' (Pirson and Bol, 2021).

Quando si analizza l'impatto ambientale generato da un AI-infused Object è importante considerare anche l'effetto di compensazione che l'oggetto può avere una volta che viene utilizzato dall'utente. Infatti molti di questi oggetti adottano delle strategie persuasive per promuovere un com-

portamento più sostenibile da parte dell'utente, fungendo da intermediari, amplificatori, determinanti o promotori (Midden, Kaiser and McCalley, 2007); tra queste strategie Cialdini (2009) propone la reciprocità, l'impegno, la prova sociale, l'autorità e il piacere. Parallelamente il framework Persuasive Systems Design (Oinas-Kukkonen and Harjuma, 2009) derivante da Fogg (2002) propone 28 strategie persuasive tra le più utilizzate per promuovere un comportamento sostenibile in un sistema IoT (Adaji and Adisa, 2022).

**Componente digitale e analisi dell'impatto ambientale** | La stringa per la ricerca della componente digitale degli AI-infused Objects nei database ha compreso le parole chiave 'environmental', 'artificial intelligence', 'impacts', 'evaluation' e ha generato 70 risultati; di questi, 36 non sono considerati in quanto studiano l'utilizzo di IA per calcolare il ciclo di vita di qualcos'altro. Negli studi rimanenti comunque, gli impatti dell'IA non vengono analizzati interamente, tralasciando il consumo di energia effettivo del ciclo di vita del modello di IA e i flussi di materiali fisici. La ricerca informatica sta diventando sempre più consapevole delle implicazioni dell'IA e incentra la propria attenzione sul miglioramento degli algoritmi in relazione al contesto d'uso (Ligozat, 2021), soprattutto se associato all'esperienza utente prevista del servizio che utilizza quell'algoritmo. Un caso rappresentativo di questa analisi è riportato da Turovsky (2016) su Google Translate.

La letteratura sull'IA tratta principalmente una piccola parte degli impatti diretti e trascura la produzione della tecnologia, la fine della vita e i possibili effetti indiretti. Sia Wu et alii (2022) che Gupta et alii (2022), evidenziano le carenze metodologiche degli studi precedenti, concentrandosi sulla fase di utilizzo mentre Lacoste et alii (2019), al pari di Kaack et alii (2022), approfondiscono le fonti di emissione di carbonio di un servizio di IA, offrendo una visione più completa degli impatti diretti. Inoltre Kaack et alii (2022) sostengono anche la necessità di approcci metodologici transdisciplinari per analizzare gli effetti indiretti; da qui un possibile coinvolgimento della figura dello User Experience Designer che può comprendere come un oggetto è utilizzato per dedurre l'impatto ambientale.

Ligozat (2021, 2022) ha presentato una guida pratica su come valutare l'impatto ambientale diretto legato all'IA, tuttavia esistono diversi strumenti che possono informare il processo decisionale del progettista sull'impatto ambientale di un sistema IA: quelli integrati nel codice sono più complessi da utilizzare – ne sono esempio CarbonTracker (Anthony, Kanding and Selvan, 2020), Codecarbon (Budenny et alii, 2022), Experiment Impact Tracker (Henderson et alii, 2020) – mentre quelli disponibili online sono meno precisi ma più semplici da utilizzare, come Green Algorithms e ML CO<sub>2</sub> Impact (Bannour et alii, 2022). Essi analizzano diverse fasi del ciclo di vita di un sistema IA, partendo dalla costruzione del modello fino alla fase di inferenza, con diverse categorie di impatto a seconda dello scopo dell'algoritmo e del contesto d'uso. In generale per valutare gli impatti ambientali della componente digitale di un AI-infused Object, bisogna sommare gli impatti derivanti dai requisiti di connessione dell'oggetto, che variano a seconda della esperienza d'uso prevista (Rowland et alii, 2015), e l'impatto generato

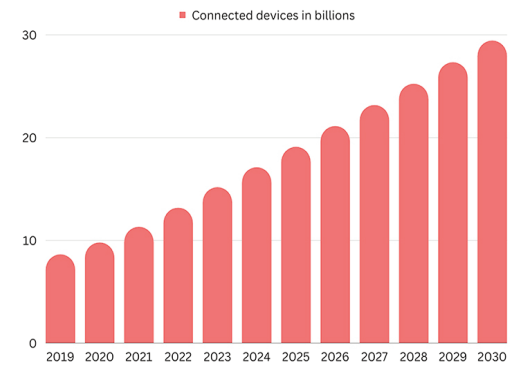


Fig. 4 | The number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide and forecasts until 2030 (source: Vailshery, 2022).

dall'IA (costruzione del modello, implementazione e inferenza); in questo modo si può bilanciare, anche in fase di progettazione, l'esperienza utente desiderata e il suo impatto ambientale.

**Componente d'uso e analisi dell'impatto ambientale** | La comprensione del contesto d'uso è il punto di partenza per analizzare il terzo componente degli AI-infused Objects, che deriva dalla modalità di interazione dell'utente con l'oggetto e ne valuta gli impatti diretti e indiretti. La stringa per la ricerca della componente d'uso degli AI-infused Objects nei database ha compreso le parole chiave 'user', 'behaviour', 'impact', 'AI', 'assessment' e 'iot' e ha generato 231 risultati.

Gli impatti ambientali di un AI-infused Object legati al comportamento utente possono essere di tipo diretto, quando considerano la domanda di energia o le emissioni associate al ciclo di vita delle componenti, e di tipo indiretto, con valori positivi o negativi (Coroamã et alii, 2020; Wohlschlagel, Neitz-Regett and Lanzinger, 2021). Gli effetti sono considerati sia a livello domestico, con una variazione del consumo energetico, sia a livello di sistema poiché possono determinare un effetto di rimbalzo: uno smart meter potrebbe diminuire il consumo energetico di una famiglia, che però potrebbe decidere di tenere la temperatura più calda in determinate ore, riducendo i benefici netti (Shehabi, 2017). La letteratura scientifica infine riporta svariate tassonomie sugli effetti diretti e indiretti legati alla tecnologia e al suo utilizzo (Horner, Shehabi and Azevedo, 2016; Pohl et alii, 2022; Sternieri et alii, 2023) e diverse metodologie di analisi specifiche sulle singole componenti.

**La User Experience Sustainability e il focus sulla componente d'uso** | Dall'analisi della letteratura scientifica emerge come l'impatto ambientale di questi oggetti sia determinato dalla somma degli impatti derivanti dalle singole componenti di cui sono composti: fisico, digitale e d'uso; un ambito di ricerca non ancora esplorato riguarda l'uso e il ruolo degli AI-infused Object nella quotidianità degli utenti. L'approccio proposto prevede di ribaltare l'ottica di analisi tradizionale adottata dal Design partendo dall'esperienza d'uso auspicata e auspicabile; con questo approccio si potrebbero individuare ulteriori e più significativi elementi utili a una 'progettazione consapevole' sia della parte fisica che di quella digitale dell'ecosistema. L'esperienza d'uso mira a valutare come l'oggetto è effettivamente adoperato, quali logiche interattive

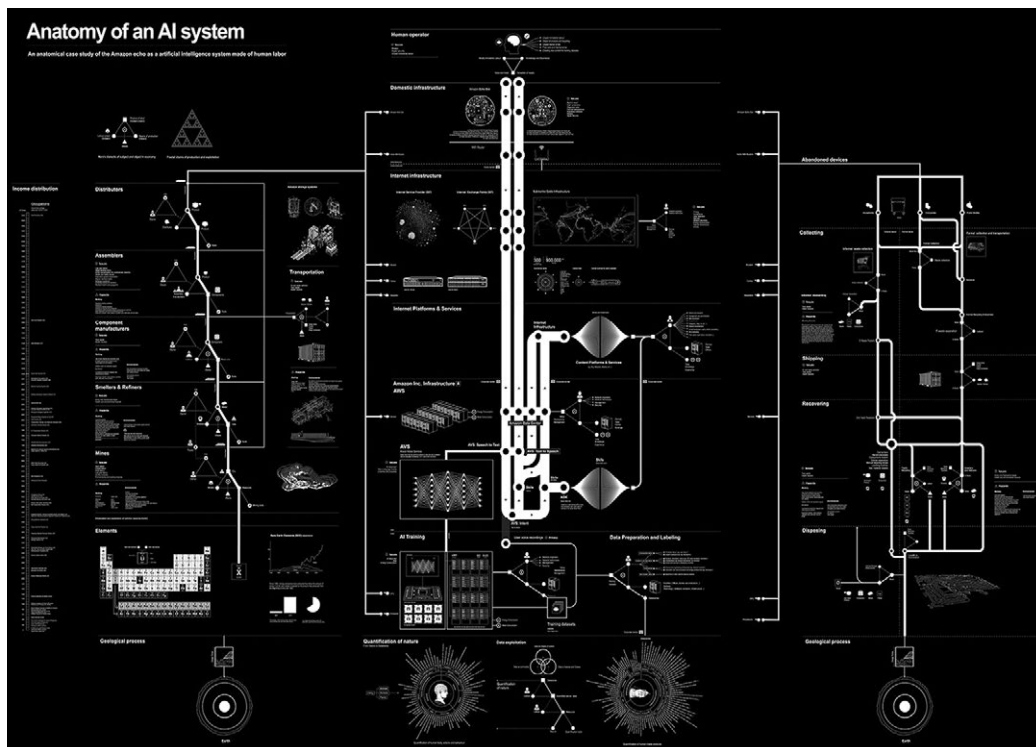


Fig. 5 | Anatomy of AI: a map representing the lifecycle of AI-infused Objects (source: Crawford and Joler, 2018).

vengono utilizzate, quando è necessario avvalersi dell'IA e quando, per il medesimo utilizzo, quella tecnologia potrebbe essere sostituita con una soluzione meno impattante.

Nel caso del termostato intelligente, ad esempio, se l'utente cambia la temperatura della stanza, l'esperienza d'uso sarà analoga sia che la temperatura cambi immediatamente sia che inizi a cambiare dopo due / tre minuti. Nel secondo caso il sistema attiva, sia in termini di energia consumata dall'oggetto stesso sia in termini di hardware per la computazione, una connettività meno impattante rispetto a una comunicazione sempre immediata, la quale richiede uno stato sempre attivo (Rowland et alii, 2015). Si propone quindi di partire dall'esperienza d'uso applicandola:

- 1) al componente d'uso valutando da un lato come le attitudini nei confronti di una determinata azione siano cambiate con l'introduzione di oggetti dotati di IA e quali siano i relativi impatti ambientali indiretti, dall'altro quanto impatti l'interazione diretta con un oggetto, in relazione al numero di utenti per dispositivo, al tempo d'utilizzo, al numero di utilizzi e al tipo di richiesta;
- 2) al componente digitale valutando in prima battuta se l'IA sia effettivamente necessaria e quale sia il suo impatto, a seguire il tipo di connettività richiesta in relazione all'oggetto stesso, al suo contesto e al suo utilizzo (Rowland et alii, 2015);
- 3) al componente fisico analizzando i componenti e gli elementi fisici del prodotto necessari ad un'ottimale esperienza d'uso dell'AI-infused Object (Figg. 11, 12).

**Conclusioni** | L'approccio proposto ha una valenza strategica e assegna al designer un importante ruolo nello sviluppo di sistemi utili a migliorare l'esperienza dell'utente con il minor impatto ambientale possibile già in fase di progettazione, fase che notoriamente è responsabile dell'80% dell'impatto ambientale di un oggetto (Vezzoli, Ma-

cri and Takacs, 2022). Per questi particolari oggetti assimilabili a ecosistemi fortemente tecnologici si richiama il pensiero di John Maeda (2019) secondo il quale i designer contemporanei devono conoscere e contaminarsi con l'informatica, ma allo stesso tempo devono essere critici sulla tecnologia laddove la sua adozione non produca un'esperienza utente coerente e significativa. Nello specifico serve una riflessione di ordine etico (come si usano i dati), estetico (qualità dell'interazione), dialettico (come superare le logiche del comando vocale e interagire in maniera proattiva), culturale affinché i sistemi siano inclusivi (Carella et alii, 2019) e infine, in ottica di circolarità<sup>3</sup>, relativa alla imprescindibile dimensione della sostenibilità.

L'approccio presentato, finalizzato a ribaltare l'ottica di analisi tradizionale adottata dal Design, partendo dall'esperienza d'uso ottimale, sarà oggetto di sperimentazione diretta attraverso l'analisi e la valutazione di alcuni progetti reali di ecosistemi di prodotti / servizi digitali in collaborazione con l'azienda multinazionale partner del Dottorato di Ricerca. Obiettivo futuro sarà elaborare una metodologia che possa guidare i designer già in fase progettuale acquisendo maggiore consapevolezza sugli impatti reali della tecnologia in relazione ai processi d'uso. Tale ambito costituisce di fatto un'area di ricerca ad alto potenziale innovativo che potrà essere ulteriormente approfondito in lavori successivi per una figura di designer sempre più ibrida e multidisciplinare.

We are witnessing a widespread diffusion of digital and connected objects that increasingly impact our lives (Ashri, 2020). On the one hand, these objects enhance our quality of existence; on the other hand, it is increasingly evident that they could have a negative effect on the ecosystem due to their high environmental impact throughout their

complex life cycle (design, development, production, management, maintenance, and updates). While the digitisation of objects and processes in our daily lives has been perceived as inevitable over the years (Epifani, 2020), we are now starting to reflect on the opportunity and value of this process. The digital transition is propelled by four interdependent technological phenomena: the Cyber-Physical Production System, the Internet of Things, the Smart Factory, and the Internet of Service (Hermann, Pentek and Otto, 2016), which have transformed user expectations and routines.

However, it is critical to raise questions regarding the continuous digital monitoring of our lives. Is it necessary or meaningful? Does it emancipate us or enslave us? User Experience Design is crucial in ensuring a seamless transition for users, focusing on creating positive and meaningful digital experiences (Hassenzahl, Burmester and Koller, 2021). This article presents the results of a research activity that aims to merge user experience and sustainability principles, guiding society towards a mature and sensible digital transition amidst the complexity of the current situation. It specifically explores the role and perspective of User Experience Designers in developing sustainable and desirable ecosystems embedded with Artificial Intelligence (AI). The research begins with analysing the impact of AI-infused Objects, which are 'cyber-physical' objects typically interconnected within intelligent networks. Examples include meters, clocks, or voice assistants (Vitali, Paracoli and Arquilla, 2022; Figg. 1-3).

The field of Design has embraced various sustainability-oriented approaches over time, from cradle-to-cradle (Braungart, McDonough and Bollinger, 2007) to Emotionally Durable Design (Mugge, 2007; Chapman, 2009), eco-design (Charter and Tischner, 2001; Vezzoli and Manzini, 2008), and Product / Service System Design for Sustainability (Vezzoli, 2007; Vezzoli, Delfino and Ambole, 2014; Tukker and Tischner, 2006). Similarly, engineering employs methods to assess impacts associated with the digital component of these ecosystems. These impacts can be direct, such as static, dynamic, and inference energy consumption (Ligozat, 2021, 2022), or indirect, such as the rebound effects of AI (Pohl, Hilty and Finkbeiner, 2019). In addition to these quantitative measures, strategies derived from behavioural psychology and persuasive technology (Fogg, 2002; Midden, Kaiser and McCalley, 2007; Midden and Ham, 2018) are also fundamental considerations. These crucial elements must be integrated for a comprehensive evaluation from an ecosystemic perspective. The evaluation process should include the usage component, where User Experience can play a significant role in defining AI products and services.

In this sense, Bertoni (2017) examines the integration of sustainability as a value across different levels: 'meta', 'strategic', 'tactical', and 'operational'. The tools at the first three levels are relatively well-defined, highlighting the social, ethical, and political imperative to align production, consumption, and goods with sustainability perspectives. However, there is a lack of design tools that are both applicable and cross-cutting, as reflected in the literature on the topic, which appears fragmented and not always consistent with the real needs of designers. In response to this challenge, this contribution suggests a new perspective on

sustainability analysis. It begins with the usage component and the user's experience analysis, then works backward to reconstruct the physical and digital aspects rather than the other way around. The goal is to strike a balance between a positive user experience, the associated level of intelligence, and the imperative of reducing environmental impact. It is essential to recognise that unused systems or those that fail to fully leverage their potential (e.g., by collecting unnecessary data) create negative entropy within the environmental and social ecosystems (McGovern, 2020).

Starting from the context definition, this contribution reflects on the role of User Experience as a central perspective for analysing the impact of AI-infused Objects. It considers their different components (physical, digital, and usage) through a literature review. Conclusions highlight the current criticalities in the relationship among AI-infused Objects, User Experience, and environmental sustainability. This opens up a potential area of interest for Design. The analysis refers to an ongoing doctoral research project in collaboration with a multinational technology company. The project aims to validate these assumptions by analysing and comparing real cases on digital product / service ecosystems.

**AI-infused Objects and their environmental impact** | These objects, part of the broader category of IoT devices, have gained significant popularity in the market. They bring AI-systems into people's homes and daily lives to perform ordinary tasks (Ashri, 2020). The number of IoT devices worldwide is projected to surpass 29 billion by 2030, nearly tripling the 2020 quota of 9.7 billion (Vailshery, 2022; Fig. 4). AI-infused Objects are classified as 'cyber-physical', combining a physical body for direct user interaction and a digital representation. Interaction with users can occur across multiple devices, on multimodal interfaces, and feature physical and digital controls (Maass and Janzen, 2007). AI-infused Objects have a unique

ID, enabling remote accessibility and control via an IP address throughout their lifecycle (Gutiérrez et alii, 2013; Kärkkäinen et alii, 2003). They create interconnected ecosystems by connecting with other objects (Abramovici, 2019; Greengard, 2015). Being internet-connected, their impact extends beyond visible energy consumption on the user's bill, including computational costs associated with data processing<sup>1</sup>. Furthermore, these objects possess AI, processors, and microprocessors capable of analysing, managing, and converting data into valuable information, assisting users in decision-making. These functions are often performed in the cloud rather than locally (Meyer, Främling and Holmström, 2009).

During this exploratory phase of technological potential and fascination in academia, research primarily focuses on enhancing technology's efficiency while paying less attention to its actual environmental impact (Kaack et alii, 2022). Aimee van Wynsberghe (2021), an academic expert on the relationship between AI and sustainability, has identified two alternative perspectives: AI for Sustainability and Sustainability for AI. The researcher highlights a growing movement to use AI for 'good' purposes and sustainable development goals (e.g., AI4Good). An example of AI for Sustainability is presented by Zaffagnini and Morganti (2022), who suggest combining data and industrial machinery can reduce the environmental impact of products through a Life Cycle Assessment (LCA) approach.

However, it is also crucial to address the sustainability aspects related to the development and use of AI systems. Crawford and Joler (2018) present a significant contribution to this aspect in the Anatomy of AI (Fig. 5). The work has been showcased in international exhibitions and widely discussed in publications as the first attempt to analyse the 'dark side' of AI technology. The authors identify hidden costs behind the apparent simplification of users' quality of life. These costs include infrastructure, technology, data traffic, and the hu-

man labour involved in implementing these systems. They encompass direct costs related to products and infrastructure, costs associated with data flow and analysis, and social costs related to designing and educating these systems.

Users often see the use of these ecosystems as assistance in their own existence. From an egocentric perspective, this may be true. However, from a collective responsibility standpoint, it is essential also to consider indirect aspects and evaluate various use conditions. A constantly connected medical device for patients can provide valuable assistance and potentially save lives when needed. On the other hand, a healthy teenager wearing a smartwatch without engaging in specific training generates similar data and impacts but with little purpose (Fig. 6, 7). Therefore, these aspects should be carefully considered during the design phase to highlight the responsibility of those who design and manage these systems. Additionally, ethical concerns arise regarding data, which can generate or reinforce biases and harm certain user groups. These are some of the issues highlighted in the Mozilla report<sup>2</sup>, which also emphasises the power disparity between those who benefit from AI and those harmed by it.

**The ecosystem components of AI-infused Objects** | AI enables AI-infused Objects to be proactive and make informed decisions without direct user input. An example of this is Nest (Fig. 8), a digital thermostat that autonomously adjusts a home's temperature based on occupancy and external temperature. This 'relationship' involves a triangulation between the user, who provides the data, the physical and digital touchpoints with which the user interacts, and the AI-powered service that generates personalised feedback and behaviours based on user data in daily life.

To analyse the impact dimension of AI-infused Objects, it is necessary to consider three main components of the ecosystem: 1) the physical components of the object, the physical touchpoints



Fig. 6 | Apple Watch, Health App: Display of user sleep activity data (credit: Apple, 2023).

Fig. 7 | Apple Watch, Health App allows sharing of data with family members; the image shows a notification for a change in the heart rate of an elderly member (credit: Apple, 2023).



**Fig. 8** | Nest Smart Learning Thermostat (credit: Google, 2023).

through which the user interacts (for example, in the case of a smart refrigerator, the refrigerator itself), and the related intelligent components (screens, touchscreens, speakers, sensors, etc.; Fig. 9, 10); 2) the digital components refer to everything that an AI-infused Object must have to demonstrate ‘intelligent’ abilities and differentiate itself from a conventional object – this includes connectivity requirements (to connect to the internet and other objects) and the AI’s computing capacity (for example, it involves data processing during object inference); 3) The usage component encompasses the impacts of direct user interactions, such as the frequency of use per hour – additionally, it considers the impacts resulting from user behaviour changes, reflecting how their daily routines are altered since adopting a specific AI-infused Object.

**The research methodology** | The research involved a systematic literature review to identify the three components. It integrated sources from three different areas: the relationship between Design and Sustainability to investigate the physical component, the relationship between Sustainability and Artificial Intelligence for the digital component, and the relationship between Use Behaviour and Potential Recursive Impacts for the usage one. In particular, this research focused on identifying practices and guidelines to assess AI-infused Objects’ sustainability, following the PICO model (Nishikawa-Pacher, 2022). This model considers Population (AI-infused Objects in domestic settings), Intervention (environmental impact assessment methodologies from Design and Engineering), Comparison (studies that focus on comparing different methodologies for the same purpose and / or comparing AI-infused Objects with their conventional or analogue versions) and Desired Outcome (defining a usable methodology for AI-infused Objects designers).

This research used Web of Science, Scopus, and IEEE Xplore databases. Results were examined based on inclusion / exclusion criteria relevant to the PICO framework (Ranganathan and Aggarwal, 2020).

**Physical component and environmental impact analysis** | The search string used to explore the physical component of AI-infused Objects in databases encompassed the following keywords:

‘sustainability’, ‘life cycle’, ‘design’, and ‘smart objects’. This search aimed to explore existing research within the field of Design that examines the physical touchpoints of AI-infused Objects. The search yielded 5,500 results, further filtered based on the pertinence to the topic and discipline of Design. Out of the 149 selected resources, only 45 were relevant to the comprehensive life cycle analysis of intelligent objects and / or studies exploring compensation strategies for behavioural changes prompted by these objects, aiming to encourage more sustainable user behaviour.

Through the analysis of relevant literature, it is evident that the initial approaches to sustainability assessment in Design were Eco-design (Charter and Tischner, 2001; Vezzoli and Manzini, 2008) and ‘cradle-to-cradle’ (Braungart, McDonough and Bollinger, 2007). Eco-design aims to minimise the environmental impact of products throughout their entire life cycle. At the same time, ‘cradle-to-cradle’ focuses on creating recyclable and compostable products within a closed, circular, and sustainable life cycle. Another approach is Emotionally Durable Design (Mugge, 2007; Chapman, 2009), which recognises the importance of durable products that meet consumers’ emotional needs over time. For the first time, the focus goes beyond the product’s physical characteristics to analyse its sustainable aspects, emphasising how the user perceives the object in response to the phenomenon of psychological obsolescence (Cooper, 2004) prevalent in our current era. This analysis starts from the user’s perspective.

The latest approach, known as Product / Service System Design for Sustainability (Tukker and Tischner, 2006; Vezzoli, 2007; Vezzoli, Delfino and Ambole, 2014), combines considerations of user perception, factors influencing user satisfaction, and integrates social, environmental, and economic aspects in product and system design. This approach recognises products as part of broader systems and aims to create sustainable products and services that meet user needs while minimising environmental impact. However, existing Design evaluation tools primarily focus on the strategic approach during the preliminary project phase, providing limited support for designers during the execution phase.

Additionally, the sustainability assessment of an AI-infused Object does not consider the impact of connectivity or the one from AI. It solely focuses on the direct impacts of the object. It evaluates the energy required to keep the object active but neglects the energy consumed in the AI’s ideation, design, and management process (Bracquené, De Bock and Dufloy, 2020; Rizwan et alii, 2022). Designers have access to various tools for assessing the environmental impact of the physical component of AI-infused Objects (Vezzoli, Macri and Takacs, 2022; Vezzoli, Garcia Parra and Kohtala, 2021), including the Life Cycle Assessment of the object itself and the components necessary for its ‘intelligence’ (Pirson and Bol, 2021).

When analysing the environmental impact generated by an AI-infused Object, it is essential to consider the compensatory effect that the object may have once used. Many of these objects adopt persuasive strategies to promote sustainable behaviour by the user, acting as intermediaries, amplifiers, determinants, or promoters (Midden, Kaiser and McCalley, 2007). Cialdini (2009) proposes re-

ciprocity, commitment and consistency, authority, liking and consensus among these strategies. Concurrently the Persuasive Systems Design framework (Oinas-Kukkonen and Harjumaa, 2009), derived from Fogg (2002), suggests 28 persuasive strategies commonly used in promoting sustainable behaviour in an IoT system (Adaji and Adisa, 2022).

**Digital component and environmental impact analysis**

| The search string for the digital component of AI-infused Objects in databases included the keywords ‘environmental’, ‘artificial intelligence’, ‘impacts’, and ‘evaluation’. It generated 70 results, with 36 excluded due to their focus on using AI to calculate the life cycle of something else. However, the remaining studies incompletely analyse the impacts of AI, neglecting the actual energy consumption of the AI model’s life cycle and physical material flows. Computer science research is becoming increasingly aware of the implications of AI. It aims to improve algorithms in relation to the intended user experience of services adopting those algorithms (Ligozat, 2021), particularly when aligned with users’ expected experience. Turovsky’s (2016) work on Google Translate is a notable case illustrating this analysis.

The literature on AI primarily addresses a small portion of direct impacts and overlooks technology production, end-of-life, and potential indirect effects. Wu et alii (2022) and Gupta et alii (2022) point out methodological limitations in previous studies, focusing on the using phase. Lacoste et alii (2019) and Kaack et alii (2022) examine the carbon emissions of AI services, providing a more comprehensive understanding of direct impacts. Kaack et alii (2022) also advocate for transdisciplinary methodologies to analyse indirect effects, potentially involving User Experience Designers who can understand an object’s environmental impact starting on how it is used.

Ligozat (2021, 2022) has presented a practical guide to evaluating the direct environmental impact associated with AI. However, several tools can inform the designer’s decision-making process regarding the environmental impact of an AI system. Integrated tools within the code are more complex to use. Examples include CarbonTracker (Anthony, Kanding and Selvan, 2020), Codecarbon (Budenny et alii, 2022), and Experiment Impact Tracker (Henderson et alii, 2020). On the other hand, online tools are less precise but easier to use. Examples include Green Algorithms and ML CO<sub>2</sub> Impact (Bannour et alii, 2022). These tools analyse various stages of an AI system’s life cycle, starting from the model construction, implementation, and inference, with different impact categories based on the algorithm’s purpose and use context.

In general, to assess the environmental impacts of the digital component of an AI-infused Object, it is necessary to consider the impacts arising from the object’s connectivity requirements. These requirements vary depending on the intended user experience (Rowland et alii, 2015). Additionally, we must consider the impact generated by the AI itself, including model construction, implementation, and inference. This allows to strike a balance between the desired user experience and its environmental impact even during the design phase.

**Use component and environmental impact analysis** | Understanding the use context is the foundation for analysing the third component of AI-infused Objects. The use component stems from the user's interaction and evaluates direct and indirect impacts. The search string used to explore the usage component of AI-infused Objects in databases yielded 231 results, incorporating the keywords 'user', 'behaviour', 'impact', 'AI', 'assessment', and 'IoT'.

The environmental impacts linked to user behaviour in AI-infused Objects can be categorised as direct or indirect. Direct impacts encompass energy demand and emissions throughout the component's life cycle. Indirect impacts can have pos-

itive or negative values (Coroamă et alii, 2020; Wohlschlager, Neitz-Regett and Lanzinger, 2021). The effects are considered both at the household level, resulting in a change in energy consumption, and at the system level as they can result in a rebound effect. A noteworthy example involves smart meters reducing energy consumption for a family, but the family might compensate by raising the temperature during specific hours, thus diminishing the net benefits (Shehabi, 2017). Scientific literature offers diverse taxonomies on direct and indirect effects related to technology and its use (Horner, Shehabi and Azevedo, 2016; Pohl et alii, 2022; Stermieri et alii, 2023) as well as several specific analysis methodologies on individual components.

**User Experience Sustainability and the use component focus** | The analysis of the scientific literature reveals that the environmental impact of these objects is determined by the combined impacts of their components: physical, digital, and usage. One unexplored area of research concerns the use and role of AI-infused Objects in users' everyday lives. The proposed approach reverses the traditional analysis perspective employed by Design, starting from the desired and desirable user experience. This approach could uncover additional and more meaningful elements that are instrumental in the 'conscious design' of the ecosystem's physical and digital aspects. The user experience assessment aims to understand how the object is actually

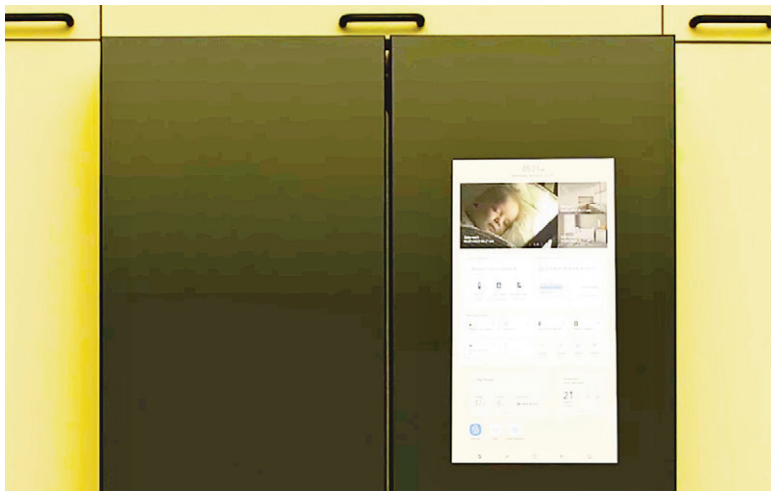


Fig. 9 | Samsung 'Family Hub' Smart Refrigerator (credit: Samsung).

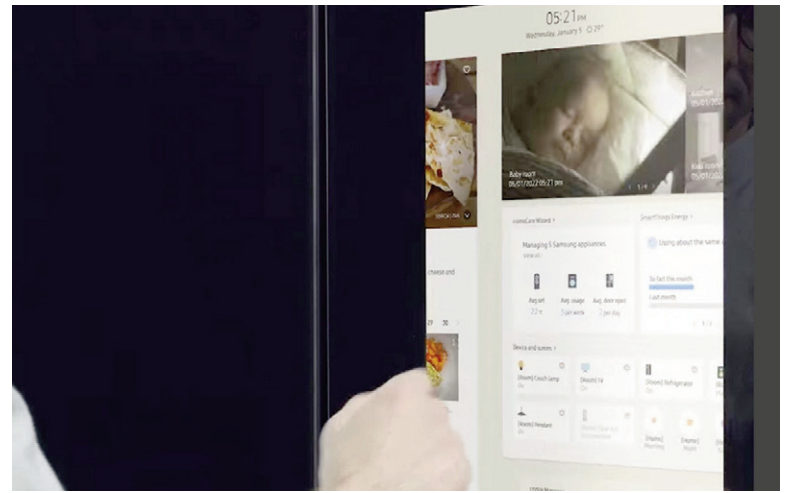


Fig. 10 | Interface of Samsung 'Family Hub' smart refrigerator (credit: Samsung).



Fig. 11 | Physical components of 'Alexa', Amazon Echo (credit: T. McLellan, 2017).



Fig. 12 | 'Alexa' Amazon Echo (credit: K. Dupzyk, 2017).



used, which interaction logic is employed, when it is necessary to use AI, and when alternative, less impactful solutions could replace that technology for the same purpose.

For instance, in the case of the smart thermostat, the user experience remains similar regardless of whether the room temperature changes instantly or gradually over two to three minutes. In the second scenario, the system uses a less impactful connectivity method in terms of energy consumption and hardware requirements compared to constant immediate communication, which requires the system always to be active (Rowland et alii, 2015). Therefore, it is proposed to start from user experience by applying it:

1) To the usage component, by evaluating, on the one hand, how attitudes towards a specific action have changed with the introduction of AI-infused objects and the resulting indirect environmental impacts, on the other hand, it assesses the direct impact deriving from the interaction with the object, considering factors such as the number of users per device, use time, frequency of use, and type of request.

2) To the digital component, by firstly evaluating the necessity of AI and its impact, secondly, consid-

ering the required connectivity type in relation to the object itself, its context, and its use (Rowland et alii, 2015).

3) To the physical component, by focusing on the analysis of the physical touchpoints and product elements that are essential for providing an optimal user experience with the AI-infused Object (Figg. 11, 12).

**Conclusions** | The proposed approach holds strategic significance and assigns a critical role to designers in developing systems that enhance user experience with minimal environmental impact. This begins already in the design phase, which is well known to account for 80% of an object's environmental impact (Vezzoli, Macrì and Takacs, 2022). For these particular objects, resembling highly technological ecosystems, the thinking of John Maeda (2019) is evoked. He states that contemporary designers must have the knowledge and be skilled in computer science. At the same time, they should remain critical of technology, especially when its adoption does not result in a coherent and meaningful user experience. Specifically, this calls for ethical considerations in terms of data use. Aesthetic considerations for in-

teraction quality and dialectical considerations to go beyond voice command and proactively engage users. Cultural considerations are essential to ensure that systems are inclusive (Carella et alii, 2019). Lastly, within the circularity perspective<sup>3</sup>, the dimension of sustainability is indispensable.

The presented approach aims to overturn the traditional perspective adopted by Design. It starts from the optimal user experience and will be subjected to direct experimentation through the analysis and evaluation of real projects involving digital product / service ecosystems in collaboration with the multinational company partner of this doctorate research. The future objective is to develop a methodology to guide designers during the design phase by fostering and concretising their awareness of the actual impacts of technology in relation to its use. This area represents a highly innovative research field with a significant potential for further exploration in subsequent studies, fostering the emergence of a designer figure that is increasingly hybrid and multidisciplinary.

## Notes

1) More information can be found here: [internethealthreport.org/2018/introduction/readme](https://internethealthreport.org/2018/introduction/readme) [Accessed 25 March 2023].

2) More information can be found here: [foundation.mozilla.org/en/blog/mozillas-2022-internet-health-report-names-power-disparity-between-who-benefits-from-ai-and-who-is-harmed-by-ai-as-top-challenge-to-health-of-internet/](https://foundation.mozilla.org/en/blog/mozillas-2022-internet-health-report-names-power-disparity-between-who-benefits-from-ai-and-who-is-harmed-by-ai-as-top-challenge-to-health-of-internet/) [Accessed 25 March 2023].

3) More information can be found here: [circulardesignguide.com](https://circulardesignguide.com) [Accessed 25 March 2023].

## References

Abramovici, M. (2019), "Smart products", in Chatti, S., Laperrière, L., Reinhart, G. and Tollo, T. (eds), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Springer Berlin, Heidelberg. [Online] Available at: [doi.org/10.1007/978-3-662-53120-4\\_16785](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53120-4_16785) [Accessed 25 March 2023].

Adaji, I. and Adisa, M. (2022), "A Review of the Use of Persuasive Technologies to Influence Sustainable Behaviour", in Bellogin, A., Boratto, L., Santos, O. (eds), *UMAP '22 Adjunct Proceedings of the 30th ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization*, Association for Computing Machinery, New York, pp. 317-325. [Online] Available at: [doi.org/10.1145/3511047.3537653](https://doi.org/10.1145/3511047.3537653) [Accessed 25 March 2023].

Anthony, L. F. W., Kanding, B. and Selvan, R. (2020), "Carbontracker – Tracking and Predicting the Carbon Footprint of Training Deep Learning Models", presented at the *ICML Workshop on Challenges in Deploying and Monitoring Machine Learning Systems*, pp. 1-11. [Online] Available at: [doi.org/10.48550/arXiv.2007.03051](https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.03051) [Accessed 25 March 2023].

Ashri, R. (2020), *The AI-Powered Workplace – How Artificial Intelligence, Data, and Messaging Platforms Are Defining the Future of Work*, Apress, Berkeley (CA). [Online] Available at: [doi.org/10.1007/978-1-4842-5476-9](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5476-9) [Accessed 25 March 2023].

Bannour, N., Ghannay, S., Névéal, A. and Ligozat, A. L. (2021), "Evaluating the carbon footprint of NLP methods

– A survey and analysis of existing tools", in Nafise, S., Moosavi, I. and Gurevych, A. (eds), *Proceedings of the Second Workshop on Simple and Efficient Natural Language Processing*, Association for Computational Linguistics, pp. 11-21. [Online] Available at: [doi.org/10.18653/v1/2021.sustainlp-1.2](https://doi.org/10.18653/v1/2021.sustainlp-1.2) [Accessed 25 March 2023].

Bertoni, M. (2017), "Introducing sustainability in value models to support design decision making – A systematic review", in *Sustainability*, vol. 9, issue 6, article 994, pp. 1-31. [Online] Available at: [doi.org/10.3390/su9060994](https://doi.org/10.3390/su9060994) [Accessed 25 March 2023].

Braquené, E., De Bock, Y. and Dufloy, J. (2020), "Sustainability impact assessment of an intelligent control system for residential heating", in *Procedia CIRP*, vol. 90, pp. 232-237. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.007](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.007) [Accessed 25 March 2023].

Braungart, M., McDonough, W. and Bollinger, A. (2007), "Cradle-to-cradle design – Creating healthy emissions – A strategy for eco-effective product and system design", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, issues 13-14, pp. 1337-1348. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003) [Accessed 25 March 2023].

Budenny, S., Lazarev, V., Zakharenko, N., Korovin, A., Plosskaya, O., Dimitrov, D., Akhripkin, V. S., Pavlov, I. V., Oseledets, I. V., Barsola, I. S., Egorov, I. V., Kosterina, A. A. and Zhukov, L. E. (2022), "eco2AI – Carbon emissions tracking of machine learning models as the first step towards sustainable AI", in *Doklady Mathematics*, vol. 106, pp. 118-128. [Online] Available at: [doi.org/10.1134/S1064562422060230](https://doi.org/10.1134/S1064562422060230) [Accessed 25 March 2023].

Carella, G., Arquilla, V., Zurlo, F. and Tamburello, M. C. (2019), "Phygital experiences design", in *DIID | Disegno Industriale Industrial Design*, vol. 67, pp. 128-135. [Online] Available at: [re.public.polimi.it/handle/11311/1138184](https://re.public.polimi.it/handle/11311/1138184) [Accessed 25 March 2023].

Chapman, J. (2009), "Design for (emotional) durability", in *Design Issues*, vol. 25, issue 4, pp. 29-35. [Online] Available at: [doi.org/10.1162/desi.2009.25.4.29](https://doi.org/10.1162/desi.2009.25.4.29) [Accessed 25 March 2023].

Charter, M. and Tischner, U. (2001), *Sustainable Solutions – Developing Products and Services for the Future*, Routledge London. [Online] Available at: [doi.org/10.4324/](https://doi.org/10.4324/)

9781351282482 [Accessed 25 March 2023].

Cialdini, R. B. (2009), *Influence – Science and practice*, Pearson Education, Boston.

Cooper, T. (2004), "Inadequate life? Evidence of consumer attitudes to product obsolescence", in *Journal of Consumer Policy*, vol. 27, issue 4, pp. 421-449. [Online] Available at: [doi.org/10.1007/s10603-004-2284-6](https://doi.org/10.1007/s10603-004-2284-6) [Accessed 25 March 2023].

Coroamă, V. C., Bergmark, P., Höjer, M. and Malmödin, J. (2020), "A methodology for assessing the environmental effects induced by ICT services – Part 1 – Single services", in Chitchyan, R. and Schien, D. (eds), *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability*, Association for Computing Machinery, New York, pp. 36-45. [Online] Available at: [doi.org/10.1145/3401335.3401716](https://doi.org/10.1145/3401335.3401716) [Accessed 25 March 2023].

Crawford, K. and Joler, V. (2018), *Anatomy of an AI System – The Amazon Echo as an anatomical map of human labor, data and planetary resource*, Share Lab and AI Now Institute. [Online] Available at: [anatomyof.ai/img/ai-anatomy-publication.pdf](https://anatomyof.ai/img/ai-anatomy-publication.pdf) [Accessed 25 March 2023].

Epifani, S. (2020), *Sostenibilità digitale – Perché la sostenibilità non può fare a meno della transizione digitale*, Digital Transformation Institute, Roma. [Online] Available at: [attiviamoenergiepositive.it/wp-content/uploads/2020/07/EstrattoPerIlSitoRidotto.pdf](https://attiviamoenergiepositive.it/wp-content/uploads/2020/07/EstrattoPerIlSitoRidotto.pdf) [Accessed 25 March 2023].

Fogg, B. J. (2002), "Persuasive technology – Using computers to change what we think and do", in *Ubiquity*, vol. 2002, issue December, article 5, pp. 89-120. [Online] Available at: [doi.org/10.1145/764008.763957](https://doi.org/10.1145/764008.763957) [Accessed 25 March 2023].

Greengard, S. (2015), *The Internet of Things*, MIT Press, Cambridge (MA).

Gupta, U., Kim, Y. G., Lee, S., Tse, J., Lee, H.-H. S., Wei, G. Y., Brooks, D. and Wu, C.-J. (2022), "Chasing carbon – The elusive environmental footprint of computing", in *IEEE Micro*, vol. 42, issue 4, pp. 37-47. [Online] Available at: [doi.org/10.1109/MM.2022.3163226](https://doi.org/10.1109/MM.2022.3163226) [Accessed 25 March 2023].

Gutiérrez, C., Garbajosa, J., Diaz, J. and Yagüe, A. (2013), "Providing a Consensus Definition for the Term Smart Product", in *2013 20th IEEE International Confer-*

- ence and Workshops on Engineering of Computer Based Systems (ECBS), IEEE, pp. 203-211. [Online] Available at: doi.org/10.1109/ECBS.2013.26 [Accessed 25 March 2023].
- Hassenzahl, M., Burmester, M. and Koller, F. (2021), "User Experience Is All There Is – Twenty Years of Designing Positive Experiences and Meaningful Technology", in *i-com*, vol. 20, issue 3, pp. 197-213. [Online] Available at: doi.org/10.1515/icom-2021-0034 [Accessed 25 March 2023].
- Henderson, P., Hu, J., Romoff, J., Brunskill, E., Jurafsky, D. and Pineau, J. (2020), "Towards the systematic reporting of the energy and carbon footprints of machine learning", in *The Journal of Machine Learning Research*, vol. 21, issue 1, article 248, pp.10039-10081. [Online] Available at: dl.acm.org/doi/abs/10.5555/3455716.3455964 [Accessed 25 March 2023].
- Hermann, M., Pentek, T. and Otto, B. (2016), "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios", in *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Koloa (US), pp. 3928-3937. [Online] Available at: doi.org/10.1109/HICSS.2016.488 [Accessed 25 March 2023].
- Horner, N. C., Shehabi, A. and Azevedo, I. L. (2016), "Known unknowns – Indirect energy effects of information and communication technology", in *Environmental Research Letters*, vol. 11, issue 10, article 103001, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1748-9326/11/10/103001 [Accessed 25 March 2023].
- Kaack, L. H., Donti, P. L., Strubell, E., Kamiya, G., Creutzig, F. and Rolnick, D. (2022), "Aligning artificial intelligence with climate change mitigation", in *Nature Climate Change*, vol. 12, issue 6, pp. 518-527. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41558-022-01377-7 [Accessed 25 March 2023].
- Kärkkäinen, M., Holmström, J., Främling, K., and Arto, K. (2003), "Intelligent products – A step towards a more effective project delivery chain", in *Computers in industry*, vol. 50, issue 2, pp. 141-151. [Online] Available at: doi.org/10.1016/S0166-3615(02)00116-1 [Accessed 25 March 2023].
- Lacoste, A., Luccioni, A., Schmidt, V. and Dandres, T. (2019), "Quantifying the Carbon Emissions of Machine Learning", in *arXiv.org*. [Online] Available at: doi.org/10.48550/arXiv.1910.09700 [Accessed 25 March 2023].
- Ligozat, A. L. and Luccioni, S. (2021), *A Practical Guide to Quantifying Carbon Emissions for Machine Learning Researchers and Practitioners*, Research Report. [Online] Available at: haliiscience/hal-03376391/ [Accessed 25 March 2023].
- Ligozat, A. L., Lefèvre, J., Bugeau, A. and Combaz, J. (2022), "Unraveling the Hidden Environmental Impacts of AI Solutions for Environment Life Cycle Assessment of AI Solutions", in *Sustainability*, vol. 14, issue 9, article 5172, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su14095172 [Accessed 25 March 2023].
- Maass, W. and Janzen, S. (2007), "Dynamic Product Interfaces – A Key Element for Ambient Shopping Environments", in Markus, M. L. (ed.), *20th Bled eConference in eMergence – Merging and Emerging Technologies, Processes, and Institutions – Bled, Slovenia*, Faculty of Organizational Sciences, pp. 457-470. [Online] Available at: alexandria.unisg.ch/36765 [Accessed 25 March 2023].
- Maeda, J. (2019), *How to Speak Machine – Computational Thinking for the Rest of Us*, Penguin Random House, New York.
- McGovern, G. (2020), *World Wide Waste – How Digital Is Killing Our Planet – And What We Can Do About It*, Silver Beach.
- Meyer, G. G., Främling, K. and Holmström, J. (2009), "Intelligent products – A survey", in *Computers in Industry*, vol. 60, issue 3, pp. 137-148. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.compind.2008.12.005 [Accessed 25 March 2023].
- Midden, C. and Ham, J. (2018), "Persuasive Technology to Promote Pro-Environmental Behaviour", in Steg, L. and de Groot, J. (eds), *Environmental psychology – An introduction*, Wiley Online Library, pp. 283-294. [Online] Available at: doi.org/10.1002/9781119241072.ch28 [Accessed 25 March 2023].
- Midden, C. J. H., Kaiser, F. G. and McCalley, L. T. (2007), "Technology's Four Roles in Understanding Individuals' Conservation of Natural Resources", in *Journal of Social Issues*, vol. 63, issue 1, pp. 155-174. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1540-4560.2007.00501.x [Accessed 25 March 2023].
- Mugge, R. (2007), *Product Attachment*, PhD Thesis, Technische Universiteit of Delft, the Netherlands. [Online] Available at: resolver.tudelft.nl/uuid:0a7cef79-cb04-4344-abb1-ef24e3e3a78 [Accessed 25 March 2023].
- Nishikawa-Pacher, A. (2022), "Research Questions with PICO – A Universal Mnemoni", in *Publications*, vol. 10, issue 3, article 21, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.3390/publications10030021 [Accessed 25 March 2023].
- Oinas-Kukkonen, H. and Harjumaa, M. (2009), "Persuasive systems design – Key issues, process model, and system features", in *Communications of the Association for Information Systems*, vol. 24, article 28, pp. 485-500. [Online] Available at: doi.org/10.17705/1CAIS.02428 [Accessed 25 March 2023].
- Pirson, T. and Bol, D. (2021), "Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 322, article 128966, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128966 [Accessed 25 March 2023].
- Pohl, J., Frick, V., Finkbeiner, M. and Santarius, T. (2022), "Assessing the environmental performance of ICT-based services – Does user behaviour make all the difference?", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 31, pp. 828-838. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2022.04.003 [Accessed 25 March 2023].
- Pohl, J., Hilty, L. M. and Finkbeiner, M. (2019), "How LCA contributes to the environmental assessment of higher order effects of ICT application – A review of different approaches", in *Journal of cleaner production*, vol. 219, pp. 698-712. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.018 [Accessed 25 March 2023].
- Ranganathan, P. and Aggarwal, R. (2020), "Study designs – Part 7 – Systematic reviews", in *Perspectives in Clinical Research*, vol. 11, issue 2, pp. 97-100. [Online] Available at: pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32670836/ [Accessed 25 March 2023].
- Rizwan, A., Rasheed, R., Javed, H., Farid, Q. and Ahmad, S. R. (2022), "Environmental sustainability and life cycle cost analysis of smart versus conventional energy meters in developing countries", in *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 33, pp. 2-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00464 [Accessed 25 March 2023].
- Rowland, C., Goodman, E., Charlier, M., Light, A. and Lui, A. (2015), *Designing connected products – UX for the consumer Internet of Things*, O'Reilly Media. [Online] Available at: dl.acm.org/doi/abs/10.5555/2891121 [Accessed 25 March 2023].
- Shehabi, A. (2017), "Data Clouds and the Environment", in Egenhofer, R. B. (ed.), *Routledge Handbook of Sustainable Design*, Routledge, London, pp. 170-178. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315625508 [Accessed 25 March 2023].
- Stermieri, L., Kober, T., Schmidt, T. J., McKenna, R. and Panos, E. (2023), "Quantifying the implications of behavioral changes induced by digitalization on energy transition – A systematic review of methodological approaches", in *Energy Research & Social Science*, vol. 97, article 102961, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.erss.2023.102961 [Accessed 25 March 2023].
- Tukker, A. and Tischner, U. (2006), "Product-services as a research field – Past, present and future – Reflections from a decade of research", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, issue 17, pp. 1552-1556. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.01.022 [Accessed 25 March 2023].
- Turovsky, B. (2016), "Ten years of Google Translate", in *The Keyword*, 28/04/2016. [Online] Available at: blog.google/products/translate/ten-years-of-google-translate [Accessed 25 March 2023].
- Vailshery, L. S. (2022), "Number of IoT connected devices worldwide 2019-2021, with forecasts to 2030", in *Statista*, 22/11/2022. [Online] Available at: statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide [Accessed 25 March 2023].
- van Wynsberghe, A. (2021), "Sustainable AI – AI for sustainability and the sustainability of AI", in *AI and Ethics*, vol. 1, issue 3, pp. 213-218. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s43681-021-00043-6 [Accessed 25 March 2023].
- Vezzoli, C. (2007), *System design for sustainability – Theory, methods and tools for a sustainable 'satisfaction-system' design*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RM).
- Vezzoli, C., Delfino, E. and Ambole, L. A. (2014), "System Design for Sustainable Energy for all – A new challenging role for design to foster sustainable development", in *FormAkademisk*, vol. 7, issue 3, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.7577/formakademisk.791 [Accessed 25 March 2023].
- Vezzoli, C., Garcia Parra, B. and Kohtala, C. (eds) (2021), *Designing Sustainability for All – The Design of Sustainable Product-Service Systems Applied to Distributed Economies*, Springer Nature, Milano. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-66300-1 [Accessed 25 March 2023].
- Vezzoli, C., Macri, L. and Takacs, B. (2022), *System Design for Sustainability in Practice*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RM).
- Vezzoli, C. and Manzini, E. (2008), "Review – Design for sustainable consumption and production systems", in Tukker, A., Charter, M., Vezzoli, C., Stø, E. and Andersen, M. M. (eds), *System Innovation for Sustainability I – Perspectives on Radical Changes to Sustainable Consumption and Production*, Routledge, London, Chapter 28, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781351280204 [Accessed 25 March 2023].
- Vitali, I., Paracolli, A. and Arquilla, V. (2022), "The role of design in the era of conversational interfaces", in Spallazzo, D. and Sciannamè, M. (eds), *Embedding Intelligence – Designing reflections on AI-infused Products*, FrancoAngeli, Milano, pp. 77-86. [Online] Available at: researchgate.net/publication/363335630\_EMBEDDING\_INTELLIGENCE\_Designerly\_reflections\_on\_AI-infused\_products [Accessed 25 March 2023].
- Wohlschlager, D., Neitz-Regett, A. and Lanzinger, B. (2021), "Environmental Assessment of Digital Infrastructure in Decentralized Smart Grids", in *2021 IEEE 9th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, IEEE, pp. 13-18. [Online] Available at: doi.org/10.1109/SEGE52446.2021.9535061 [Accessed 25 March 2023].
- Wu, C.-J., Raghavendra, R., Gupta, U., Acun, B., Ardalan, N., Maeng, K. et alii (2022), "Sustainable AI – Environmental implications, challenges and opportunities", in Marculescu, D., Chi, Y., and Wu, C. (eds), *Proceedings of Machine Learning and Systems*, vol. 4, pp. 795-813. [Online] Available at: doi.org/10.48550/arXiv.2111.00364 [Accessed 25 March 2023].
- Zaffagnini, T. and Morganti, L. (2022), "Data-driven LCA per l'innovazione industriale green delle facciate continue customizzate | Data-driven LCA for green industrial innovation of custom curtain walls", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 94-105. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1292022 [Accessed 25 March 2023].