

ARTICLE INFO

Received	12 September 2023
Revised	16 October 2023
Accepted	22 October 2023
Published	31 December 2023

IL DESIGN MODULARE VERSO L'ECONOMIA CIRCOLARE

Dal 'fare per disfare' al 'fare per rifare'

MODULAR DESIGN TOWARDS THE CIRCULAR ECONOMY

From 'making to unmake' to 'making to remake'

Lucia Pietroni, Alessandro Di Stefano, Daniele Galloppo

ABSTRACT

Alla luce del recente dibattito sulla transizione verso l'Economia Circolare le strategie di Design for Modularity assumono un ruolo determinante nel processo di trasformazione dell'attuale modello economico da lineare a circolare. Attraverso la descrizione di alcuni casi-studio di prodotti modulari, recentemente sviluppati, l'articolo intende tratteggiare la riflessione, sviluppata nell'ambito della cultura del design per la sostenibilità, sul concetto di modularità che, negli ultimi anni, è passata dalla logica industriale del 'fare per disfare', ovvero, concepire prodotti modulari e disassemblabili soprattutto per riciclarne i materiali a fine vita, alla logica del 'fare per rifare', al fine di incrementare la loro circolarità e durabilità, rendendoli riutilizzabili, riparabili e rifabbricabili. L'obiettivo del contributo è riesaminare il concetto di 'modularità' nello scenario dell'Economia Circolare, quale leva strategica progettuale per allungare la vita utile dei prodotti industriali.

Given the recent debate regarding the transition to the Circular Economy, Design for Modularity strategies play a decisive role in the process of transforming the current economic model from linear to circular. By describing some recently developed modular product case studies, this article intends to outline the considerations developed in the field of design culture for sustainability, on the concept of modularity. In recent years, this has shifted from the industrial logic of 'making to unmake', namely designing modular and disassemblable products mainly to recycle their end-of-life materials, to the logic of 'making to remake', to increase their circularity and durability, thereby making them reusable, repairable and re-manufacturable. The objective of this contribution is to re-examine the concept of 'modularity' in the Circular Economy scenario, as a strategic design lever to extend the useful life of industrial products.

KEYWORDS

design modulare, economia circolare, riparabilità, rifabbricabilità, durabilità

modular design, circular economy, reparability, re-manufacturability, durability

Lucia Pietroni is a Full Professor of Industrial Design at the SAAD of the University of Camerino (Italy), where she is the Director of the Master in Eco-design & Eco-innovation. She is a founding member of SID (Italian Design Society) and a member of the Board of Directors since 2018; she has served as President of EcodesignLab Srl, a spin-off of UniCam, since 2013. Her main research areas are sustainable and bio-inspired design, design for safety, and design-led innovation processes. E-mail: lucia.pietroni@unicam.it

Alessandro Di Stefano, Designer, is a PhD Candidate in Innovation Design at SAAD, University of Camerino (Italy). His research focuses on circular design as well as the potential of digital fabrication through the investigation of critical production, technical and aesthetic issues in industrial design. E-mail: alessandro.distefano@unicam.it

Daniele Galloppo, Designer, is a Researcher in Industrial Design at SAAD, University of Camerino (Italy). He conducts research mainly in the field of design for environmental sustainability, focusing on the contribution made by innovative materials and production processes for the evolution of industrial products and on the Design for Safety. He is a founding member of EcodesignLab Srl as of 2013. E-mail: daniele.galloppo@unicam.it



L'articolo ha l'obiettivo di ridiscutere i concetti di 'modularità' e di 'design modulare' alla luce del recente dibattito sulla transizione verso l'Economia Circolare che, nel riconoscere un ruolo strategico alla progettazione nella trasformazione dell'attuale modello economico da lineare a circolare, evidenzia l'importanza del design modulare quale strategia progettuale per allungare la vita utile dei prodotti, rendendoli riutilizzabili, manutenibili, riparabili, aggiornabili e rifabbricabili (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Charter, 2018).

La prima parte del contributo affronta il concetto di Design for Modularity (DfM) nella cultura imprenditoriale e progettuale del 'fare per disfare', ossia di prodotti disassemblabili concepiti soprattutto per recuperare e riciclare i materiali a fine vita. La seconda parte si focalizza sulla descrizione di tre casi-studio di prodotti modulari, recentemente sviluppati, per rilevare le strategie di DfM sviluppate a favore di una logica del 'fare per rifare', ossia per concepire prodotti sostenibili secondo i criteri dell'Economia Circolare. Attraverso la revisione della letteratura e la descrizione dei casi-studio, l'articolo intende tratteggiare la riflessione attuale, sviluppata nell'ambito della cultura del design per la sostenibilità, sul concetto di modularità come strategia per incrementare la circolarità e la durabilità dei prodotti, in particolare in riferimento ai radicali cambiamenti del sistema di produzione e consumo necessari per realizzare la transizione verso l'Economia Circolare (Lacy and Rutqvist, 2015; van der Berg and Bakker, 2015).

Fin dagli anni '90 gli studiosi che si sono occupati di Eco-design o Design per la Sostenibilità ambientale hanno definito e approfondito le strategie di Design for Disassembling (DfD) per facilitare in via prioritaria il riciclo dei componenti e dei materiali di un prodotto (Keoleian and Menerey, 1994; Manzini and Vezzoli, 1998; Bryant et alii, 2004; Machado and Morioka, 2021). L'architettura dei prodotti, soprattutto quelli a elevata complessità, veniva rivista e semplificata lavorando sulla modularità del prodotto come strategia di standardizzazione per generare piattaforme produttive che, da un numero limitato di componenti, potessero sviluppare differenti configurazioni di prodotti finiti (Ulrich, 1994; Miller and Elgård, 1998; Bordignon, 2009; Yan and Feng, 2013, Crippa et alii, 2023).

Le soluzioni di DfM, inoltre, consentivano di razionalizzare costi e tempi di produzione, di incrementare la flessibilità produttiva e la personalizzazione dei prodotti, di ridurre il consumo di risorse e migliorare notevolmente le possibilità di disassemblaggio delle componenti e il riciclo dei materiali a fine vita (Jacobs, Vickery and Droge, 2007; Umeda et alii, 2008). In questi anni, la concezione modulare dei prodotti, anche attraverso la realizzazione di progetti pilota di piattaforme di disassemblaggio (elettrodomestici, automobili, ecc.), ha rappresentato una strategia capace di coniugare benefici ambientali ed economici, facendo crescere una cultura imprenditoriale e progettuale del 'fare per disfare' e consentendo di sviluppare un importante know how sui processi di riciclo, sui materiali riciclati e sulle loro prestazioni.

Oggi, nella transizione verso l'Economia Circolare, il design modulare acquista nuova importanza come strategia progettuale per ridurre drasticamente la produzione di rifiuti, concependo prodotti in un'ottica di 'fare per rifare' che possano

essere disassemblati, in primo luogo per allungarne la vita utile e, solo in ultima istanza, per riciclare i loro materiali valorizzandoli in materie seconde di elevata qualità (van der Berg and Bakker, 2015; Sonogo, Echeveste and Debarba, 2018). Pertanto, considerato il nuovo modello economico, la modularità dei prodotti deve essere concepita per essere funzionale alla strategia delle 3R, Ridurre / Riusare / Riciclare, ovvero minimizzare la produzione di rifiuti, riusare il maggior numero di componenti rendendo i prodotti riparabili, manutenibili, aggiornabili, rifabbricabili e, infine, riciclabili.

In questo nuovo scenario, in cui le strategie progettuali prioritarie sono legate alla durabilità dei prodotti, la modularità diventa un requisito fondamentale per trasformare la 'fase di uso' in riuso, manutenzione, riparazione e la 'fase di produzione' in aggiornamento / rinnovamento e rifabbricazione (Soh, Ong and Nee, 2014; Machado and Morioka, 2021). Di seguito vengono discussi gli approcci di DfM, evidenziandone i benefici e i possibili sviluppi nella trasformazione dell'attuale modello economico da lineare a circolare, in quanto strategia progettuale significativa per l'allungamento della vita dei prodotti, per l'incremento della loro intensità d'uso, per lo sviluppo di nuovi modelli di business circolari che consolidino una cultura imprenditoriale del 'fare per rifare' e non solo del 'fare per disfare'.

La modularità per 'disfare' | Sin dall'inizio dell'industrializzazione la progettazione orientata alla modularità, generata attraverso un processo di standardizzazione e razionalizzazione dei moduli, ha rappresentato una strategia efficace per aumentare l'efficienza produttiva e la competitività delle imprese. La modularità rappresenta infatti un principio di progettazione di fondamentale importanza, sia per rispondere alla 'personalizzazione di massa', in cui una vasta gamma di prodotti è ottenuta combinando moduli standardizzati e gestiti in piattaforma (Miller and Elgård, 1998; Baldwin and Clark, 1999; Bask et alii, 2010) sia, specialmente oggi, per facilitare il disassemblaggio delle componenti e il riciclaggio a fine vita dei materiali (Bordignon, 2009; Ijomah et alii, 2010; Mital et alii, 2014). Alla fine degli anni '90 Salhieh e Kamrani (1999) presentano un modello di progettazione per la modularità, che considera tanto la scomposizione delle funzioni dei prodotti quanto la creazione di piattaforme, ovvero varietà dello stesso prodotto costruite attorno a un'unità centrale di base alla quale possono essere aggiunti moduli diversi. Tale approccio, definito anche con il concetto di 'commonality', propone un modulo come un'unità funzionale essenziale che ha una propria autonomia rispetto al prodotto del quale è parte: la sua sostituzione con un altro crea una nuova variante di prodotto e favorisce la formazione di famiglie sviluppate attorno a una piattaforma specifica (Sanderson and Uzumeri, 1997; Abdullah, Kamaruddin and Ripin, 2008).

La modularità, dunque, è funzionale all'ottimizzazione di prodotti e componenti, favorisce il perfezionamento continuo e l'adattabilità alle mutevoli esigenze espresse dal mercato e dagli utenti ed è fortemente correlata allo scenario di fine vita. L'intersezione tra modularità e sostenibilità è stata oggetto di diversi studi come quello svolto negli Stati Uniti nel 2004 da un gruppo di ingegneri che si è focalizzato sulla progettazione di metodi mirati

a integrare la sostenibilità ambientale nello sviluppo dei prodotti sviluppando il concetto di modularità nel loro intero ciclo di vita (Bryant et alii, 2004). L'obiettivo era ottimizzare la sostenibilità attraverso un approccio modulare che considerasse la facilità di riciclo, lo smontaggio agevole e la riduzione delle risorse impiegate fin dalla fase di sviluppo.

In un altro studio condotto da Newcomb, Bras e Rosen (1998) l'attenzione è stata rivolta al legame tra progettazione modulare e ciclo di vita dei prodotti con l'obiettivo di sviluppare architetture che fossero in grado di ridurre gli impatti ambientali. La loro ricerca partiva dall'assunto che l'architettura di un prodotto gioca un ruolo cruciale nel determinare aspetti quali l'assemblaggio, lo smontaggio, il riciclo e il servizio al termine della vita utile del prodotto. Un elevato indice di modularità può portare, dunque, sia a un significativo contributo in termini di riciclo e recupero dei materiali che a una sensibile riduzione dei costi legati all'assemblaggio, allo smontaggio e alla manutenzione. Pertanto, per la cultura del design sostenibile, fin dagli anni '90, la modularità ha rappresentato un requisito di prodotto fondamentale per consentire il disassemblaggio e il riciclo dei componenti, ovvero un concetto-chiave per incrementare la cultura del 'fare per disfare'.

La modularità per 'rifare' | Come già evidenziato la modularità non è, quindi, un concetto nuovo nel mondo del design industriale, ma oggi sta assumendo una nuova caratterizzazione. Oltre all'interfaccia e alla componibilità tradizionali l'accento è posto sull'abilità di aggiornare, riparare e sostituire parti non più funzionanti, nonché sull'implementazione di funzionalità più avanzate in alcune parti per aumentare la vita utile del prodotto specialmente nei prodotti elettronici. In questo contesto le componenti o i moduli diventano elementi chiave di un concetto di modularità orientato al 'rifare'. Questa nuova visione è emersa nella transizione da un paradigma di progettazione per la disassemblabilità a un paradigma di progettazione per la rifabbricazione (van der Berg and Bakker, 2015).

La base teorica di questo nuovo approccio alla progettazione si è sviluppata attraverso una revisione e un aggiornamento della letteratura tecnico-scientifica, che ha identificato nuovi criteri e parametri chiave. Questi criteri delineano la creazione di prodotti modulari che non solo sono efficienti dal punto di vista della produzione, ma anche nelle fasi d'uso e di dismissione, in quanto la loro modularità è funzionale all'allungamento della loro vita utile. Ogni modulo è studiato con una durata programmata affinché i prodotti siano facilmente disassemblabili per riutilizzarne le componenti più durevoli, aggiornarne la funzionalità, rifabbricarne le parti con una più breve durata.

Il principio alla base di questo approccio al design modulare è che riusare / rifabbricare è più sostenibile di riciclare. Pertanto, si inizia ad affermare una cultura progettuale del 'fare per rifare', che modifica in modo particolare la fase d'uso del prodotto e incentiva modelli di business basati sui servizi di manutenzione, riparazione e rifabbricazione. In questo nuovo scenario si evidenziano due aspetti principali della modularità: uno orientato all'utente e l'altro orientato all'azienda. La modularità per una riparazione fatta dall'utente consente ai consumatori di effettuare semplici interventi

di manutenzione e riparazione sui loro prodotti; dall'altra parte c'è la modularità a favore dell'azienda, che consente di ritirare i prodotti, aggiornarli e rimetterli sul mercato, come prodotti ricondizionati e rigenerati, contribuendo così a estendere il loro ciclo di vita.

Il contesto d'utilizzo e la durata utile del prodotto determinano la strategia DfM da perseguire, infatti, nella progettazione di prodotti manutenibili e ricondizionabili o rifabbricabili viene data priorità al disassemblaggio non distruttivo, mentre il disassemblaggio distruttivo si dimostra più adeguato in ottica di riciclo: la tipologia e la qualità del processo di disassemblaggio o, meglio, delle connessioni e degli elementi di fissaggio, diventa determinante per il fine vita e merita pertanto particolare attenzione (Peeters et alii, 2012; Mital et alii, 2014).

Gli autori van der Berg e Bakker (2015) sottolineano l'importanza del concetto di 'remake' nell'ambito della circolarità dei prodotti, termine che comprende una serie di azioni intraprese quando un prodotto ritorna dal cliente all'azienda, contribuendo così a renderlo effettivamente circolare. Affinché si possano generare le condizioni per lo sviluppo di prodotti modulari per il remake, i moduli devono essere progettati in modo da consentire riparazioni e aggiornamenti efficaci, il che implica l'adozione di interfacce standardizzate e l'implementazione di connessioni reversibili.

Oltre ai criteri di progettazione dei moduli occorre ripensare, all'interno del processo industria-

le e della filiera, a nuovi servizi di supporto per il mantenimento e la durabilità delle prestazioni del prodotto, adottando sistemi di controllo come la prognostica e la diagnostica (ovvero la valutazione dell'affidabilità residua dei componenti) e sviluppando la logistica 'inversa', ossia il recupero da parte delle aziende dei prodotti o dei moduli per procedere con la loro riparazione o rifabbricazione. Pertanto, negli ultimi anni, nella transizione verso l'Economia Circolare, le pratiche progettuali riferite al DfM si focalizzano sull'obiettivo di 'fare per rifare' al fine di incrementare la circolarità e la durabilità dei prodotti, oltre che la loro riciclabilità.

Nei paragrafi successivi vengono analizzati e discussi tre casi studio di prodotti contemporanei, appartenenti a differenti settori merceologici, progettati e realizzati con particolare attenzione ai criteri di modularità e disassemblabilità, al fine di renderli facilmente smontabili, riparabili, aggiornabili, personalizzabili, rifabbricabili, in linea con gli obiettivi di circolarità.

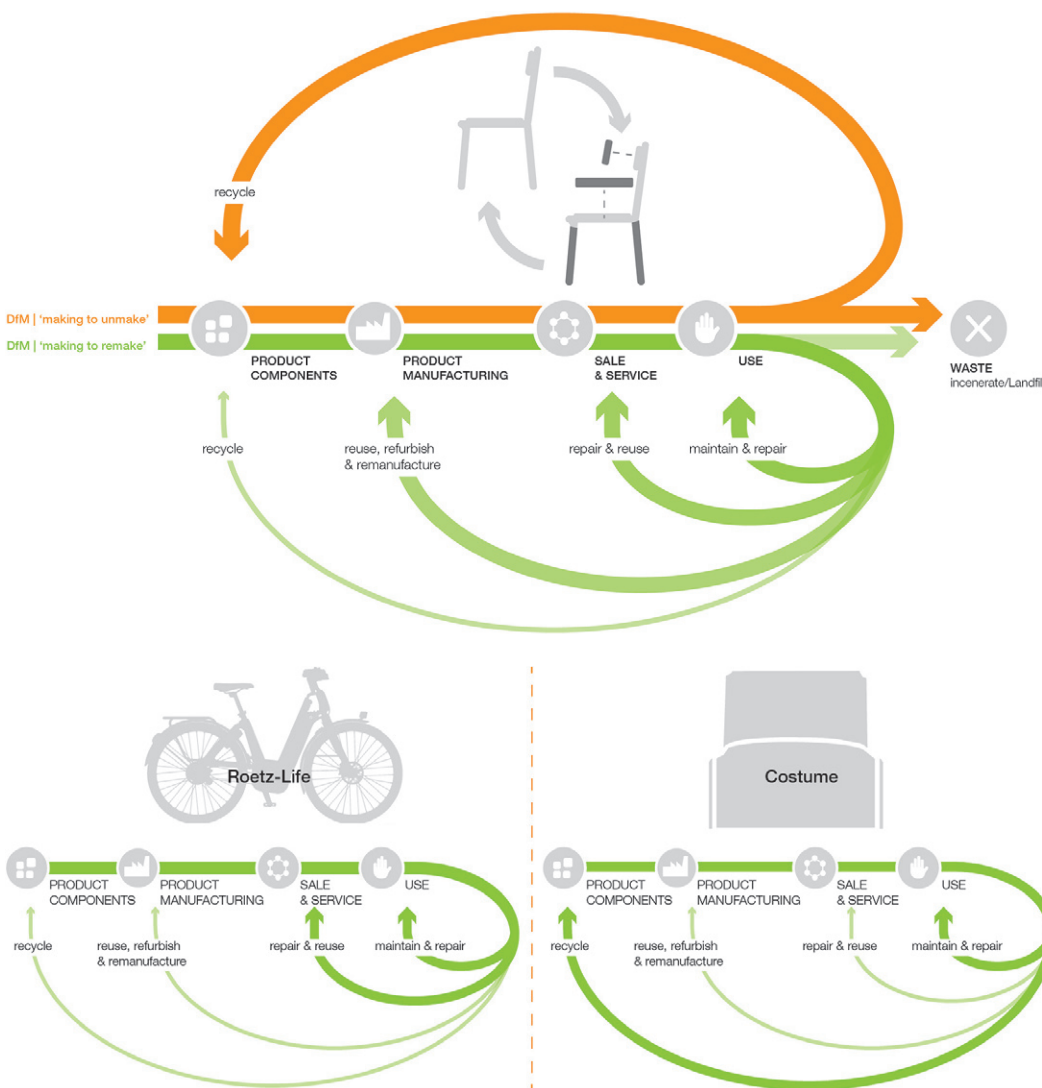
I prodotti sono stati selezionati in base ad anno e Paese di produzione, individuando prodotti recenti di non oltre 5 anni e realizzati in diversi Paesi, al loro essere concepiti a piattaforma e all'impiego di strategie DfM finalizzate a riparare e aggiornare, incrementare la durabilità tecnica ed estetica, riutilizzare e rifabbricare. I casi studio identificano approcci differenti alla circolarità che vanno ben oltre la riciclabilità dei materiali attraverso un utilizzo del design modulare per l'allungamento

della vita utile dei prodotti e/o dei loro componenti (Figg. 1, 2).

La bicicletta Roetz Life: la modularità per incrementare la riparazione e l'upgrading

Nel nord Europa la mobilità urbana sostenibile, attraverso l'ampio utilizzo di biciclette e di servizi ad esso connessi, è da molti anni entrata a far parte della cultura locale e della quotidianità, sebbene ogni anno più di un milione di biciclette diventa rifiuto e talvolta senza essere mai state utilizzate (Bakker et alii, 2017). In risposta a ciò l'azienda olandese Roetz-Bikes ha sviluppato Roetz Life, un concetto di bicicletta elettrica customizzabile e 'circolare' per durare nel tempo e ridurre drasticamente il rischio di generare scarti e rifiuti (Fig. 3). L'architettura della Roetz Life (Fig. 4) si articola in cinque moduli assemblati secondo una precisa gerarchia: il modulo telaio (a); il modulo batteria (b); il modulo ruota (c); il modulo di trasmissione (d); il modulo freni (e).

L'approccio DfM adottato nello sviluppo di Roetz Life è orientato soprattutto a generare un prodotto configurato per essere facilmente manutenibile e aggiornabile nel tempo, attraverso il canale di vendita dell'azienda e un servizio di supporto alla manutenzione per incentivare riparazione e riutilizzo delle componenti. Il cuore del progetto è il design altamente innovativo del telaio (Fig. 5), pensato come scheletro modulare in cui tutti i componenti sono interconnessi in modo reversibile così da poter essere disassemblati e so-



Figg. 1, 2 | The first diagram depicts the pattern of material and component flow according to the two different approaches of DfM, the traditional 'making to unmake' approach oriented toward recyclability, and the 'making to remake' approach oriented toward the development of durable and circular products that are easily maintained, reusable, remanufacturable, and ultimately recyclable (credit: UniCam). The second image refers to the analysed case studies: for each product, it is possible to identify the main end-of-life scenarios optimised by DfM strategies, highlighted by the flows of materials and components that fall within certain stages of the production process (credit: UniCam).

Next page

Figg. 3, 4 | Roetz Life modular electric bicycle, urban-bike version; Components and main modules (frame 'a'; battery 'b'; wheel 'c'; transmission 'd'; brakes 'e') that make up the architecture of the bicycle (credits: Roetz-Bikes).

stituiti indipendentemente dallo stato di usura o danneggiamento degli altri.

I principali criteri progettuali che hanno condotto alla definizione dell'architettura del prodotto sono stati: la realizzazione di un telaio monolitico che integra alcune componenti (ad esempio i tubi per il manubrio e il sellino), accoglie i moduli e gli accessori e si presta alla customizzazione e alla coverizzazione; la scelta di lasciare a vista gli snodi e la minuteria, per far comprendere all'utente in modo più intuitivo dove e come disassemblare le parti; l'esclusione di componenti saldate e la sostituzione con sistemi di accoppiamento per incastro e con minuteria standard (specialmente per il modulo batteria e trasmissione); la realizzazione di sistemi di connessione reversibili che offrono la possibilità all'utente di riparare o sostituire delle componenti per cambiare e ampliare le prestazioni del prodotto, ad esempio per passare dalla versione 'urban' alla versione per il 'delivery' (Fig. 6); l'implementazione di una serie di sensori che conferiscono 'intelligenza' al prodotto per permettere un monitoraggio continuo dello stato di usura delle parti più sollecitate.

Sebbene il concetto DfM per il prodotto Roetz rappresenti un caso virtuoso di circolarità, si segnala la criticità del servizio di manutenzione offerto: oltre ad essere poco chiare le sue modalità di fruizione, il servizio è ancora vincolato all'area geografica di residenza dell'azienda, aspetto questo che limita la possibilità di estendere la riparazione della e-bike, e di conseguenza anche la sua commercializzazione, in altri Paesi.

La poltrona Costume: la modularità per incrementare la durabilità tecnica e estetica | Se in passato il concetto di durabilità era un assunto base per molti prodotti, oggi, dopo anni di affermazione dell'obsolescenza programmata, tornare a creare prodotti 'senza tempo' è quasi una rivoluzione, specialmente nei settori abbigliamento e arredo, dove all'obsolescenza tecnica accelerata si aggiunge obsolescenza estetica dei prodotti indotta dalle mode e dai trend. Tuttavia, si sta cercando di invertire questa tendenza 'usa e getta' che si è affermata nel settore arredo.

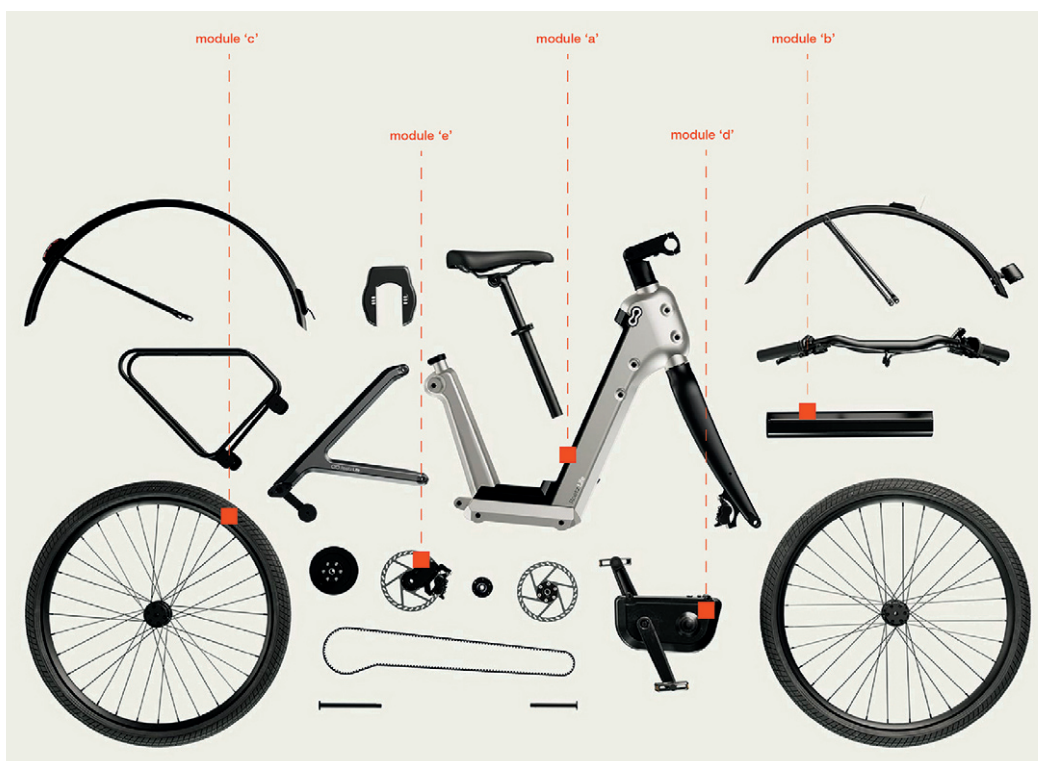
Un caso studio molto interessante di arredo che utilizza il design modulare per frenare l'obsolescenza tecnica ed estetica e incrementare la durabilità del prodotto è la poltrona Costume, nata dalla collaborazione tra l'azienda Magis e il designer Stefan Diez, secondo il quale l'arredo può essere paragonato al sistema dell'alfabeto, dove la corretta articolazione delle lettere o dei moduli produce frasi, storie e progetti differenti. Il linguaggio progettuale del sistema componibile Costume rispecchia perfettamente questa filosofia progettuale, reinterpretando il tradizionale modo di costruire le poltrone in un processo di componibilità utile alla circolarità.

La poltrona Costume, e in particolare la versione Armchair (Figg. 7, 8), è stata concepita secondo un'architettura modulare semplificata di quattro unità ('a'+ 'b'+ 'c'+ 'd'), in grado di generare un sistema componibile, manutenibile e aggiornabile, che offre la possibilità all'utente finale di riconfigurare e personalizzare il prodotto con facili operazioni di disassemblaggio e assemblaggio.

Il modulo 'a', il nucleo della poltrona, è un corpo realizzato in polietilene riciclato con la tecnologia dello stampaggio rotazionale, ideato per sem-

plificare le fasi di montaggio e accogliere gli altri moduli attraverso incastri e giustapposizioni. Il sedile è generato dall'accoppiamento di un inserto in molle (il modulo 'b') e uno strato di poliuretano (il modulo 'c'): questa soluzione non solo utilizza molta meno schiuma rispetto ai divani convenzionali, ma è facilmente disassemblabile per permettere il riciclo a fine vita; la parte morbida della poltrona è completata dal modulo 'd', un rivestimento in tessuto che all'occorrenza può essere rimosso, tramite quattro anelli elastici allacciati al nucleo (Fig. 9). Un'altra grande innovazione di Costume è la creazione e l'utilizzo di altre due unità, il 'bracciolo' e il 'connettore di plastica' (Fig. 10), che in-

sieme agli altri moduli permettono di generare un sistema a piattaforma con diverse possibilità di configurare le versioni previste dalla collezione (Fig. 11). Nella maggior parte dei casi, i divani sono prodotti di arredo composti da molti materiali uniti tra loro in modo irreversibile, rendendo quasi impossibile la riparazione di parti usurate e il riciclo dei vari componenti. Diversamente, l'approccio DfM adottato nello sviluppo di Costume intende incrementare la durabilità e ridurre l'obsolescenza estetica e tecnica attraverso due criteri progettuali: l'estrema semplificazione dell'architettura del prodotto e lo sviluppo di un sistema di disassemblaggio 'user friendly'.



Tuttavia nonostante l'elevato indice di disassemblabilità del prodotto, che ne consente sia una buona manutenibilità che aggiornabilità estetica, non è stato sviluppato un servizio ad hoc per il recupero ed il riutilizzo dei moduli: lo scenario di fine vita di Costume, ossia il riciclo delle componenti, è ancora di responsabilità dell'utente finale, mentre l'attivazione di un servizio come questo aggiungerebbe valore all'intera filiera, incentivando il cambiamento verso un modello circolare e più sostenibile (Fagnoni and Olivastri, 2019).

Il notebook Concept Luna: la modularità per incrementare la rifabbricazione | La maggior parte dei prodotti elettronici di consumo sono realizzati secondo un principio di obsolescenza programmata dei componenti e con una precisa durata della loro vita utile. Inoltre, quasi sempre, il consumatore finale si trova ad avere la responsabilità del fine vita di questi prodotti difficili da disassemblare per un corretto riciclo, nonostante esista una Direttiva Europea che definisce la Responsabilità Estesa del Produttore (European Parliament and the Council of the European Union, 2018). Infatti, negli ultimi anni, alcune delle grandi aziende di elettronica stanno ripensando i loro prodotti per estenderne la vita utile, specialmente attraverso i servizi di riparazione e ricondizionamento. Tra queste la Dell sta sviluppando nuovi concetti di notebook modulari, ideati per essere facilmente disassemblati, aggiornati, riparati o ricondizionati. È il caso del Concept Luna, un prototipo di notebook realizzato con moduli a incastro che, diversamente dai prodotti tradizionali, permettono di smontare le componenti più importanti senza svitare una vite o scollare le superfici (Fig. 12).

Il prodotto è caratterizzato da uno chassis in alluminio dotato di una chiave speciale che permette di rimuovere una striscia sopra la tastiera, e quindi disassemblare tutti i componenti. Ogni componente rappresenta un modulo funzionale del notebook aggregato ad altri con sistemi a in-

castro e interconnesso secondo un preciso layout che definisce la gerarchia generale dell'assieme del PC (Fig. 13): il modulo strutturale 'a', lo chassis, ha la funzione di accogliere tanto i moduli che forniscono le prestazioni di calcolo e autonomia energetica (il modulo scheda madre 'b', la batteria 'c', ecc.) quanto i moduli per l'interfaccia e l'interazione con il notebook (modulo tastiera 'd' e il modulo display 'e').

A supporto di questo nuovo concept Dell ha ideato una 'micro-factory' che impiegherà robot specializzati nel disassemblaggio dei moduli e la telemetria per diagnosticare lo stato di salute dei singoli componenti (Fig. 14). Questo nuovo modello industriale per la circolarità rappresenta la vera opportunità per innescare, come sostiene Dell Technologies, un cambiamento epocale nel settore della produzione di notebook, generando un nuovo sistema di prodotto-servizio in grado di comprendere meglio quali componenti possono essere riutilizzati, ricondizionati o riciclati, ed infine, rifabbricati. Il Concept Luna esprime una filosofia di DfM principalmente orientata a rendere il prodotto facilmente disassemblabile per il ricondizionamento e la rifabbricazione delle parti: tale approccio è stato ulteriormente ottimizzato attraverso l'implementazione della robotica e della telemetria e sollevando l'utente dalla responsabilità di dismettere il prodotto a fine vita.

Questo tipo di tecnologia permette di sistematizzare e processare grandi quantità di dati, favorendo le condizioni necessarie affinché si mettano in pratica i cicli di interconnessione previsti dall'Economia Circolare (Barbero and Ferrulli, 2023). Il concept Dell è in fase prototipale, ma sarà interessante capire quale sarà l'evolversi del prodotto; magari si immetteranno sul mercato altre versioni che implementino i moduli sviluppati per la generazione di prodotti con il monitor più grande, oppure con un nuovo packaging specifico per la logistica e il servizio di riparazione e aggiornabilità previsto nella 'micro-factory'.

Conclusioni | La modularità ha avuto da sempre un ruolo importante nel processo di industrializzazione dei prodotti complessi per ottenere la massima standardizzazione ed elevati vantaggi di efficienza produttiva. Scomponendo un prodotto in componenti modulari le aziende sono riuscite a ottimizzare i tempi e i costi di produzione e di assemblaggio dei prodotti, incrementandone anche l'affidabilità, in quanto i moduli difettosi potevano essere facilmente identificati e sostituiti, nell'ottica di tendere a 'zero difetti'.

Più di recente, con l'affermarsi delle problematiche ambientali e dei temi della sostenibilità dei prodotti, il concetto di modularità ha assunto un nuovo valore nella progettazione industriale, diventando un pre-requisito determinante per migliorare specialmente il fine vita dei materiali. Nella cultura del design per sostenibilità, fin dagli anni '90, si sono affermati criteri e metodi di progettazione finalizzati al 'disfare' ovvero a rendere i prodotti disassemblabili per facilitare la separazione dei componenti da conferire alle piattaforme di riciclo.

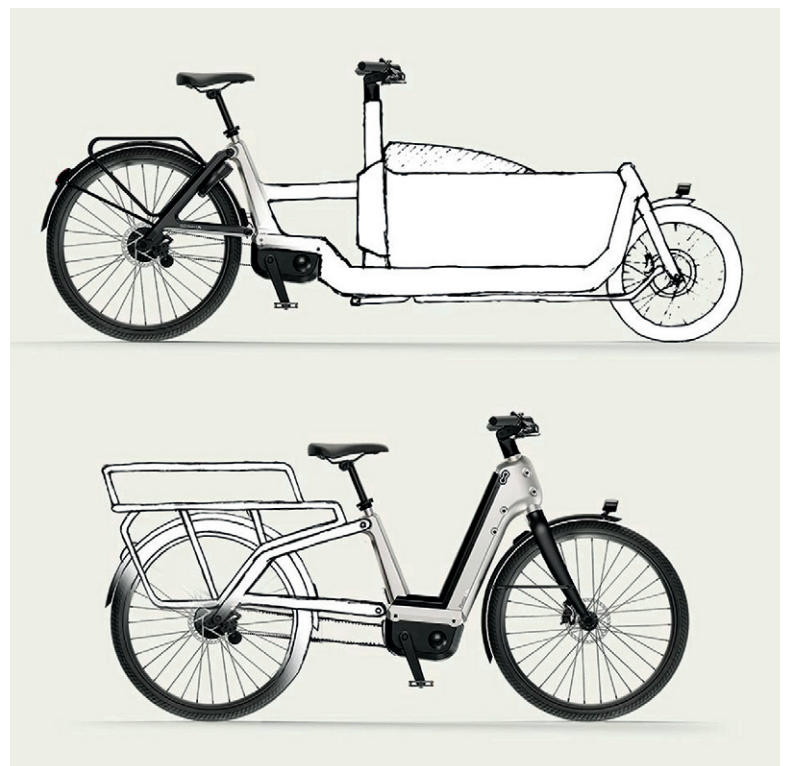
L'attuale fase di transizione verso l'Economia Circolare ha ulteriormente trasformato il concetto di modularità, che oggi svolge un ruolo cruciale per l'estensione della durata della vita utile dei prodotti e per consentire la rifabbricazione e il riutilizzo, oltre che il riciclaggio. Stiamo assistendo infatti a una trasformazione del concetto di modularità dei prodotti che diventa funzionale non solo a incrementare la loro sostenibilità ambientale ma soprattutto la loro circolarità. Il design modulare è diventato una strategia progettuale che supporta una cultura del 'fare per rifare', oltre che del 'fare per disfare' la quale ne rimane la base metodologica di partenza.

Il design modulare è oggi finalizzato in primo luogo a 'ridurre' e 'riusare' e poi a 'riciclare'. I casi studio descritti evidenziano questa transizione della cultura del design dal 'disassembling' al 're-making', ovvero sottolineano come la modularità, nello sviluppo di nuovi prodotti, possa essere una



Fig. 5 | View of the Roetz Life frame (module 'a'), designed to accommodate all product modules (credit: Roetz-Bikes).

Fig. 6 | Concept of the cargo module to transform the urban version of the Roetz-bike to the delivery version (credit: Roetz-Bikes).





Figg. 7, 8 | Costume Armchair and main modules of the Armchair version: the armchair core 'a'; the seat, composed of a spring insert 'b' and a polyurethane layer 'c'; the fabric cover 'd' (credit: Magis).

strategia declinabile in modi diversi per le differenti tipologie merceologiche di prodotto (mezzi di trasporto, arredi, elettronica di consumo, etc.) al fine di allungare la loro vita utile, rendendo gran parte delle loro componenti riutilizzabili e rifabbricabili, trasformando i modelli di business delle aziende che, da fornitrici di prodotti, diventano erogatrici di nuovi servizi di manutenzione, riparazione, aggiornamento e rifabbricazione.

Il percorso verso una nuova concezione del fine vita dei prodotti attraverso le strategie del DfM appare per alcuni settori ancora lungo e in attesa di ulteriori sviluppi: la mancanza di servizi di riparazione e rifabbricazione, implementati quasi esclusivamente nel settore elettronico, rappresenta la principale barriera per un cambiamento radicale verso un modello di business più circolare. Tuttavia negli ultimi anni molte aziende del manifatturiero, stimolate anche dalla ricezione di nuove normative come la Direttiva Ecodesign 2009/125/CE (European Commission, 2023), stanno iniziando a mettere in campo delle pratiche progettuali volte al miglioramento delle performance ambientali di prodotto e, in questo senso, il design modulare diventa la più importante strategia progettuale per raggiungere questi obiettivi e realizzare prodotti e prodotti-servizi realmente circolari.

The article aims to re-discuss the concepts of 'modularity' and 'modular design' in light of the recent debate on the transition to the Circular Economy that, in recognising a strategic role for design in the transformation of the current economic model from linear to circular, highlights the importance of modular design as a design strategy to extend the useful life of products, making them reusable, maintainable, repairable, upgradable and remanufacturable (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Charter, 2018).

The first part of the contribution deals with the Design for Modularity (DfM) concept in the entrepreneurial and design culture of 'making to unmake', that is, disassembling products designed especially to recover and recycle end-of-life materials. The second part focuses on describing three

recently developed case studies of modular products to detect DfM strategies developed in favour of a 'making to remake' logic, i.e., to design sustainable products according to Circular Economy criteria. Through literature review and case-study description, the article intends to outline the current reflection, developed within the culture of design for sustainability, on the concept of modularity as a strategy to increase the circularity and durability of products, in particular with reference to the radical changes in the production and consumption system necessary to achieve the transition to the Circular Economy (Lacy and Rutqvist, 2015; van der Berg and Bakker, 2015).

Since the 1990s, scholars concerned with Eco-design or Design for Environmental Sustainability have defined and explored Design for Disassembling (DfD) strategies to make it easier to recycle a product's components and materials as a priority (Keoleian and Menerey, 1994; Manzini and Vezzoli, 1998; Bryant et alii, 2004; Machado and Morioka, 2021). Product architecture, especially that of products with high complexity, was being revised and simplified by working on product modularity as a standardisation strategy to generate production platforms that, from a limited number of components, could develop different configurations of finished products (Ulrich, 1994; Miller and Elgård, 1998; Bordignon, 2009; Yan and Feng, 2013, Crippa et alii, 2023). In addition, DfM's solutions made it possible to rationalise production costs and time, increase production flexibility and product customisation, reduce resource consumption, and significantly improve the possibilities for the disassembly of components and recycling of end-of-life materials (Jacobs, Vickery and Droge, 2007; Umeda et alii, 2008). In recent years, modular product design has been a strategy capable of combining environmental and economic benefits, growing an entrepreneurial and design culture of 'making to unmake' and enabling the development of important know-how on recycling processes, recycled materials and their performance, also through the implementation of pilot projects of disassembly platforms (home appliances, automobiles, etc.).

Today, in the transition toward the Circular Economy, modular design acquires new importance as

a design strategy to drastically reduce waste production, conceptualising products with a 'making to remake' perspective that can be disassembled, primarily to extend their useful life and, only as a last resort, to recycle their materials by valorising them into high-quality secondary materials (van der Berg and Bakker, 2015; Sonego, Echeveste and Debarba, 2018). Therefore, given the new economic model, product modularity must be designed to be functional to the 3Rs strategy, Reduce / Reuse / Recycle, i.e., minimise waste generation, reuse as many components as possible by making products repairable, maintainable, upgradeable and remanufacturable, and, finally, recyclable.

In this new scenario, where priority design strategies are related to product durability, modularity becomes a fundamental requirement to transform the 'use phase' into reuse, maintenance, repair and the 'production phase' into upgrade / renewal and remanufacturing (Soh, Ong and Nee, 2014; Machado and Morioka, 2021). DfM approaches are discussed below, highlighting their benefits and possible developments in the transformation of the current economic model from linear to circular, as a significant design strategy for extending the life of products, increasing their intensity of use, and developing new circular business models that consolidate a business culture of 'making to remake' and not just 'making to unmake'.

Modularity to 'unmake' | Since the beginning of industrialisation, modularity-oriented design, generated through a process of standardisation and rationalisation of modules, has been an effective strategy for increasing production efficiency and company competitiveness. Indeed, modularity is a key design principle, both in response to 'mass customisation', in which a wide range of products is achieved by combining standardised, platform-managed modules (Miller and Elgård, 1998; Baldwin and Clark, 1999; Bask et alii, 2010) and, particularly today, to facilitate disassembly of components and end-of-life recycling of materials (Bordignon, 2009; Ijomah et alii, 2010; Mital et alii, 2014).

In the late 1990s, Salhieh and Kamrani (1999) described a design model for modularity which



Figg. 9-11 | Costume Armchair, Armchair version: Detail of the lacing system between the fabric and the armchair core to proceed with upholstery wash or replacement; Detail of the plastic connector used to join the other modules and the armrest; Layout flexibility and customisation generated through module modularity (credist: Magis).

considers both the decomposition of product functions and the creation of platforms, i.e., varieties of the same product built around a basic central unit to which different modules can be added. This approach, also referred to as 'commonality', views a module as an essential functional unit possessing its own autonomy from the product of which it is a part: its replacement with another module creates a new product variant and promotes the creation of families developed around a specific platform (Sanderson and Uzumeri, 1997; Abdullah, Kamaruddin and Ripin, 2008). Modularity, therefore, is instrumental in optimising products and components, promotes continuous refinement and adaptability to the changing needs expressed by the market and users, and is strongly related to the end-of-life scenario. The intersection of modularity and sustainability has been the subject of several studies, such as one carried out in the United States in 2004 by a group of engineers who focused on designing methods aimed at integrating environmental sustainability into product development by developing the concept of modularity throughout their entire life cycle (Bryant et alii, 2004). The goal was to optimise sustainability through a modular approach that considered ease of recycling, easy disassembly, and reduced resources from the development stage.

Another study conducted by Newcomb, Bras and Rosen (1998) focused on the link between

modular design and product life cycle, with the aim of developing architectures able to reduce environmental impacts. Their research was based on the assumption that a product's architecture plays a crucial role in determining aspects such as assembly, disassembly, recycling, and service at the end of the product's useful life. A high modularity index can lead, therefore, both to a significant contribution in terms of recycling and recovery of materials and to a substantial reduction in costs related to assembly, disassembly and maintenance. Therefore, since the 1990s, modularity has been a fundamental product requirement for sustainable design culture to enable disassembly and recycling of components, i.e., a pivotal concept to increment the culture of 'making to unmake'.

Modularity to 'remake' | As previously stated, modularity is not a new concept in industrial design, but it is taking on a new dimension today. In addition to traditional interface and composability, the emphasis is on the ability to upgrade, repair, and replace parts that no longer work, as well as on implementing more advanced features into specific components to increase product life, especially in electronic products. In this context, components or modules become key elements of a 'remake' oriented concept of modularity. This new vision emerged in the transition from a design paradigm for disassembling to a design paradigm for remanufactur-

ing (van der Berg and Bakker, 2015). The theoretical basis for this new approach to design was developed through a review and update of technical and scientific literature, which identified new criteria and key parameters. These criteria outline the creation of modular products that are efficient from a production standpoint and in the use and disposal phases, as modularity is instrumental in extending their useful life. Each module is designed with a planned lifespan so that products can be easily disassembled to reuse their most durable components, upgrade their functionality, and remanufacture parts with a shorter lifespan.

The principle behind this approach to modular design is that reuse / remanufacturing is more sustainable than recycling. Therefore, a design culture of 'making to remake' is beginning to take root, which particularly alters the product use phase and incentivises business models based on maintenance, repair and remanufacturing services. Two main aspects of modularity are highlighted in this new scenario: one user-oriented and the other business-oriented. Modularity for user-made repairs allows consumers to perform simple maintenance and repair work on their products; on the other hand, there is modularity in favour of the company, which will enable them to retire products, upgrade them, and remarket them as refurbished and remanufactured products, thus helping prolong their life cycle.

The context of use and the product's useful life determine the DfM strategy to be pursued. In fact, when designing maintainable and reconditionable or remanufacturable products, priority is given to non-destructive disassembly, while destructive disassembly proves to be more appropriate from a recycling perspective: the type and quality of the disassembly process or, instead, of the connections and fastening elements, becomes decisive for end-of-life and therefore warrants special attention (Peeters et alii, 2012; Mital et alii, 2014).

Authors van der Berg and Bakker (2015) emphasise the importance of the concept of 'remake' in the context of product circularity, a term that encompasses a series of actions undertaken when a product returns from the customer to the company, thus helping to make it circular effectively. To generate the conditions for developing modular products for the remake, modules must be designed to enable effective repairs and upgrades, which implies the adoption of standardised interfaces and the implementation of reversible connections.

In addition to the module design criteria, it is necessary to rethink new support services within the industrial process and supply chain for the maintenance and durability of product performance, adopting control systems such as prognostics and diagnostics (i.e., evaluation of the residual reliability of components) and developing 'reverse' logistics, i.e., retrieval of products or modules, on behalf of the companies, to proceed with their repair or remanufacturing. Therefore, in recent years, in the transition to the Circular Economy, design practices related to DfM focus on the goal of 'making to remake' to increase the circularity and durability of products, as well as their recyclability.

The following paragraphs analyse and discuss three case studies of contemporary products belonging to different commodity sectors, designed and manufactured with special attention

to the criteria of modularity and disassemblability to make the products easily disassemblable, repairable, upgradable, customisable, and remanufacturable, in line with the goals of circularity.

Products were selected based on year and country of manufacture, identifying recent products that were no more than five years old and made in different countries, on whether they were platform-designed, and on the use of DfM strategies aimed at repairing and upgrading, increasing technical and aesthetic durability, reusing and remanufacturing. The case studies identify different approaches to circularity that go well beyond material recyclability through the use of modular design to extend the useful life of products and/or their components (Figg. 1, 2).

The Roetz Life bicycle: modularity to increase repair and upgrading

In northern Europe, sustainable urban mobility, through the widespread use of bicycles and related services, has been part of local culture and everyday life for many years, although each year more than one million bicycles become waste, sometimes without ever having been used (Bakker et alii, 2017). In response to this, Dutch company Roetz-Bikes developed Roetz Life, a customisable electric bicycle concept that is 'circular' to last over time and drastically reduce the risk of generating waste and scrap (Fig. 3). The architecture of Roetz Life (Fig. 4) is divided into five modules assembled according to a precise hierarchy: the frame module (a); the battery module (b); the wheel module (c); the transmission module (d); and the brakes module (e).

The DfM approach taken in the development of Roetz Life is geared primarily to generating a product configured to be easily maintainable and upgradeable over time, through the company's sales channel and a maintenance support service to incentivise repair and reuse of components. At the heart of the project is the highly innovative design of the frame (Fig. 5), conceived as a modular skeleton in which all components are reversibly interconnected so that they can be disassembled and replaced regardless of the state of wear and

tear or damage to the other components. The main design criteria that led to the definition of the product architecture were: the creation of a monolithic frame that integrates certain components (for example, the tubes for the handlebar and saddle), accommodates modules and accessories, and lends itself to customization and coverization; the choice to leave joints and small parts visible, making it more intuitive for the user to understand where and how to disassemble the parts; the exclusion of welded components and their replacement with interlocking coupling systems and standard small parts (especially for the battery and transmission module); the implementation of reversible connection systems that provide the possibility for the user to repair or replace components to change and extend the performance of the product, for example, to switch from the 'urban' to the 'delivery' version (Fig. 6); the implementation of a series of sensors that make the product 'intelligent', enabling continuous monitoring of the wear status of the most stressed parts.

Although the DfM concept in the case of the Roetz product represents a virtuous case of circularity, it is necessary to point out the critical nature of the maintenance service offered: in addition to being unclear regarding its use, the service is still tied to the company's geographic area of residence, an aspect that limits the possibility of extending e-bike repair, and consequently also its marketing, to other countries.

The Costume armchair: modularity to increase technical and aesthetic durability

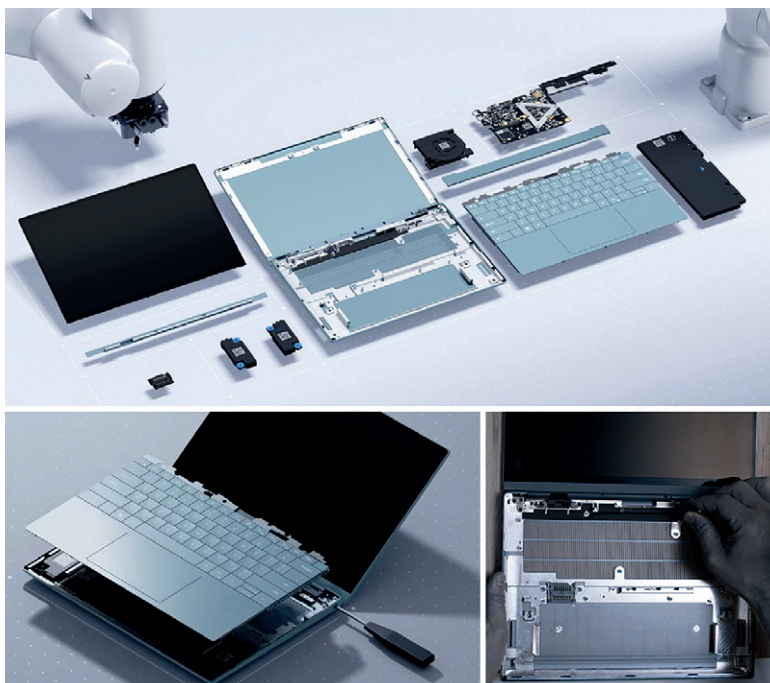
If in the past the concept of durability was a basic assumption for many products, today, in the wake of years of affirmation of planned obsolescence, going back to creating 'timeless' products is almost a revolution, especially in the apparel and furniture sectors, where accelerated technical obsolescence is compounded by aesthetic obsolescence of products driven by fashion and trends. However, efforts are being made to reverse this 'disposable' trend that has taken hold in the furniture industry. The Costume Armchair, a collaboration between

Magis and designer Stefan Diez, is a fascinating case study of furniture that uses modular design to slow down technical and aesthetic obsolescence and increase product durability. According to Diez, furniture can be compared to the alphabet system, where the correct articulation of letters or forms produces different sentences, stories and projects. The design language of the Costume modular system perfectly reflects this design philosophy, reinterpreting the traditional way of constructing armchairs in a process of useful modularity for circularity.

The Costume armchair, and especially the Armchair version (Figg. 7, 8), has been designed according to a simplified modular architecture of four units ('a'+ 'b'+ 'c'+ 'd'), capable of generating a modular, maintainable and upgradeable system that offers the end user the opportunity to reconfigure and customise the product with easy disassembly and assembly.

Module 'a', the chair's core, is a unit made of recycled polyethylene using rotational moulding technology, designed to simplify assembly steps and accommodate the other modules through joints and juxtapositions. The seat is generated by the coupling of a spring insert (the 'b' module) and a layer of polyurethane (the 'c' module): this solution not only uses far less foam than conventional sofas, but is also easily disassembled to allow end-of-life recycling. The soft part of the armchair is completed by module 'd', a fabric cover that can be removed, if necessary, using four elastic loops fastened to the core (Fig. 9). Another great innovation of Costume is the creation and use of two other units, the 'armrest' and the 'plastic joint' (Fig. 10), which together with the other modules make it possible to generate a platform system with various possibilities for the configuration of the versions included in the collection (Fig. 11).

In most cases, sofas are pieces of furniture composed of many materials joined together irreversibly, making it almost impossible to repair worn parts and recycle the various components. In contrast, the DfM approach adopted in the development of Costume aims to increase durability



Figg. 12, 13 | Concept Luna prototype: 13" notebook designed with a series of modules that can be easily disassembled and connected via interlocking and reversible connections; the main modules ('a'+ 'b'+ 'c'+ 'd'+ 'e') that configure the notebook (credits: Dell Inc.).

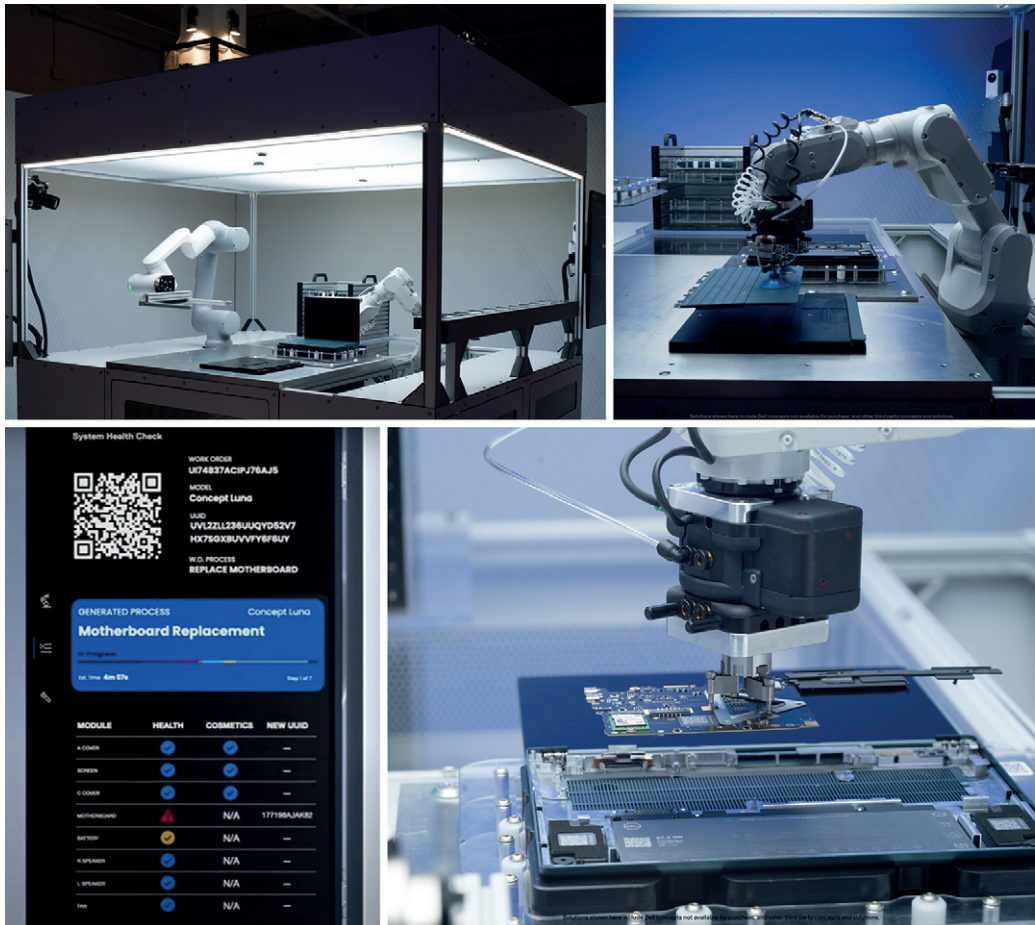


Fig. 14 | Some stages of the Luna notebook assembly process using robots and telemetry to diagnose the health of individual components within the 'micro-factory' (credit: Dell Inc.).

and reduce aesthetic and technical obsolescence through two design criteria: the extreme simplification of the product architecture and the development of a 'user-friendly' disassembly system.

However, despite the product's high disassemblability index, which allows for both good maintainability and aesthetic upgradability, an ad hoc service for the recovery and reuse of the modules has not been developed: the end-of-life scenario of Costume, i.e., the recycling of the components, is still the responsibility of the end user, while the activation of a service such as this would produce value on the entire supply chain, including on the social fabric, by incentivising change toward a circular and more sustainable model (Fagnoni and Olivastri, 2019).

The Concept Luna notebook: modularity to increase remanufacturing

Most consumer electronic products are manufactured according to a principle of programmed obsolescence of components and with a precise duration of their useful life. In addition, the end consumer almost always bears the responsibility for the end-of-life of these products that are difficult to disassemble for proper recycling, despite a European Directive defining Extended Producer Responsibility (European Parliament and the Council of the European Union, 2018). In fact, in recent years, some of the major electronics companies are rethinking their products to extend their useful life, primarily through repair and reconditioning services. Among these, Dell is developing new modular notebook concepts designed to be easily disassembled, up-

graded, repaired or reconditioned. This is the case with Concept Luna, a prototype notebook made with interlocking modules that, unlike traditional products, allow significant components to be disassembled without loosening screws or peeling off surfaces (Fig. 12).

The product features an aluminium chassis equipped with a special key that allows removing a strip above the keyboard and disassembling all components. Each component represents a functional module of the notebook aggregated to others with interlocking systems and interconnected according to a precise layout that defines the overall hierarchy of the PC assembly (Fig. 13): structural module 'a', which is the chassis, is responsible for accommodating both the modules that provide the computing performance and power autonomy (the motherboard module 'b', the battery 'c', etc.) and the modules for interface and interaction with the notebook (keyboard module 'd' and the display module 'e').

To support this new concept, Dell has envisioned a 'micro-factory' that will employ specialised robots to disassemble modules and telemetry to diagnose the health of individual components (Fig. 14). This new industrial model for circularity represents the true opportunity to trigger, as Dell Technologies argues, a meaningful change in the notebook manufacturing industry by generating a new product-service system that better understands which components can be reused, reconditioned or recycled, and ultimately, remanufactured. Concept Luna expresses a DfM philosophy primarily geared toward ensuring that the product can be

easily disassembled for reconditioning and re-manufacturing of parts: this approach has been further optimised through the implementation of robotics and telemetry and by relieving the user of the responsibility of disposing of the product at the end of its life.

This technology makes it possible to systematise and process large amounts of data, fostering the conditions necessary to implement the interconnection cycles envisioned by the Circular Economy (Barbero and Ferrulli, 2023). The Dell concept is in the prototype stage, but it will be interesting to see the development of the product; perhaps other versions will be brought to market implementing the modules developed for the generation of products with the larger monitor or with new packaging specifically for logistics and the repair and upgradability service provided in the 'micro-factory'.

Conclusions | Modularity has always played an important role in the industrialisation process of complex products to achieve maximum standardisation and high production efficiency advantages. Modularity has always played an important role in the industrialisation process of complex products to achieve full standardisation and high production efficiency advantages. By breaking a product down into modular components, companies could optimise the time and cost of manufacturing and assembling products while also increasing their reliability, as defective modules could be easily identified and replaced, striving towards 'zero defects'. More recently, with the rise of environmental issues and product sustainability issues, the concept of modularity has taken on a new value in industrial design, becoming a crucial pre-requisite, especially to improve the end-of-life of materials. The design for sustainability culture, since the 1990s, has seen the emergence of design criteria and methods aimed at 'unmaking', i.e., making products disassemblable to facilitate the separation of components for delivery to recycling platforms.

The current transition towards the Circular Economy has further transformed the concept of modularity, which now plays a crucial role in extending the useful life of products and enabling their remanufacturing and reuse, as well as their recycling. In fact, we are witnessing a transformation of the concept of modularity of products, which becomes functional to increase their environmental sustainability and especially their circularity. Modular design has become a design strategy that supports a culture of 'making to remake' as well as 'making to unmake', which remains its methodological basis.

Modular design today primarily aims at 'reducing' and 'reusing' and subsequently 'recycling'. The described case studies highlight this transition of design culture from 'disassembling' to 'remaking', i.e., they emphasise how modularity, in the development of new products, can be a strategy declinable in different ways for different product types (transportation, furniture, consumer electronics, etc.) to extend their useful life, making most of their components reusable and remanufacturable, thus also transforming the business models of companies that, from product suppliers, become providers of new maintenance, repair, upgrade and remanufacturing services. The path toward a new understanding of product end-

of-life through DfM strategies appears, for some sectors, still long and in need of further development: the lack of repair and remanufacturing services, implemented almost exclusively in the electronics sector, is the main barrier to a radical change toward a more circular business model.

However, in recent years, many manufacturing companies, also stimulated by the receipt of new regulations such as the Ecodesign Directive 2009/125/EC (European Commission, 2023), are beginning to implement design practices aimed at improving product environmental performance

and, in this sense, modular design becomes the most important design strategy to achieve these goals and create truly circular products and product-services.

References

- Abdullah, A. G., Kamaruddin, A. R. and Ripin, Z. M. (2008), "Utilization of Design for Modularity Approach to Identify Product Platform", in *Modern Applied Science*, vol. 2, issue 2, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.5539/mas.v2n2p19 [Accessed 17 October 2023].
- Baldwin, C. Y. and Clark, K. B. (1999), *Design Rules – The power of modularity – Volume 1*, MIT Press, Cambridge. [Online] Available at: dl.acm.org/citation.cfm?id=555152 [Accessed 17 October 2023].
- Bakker, C., van Dam, S., de Pauw, I., van der Grinten, B. and Asif, F. (2017), *ResCoM Design Methodology for Multiple Lifecycle Products*, Delft University of Technology. [Online] Available at: pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portalfiles/54414681/D3_4_Design_Methodology_for_Multiple_Lifecycle_Products_final.pdf [Accessed 17 October 2023].
- Barbero, S. and Ferrulli E. (2023), "Transizione ecologica e digitale – Il Design Sistemico nei processi di innovazione aperta delle PMI | Ecological and digital transition – Systemic Design in SMEs open innovation processes", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 269-280. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13232023 [Accessed 17 October 2023].
- Bask, A., Lipponen, M., Rajahonka, M. and Tinnilä, M. (2010), "The concept of modularity – Diffusion from manufacturing to service production", in *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 21, issue 3, pp. 355-375. [Online] Available at: doi.org/10.1108/17410381011024331 [Accessed 17 October 2023].
- Bordignon, M. (2009), *La modularità e il suo potenziale ruolo nelle imprese – La gestione dell'approccio modulare e le criticità, le opportunità e i rischi legati alla modularizzazione*, Aracne Editrice, Roma.
- Bryant, C. R., Sivaramakrishnan, K. L., Van Wie, M., Stone, R. B. and McAdams, D. A. (2004), "A Modular Design Approach to Support Sustainable Design", in *Proceeding of the ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Salt Lake City, September 28-October 2*, vol. 3d, ASME, pp. 909-918. [Online] Available at: doi.org/10.1115/detc2004-57775 [Accessed 17 October 2023].
- Charter, M. (2018), *Designing for the Circular Economy*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315113067 [Accessed 17 October 2023].
- Crippa, D., Cason Villa, M., Di Prete, B., Ratti, L., Rebaglio, A., Zanini, M. and Zanotto, F. (2022), "Verso un progetto circolare, tra architettura e allestimento – Piattaforme digitali per il riuso | Towards a circular project, between architecture and exhibition design – Digital platforms for reuse practices", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 234-245. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1221202212202022 [Accessed 16 October 2023].
- Ellen MacArthur Foundation (2013), *Towards the circular economy Vol. 1 – An economic and business rationale for an accelerated transition*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an [Accessed 17 October 2023].
- European Commission (2023), *Commission Regulation (EU) 2023/826 of 17 April 2023 laying down eco-design requirements for off mode, standby mode, and networked standby energy consumption of electrical and electronic household and office equipment pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Regulations (EC) No 1275/2008 and (EC) No 107/2009*, document 32023R0826. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/826/oj [Accessed 17 October 2023].
- European Parliament and the Council of the European Union (2018), *Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste*, document 32018L0851, PE/11/2018/REV/2. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj [Accessed 17 October 2023].
- Fagnoni, R. and Olivastri, C. (2019), "Hardsign vs Softsign", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 145-152. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5162019 [Accessed 12 October 2023].
- Ijomah, W. L., McMahon, C. A., Hammond, G. P. and Newman, S. T. (2010), "Development of robust design-for-remanufacturing guidelines to further the aims of sustainable development", in *International Journal of Production Research*, vol. 45, issue 18-19, pp. 4513-4536. [Online] Available at: doi.org/10.1080/00207540701450138 [Accessed 17 October 2023].
- Jacobs, M. D., Vickery, S. K. and Droge, C. (2007), "The effects of product modularity on competitive performance", in *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 27, issue 10, pp. 1046-1068. [Online] Available at: doi.org/10.1108/01443570710820620 [Accessed 17 October 2023].
- Keoleian, G. A. and Menerey, D. (1994), "Sustainable Development by Design – Review of Life Cycle Design and Related Approaches", in *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 44, issue 5, pp. 645-668. [Online] Available at: doi.org/10.1080/1073161x.1994.10467269 [Accessed 17 October 2023].
- Lacy, P. S. and Rutqvist, J. (2015), "The Roots of the Circular Economy", in *Waste to Wealth – The Circular Economy Advantage*, Palgrave Macmillan, London, pp. 19-23. [Online] Available at: doi.org/10.1057/9781137530707_2 [Accessed 17 October 2023].
- Machado, N. T. and Morioka, S. N. (2021), "Contributions of modularity to the circular economy – A systematic review of literature", in *Journal of Building Engineering*, vol. 44, article 103322, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103322 [Accessed 17 October 2023].
- Manzini, E. and Vezzoli, C. (1998), *Lo sviluppo di prodotti sostenibili – I requisiti ambientali dei prodotti industriali*, Maggioli Editore, Rimini.
- Miller, T. D. and Elgård, P. P. E. (1998), "Defining Modules, Modularity and Modularization – Evolution of the Concept in a Historical Perspective", in *Design for integration in manufacturing | Proceedings of the 13th IPS Research Seminar, Fuglsø, Denmark on 20-21, April 1998, Fuglsø, IKS*. [Online] Available at: alvarestech.com/temp/PDP2011/CDAndrea/Modularidade/MILLER%202005.pdf [Accessed 17 October 2023].
- Mital, A., Desai, A., Subramanian, A. and Mital, A. (2014), "Designing for assembly and disassembly", in Mital, A., Desai, A., Subramanian, A. and Mital, A. (eds), *Product Development | A Structured Approach to Consumer Product Development, Design, and Manufacture*, Elsevier, Amsterdam, pp. 159-202. [Online] Available at: doi.org/10.1016/b978-0-12-799945-6.00007-7 [Accessed 17 October 2023].
- Newcomb, P. J., Bras, B. and Rosen, D. W. (1998), "Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle", in *Journal of Mechanical Design*, vol. 120, issue 3, pp. 483-490. [Online] Available at: doi.org/10.1115/1.2829177 [Accessed 17 October 2023].
- Peeters, J., Vanegas, P., Dewulf, W. and Duflou, J. (2012), "Design for demanufacturing – A life cycle approach", in *Proceedings of Conference I-SUP2012 – Innovation for Sustainable Production, Bruges, Belgium, May 7-9, 2012*, pp. 6-9. [Online] Available at: scholar.google.it/scholar?q=Design+for+demanufacturing:+a+life+cycle+approach&hl=it&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar [Accessed 17 October 2023].
- Salhieh, S. M. and Kamrani, A. K. (1999), "Macro level product development using design for modularity", in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 15, issue 4, pp. 319-329. [Online] Available at: doi.org/10.1016/s0736-5845(99)00008-3 [Accessed 17 October 2023].
- Sanderson, S. W. and Uzumeri, M. (1997), *Managing product families*, McGraw-Hill/Irwin, New York.
- Soh, S., Ong, S. and Nee, A. Y. C. (2014), "Design for Disassembly for Remanufacturing – Methodology and Technology", in T. K. Lien (ed.), *Procedia 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, vol. 15, pp. 407-412. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.053 [Accessed 17 October 2023].
- Sonego, M., Echeveste, M. E. S. and Debarba, H. G. (2018), "The role of modularity in sustainable design – A systematic review", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 196-209. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.106 [Accessed 17 October 2023].
- Ulrich, K. (1994), "Fundamentals of Product Modularity", in Dasu, S. and Eastman, C. (eds), *Management of Design*, Springer, Dordrecht, pp. 219-231. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-94-011-1390-8_12 [Accessed 17 October 2023].
- Umeda, Y., Fukushige, S., Tonoike, K. and Kondoh, S. (2008), "Product modularity for life cycle design", in *CIRP Annals*, vol. 57, issue 1, pp. 13-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.115 [Accessed 17 October 2023].
- van der Berg, M. R. and Bakker, C. A. (2015), "A product design framework for a circular economy", in Cooper, T., Braithwaite, N., Moreno, M. and Salvia, G. (eds), *Product Lifetimes and the Environment – Conference Proceedings, 17-19 June 2015, Nottingham (UK)*, Nottingham Trent University, CADBE, Research in Design Series, vol. 9, IOS Press, pp. 365-379. [Online] Available at: plateconference.org/pdf/plate_2015_proceedings.pdf [Accessed 17 October 2023].
- Yan, J. and Feng, C. (2013), "Sustainable design-oriented product modularity combined with 6R concept – A case study of rotor laboratory bench", in *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 16, issue 1, pp. 95-109. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10098-013-0597-3 [Accessed 17 October 2023].