



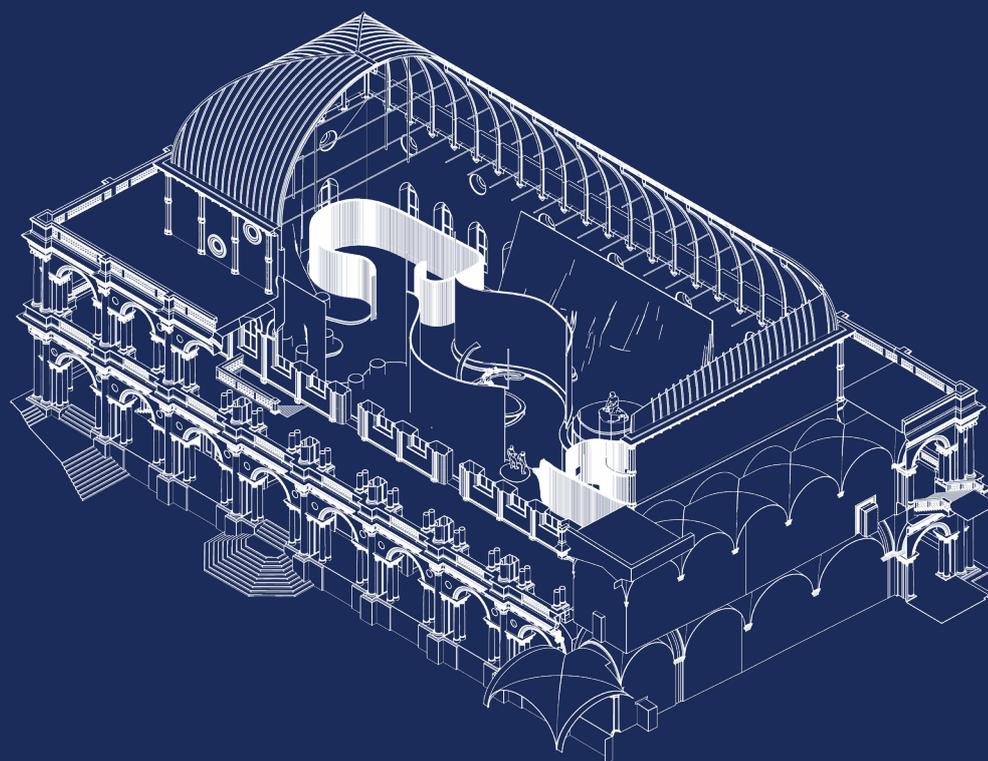
**Politecnico  
di Torino**

Corso di Laurea triennale in  
Design e Comunicazione

A.a. 2024/2025

# **NUOVE FRONTIERE PER L'EXHIBIT DESIGN SOSTENIBILE**

**Attraverso l'ausilio della progettazione Biomimetica**



**RELATRICE**

Silvia Barbero

**CORELATRICE**

Mariapaola Puglielli

**CANDIDATA**

Ilaria Tartaglia





**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea triennale in Design e Comunicazione

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Luglio 2025

# **Nuove frontiere per l'Exhibit design sostenibile**

Attraverso l'ausilio della progettazione Biomimetica

*Relatore:*

*Silvia Barbero*

*Maria Paola Puglielli*

*Candidati:*

*Ilaria Tartaglia*



# INDICE

<b>ABSTRACT</b>			
<b>0. INTRODUZIONE</b>	<b>01</b>		
<b>1. PARADIGMI A CONFRONTO: ISPIRAZIONE ALLA NATURA</b>	<b>03</b>		
<b>1.1 Organicismo</b>	<b>03</b>		
1.1.1 Nell'architettura	04		
1.1.2 Nei prodotti	08		
<b>1,2 Biomimesi</b>	<b>11</b>		
1.2.1 Approcci progettuali: Top Down e Bottom Up	11		
1.2.2 Metodo della "Spirale della progettazione Biomimetica"	12		
1.2.3 Sviluppo dell'approccio biomimetico	13		
• Livelli di applicazione: micro e nano scala	15		
• Livelli di applicazione: meso scala	18		
• Livelli di applicazione: macro scala	21		
<b>1.3 Differenze e punti d'incontro</b>	<b>24</b>		
<b>2. INTEGRAZIONE INDUSTRIA 5.0 NELLA BIOMIMETICA</b>	<b>27</b>		
<b>2.1 La 5° rivoluzione industriale: Un nuovo equilibrio tra tecnologia e ambiente</b>	<b>27</b>		
2.1.1 Robotica collaborativa: sinergia uomo-macchina	28		
2.1.2 Stampa 3D-4D e biostampa	31		
2.1.3 Internet of things (IOT) and Digital Twins	34		
2.1.4 Intelligenza artificiale	36		
<b>2.2 Focus: Triz</b>	<b>37</b>		
2.1.2 Integrazione Triz e biomimetica	37		
<b>3. PROGETTARE PER LA SOSTENIBILITÀ</b>	<b>41</b>		
<b>3.1 Da economia lineare a circolare</b>	<b>41</b>		
3.1.1 Economia lineare: caratteristiche e impatti	41		
3.1.2 Principi dell'economia circolare	41		
3.1.3 Implicazioni per la progettazione	42		
<b>3.2 Primo paradigma: Eco-design</b>	<b>43</b>		
3.2.1 Obiettivi Eco-design	43		
3.2.2 Caso studio: Paper softwall	43		
3.2.3 Approccio LCA	44		
<b>3.3 Secondo paradigma: Green Economy</b>	<b>46</b>		
3.3.1 Principi della Green conomy	46		
3.3.2 Caso studio: Broken Nature: Design takes on Human Survival	47		
3.3.3 Confronto con la progettazione biomimetica	47		
<b>3.4 Terzo paradigma: Blue economy</b>	<b>49</b>		
3.4.1 Storia della Blue Economy	49		
3.4.2 Principi della Blue Economy	49		
3.4.3 Caso studio: Recupero di acqua senza osmosi	50		
3.3.4 Confronto con la progettazione Biomimetica	50		
<b>3.5 Integrazione e confronto tra Biomimetica ed Eco-design</b>	<b>52</b>		
3.5.1 Principi della Biomimetica	52		
3.5.2 Principi dell'Eco-design	53		
3.5.3 Casi studio	53		
3.5.4 Analisi critica casi studio	55		
3.5.5 Riflessioni e conclusioni	56		
3.5.6 Estrapolazione e rielaborazione linee guida	57		
<b>4. EXHIBIT DESIGN E SOSTENIBILITÀ BIOMIMETICA</b>	<b>61</b>		
<b>4.1 Introduzione all'Exhibit design</b>	<b>61</b>		
<b>4.2 Approccio progettuale sostenibile nell'exhibit design</b>	<b>62</b>		
<b>4.3 Linee guida per una progettazione sostenibile: Integrazione biomimetica ed Eco-design</b>	<b>65</b>		
<b>4.4 Progetto esecutivo: Oltre Onda</b>	<b>65</b>		
4.4.1 Illuminazione	66		
4.4.2 Acustica	69		
4.4.3 Scelta dei materiali	72		
4.4.4 Mobilità e trasporto	76		
4.4.5 Comunicazione	80		
4.4.6 Analisi e confronto finali	83		
<b>5. CONCLUSIONI</b>	<b>86</b>		



# ABSTRACT

L'elaborato di tesi affronta il tema della **biomimetica**, un approccio progettuale interdisciplinare che unisce tre sfere principali: biologia, tecnologia, ingegneria e design. L'obiettivo della biomimetica è la risoluzione di problemi umani anche di natura complessa, mediante l'utilizzo di metodi ispirati al mondo naturale.

Partendo dagli aspetti storici e descrittivi, l'elaborato si sviluppa analizzando il **rapporto tra Biomimesi e nuove tecnologie**, in particolare le nuove tecnologie dell'industria 5.0, come stampa 3d, robotica collaborativa, intelligenza artificiale, sfociando in un confronto diretto con il tema della sostenibilità ambientale, più nello specifico con **l'ecodesign**, passando dallo studio della Blue e della Green Economy.

L'obiettivo dell'elaborato è l'analisi dell'**unione dei principi** di due approcci progettuali, **Biomimesi ed Eco-design**, attraverso uno studio relativo all'ambito dell'**exhibit design** e all'utilizzo di nuove tecnologie digitali.

L'analisi delle **tecnologie 5.0** in rapporto al tema della biomimetica si pone come obiettivo quello di tracciare una linea temporale dove sono evidenti le innovazioni tecnologiche e gli sviluppi nelle possibilità progettuali e nella fase di ricerca, grazie anche ad algoritmi di analisi dei dati.

In particolare, è stato approfondita la tecnologia Triz: metodo innovativo di problem solving che analizzando brevetti individua schemi ricorrenti di innovazione.

Il **confronto tra biomimesi ed eco-design** è stato portato avanti per trasformare un metodo progettuale idealmente sostenibile ma non sempre applicato con questo scopo, come la biomimetica, in un metodo effettivamente sostenibile sotto tutti i punti di vista che considera l'impatto ambientale come prima esigenza, attraverso riflessioni su: **materiali, scarti, emissioni, cicli chiusi progettuali**.

In tutte le valutazioni effettuate sono stati confrontati gruppi differenti di **casi studio** coerenti con l'argomento trattato, estrapolando le informazioni necessarie per sostenere risultati concreti e scientificamente rilevanti, come ad esempio la distribuzione del metodo nei vari settori di produzione: **Architettura, product design, exhibit design, fashion design**.

Oppure ancora le tecnologie utilizzate per la realizzazione dei casi studio: stampa 3d, nanotecnologie, robotica, intelligenza artificiale.

In **conclusione**, lo studio ha portato ad un'analisi completa del tema Biomimetica, restituendo una panoramica dei suoi rapporti con la sfera delle tecnologie e della sostenibilità.

Inoltre, ha portato a risultati concreti ed applicabili per la **creazione di un metodo progettuale** che unisca i principi base della biomimetica e quelli dell'ecodesign.

# 0. INTRODUZIONE

L'idea che ha ispirato questo elaborato, ovvero che **la natura possa rappresentare un modello progettuale**, non è nuova, ma nel tempo ha assunto forme, approcci e finalità differenti.

L'elaborato parte dal confronto tra due paradigmi che si ispirano al mondo naturale: **l'organicismo**, nato in ambito architettonico e focalizzato su un'estetica fluida e armonica con l'ambiente, e la **biomimetica**, approccio scientifico e trasversale che osserva, interpreta e traduce strategie biologiche in soluzioni progettuali funzionali e sostenibili.

Dopo aver messo in luce le **differenze** e i **punti di contatto** tra queste due visioni, la tesi si concentra sulla biomimesi, analizzandone metodi, livelli di applicazione (formale, funzionale e sistemico) e la sua evoluzione storica, fino alle più recenti interazioni con le tecnologie emergenti della cosiddetta **Industria 5.0**.

Quest'ultima viene analizzata in maniera mirata, non come fulcro centrale della trattazione, ma come contesto utile a comprendere come la sinergia tra uomo, macchina e natura possa supportare una progettazione più consapevole e rigenerativa.

Successivamente, vengono approfonditi tre modelli progettuali legati alla sostenibilità, **eco-design**, **blue economy** e **green economy**, per arrivare a un confronto critico con la biomimesi.

Questo passaggio risulta fondamentale per individuare i principi chiave che, se integrati, permettono di trasformare la biomimesi da semplice approccio ispirazionale a strumento effettivo per una progettazione sostenibile.

La seconda parte dell'elaborato applica queste riflessioni al settore dell'**exhibit design**, ambito progettuale caratterizzato da **temporaneità** e grande varietà di contesti applicativi.

Dopo una prima analisi delle caratteristiche specifiche di questo settore e delle sue problematiche ambientali, viene proposto il progetto "**Oltre Onda**", installazione temporanea sul tema degli oceani. Questo caso studio rappresenta la **sintesi tra i principi biomimetici e quelli dell'eco-design**, applicati nei diversi ambiti progettuali dell'allestimento: dall'illuminazione ai materiali, dalla mobilità alla comunicazione.

# 1. PARADIGMI A CONFRONTO:

## Ispirazione alla natura

Esistono due tipologie di paradigmi che affrontano sfide progettuali e tecniche attraverso l'ispirazione e la copia di modelli naturali, seppur con modalità e obiettivi finali differenti: **Organicismo** e **Biomimetica**.

Nei paragrafi seguenti entrambi i temi verranno affrontati nello specifico e facendo riferimento alla loro storia e ad aspetti caratterizzanti di ognuno, terminando con un confronto diretto riguardante i punti in comune e le relazioni tra i due.

### 1.1 Organicismo

L'aggettivo **"organico"** compare per la prima volta all'inizio del ventesimo secolo per descrivere un nuovo stile e approccio progettuale e architettonico.

È stato infatti l'architetto americano **Frank Lloyd Wright** a impegnarsi per primo nel definire le caratteristiche di una progettazione di tipo organico, applicandole sistematicamente nelle sue opere più significative.

Wright assume una posizione critica nei confronti del funzionalismo di Le Corbusier: pur accogliendone molte premesse, rifiuta l'esaltazione delle macchine e la standardizzazione dell'architettura.

Egli adotta quindi un approccio organicista, ovvero una progettazione che, oltre a ricercare **forme fluide** ispirate al mondo naturale e a modelli specifici, segue le leggi proprie degli organismi viventi, adattandosi all'uso previsto e al contesto in cui l'opera verrà realizzata.

L'obiettivo principale dell'organicismo è **mettere in relazione il progetto con l'ambiente circostante, creando un'armonia totale tra costruito e natura.**

(Paris, 2022, p. 2)

Pur essendo nato in un contesto strettamente architettonico, nel corso del XX secolo l'organicismo ha ampliato le sue aree di applicazione, estendendosi a settori come l'arredamento, l'interior design, il design industriale e perfino la grafica, temi che verranno approfonditi nei paragrafi successivi.

Esistono **cinque principi** della progettazione organica, e sono:

#### 1. Interaction with the landscape (Interazione con il paesaggio)

L'edificio dovrebbe armonizzarsi con il suo ambiente, emergendo come una naturale estensione del paesaggio circostante, portando una riflessione sull'interazione umana con gli elementi dell'ambiente circostante.

#### 2. Use of natural materials (utilizzo di materiali naturali)

L'uso di materiali locali e naturali è essenziale per creare una connessione autentica tra l'edificio e il suo contesto, permette di fare esperienza della varietà di sensazioni generate dai cambiamenti di texture e colori.

#### 3. Unity of architecture with nature (unità architettura-ambiente)

Gli spazi interni dovrebbero fluire senza soluzione di continuità verso l'esterno, dissolvendo le barriere tra interno ed esterno e creando un'esperienza abitativa unificata, creando un'illusione di espansione dei confini.

#### 4. Variety of decorative solutions (variazione delle soluzioni decorative)

Visualizzazione positiva dello spazio

#### 5. Individuality (individualità)

Interconnessione tra visione del mondo e aspetti estetici nell'architettura, questa dovrebbe infatti servire le esigenze umane, creando ambienti confortevoli e stimolanti che favoriscano il benessere e la crescita personale.  
(Ilvitskaya et al., 2020)

### 1.1.1 Nell'architettura

Come già accennato in precedenza, la figura che ha reso nota l'architettura organica è **Frank Lloyd Wright**, architetto che ha fatto dell'organicismo la sua caratteristica distintiva, definendolo e declinandolo nelle sue sfaccettature.

Dando uno sguardo al passato è però l'architetto francese **Violet le-Duc** che, insieme allo scrittore inglese John Ruskin, esprime l'idea di un'architettura più vicina alla natura, organica.

John Ruskin nel 1849 pubblica un libro, **"I sette pilastri dell'architettura"**, il quale tratta i pilastri base della progettazione e la loro connessione ai sette valori morali che l'autore considera essenziali per l'architettura. Tutti e sette i principi sono collegati e similari a quelli appartenenti all'organicismo, elencati nel paragrafo precedente. Questo libro ha poi influenzato la successiva generazione di architetti, dove erano presenti esponenti come **Antoni Gaudi** e, come prevedibile, Frank Lloyd Wright.

Un altro stile che ha contribuito alla contaminazione di Wright è lo stile Shingle, spesso utilizzato in America verso fine 1800. La caratteristica principale di questo stile è la rientranza dei volumi rispetto al tetto, il quale copre e integra nell'edificio anche parte del giardino.

Questo dettaglio è stato fondamentale per l'ideazione della progettazione organica, così come lo è stato il movimento **"Arts and Crafts"**, sviluppato da **William Morris**.

L'architettura emblema dell'organicismo è la casa nella cascata, **"Fallingwater"**, costruita nel 1935 in Pennsylvania, USA.

Questa villa, commissionata da Edgar Kaufman, è composta da volumi totalmente integrati con l'ambiente circostante a dove sorge il sito, ovvero una collina attraversata da una cascata appunto.

Entrando in villa la sensazione è **un'unione spaziale tra interno ed esterno**, data inizialmente dai soffitti bassi, i quali influenzano lo sguardo del visitatore a prestare attenzione alle finestre lungo i margini della casa, e dunque alla dimensione orizzontale, piuttosto che quella verticale.

Anche la composizione spaziale punta ad avere connessioni dirette con la natura, ne sono un esempio le **scale** che, partendo dalla zona living, arrivano direttamente dentro all'acqua sotto al piano inferiore, e **l'illuminazione fioca**, che crea un senso di compressione rispetto alla notevole quantità di luce naturale che penetra dalle finestre.

(Swati Panchal, 2000, p. 14)

Altro importante esponente dell'organicismo è l'architetto spagnolo **Antonio Gaudi**, nato nel 1852 a Reus.

La sua concezione dell'architettura organica consisteva in una **trasformazione fluida degli organismi naturali**. La sua forma è caratterizzata da linee curve, forme deformate e asimmetriche, elementi di sostegno come colonne e pilastri rese un tutt'uno con l'edificio e caratterizzate da forme figurative di vegetazione.

Partendo da questi principi l'architettura di Gaudi è diventata **un'unione totale tra funzione e natura** messi in relazione tra loro, un esempio formidabile di tale unione è **Casa Batlo**.

In questo caso l'applicazione dell'organicismo supera il concetto di Wright della pura e semplice relazione tra spazio e natura; infatti, l'edificio è pensato come un **singolo organismo totale**, che racchiude ogni aspetto e dettaglio, partendo dagli stucchi sui muri, porte, finestre fino ad arrivare ai camini sul tetto e all'arredamento, si parla di opera d'arte completa.  
(Swati Panchal, 2000, p. 15)

Partendo dagli **interni** si può osservare che le porte sono finemente costruite secondo una forma modernista, e i vetri di queste riflettono le piastrelle degli esterni creando la sensazione di essere sott'acqua, i corrimani, le maniglie e i pomelli hanno forme ergonomiche e ispirate a fronde.

Dal vestibolo al pian terreno fino al tetto il linguaggio rimane coerente, anche il giardino centrale collabora alla funzionalità degli elementi, permettendo l'entrata di una cospicua quantità di luce naturale riflessa dalle piastrelle di varie tonalità di azzurro che ne ricoprono le pareti.

Nella **facciata** la forma ondulata è protagonista, così come i materiali utilizzati: pietra, vetro e ceramica. A piano terra nella facciata sono presenti colonne slanciate, mentre al secondo piano sono presenti ringhiere in ferro fuso ad unica colata.

(Casa Batlló, n.d.)



Figura 1, Fallingwater, Esterno lato Sud



Figura 2, Fallingwater, Esterno lato Nord



Figura 3, Casa Batlo, Interno



## 1.1.2 Nei prodotti

Spostando l'attenzione in Europa, un altro grande architetto ha applicato e reinterpretato i concetti di architettura organica adattandoli alla sua cultura, contemporaneo a Wright, si tratta dell'architetto finlandese **Alvar Aalto**.

anni di sviluppo del **movimento moderno** in Italia. L'esigenza di Saarinen era rendere belli e funzionali mobili e arredi che fino a quel momento erano rimasti perlopiù anonimi. (Montes Serrano et al., 2019)

Per Aalto, il paesaggio e la natura organica degli organismi e della vita hanno la capacità di mediare gli edifici architettonici.

Lui stesso afferma:

**"...lo scopo di tutto ciò che ho detto finora è sottolineare che la varietà e la crescita, che richiamano la vita organica naturale, sono l'essenza stessa dell'architettura. Vorrei dire che questo è, in definitiva, l'unico vero stile architettonico."** (Aalto, A., & Schildt, G, 1998)

I primi progetti di Aalto che seguono queste idee sono la biblioteca di Viipuri, in particolare il soffitto ondulato dell'edificio, e il sanatorio di Paimio. Risulta interessante approfondire alcuni elementi di arredo, progettati dall'architetto, all'interno di questi due luoghi; in particolare **"Armchair 41"**.

Disegnata nel 1931 appositamente per la sala d'aspetto del Sanatorio di Paimio, la "Poltrona Paimio" rappresenta una rivoluzione e definisce un nuovo standard per il futuro del furniture.

La struttura tradizionale della seduta in legno laminato viene integrata in modo magistrale con una **silhouette dalle forme organiche** in compensato di betulla pressato, curvato ed in seguito laccato. I bracci della seduta sono ottenuti da un unico pezzo di betulla, diviso in due, per mantenere il bilanciamento in caso di cambiamenti del legno. Sostegno e bracci sono uniti in solamente quattro punti, creando un'illusione di leggerezza ed elasticità.

Un altro esempio dal mondo del design è **"Organic Chair"** seduta progettata da **Charles Eames e Eero Saarinen** nel 1940 in occasione di un concorso dal Dipartimento di Industrial Design del MOMA di New York. Il tema del concorso era appunto **"Organic design in home furnishing"**.

Questa sedia è parte di una idea più ampia, vale a dire l'integrazione di una visione organica anche negli interni e nel mobilio presente dentro alle strutture architettoniche.

Fa parte di questa idea anche la **"sedia tulip"**, progettata da Eero Saarinen nel 1956 per **Knoll**.

Composta da due pezzi avvitati tra loro, scocca in plastica fibrorinforzata e base in alluminio pressofuso rivestito, la sedia tulip è nata negli

Figura 4, Casa Batlló, Facciata

Paradigmi a confronto: ispirazione alla natura



Figura 5, Armchain 41, Alvar Aalto

Figura 6, Organic chair, Saariner ed Eames, 1940



Capitolo 1



Figura 7, Tulip chair, Eero Saariner, 1956

## 1.2 BIOMIMETICA

La parola Biomimesi deriva dall'unione di due parole greche "**bio**", vita, e "**mimesi**", imitazione.

Il termine è stato coniato nel 1960 da **Otto Smith**, biofisico e scienziato americano, e diventato celebre e conosciuto grazie a **Janine M. Benyus**, nata nel 1958 in New Jersey, biologa e ricercatrice americana, consulente per l'innovazione e fondatrice del Biomimicry's Institute, prima azienda di consulenza per l'innovazione. (Benyus, 2002, p. 7)

Identifica una disciplina multidisciplinare che unisce **biologia, tecnologia, ingegneria e design**.

L'obiettivo che si pone questa disciplina è quello di **rispondere alle crescenti problematiche e sfide umane moderne** attraverso soluzioni derivanti dallo studio della natura e dei suoi processi. Analizzando le soluzioni ottimizzate dalla natura, la biomimesi propone soluzioni di matrice biologica, come materiali, sistemi e tecnologie che si adattano e rispondono in modo dinamico e preciso a problemi ambientali.

La biomimetica opera su tre livelli principali: **l'emulazione delle strutture**, che riguarda prevalentemente l'aspetto estetico e formale; **l'emulazione delle funzioni**, ovvero il modo in cui un organismo naturale svolge una determinata azione; e infine **l'emulazione dei processi**, reinterpretati attraverso le nuove tecnologie e possibilità ingegneristiche.

Nel libro "**Biomimicry: Innovation inspired by nature**" scritto nel 1997, Janis M. Benyus scrive che la natura deve essere interpretata in tre modi differenti:

### 1. Natura come modello

La biomimesi è una scienza nuova che imita o prende ispirazione questi modelli naturali per rispondere ad esigenze umane.

### 2. Natura come misura

La biomimesi utilizza un approccio sostenibile ed ecologico per valutare le innovazioni effettuate dall'uomo nel tempo. La natura ha imparato "Cosa funziona, cosa è appropriato e cosa dura"

### 3. Natura come mentore

La biomimesi apre ad un nuovo modo di vedere e valutare la natura che ci circonda, indirizza verso un mondo dove possiamo imparare dalla

natura, e non solamente estrarre ciò che è presente in essa. (Benyus, 2002, p. 7)

Per secoli i progettisti come ingegneri, architetti e designer hanno studiato ed emulato le caratteristiche dei sistemi biologici per provare a reinterpretarli, ma solo da qualche decina di anni, grazie allo sviluppo sempre maggiore di tecnologie che hanno permesso di comprendere ad un livello molto più profondo questi processi, si sono trovate soluzioni a livelli sempre più complessi.

**Lo sviluppo bio-tecnologico** ha inoltre permesso di osservare e comprendere le azioni degli organismi viventi a diverse tipologie di stimoli, così da poter adattare e riprogrammare queste risposte per adattarle alle differenti necessità identificate. (Arruda & Palombini, 2024, p. 227)

La tesi di Janine Benyous è che per decenni i progettisti hanno operato seguendo un approccio **human-centered** pensando di risolvere ogni disagio attraverso questa lente, ignorando l'approccio utilizzato dalla natura e considerandolo inutile per l'innovazione.

Osservando la vita e le abitudini della vita selvaggia, Janine, si è resa conto dell'armonia presente tra le varie specie differenti e il posto in cui vivono, nonché con le loro abitudini. La differenza con l'uomo è lampante, ad oggi si fa sempre più fatica a sentirsi parte di un posto o a un gruppo di persone, ed è diventato impegnativo anche sopperire ad alcuni bisogni primari per l'uomo, come mangiare, ripararsi, bere. Cosa accadrebbe dunque se cambiassimo punto di vista? (Benyus, 2002, p. 11)

Questo approccio trova applicazione attraverso **diversi metodi progettuali** descritti di seguito.

### 1.2.1 Approcci progettuali: Top Down e Bottom Up

Esistono due tipologie di approcci applicabili per raggiungere un progetto biomimetico: il l'approccio "**Top Down**", e "**Bottom up**".

Il primo è un **metodo induttivo**, partendo da un problema dato specifico viene poi ricercata la soluzione in un modello biologico coerente con la problematica, ma molto più ampio. Viene estratto il concetto generale del tema. Si tratta dell'approccio più utilizzato negli ambiti e spazi di ricerca.

Più nello specifico i **passaggi** considerati sono: Identificazione del problema, ricerca di analogie biologiche. Identificazione di principi appropriati, astrazione del modello scelto, test e feedback, soluzione.

Il secondo è un **metodo deduttivo**, partendo dall'osservazione di un modello biologico (generale), il risultato è una serie di possibili declinazioni pratiche ispirate a questo modello, applicabili ad una specifica progettazione (particolare).

Anche in questo caso andando più nello specifico i **passaggi** considerati sono: Ricerca biologica, biomeccanismi e ricerca morfologia e anatomia dei processi, comprensione del principio, astrazione del principio, traduzione tecnica del principio e soluzione finale. (Primrose, 2020, p. 12)

Indipendentemente dal metodo scelto **è necessario identificare e specificare la specie biologica presa come riferimento**, il tratto o la caratteristica esaminata e come questa o i processi che la caratterizzano possono essere tradotti all'interno della sfera progettuale.

Entrambi gli approcci biomimetici consentono vari livelli di osservazione della natura nei suoi meccanismi e principi base, permettendo l'individuazione e la scelta del modello più accessibile e riproducibile a livello tecnologico, partendo da aspetti più formali e figurativi, fino ad arrivare ad aspetti più complessi come capacità auto-conservative e di processo. (Arruda & Palombini, 2024, p. 228)

### 1.2.2 Metodo della: "Spirale della progettazione biomimetica"

Esiste anche un altro approccio inerente alla progettazione biomimetica, il quale identifica un **percorso più definito e preciso** per ottenere soluzioni di design innovative e sostenibili a partire, anche in questo caso, da processi naturali.

Si tratta della "**Spirale della progettazione biomimetica**", pensata e sviluppata nel 2005 dall'australiano game designer Carl Hastrich, partendo da un semplice metodo a spirale utilizzato per la progettazione per il design, e aggiungendo gli step fondamentali propri della biomimetica. (Alanbari & Al, 2022, p. 3)

La spirale si compone di **sei step fondamentali**:

#### 1. Identify

Si inizia identificando le funzioni che il nostro progetto deve compiere, la domanda da porsi è "**Perché voglio che il mio progetto faccia questo?**"

#### 2. Translate

Una volta creato questo elenco di funzioni, è necessario tradurle in termini che risultino coerenti e sensati nel mondo biologico.

#### 3. Discover

Completata la traduzione, è necessario analizzare le strategie che la natura utilizza per compiere queste funzioni, e descrivere come applicare certe strategie al progetto. Si fa osservando un modello dal vivo e studiandone le caratteristiche sulla letteratura e con l'aiuto di incontri o brainstorming con biologi.

#### 4. Abstract

Proseguendo si astraggono i concetti chiave, i quali vengono tradotti in processi tecnologici.

#### 5. Emulate

Applicare i concetti rianalizzati e riadattati, anche in modalità differenti, al progetto.

#### 6. Evaluate

Valutare il risultato del progetto in riferimento al brief iniziale di progetto e ai Life's Principles, chiedendosi ad esempio se il nostro progetto può adattarsi ed evolvere in vista di scenari futuri, o come posso migliorare nuovamente il mio design. Questo tema verrà approfondito nel capitolo 3. (Primrose, 2020, p. 13)

Ciò che rende particolarmente interessante la spirale della progettazione biomimetica è il suo **sviluppo graduale**, che procede dal centro verso l'esterno seguendo un percorso ciclico.

Questa forma scandisce un ritmo che permette la creazione di **brevi e rapidi passaggi iniziali**, i quali hanno l'obiettivo di far esplorare una **moltitudine di idee e potenziali strade di progetto**, magari anche idee nate durante l'esplorazione, in modo veloce, osservando il quadro generale emerso prima di addentrarsi nella sfera vera e propria della progettazione.

Inoltre, la sequenza di passaggi nella spirale alterna un **pensiero divergente**, che apre e genera molte idee differenti, a **uno convergente**, che è caratterizzato dalla scelta, selezione e valutazione delle idee. Entrambi sono seguiti da **riflessione e reindirizzamento**, ciò consente di avanzare continuamente verso soluzioni progettuali più innovative ed efficaci. (Alanbari & Al, 2022, p. 4)

## 1.2.3 Sviluppo dell'approccio Biomimetico

La declinazione della biomimetica nell'epoca moderna ha radici ben più antiche di quanto si possa immaginare, è infatti una pratica riscoperta da relativamente pochi decenni rispetto alle sue forme primordiali. Sono state ritrovate **prove e testimonianze dell'utilizzo di un approccio simile**, di copia e reinterpretazione della natura, **tra la maggior parte delle popolazioni indigene**, tale approccio con il tempo è scomparso, per poi comparire in modo altalenante con esponenti di rilievo come **Leonardo Da Vinci** o **Frei Otto**, ma senza una decisa presa di posizione.

È stato grazie alla ricercatrice **Janine Benyus** e alla pubblicazione nel 1997 del suo libro **"Biomimicry: Innovation inspired by nature"**, se il concetto di biomimesi si è sviluppato ed è cresciuto, fino ad affermarsi come disciplina scientifica. Da questo momento in poi la Biomimesi **"Moderna"** ha inizio.

"Questi episodi isolati sono ottimi esempi, ma non sono considerati l'inizio di un'emersione più ampia. Non c'era un corpus di opere, né studi accademici, né gruppi di studenti formati per essere protetti della natura. E così la biomimesi ricadde nuovamente in uno stato di dormienza." - Janine Benyus (Benyus, p.9)

Esistono quattro ere di riferimento per questo approccio:

### 1. Era base della biomimetica

comprende le prime sperimentazioni ed osservazioni dei modelli, risale ai tempi precedenti al XV secolo.

### 2. Primi innovatori della biomimetica

comprende la storia dei primi pionieri che hanno utilizzato principi naturali per creare grandi innovazioni, va dal XV secolo al XX secolo circa.

### 3. Biomimetica moderna

ha inizio con Janine Benyus nel 1997.

### 4. Crescita e ricerca biomimetica:

comprende il periodo dal 1997 ai giorni nostri. (Primrose, 2020, p.13)

L'era base della biomimetica inizia con un prodotto che risale al V sec b.C. e si tratta dell'invenzione e sviluppo **dell'ombrello**. La mente dietro al progetto è stata la moglie di Lu Ban, rinomato carpentiere cinese, il quale ha

provveduto alla sua realizzazione.

La copertura impermeabile e curva, inizialmente realizzata in seta, prende ispirazione dalle **foglie di ninfea**, le quali fanno scivolare via le gocce d'acqua senza assorbirla, mentre la forma del braccio è nata dalla reinterpretazione dei rami della vite.

Tuttavia, la nascita dei primi innovatori inizia con **Leonardo Da Vinci**, più in particolare con la progettazione nel 1485 delle sue **"macchine volanti"**, al primo precursore e pioniere delle teorie biomimetiche per lo sviluppo di nuove tecnologie.

Leonardo ha effettuato molteplici studi sul principio alla base del volo degli uccelli e sulla loro anatomia, attraverso la realizzazione di schizzi e appunti che ancora oggi sono conservati. Non sono stati rinvenuti prototipi o esempi di applicazione.

Il primo uomo ad avere una documentazione accurata del primo tentativo di volo di successo è **Otto Lilienthal**, un aviatore tedesco. Egli prendendo ispirazione degli studi di Leonardo e aggiungendo alcune ricerche personali sull'aerodinamica è riuscito a progettare un meccanismo che permetteva il cambio di direzione a seconda dello spostamento del baricentro. Sfortunatamente Lilienthal perse la vita tastando la sua macchina.

Queste teorie e questo avvenimento in particolare hanno ispirato i due fratelli aviatori provenienti dall'Ohio, **Orville e Wilbur Wright**, all'avanzamento dello studio sull'aeronautica. Grazie anche al lavoro di **Sir George Cayley**, il cosiddetto "padre dell'aeronautica", il quale definì le quattro forze principali del volo: Peso, portanza, resistenza e spinta, i due riuscirono nell'intento della realizzazione del primo aereo a motore.

Rilevante però è che differentemente dall'epoca di Leonardo e Lilienthal, all'epoca dei fratelli Wright, dunque intorno alla metà XIX secolo, era stato **inventato il motore a combustione interna**.

A metà XX secolo un altro prodotto di ispirazione biomimetica è stato inventato, il **velcro**. Invenzione è attribuita all'ingegnere svizzero **George de Mestral**, il quale durante una battuta di caccia con il suo cane, notò che una particolare tipologia di pianta, le bardane, rimanevano attaccati al manto dell'animale, creando non poche difficoltà nel momento di rimozione.

Incuriosito da questo fatto l'ingegnere esaminò

la geometria della pianta al microscopio, scoprendo la presenza di centinaia di piccoli uncini.

L'idea di Mestral fu di creare un materiale a nastro con questa stessa tecnologia, capace di legarsi a qualsiasi materiale ruvido, e senza il bisogno di essere perfettamente allineato alla superficie di chiusura, come lo erano le zip.

Fu il biofisico Americano **Otto Smith** nel 1950 a coniare il termine **"Biomimetica"**, in seguito alla sua ricerca di dottorato dove sviluppò il "Trigger di Smith", un tipo di circuito elettronico usato per trasformare segnali analogici instabili in segnali digitali stabili.

L'idea del processo fu un risultato dello studio di Schmitt sulla propagazione dell'impulso neurale nei nervi del calamaro. (Primrose, 2020, p.14)

Nel 1958 nasce colei che, quaranta anni dopo avrebbe dato inizio all'era moderna della biomimetica: la biologa e ricercatrice americana **Janine Benyus**. Janine aveva l'obiettivo di **rendere la biomimetica una disciplina fruibile a tutti**, persino agli studenti; ciò fu reso possibile grazie alla pubblicazione del suo libro: Biomimicry: Innovation inspired by nature.

Nel 1997 viene effettuato il redesign dei treni alta velocità **Shinkansen**, probabilmente il caso più conosciuto ed emblematico a livello mondiale di operazione biomimetica. Il designer giapponese **Eiji Nakatsu** dà l'idea di rimodellare il muso del treno ispirandosi alla forma del **becco dei martin pescatore**.

Questa specie di uccello da lui osservata presentava caratteristiche singolari, come ad esempio la riduzione quasi a zero di schizzi durante l'entrata in acqua e il silenzio che lo contraddistingue durante questa pratica. Tali caratteristiche furono tradotte in termini di **riduzione di resistenza all'aria e alla pressione atmosferica**, ciò rese il treno più veloce, silenzioso ed efficiente dal punto di vista energetico.

Nel 1998 entra in scena **Dayana Baumeister**, professoressa e consulente di innovazione, ha contribuito all'evoluzione della biomimesi nell'era moderna ed ha formalizzato le modalità di insegnamento del tema. Ha istituito nel 2008 **il primo programma di due anni di certificazione professionale sulla Biomimesi**.

Insieme a Janine ha fondato nel 2010 **Biomimicry 3.8**, azienda leader mondiale nelle consulenze bio-ispirate, attraverso l'intelligenza biologica e l'istruzione mirata su temi inerenti.

Dagli anni 2000 in poi la combinazione di pressioni legate alla **sostenibilità**, tecnologie

sempre più innovative, organizzazioni focalizzate sulla biomimesi e la formalizzazione della biomimesi come professione, ha inizio l'esplosione delle **ricerche ispirate alla biomimesi**.

Prima tappa di tale cambiamento è la fondazione del **Biomimicry Institute**.

Organizzazione no-profit statunitense, il cui obiettivo è aiutare aziende ad imparare dalla natura per progettare prodotti e processi sostenibili per rispondere alle crescenti sfide moderne.

Un altro passo importante è la fondazione del **"Biomimicry Centre"**, sviluppato a partire da una collaborazione tra Biomimicry 3.8 e l'università dell'Arizona.

Lo scopo di questo centro è espandere l'alta formazione e ricerca universitaria nei confronti della biomimetica. I metodi proposti da Biomimicry 3.8 vengono accreditati e proposti dall'ente universitario in altre branche di studio.

Infine, nel 2015 è stata proposta per la prima volta **Biomimicry Youth Design Challenges**, challenge basata sull'idea di chiedere a studenti delle scuole medie o superiori di proporre progetti ispirati alla biomimesi che possono rispondere a grandi sfide quotidiane. (The Complete History of Biomimicry (with Examples), n.d)

## ● Livelli di applicazione: Micro e Nano scala

Esistono tre livelli di applicazione biomimetica, **micro e nano scala, meso scala e macroscale**.

Nel primo caso si tratta perlopiù di **tecnologie o materiali** le cui funzioni sono ispirate dalle micro-geometrie naturali, riportate a livello di strutture artificiali.

Questi materiali sono suddivisi in più gruppi, in base alle loro caratteristiche principali, quelle che andremo ad analizzare sono: i materiali **auto-riparanti, auto-pulenti** e con **geometrie particolari**.

L'**auto guarigione** o riparazione è un processo che accomuna tutti gli organismi viventi e che permette all'organismo stesso di rimanere longevo il più a lungo possibile.

Da questo concetto è stata sviluppata una nuova gamma di materiali sintetici, in grado di riprodurre lo stesso processo di riparazione attraverso specifiche composizioni e geometrie interne. L'obiettivo cercato anche in questo caso è quello di **allungare il più possibile il ciclo di vita di un prodotto**, il quale che, oltre ad essere più sicuro in caso di rottura, soprattutto se si tratta di prodotti di difficile e costosa sostituzione, risulta anche meno d'impatto a livello ambientale.

È importante tenere a mente in vista delle possibili declinazioni d'utilizzo di questi materiali che spesso quando si parla di **"self-healing"** non si parla di un ritorno alle proprietà e forme iniziali senza ripercussioni; infatti, nella maggior parte dei casi avviene un cambiamento nelle proprietà iniziali, come ad esempio un indebolimento delle proprietà meccaniche nel punto di rottura.

I polimeri e compositi possono essere **Intrinseci**, vale a dire che sono in grado di riparare le cricche senza l'aggiunta di agenti riparanti. Ed **Estrinseci**, per la riparazione richiedono la presenza di agenti riparanti dispersi nella matrice polimerica

Esistono due tipologie di riparazioni: **autonoma e indotta**.

La prima riguarda tutti quei materiali che **non hanno necessità di uno stimolo esterno** per attivare la riparazione. Questi riconoscono una discontinuità nella loro struttura e procedono a rilasciare sostanze o ad effettuare processi per riparare tale danneggiamento.

Nel secondo caso per effettuare la riparazione è **necessario che ci sia uno stimolo esterno**, generalmente energia elettrica o calore, grazie al quale vengono attivati gli agenti responsabili.

Le riparazioni citate sopra possono inoltre essere: **Full Scale e Funzionale**.

Nel primo caso, in seguito a riparazione a rottura, una volta completato il processo **non sarà più possibile vedere il punto di frattura** e le proprietà saranno ritornate eguali a quelle iniziali. Questi casi rappresentano una minoranza dei materiali in commercio.

Nel secondo caso in seguito a riparazione, pur avendo per la maggior parte rimediato al danno e ripristinato le proprietà originali, **il punto di frattura rimarrà sempre visibile** e con proprietà meccaniche relativamente meno performanti rispetto ad altri punti del prodotto.

Un esempio di possibile metodologia di riparazione è quella dei **"Polimeri con microcapsule"**, i quali si ispirano al modo in cui la pelle degli esseri viventi si cicatrizza, isolando il danno e rigenerandosi.

Queste strutture sono caratterizzate dalla presenza di microcondotti in vetro e microcapsule; i primi sono riempiti di **agente polimerizzante** mentre le capsule con **un'agente indurente**. Una volta fratturati microcondotti e microcapsule si creerà una riparazione della cricca.

(Nagasamudram et al., 2020)

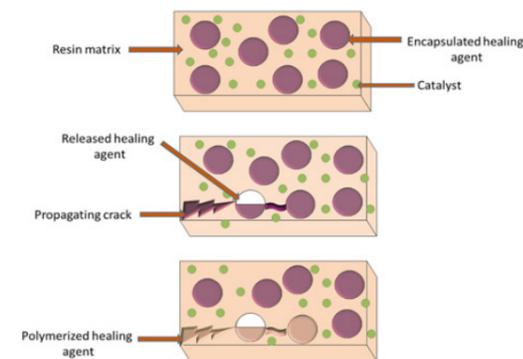


Figura 8, Self-healing polymer

I **materiali autopulenti** sono stati sviluppati in seguito allo studio e all'osservazione di alcuni tipi di foglie e di piante, come quelle del **fiore di loto**, le quali presentano proprietà idrofobe, che impediscono all'acqua e allo sporco di depositarsi, facendoli scivolare via.

Tali proprietà sono state sviluppate in alcuni materiali per garantire determinate caratteristiche e livelli di pulizia in situazioni dove **l'intervento umano risulterebbe difficoltoso**, come ad esempio i vetri dei grattacieli o i pannelli fotovoltaici.

Esistono due principali tipi di superfici autopulenti:

- **Superfici idrofobiche**

repellono lo sporco grazie alla presenza dell'acqua che trascina con sé la sporcizia.

- **Superfici fotocatalitiche**

degradano lo sporco e gli agenti inquinanti grazie alla luce (spesso a base di  $TiO_2$ ).

È possibile anche avere materiali che presentano contemporaneamente queste due caratteristiche.

L'acqua rappresenta il sistema liquido più abbondantemente disponibile e utilizzato per la rimozione di contaminanti da differenti varietà di superfici.

Per esemplificazione, l'autopulizia delle foglie di loto segue una specifica **interazione acqua-superficie**.

Per ottenere l'effetto autopulente di una superficie è necessario che le gocce d'acqua possano scivolare via senza difficoltà e resistenza. Per ottenere ciò si tende a **massimizzare l'angolo di contatto per facilitare il movimento naturale delle gocce**.

Generalmente quando questo raggiunge i  $180^\circ$ , il bisogno viene soddisfatto.

L'utilizzo di  **$TiO_2$**  (ossido di titanio) come coating di alcuni materiali, con ad esempio il vetro, ne aumenta l'idrofobicità e dunque facilita il movimento delle gocce d'acqua.

Seppur questo metodo risulti efficace per la pulizia delle superfici, in certe situazioni non è possibile utilizzarlo.

Ad esempio, in **ambienti molto freddi** oppure nello spazio aereo, dove le temperature scendono sotto agli  $0^\circ C$ , non è possibile ricorrere all'utilizzo dell'acqua, è dunque necessario prendere in considerazione ed utilizzare altre possibilità e tecnologie.

In queste situazioni vengono utilizzate **superfici fotocatalitiche**; La fotocatalisi è un processo in cui un materiale, come  $TiO_2$ , agisce come catalizzatore sotto l'esposizione alla luce ultravioletta, **decomponendo sostanze organiche** e inquinanti presenti sulla superficie. (Q. Xu et al., 2016, pp. 2-6)

L'ultimo caso trattato riguarda i materiali ottenuti mediante la **progettazione di microarchitetture** strutturali studiate a partire da organismi biologici. Per fare ciò il materiale preso in esame è il **GekoTape**.

Si tratta di un nastro adesivo progettato con l'obiettivo di aderire perfettamente a qualsiasi tipo di superficie, liscia o ruvida che sia, mantenendo lo stesso livello di tensione.

Tale caratteristica è stata studiata a partire da una caratteristica propria dell'animale da cui prende il nome, il Geko, il quale ha la **capacità di aderire a qualsiasi superficie e a qualsiasi grado di inclinazione**.

In particolare, questa particolare forza di adesione è resa possibile dalle forze deboli di **van der Waals** che si instaurano tra le superfici generiche e le setole presenti sotto alle zampe dell'animale, si forma dunque una polarità molecolare che permette questa proprietà.

La traduzione a livello tecnologico è stata effettuata tramite una riproduzione accurata delle setole sopracitate in filamenti sottilissimi, attraverso la tecnica **Nanoimprint Lithography**. (Acocella et al., 2016, p. 1)

## ● Livelli di applicazione: Meso scala

Quando si parla di applicazioni biomimetiche su un livello di **meso-scala** si intende appunto una scala intermedia tra la micro-scala (micron,  $10^6$  m) e la macro-scala (metri, 1 m).

Per restringere il campo di osservazione al tema del design prenderemo in considerazione innovazioni nelle strutture tecnologiche, prodotti di **design industriale, Exhibit e Interior**.

A differenza del livello di osservazione precedente, il quale si concentrava più sulle funzioni e proprietà degli organismi da replicare per ottenere un vantaggio intrinseco al materiale, i prodotti su meso-scala presentano finalità ed obiettivi differenti.

Per quanto riguarda l'analisi di innovazioni tecnologiche strutturali, nella maggior parte dei casi **la finalità ultima è l'ottimizzazione energetica e la riduzione degli sprechi** attraverso, anche in questo caso, la reinterpretazione di processi naturali.

Mentre l'applicazione relativa ai vari campi del design risulta più incentrata sull'**integrazione tra sostenibilità ambientale e progettazione**, oltre che a tenere in considerazione il concetto di "**biophilic design**", un approccio progettuale che mira a riconnettere l'essere umano con la natura all'interno degli spazi costruiti.

Il primo caso studio presentato è **Smart Flower Solar**, un sistema fotovoltaico intelligente, ispirato alla rotazione dei fiori durante il giorno per massimizzare la produzione di energia solare immagazzinata. La sua forma rende evidente tale somiglianza attraverso la presenza di una pluralità di pannelli sovrapposti e disposti a raggiera attorno ad un punto centrale, mimando appunto la forma floreale.

I "petali" del prodotto si orientano verso la direzione di maggior incidenza dei raggi solari, risultando quasi perfettamente aperti in estate e raccolti in inverno. Grazie ad un **orologio solare incorporato** è possibile per la tecnologia individuare il giusto orientamento anche in caso di mal tempo. Rispetto ad un normale pannello fotovoltaico, la produzione di energia è **maggiore del 40%**.

(Alnaieli et al., 2024, p. 119)

I seguenti due casi studio rappresentano esempi di design, rispettivamente di product design e un materiale di supporto utilizzato in architettura e Interior design: **Bone Chair** and **Panelite**.

La prima è sviluppata nel 2006 da **Joris Laarmann**, progettista proveniente dai Paesi

Bassi. Laarmann per la realizzazione di questa seduta prende ispirazione dal comportamento delle **ossa**, umane e non, le quali hanno la capacità di **ridurre materiale** dove le forze applicate in un determinato punto sono irrilevanti.

Lo studio e la prototipazione 3d di questa seduta sono state possibili grazie ad un software sviluppato dal fisico **Claus Mattheck**, e dall'ingegnere **Lothar Harzheim**, i quali hanno sviluppato uno strumento digitale dinamico che copia i modi di costruire degli alberi e delle ossa, utilizzato inizialmente per l'ottimizzazione delle componenti automobilistiche.

Lo scopo del software di progettazione era di fissare **elementi chiave** in posizione fornendo una resistenza ottimale, riducendo al minimo la quantità di materiale utilizzata.

Il rapporto con le ossa riguarda la loro capacità nella creazione di strutture interne per ottenere un **rapporto peso-resistenza ottimale** poiché aggiungono e rimuovono costantemente materiale in risposta alle sollecitazioni dal loro ambiente.

La sedia è stata ottenuta mediante una colata in unico stampo di alluminio.

(Verria, 2022)

Il secondo materiale, è una struttura **honey-comb**, vale a dire un materiale composito composto da **due pelli sottili esterne e un core più spesso** ma leggero, possono essere prodotti in materiali differenti a seconda delle necessità.

Lo scopo dei pannelli a sandwich è quello di assorbire grandi quantità di forza pur rimanendo relativamente leggeri.

L'ispirazione del materiale è resa evidente già dal nome, infatti le tipiche forme ad esagono degli alveari sono riportate in modo esatto nella struttura core di questi pannelli.

In particolare, **Panelite** è composto da un nido d'ape in alluminio e pelle in acrilico rinforzato con fibre di vetro. In alternativa, le pelli possono essere realizzate in resina trasparente, acetato di cellulosa o policarbonato. Questi pannelli vengono utilizzati anche come ripartitori degli spazi in **ambienti architettonici** o per la creazione di oggetti di **industrial design** con determinati risvolti visivi;

Nel quartier generale del **New York Times** a Manhattan, progettato da Renzo Piano, i pannelli Panelite sono stati utilizzati per le partizioni interne, creando spazi che favoriscono la diffusione della luce naturale pur mantenendo la privacy. (Kunzmann et al., 2023, p. 1)

Figura 9, Zampa Geko, ispirazione per GekoTape



Figura 10, Panelite



Figura 11, Bone Chair

## ● Livelli di applicazione: Macro scala

Per concludere, le applicazioni biomimetiche su **macro-scala**, individuate in architetture complesse e progetti di urbanistica, si orientano verso la **progettazione sistemica**, ovvero l'imitazione di ecosistemi naturali complessi per sviluppare soluzioni urbane, architettoniche e territoriali che siano resilienti, rigenerative e interconnesse.

L'applicazione della biomimetica a questa scala mira **ripensare le città e le infrastrutture come organismi viventi complessi**, in equilibrio con l'ambiente circostante. Ispirandosi al funzionamento degli ecosistemi naturali, i quali operano secondo principi di **unione, ciclicità e zero sprechi**.

L'approccio biomimetico punta a massimizzare l'efficienza delle risorse, ridurre l'impatto ambientale e migliorare la qualità della vita urbana, integrando l'essere umano come parte dell'ecosistema.  
(Zari, 2019, pp. 16-19)

Uno dei progetti realizzati più emblematici legato al concetto di biomimetica è **Eden Project**. Progettato negli anni '90 e aperto al pubblico nel 2001, si trova in **Cornovaglia**. L'idea è di **Tim Smith**, un imprenditore e ambientalista britannico, mentre i lavori sono stati seguiti dall'architetto **Nicholas Grimshaw** e dal suo studio.

Il progetto racchiude in sé la **serra più grande del mondo**, la quale ospita riproduzioni di ecosistemi naturali come la foresta pluviale tropicale e il clima mediterraneo, con migliaia di specie vegetali provenienti da ogni parte del pianeta.

La serra è racchiusa sotto ad un susseguirsi di **cupole geodetiche**, formate da un pattern esagonale, come a riprendere come già citato nei paragrafi precedenti la struttura a nido d'ape dell'honeycomb. Queste cupole sono traslucide e il materiale che le compone è **l'EFTE** (Ethylene Tetrafluoroethylene), polimero trasparente molto resistente e infinitamente più leggero del vetro, il quale permette di far penetrare la luce necessaria alla crescita delle piante ottimizzando i processi energetici.

Il design delle cupole integra sistemi di **ventilazione automatizzati** che rispecchiano il modo naturale in cui le piante e gli ecosistemi gestiscono temperatura e umidità. La ventilazione passiva permette lo sviluppo delle piante senza ricorrere a sistemi HVAC ad alto consumo energetico, contribuendo così al **risparmio energetico**.  
(Islam et al., 2024, p. 7)

Un'altra importante realizzazione da considerare è il progetto del **nuovo campus universitario della città di Fom el Oued**, in Marocco.

Progetto completato nel 2018 dallo studio di architettura francese **"L'Agence d'Architecture A. Bechu & Associés"**, si tratta di un campus totalmente integrato con l'ambiente desertico circostante, il quale risponde alle **esigenze dettate dal clima** particolare e prende ispirazione dalle forme fluide delle dune per le sue architetture e linee.

Tutti gli edifici del campus sono interconnessi da una **via centrale** dalla forma simile ad una crepa, la quale però in contrasto con le sembianze, è stata **riempita da elementi di vegetazione**, per contribuire al raffrescamento del clima e all'interazione tra le persone.

L'obiettivo del campus era innanzitutto gettare le basi per sperimentazione per nuove metodologie didattiche nei campi dell'acqua, dell'energia e dell'agricoltura desertica, attraverso l'installazione di **laboratori dedicati alle nuove tecnologie ambientali** e alla biomimetica. In secondo luogo, il campus doveva essere **autonomo a livello energetico**, producendo la quantità di energia necessaria al suo sostentamento.

Per fare ciò gli architetti hanno collaborato con gli ingegneri assegnati al progetto fino ad elaborare una strategia sostenibile che consente al campus di ottenere **l'80% della propria energia da fonti passive**, oltre a riciclare polveri, acqua e rifiuti organici per produrre acqua riutilizzabile e biofertilizzanti di alto valore.

L'approccio **combina tecnologie tradizionali e moderne** per creare una rete intelligente ispirata all'ambiente locale. Queste tecniche permettono al complesso di avvicinarsi a un modello a rifiuti quasi zero.  
(Gallery of Agence d'Architecture A. Bechu & Associés, n.d.)



Figura 12, Eden Project

## 1.2.4 Differenze e punti d'incontro

Analizzando i due approcci progettuali, **organicismo e biomimesi**, emerge una **relazione profonda, ma non sovrapponibile**, tra questi paradigmi ispirati alla natura.

simbolico per reintegrare l'essere umano nel ciclo naturale, la biomimesi ne fornisce le chiavi operative e progettuali, attuando **un cambio di paradigma** verso una sostenibilità attiva e consapevole.

Se da una parte entrambi condividono una radice comune nel **desiderio di riscoprire l'ambiente naturale come modello** e guida per lo sviluppo umano, dall'altra **si distinguono per ambiti di applicazione, finalità progettuali e metodologia**.

L'organicismo nasce come **visione estetico-filosofica**, fortemente connessa all'architettura e alle arti applicate, e si esprime nella volontà di **integrare forma, funzione e contesto ambientale in un unicum armonico**, dove l'opera umana si fonde con il paesaggio in una continuità sensoriale e visiva.

La biomimesi, al contrario, si configura come una **disciplina scientifica**, sistematica e trasversale, capace di spaziare dalla scala micro dei materiali a quella macro dei sistemi urbani, fondandosi su un **metodo rigoroso di osservazione, astrazione e trasposizione** delle strategie naturali.

In questa prospettiva, è possibile affermare che la **biomimesi rappresenti un'evoluzione o una specifica diramazione dell'organicismo**: non tanto nel senso cronologico, quanto in quello epistemologico.

Laddove **l'organicismo** introduce una sensibilità progettuale che guarda alla natura come **musa formale** ed etica, la **biomimesi** traduce tale visione in **strumenti concreti**, applicabili e quantificabili, dotati di una forte componente tecnologica e sperimentale.

La biomimesi si pone dunque come una **specializzazione dell'organicismo**, arricchita dalle possibilità offerte dalle scienze contemporanee.

È un'estensione metodologica, una sua "branca ingegneristica", potremmo dire, che non si limita a evocare la natura ma la interroga, la decodifica e la reinterpreta per affrontare le sfide del nostro tempo.

Nonostante le differenze di fondo, i due approcci si incontrano nella **ricerca di un equilibrio tra l'uomo e il suo ambiente**, nella volontà di superare l'antropocentrismo progettuale e di promuovere una visione sistemica del mondo.

In entrambi i casi, **la natura** non è più una risorsa da sfruttare, ma un **modello da ascoltare**.

Se l'organicismo offre il quadro culturale e



Figura 13, Campus



## 2. INTEGRAZIONE INDUSTRIA 5.0 NELLA BIOMIMETICA

Nei paragrafi successivi, l'elaborato si propone di esplorare il **rapporto tra l'innovazione introdotta dall'Industria 5.0**, preceduta e integrata da riferimenti all'evoluzione dell'Industria 4.0, e la **biomimetica**. L'analisi sarà condotta con particolare attenzione alle caratteristiche di sostenibilità insite nella biomimetica, così come alla dimensione progettuale a essa collegata.

Verranno esaminate le **motivazioni** alla base della transizione verso l'Industria 5.0, insieme agli output generati in termini di nuove tecnologie emergenti. Per ciascuna di queste tecnologie, saranno approfondite le relazioni esistenti o potenziali con l'approccio progettuale biomimetico, supportando l'analisi con l'esame di casi studio significativi.

### 2.1 La 5° rivoluzione industriale: un nuovo equilibrio tra tecnologia e ambiente

Nell'età umana sono esistite **cinque rivoluzioni** del sistema produttivo:

La **Prima Rivoluzione Industriale**, sviluppatosi a partire dallo sviluppo delle ferrovie, dall'invenzione della **macchina a vapore** e dagli investimenti sostenuti dal sistema capitalistico, ha segnato il passaggio dalla produzione manuale all'utilizzo di macchine azionate da energia a vapore o ad acqua.

Successivamente, con l'introduzione dell'**elettricità**, la **Seconda Rivoluzione Industriale** ha trasformato le fabbriche in vere e proprie linee di produzione moderne, portando a un aumento significativo della produttività e dello sviluppo economico.

Con la **Terza Rivoluzione Industriale**, sono stati introdotti i **primi computer** industriali, e nuove tecnologie di comunicazione, rendendo possibile l'automazione dei processi produttivi.

Oggi, in epoca **Industria 4.0**, sviluppatasi a partire dall'avvento di **internet** e dei sistemi di analisi digitali, i sistemi produttivi sono diventati intelligenti, le macchine sono in grado di comunicare tra loro in tempo reale, cooperando e prendendo decisioni autonome. Questo permette una produzione flessibile e personalizzata, senza rinunciare all'efficienza della produzione di massa.

Mentre le imprese iniziavano ad adottare queste tecnologie, si è sviluppato un nuovo concetto: **Industria 5.0**. Questa tecnologia si è sviluppata in seguito all'invenzione dell'**AI collaborativa**, **i Cobot** e ad una **maggiore attenzione alla produzione sostenibile**.

Questa nuova visione non si concentra solo su efficienza e automazione, ma mette al centro le **persone e l'ambiente**.

L'obiettivo è far sì che l'industria contribuisca al benessere della società, rispettando i limiti del pianeta e valorizzando il ruolo del lavoratore

L'Industria 5.0 rappresenta un'**evoluzione della quarta rivoluzione industriale**, ponendo al centro il benessere umano, la sostenibilità e la resilienza del sistema produttivo.

A differenza dell'Industria 4.0, che si concentra principalmente sull'automazione e l'efficienza attraverso l'uso di tecnologie avanzate, l'Industria 5.0 integra questi aspetti con una **visione human-centered e sostenibile**, mirando a una produzione che rispetti i limiti planetari e tuteli i diritti e la qualità della vita dei lavoratori.

L'Industria 5.0 non sostituisce l'approccio dell'Industria 4.0, ma lo **completa**, promuovendo una transizione verso un modello che coniuga l'innovazione tecnologica con valori sociali e ambientali.

La Commissione Europea ha formalmente lanciato la proposta dell'Industria 5.0 nel 2021, con l'intento di orientare le politiche industriali verso una produzione più **resiliente e inclusiva**, capace di affrontare sfide globali come la crisi sanitaria e le interruzioni nelle catene di approvvigionamento.

Gli obiettivi principali dell'Industria 5.0 includono la **promozione di una produzione sostenibile** che riduca gli sprechi e massimizzi l'efficienza delle risorse, migliorando la qualità del lavoro attraverso tecnologie che rispettino le diversità e i bisogni dei lavoratori.

A questo scopo, sono state individuate alcune tecnologie abilitanti fondamentali:

1. **Interazione uomo-macchina personalizzata** (cobot)
2. **Stampa 3d e Bio-stampa**
3. **Digital twins**
4. **IoT per l'analisi avanzata dei dati**
5. **Intelligenza artificiale**
6. **Tecnologie per l'efficienza energetica**

Per attuare questa visione, sono necessarie **politiche che integrino investimenti in ricerca, sviluppo e innovazione**, l'Industria 5.0, quindi, richiede un impegno a lungo termine e l'allineamento con obiettivi globali come gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite e il Green Deal europeo. (X. Xu et al., 2021)

#### 2.1.1 Robotica collaborativa: sinergia uomo-macchina

La robotica collaborativa è una tecnologia emergente che racchiude il suo significato all'intersezione tra tre ambiti fondamentali: **robotica, automazione e industria 5.0**.

Più nello specifico, essa fa riferimento allo sviluppo e all'utilizzo di robot progettati per lavorare a stretto contatto con l'essere umano, in modo **sinergico e cooperativo**.

Questi robot, chiamati "**cobot**" (collaborative robots), sono dotati di sensori avanzati, sistemi di controllo integrati e dispositivi di sicurezza che ne permettono un utilizzo sicuro anche in prossimità degli operatori umani.

L'obiettivo della cobotica è quello di **potenziare le capacità umane**, aumentare la produttività, migliorare l'efficienza e garantire ambienti di lavoro più sicuri e flessibili.

È proprio il legame con la nascente industria 5.0 a rendere questa tecnologia particolarmente interessante in chiave umana.

Se l'industria 4.0 era improntata su un approccio technology-driven, focalizzato sulla digitalizzazione e automazione dei processi, **l'industria 5.0 si concentra sulla centralità dell'uomo e sulla sua reintegrazione attiva all'interno dei processi produttivi**.

In questo contesto, i cobot si occupano di mansioni ripetitive e fisicamente gravose, lasciando spazio all'essere umano per attività ad alto valore cognitivo come creatività, decision-making e problem-solving. (Rahman et al., 2024, pp. 1-3)

Un passaggio significativo che accompagna l'evoluzione della robotica collaborativa da industria 4.0 a 5.0 è legato al tema della **sostenibilità**.

Oggi si sviluppano sistemi robotici sempre più

efficienti dal punto di vista energetico, affidabili e adattabili, che prendono ispirazione dalla natura. Le **strutture leggere ma resistenti** osservate in organismi naturali, ad esempio, permettono di progettare componenti più performanti e leggeri, riducendo l'uso di materiali.

Queste tecnologie si avvicinano ai principi della **biomimesi e dell'economia circolare**, in cui gli scarti di un processo diventano risorse per un altro. In ottica 5.0, i sistemi bioispirati a ciclo chiuso riducono al minimo gli sprechi, ottimizzando il riutilizzo dei materiali e contribuendo attivamente alla costruzione di un ecosistema industriale più sostenibile.

Dal punto di vista biomimetico non solo questa tecnologia prende ispirazione per la realizzazione dei cobot stessi, ma contribuisce alla **realizzazione di prodotti biomimetici grazie alle ampie possibilità di lavorazioni che offre**.

(Habib, 2025, pp. 5-6)

Un esempio significativo è il **Padiglione di ricerca ICD/ITKE**, Stoccarda, 2016;

L'Institute for Computational Design (ICD) e l'Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) dell'Università di Stoccarda hanno realizzato un padiglione che dimostrasse come la **robotica collaborativa potesse essere applicata alle strutture in legno**.

Costruita in parti modulari in lamellato di faggio, la struttura presenta una forma del tutto nuova per i materiali utilizzati, tali **moduli** sono stati uniti tramite una cucitura, tipica dell'industria tessile, pensata dagli studenti dell'università di Stoccarda e applicata dai cobot, fino al raggiungimento di una struttura salda e unica.

La forma delle strutture modulari deriva dalla reinterpretazione delle geometrie interne **dei ricci di mare**, osservate attraverso immagini e scansioni SEM (microscopia elettronica a scansione), fornite dall'Università di Tubinga. Tali fonti hanno portato alla realizzazione di una forma ottimizzata sia nella forma esterna che nella disposizione del doppio strato di materiale interno.

Il padiglione è costituito da 151 moduli prefabbricati i quali permettono l'assenza di una struttura di fissaggio in metallo, mantenendo così il peso della struttura sotto agli 800 kg. (Domus, 2012)



Figura 15, padiglione biomimetico esterno

Figura 14, padiglione biomimetico esterno /cucitire



Figura 16, Cobot

## 2.1.2 Stampa 3D e Bio-stampa

La **stampa 3d**, o Additive manufacturing, è una tecnologia emergente che unisce gli ambiti di progettazione 3d digitale e la manifattura additiva stessa.

Più nello specifico, essa fa riferimento allo sviluppo e all'utilizzo di sistemi di produzione che costruiscono oggetti **strato dopo strato**, partendo da **modelli digitali** tridimensionali. Questo processo consente una realizzazione fisica estremamente precisa e personalizzata, in modo flessibile e sostenibile.

Già presente nell'industria 4.0, questa tecnologia permette innumerevoli vantaggi rispetto alle tradizionali tecnologie di formatura e lavorazione di prodotti, ad esempio:

- **Produzione On-demand:**

è promossa una produzione per **singoli pezzi** e non più di massa, e di conseguenza un processo più flessibile e sostenibile dal punto di vista dell'impatto ambientale.

- **Riduzione degli sprechi**

rispetto alla manifattura tradizionale di tipo sottrattivo questa genera una **quantità molto minore di scarti**, permettendo la progettazione stessa dei supporti in modo da ridurli al minimo o di non inserirli affatto.

- **Personalizzazione**

questa tecnologia permette al cliente di ottenere un **prodotto totalmente adattato alle proprie esigenze** e bisogni, andando contro al consumismo eccessivo tipico dei prodotti standardizzati.

L'industria 5.0 ha collaborato al controllo e al cambiamento della produzione di prodotti tramite additive manufacturing, anche attraverso:

### 1. Ottimizzazione delle supply chain

la manifattura additiva favorisce la produzione distribuita, riducendo la dipendenza da fabbriche centralizzate. Questo porta anche ad una **riduzione dei costi dei trasporti**, permettendo la realizzazione del prodotto potenzialmente da ovunque.

### 2. Collaborazione uomo-macchina

come già accennato nel paragrafo precedente, l'uomo è necessario alla realizzazione di prodotti

e non sostituito dalla stampa 3d.

La parte più **creativa e progettuale** è infatti **relegata alla sfera umana**, mentre quella strettamente costruttiva alla macchina, questo porta ad una totale sinergia tra i due mondi rendendoli costantemente interconnessi. (PDF, s.d.-c, p. 258)

La manifattura additiva e la stampa 3D sono elementi chiave dell'Industria 5.0, in quanto promuovono **innovazione, sostenibilità e una collaborazione** più efficace **tra esseri umani e macchine**. Con l'evoluzione di queste tecnologie, il modo in cui progettiamo, realizziamo e distribuiamo i prodotti sarà profondamente trasformato nel panorama industriale del futuro.

Un'innovazione della stampa 3d portata dall'industria 5.0 è la **stampa 4D**.

La stampa 3d ha rivoluzionato il mondo della produzione attraverso la costruzione additiva di oggetti tridimensionali, mentre la stampa 4D aggiunge una quarta dimensione: il **tempo**.

In questo nuovo approccio, il materiale stampato è **programmato per modificare la propria forma o comportamento nel tempo**, in risposta a specifici stimoli ambientali come temperatura, umidità, luce o altri fenomeni.

Il concetto di stampa 4D è stato formalizzato nel 2013 da **Skylar Tibbits**, ricercatore del **MIT**, il quale ha presentato questa tecnologia come capace di integrare nella progettazione i comportamenti dei materiali stessi. Tali materiali, spesso **polimeri a memoria di forma** (SMPs) o **idrogel**, possono essere stampati in strutture complesse e dinamiche, progettate per dismettersi o modificarsi.

Questa nuova dimensione progettuale si avvicina sensibilmente ai **principi della biomimetica**, poiché propone materiali e soluzioni ispirati ai comportamenti presenti in natura. Così come certi organismi naturali modificano

la propria forma in risposta a stimoli esterni per sopravvivere o adattarsi all'ambiente, anche gli oggetti realizzati in 4D printing sono pensati per **evolversi dinamicamente in funzione delle condizioni circostanti**.

In linea con i principi dell'Industria 5.0, questa tecnologia si colloca in uno scenario in cui tecnologia, sostenibilità e adattabilità convergono verso un nuovo modello produttivo a misura d'uomo, in cui la materia diventa intelligente e responsiva.

La stampa 4D, in tal senso, apre nuove prospettive nella progettazione bioispirata, offrendo possibilità inedite per la creazione di sistemi in grado di trasformarsi nel tempo, rispondendo attivamente alle esigenze ambientali e funzionali.

(Arruda & Palombini, 2024, p. 175)

Un caso studio che racchiude l'integrazione tra stampa 3d/4d e biomimetica sono le collezioni progettate e prodotte dalla stilista Olandese **Iris Van Herpen**, in particolare l'abito **Holobiont**.

I capi, ottenuti tramite stampa 3d e 4d, esplorano l'interconnessione tra esseri viventi e microrganismi, si **espandono e si contraggono per simulare processi naturali** come la crescita o la respirazione. Ha inoltre utilizzato polimeri programmabili che cambiano aspetto con il calore o altri stimoli, permettendo agli abiti di trasformarsi dinamicamente.

L'abito è realizzato con componenti stampati in 3D, in particolare moduli polimerici flessibili, utilizzando la macchina **PolyJet di Stratasys**, che consente di stampare materiali morbidi e rigidi allo stesso tempo, ideale per creare superfici traslucide.

Per quanto riguarda il concetto di tempo l'abito è prodotto e sviluppato per adattarsi ai movimenti fluidi del corpo, ampliando e diminuendo lo spazio tra gli elementi modulari, inoltre i pattern utilizzati sono sensibili alla luce e di conseguenza cambiano nel tempo. (Iris van Herpen, n.d.)

### 2.1.3 Internet of Things (IoT) e Digital Twins

L'Internet of Things (IoT) e i Gemelli Digitali (Digital Twins) sono tecnologie che integrano il mondo fisico e digitale attraverso connessioni intelligenti e rappresentazioni virtuali.

Più nello specifico, l'IoT fa riferimento allo sviluppo e all'utilizzo di **infrastrutture capaci di raccogliere, trasmettere ed elaborare dati in tempo reale**, collegando dispositivi, sensori e sistemi fisici alla rete Internet. Il Digital twins invece, **si basa su questi dati per creare copie virtuali sincronizzate ad oggetti o processi reali**, riflettendone le caratteristiche e le prestazioni.

Questo processo consente il **monitoraggio continuo**, creazioni di simulazioni avanzate e di processo, analisi comportamentali e azioni decise attraverso un processo data-driven, migliorando la gestione dei sistemi complessi in modo flessibile, preciso e sostenibile.

Queste due tecnologie sono nate e appartengono all'**industria 4.0** e sono utilizzate per ottimizzare processi di produzione, decisionali o per la creazione di modelli per la valutazione a 360 gradi di un processo.

Non sempre a queste funzioni corrispondono o si integrano i valori individuati dall'industria 5.0, come resilienza, sostenibilità e visione umano centrica.

Per l'integrazione e lo sviluppo dei processi in un'ottica progettuale orientata alla **sostenibilità ambientale si è pensata l'unione di IoT e Digital twins per lo sviluppo di un modello molto sensibile all'interazione tra fisico e virtuale**. Tale modello ha come obiettivo quello di generare **sistemi intelligenti e adattivi** a seconda delle necessità e dei cambiamenti imprevedibili dell'ambiente esterno. Alcuni concetti chiave per attuare in modo efficace questi obiettivi sono:

- **Il riciclo** come pratica per ridurre i rifiuti e l'uso di materie prime vergini,
- **La "riconversione"**, per estendere la vita dei materiali e prodotti trovando nuove applicazioni.
- **Il "Rinnovamento"**, inteso come rigenerazione delle risorse naturali mediante pratiche quali miglioramento del suolo e conservazione idrica.

Queste pratiche sono **incorporate nell'industria 5.0** come componenti fondamentali per ridurre l'impatto ambientale e realizzare un sistema produttivo circolare, che valorizzi i materiali e le risorse naturali, contrastando la crescente problematica dei rifiuti.

Dal punto di vista della sostenibilità ambientale

la combinazione di IoT e Digital twins consente un monitoraggio continuo e intelligente dei processi, ottimizzando risorse, riducendo sprechi e supportando pratiche di economia circolare, puntando in alcuni casi a progettazioni di processi **"zero waste"**.

Per quanto riguarda l'IoT nello specifico si parla di **"green IoT"**, ovvero la produzione di sistemi IoT progettati per **minimizzare il consumo energetico** e ridurre l'impronta di carbonio.

Nel caso di studio sull'agricoltura verticale (aeroponica), il Digital twin aiuta a ottimizzare la temperatura, l'umidità e altri parametri tecnici essenziali, riducendo il consumo di acqua, energia e temperatura, adattandoli ai cambiamenti delle necessità della vegetazione interessata.

Per quanto riguarda la **resilienza**, come già accennato in precedenza le architetture Digital twin sincronizzate a IoT favoriscono **sistemi capaci di adattarsi rapidamente a eventi imprevisti**, supportando la continuità operativa anche in condizioni non ottimali.

Infine, per quanto riguarda l'integrazione uomo-macchina, il modello ottenuto permette agli operatori umani di **interagire con i Digital twins per migliorarne la produttività e il benessere**, modellando sistemi socio-tecnici che valorizzano il contributo umano, unendo una prospettiva concreta e umanistica ad una prettamente tecnica.

(Awouda et al., 2024)

Un'applicazione di questo modello coerente con i principi della creazione di ecosistemi biomimetici è il grattacielo del **Bosco Verticale di Boeri**, a Milano.

Si tratta di un edificio residenziale circondato e immerso tra alberi e vegetazione, il quale propone un nuovo concetto di sostenibilità e biodiversità.

Durante la fase di progettazione, il Bosco Verticale ha utilizzato la tecnologia del Digital Twins attraverso la piattaforma IBM Watson IoT per **monitorare le performance ambientali**, ottimizzare la crescita delle piante e monitorare le condizioni dei microclimi delle piante.

Questo evidenzia il ruolo dei Digital Twins nelle decisioni precoci, garantendo che siano soddisfatti efficacemente sia gli obiettivi ambientali che quelli funzionali.

(Şenel Solmaz, 2025)



Figura 17, Holobiont,  
Iris Van Herpen



## 2.1.4 Intelligenza artificiale

L'**intelligenza artificiale** o AI, è una tecnologia che ad oggi risulta molto ampia e complessa. Il suo obiettivo è quello di creare **sistemi e risultati in grado di simulare l'intelligenza umana**, attraverso la traduzione di testi, produzione di ragionamenti e l'elaborazione di dati per arrivare a conclusioni critiche, in alcuni casi, come nel contesto robotico, presenta addirittura un'autonomia di movimento e di percezione degli spazi.

Se nell'industria 4.0 questa tecnologia veniva utilizzata prettamente per l'**ottimizzazione dei processi industriali**, riduzione dei costi e aumento della produttività sostituendo addirittura l'operatore umano, con l'industria 5.0 l'approccio cambia radicalmente.

I valori base di questo nuovo paradigma sono radicalmente cambiati rispetto al passato, e mettono **al centro l'uomo** come già detto più volte, la creatività e la sostenibilità dei processi industriali. In questo senso l'AI ha assunto un'accezione differente, di collaborazione con l'utente umano, fungendo da **strumento di supporto per l'intelletto umano**, attraverso la definizione di processi ottimizzati dal punto di vista dei consumi energetici e all'integrazione dell'etica dell'AI, vale a dire la **trasparenza** dei processi attuati nella tecnologia stessa.

La branca dell'AI che verrà approfondita in questo paragrafo è la "**Generative AI**", sottocategoria del Machine learning, ovvero degli algoritmi dell'intelligenza artificiale che apprendono dai dati e migliorano nel tempo senza essere programmati. Questi algoritmi si dividono in **classic ML**, ovvero quegli algoritmi che necessitano di specifiche da parte dell'uomo per funzionare correttamente, e **deep ML**, ovvero quelli che agiscono autonomamente su banche dati molto importanti.

La **Generative AI**, algoritmo del deep ML, è una tipologia di AI che si concentra sulla **creazione di contenuti differenti partendo dall'analisi di dati** fino ad arrivare ad output coerenti di questi. Ad oggi una delle piattaforme di Generative AI più conosciute è chat gpt.

Un esempio di generative AI legato al tema della progettazione biomimetica si ritrova in **BIDARA** (Bio-Inspired Design and Research Assistant), algoritmo finanziato e progettato dalla NASA per il progetto PeTal, vale a dire una piattaforma open source che integra strumenti di intelligenza artificiale, come il machine learning e l'elaborazione del linguaggio naturale, per analizzare e classificare dati biologici.

Il suo obiettivo è aiutare scienziati e progettisti a trarre ispirazione dalle strategie naturali per

sviluppare tecnologie sostenibili e innovative. BIDARA è una chat basata su ChatGPT progettato specificamente per aiutare come già detto progettisti e scienziati a comprendere e replicare strategie naturali per lo **sviluppo di tecnologie sostenibili**. Si basa sulla strada definita dal Biomimicry Institute e sul percorso della progettazione della spirale biomimetica, guidando gli utenti nel processo di progettazione.

La limitazione di questo algoritmo è il fatto che è basato solamente su una **banca dati ristretta** di risorse; dunque, è possibile che non riesca a trovare soluzioni efficaci per qualsiasi tipo di situazione. (Lascari, 2023)

Figura 18, Bosco verticale, Boeri

## 2.2 FOCUS: Triz

**TRIZ**, acronimo di "Teoria della Soluzione Inventiva dei Problemi", è una metodologia avanzata sviluppata per la **risoluzione creativa di problemi complessi** e per guidare in modo sistematico il processo di innovazione tecnica. Fu ideata tra il 1946 e il 1985 dall'ingegnere e inventore russo **Genrich Altshuller**, che analizzò migliaia di brevetti per individuare schemi ricorrenti e principi universali dell'invenzione.

TRIZ si fonda su alcuni concetti chiave. Uno dei principi fondamentali è il riconoscimento che esistono **modelli comuni nei problemi tecnici**: la maggior parte delle innovazioni non nasce da intuizioni casuali, bensì segue schemi evolutivi precisi e ripetibili, basati su leggi scientifiche e principi ingegneristici consolidati.

Un altro concetto centrale è che **le contraddizioni sono al cuore dei problemi complessi**: spesso le sfide progettuali richiedono di soddisfare simultaneamente requisiti opposti, come ad esempio aumentare la resistenza di un materiale riducendone il peso. TRIZ offre strumenti specifici per risolvere tali contraddizioni senza dover scendere a compromessi che penalizzano l'efficacia delle soluzioni.

La metodologia si basa sull'**analisi sistematica dei brevetti esistenti** e sull'approfondimento delle tecnologie ingegneristiche disponibili. Attraverso processi di classificazione e astrazione, TRIZ individua modelli di risoluzione dei problemi che possono essere trasferiti da un settore tecnico a un altro.

Uno degli strumenti più noti sviluppati all'interno di TRIZ è la **matrice delle contraddizioni**, che aiuta i progettisti a individuare le priorità tra i principi inventivi da applicare, in funzione delle specifiche caratteristiche del problema da risolvere. In questo modo, è possibile affrontare sfide progettuali complesse con maggiore rigore, metodo e creatività.

Questa metodologia si configura dunque come un **supporto concreto all'innovazione**, aiutando i progettisti a identificare soluzioni originali e funzionali basate su una valutazione scientifica approfondita del contesto tecnologico e produttivo.

TRIZ consente anche di superare i conflitti decisionali e di **ridurre i tempi di sviluppo**, offrendo un linguaggio comune e condiviso per la definizione e la discussione delle soluzioni progettuali. L'approccio strutturato di TRIZ non solo stimola la creatività tecnica, ma favorisce anche un'evoluzione coerente dei sistemi tecnologici verso forme più efficienti e performanti.

### 2.2.1 Integrazione Triz e biomimetica

Triz può essere utilizzato in modo efficace anche come supporto decisionale per la ricerca di soluzioni progettuali **biomimetiche**.

Il collegamento tra TRIZ e biomimetica nasce dall'idea di utilizzare i modelli funzionali propri di TRIZ per **interpretare meglio la classificazione delle funzioni naturali** presente nella "Tassonomia della biomimetica.", vale a dire un ampio database di soluzioni naturali organizzate per funzione.

Applicando questo modo di vedere tali funzioni, si possono superare le ambiguità o le incongruenze presenti nella classificazione originale.

In particolare, TRIZ usa una struttura chiamata **Portatore-Azione-Oggetto** per descrivere in modo semplice e preciso come funziona un sistema.

Questa struttura si basa su tre elementi:

- **Portatore**

è chi o cosa genera l'azione (es. una pompa),

- **Azione**

è il movimento o il cambiamento prodotto (ad esempio spingere o muovere),

- **Oggetto**

è chi o cosa subisce l'azione (ad esempio un liquido).

In pratica, grazie ai modelli di TRIZ, è possibile **riorganizzare le soluzioni naturali** in modo più chiaro, logico e facilmente accessibile per ingegneri, progettisti e innovatori. Questo rende molto più semplice trovare ispirazione nella natura e trasformare le strategie biologiche in soluzioni tecnologiche efficaci.

In sintesi, combinare TRIZ e biomimetica significa **creare un ponte più solido tra il mondo naturale e il mondo tecnico**, permettendo di innovare sfruttando al meglio le idee già presenti e sfruttate dalla natura stessa. (Baldussu & Cascini, 2015; Bogatyrev & Bogatyreva, 2015; Ekmekci & Nebati, 2019).

Dopo aver analizzato in questo capitolo le principali tecnologie adattate ai principi dell'Industria 5.0, nel prossimo capitolo ci

concentreremo su uno in particolare di questi principi fondamentali: la **sostenibilità**.

In particolare, approfondiremo il tema della progettazione sostenibile, esplorando diversi modelli teorici e pratici che, pur partendo da approcci differenti, convergono verso un obiettivo comune: **promuovere una progettazione responsabile ed efficiente dal punto di vista ambientale, economico e sociale**.



## 3. PROGETTARE PER LA SOSTENIBILITÀ

La **progettazione sostenibile** è un approccio alla progettazione, in ambiti di architettura, ingegneria, urbanistica e design, che mira a **ridurre al minimo l'impatto ambientale**, sociale ed economico delle opere, promuovendo l'utilizzo di risorse naturali e locali, la durabilità, la salute e il benessere degli utenti e il rispetto dell'ambiente.

Si fonda su linee guida e principi che vanno dall'ottimizzazione dell'efficienza energetica, alla riduzione dell'utilizzo di risorse e alla produzione di inquinamento e rifiuti, o ancora alla durabilità del progetto stesso.

Agisce mediante l'applicazione di strategie di **Life Cycle Thinking** (pensiero basato sul ciclo di vita), valutazioni **LCA** (Life Cycle Assessment), analisi energetiche, mirando a massimizzare le prestazioni e a ridurre il consumo di risorse non rinnovabili.

La progettazione sostenibile non è quindi solo una tecnica, ma un **approccio strategico e metodologico** che richiede la cooperazione tra diverse competenze e che mira a generare valore durevole per l'ambiente, la società e l'economia.

In questo capitolo verranno approfonditi i punti chiave di passaggio da **un'economia di tipo lineare ad una di tipo circolare**, attraverso l'analisi di più paradigmi differenti: Eco-design, biomimetica e Blue Economy.

Verranno analizzate le idee e i valori alla base di ogni paradigma, prendendo in considerazione casi studio differenti che rispondono a tali idee.

(Horani, 2023)

### 3.1 PASSAGGIO DA ECONOMIA LINEARE A CIRCOLARE

Analizzando la situazione globale odierna, il tema della **sostenibilità** sta diventando sempre più importante, anche grazie al crescente interesse delle aziende ad adottare politiche incentrate sulla riduzione dei rifiuti e l'ottimizzazione dei processi di produzione, in ottica di risposta ai problemi ambientali crescenti.

Proprio partendo da questo cambiamento di pensiero, si è passati **da un paradigma di produzione ad un altro** opposto: da sistema di produzione **lineare, a circolare**.

#### 3.1.1 Economia lineare: caratteristiche ed impatti

Il sistema di **produzione lineare**, nato con l'avvento dell'industrializzazione, è basato su un processo "**prendi, produci, scarta**" e ha dominato l'economia dal XVIII secolo, portando a un incremento esponenziale di consumo e spreco.

Questa modalità, seppur efficiente nel breve termine, si è rivelata **insostenibile nel lungo periodo** a causa dell'esaurimento delle risorse naturali, dell'inquinamento e della crescente

crisi ambientale.

La consapevolezza di tali limiti ha portato a sviluppare un nuovo modello, quello **circolare**, che si ispira ai processi naturali di rigenerazione.

#### 3.1.2 Principi dell'economia circolare

Per completare tale cambio di rotta, tanti sono stati i passaggi chiave nel corso degli anni:

- Nel **1970**, grazie a un graduale cambio ideologico da parte degli economisti, sono iniziati i **primi dibattiti** riguardanti lo sviluppo del pensiero di produzione sostenibile.

- Nel **1976**, **Walter Stahel**, economista svizzero e padre dell'economia circolare, insieme a **Geneviève Reday**, pubblica per la Commissione Europea il rapporto "**The Potential for Substituting Manpower for Energy**", in cui propone un modello economico che minimizzi il consumo di risorse e l'energia, e massimizzi l'uso della manodopera e la durata dei prodotti.

- Nel **1982** ha sottolineato l'importanza di passare da un modello economico basato sulla **proprietà dei beni** a uno basato sull'**uso dei beni**, anche chiamato "**Economia della prestazione**".

- Negli **anni '80** propone per la prima volta il modello "**Cradle to Cradle**", fondato su cicli continui di utilizzo delle risorse, in cui niente diventa rifiuto.

#### 3.1.3 Implicazioni per la progettazione

Nel 1990 nasce il concetto di **eco-progettazione**, o **eco-design**, approccio che ha l'obiettivo di rendere più efficienti le linee di produzione attraverso l'imitazione dei cicli chiusi della natura.

Sulla scia di questo nuovo approccio, nel decennio seguente sono nati altri due approcci:

- La **biomimetica**, riportata alla fama da Janine Benyus, che ricerca nella natura soluzioni a problemi complessi.

- La **blue economy**, concetto introdotto da Gunter Pauli, che integra modelli di business innovativi con i sistemi della natura.

Il concetto di **Green Economy** è stato invece formalizzato in occasione della Conferenza delle Nazioni Unite sullo Sviluppo Sostenibile (Rio+20, 2012), con l'obiettivo di garantire una **crescita economica sostenibile** attraverso l'efficienza energetica, l'uso del carbonio e l'adozione di fonti rinnovabili.

L'**Economia Circolare** è un paradigma recente, evoluzione di tutti i principi sopracitati, che mira a scindere la crescita economica dal consumo di risorse, attraverso un approccio sistemico.

Una comprensione di base del principio circolare implica:

- la progettazione di prodotti **più durevoli e riparabili**;

- l'adozione del **riutilizzo e riciclo** nei cicli produttivi;

- un **cambiamento culturale nella società**, da un atteggiamento di consumo a uno più efficiente e consapevole.

Il rapido **progresso tecnologico** rappresenta un aspetto chiave di questa transizione.

L'Unione Europea svolge un ruolo determinante nel promuovere il passaggio da un'economia lineare a una circolare, mediante **politiche, finanziamenti** e una **base legislativa** mirata

a favorire il mantenimento dei prodotti e dei materiali nel ciclo produttivo il più a lungo possibile, promuovendo sostenibilità e riduzione dei rifiuti.

Nei prossimi paragrafi verranno analizzati nel dettaglio i differenti paradigmi sopracitati. (Dabija & Năstase, 2024)

## 3.2 PRIMO PARADIGMA: ECO-DESIGN

Come accennato in precedenza l'approccio della produzione umana non è stata, e in parte non è ancora, sostenibile a livello di processi e risorse. Per affrontare tale insostenibilità nasce negli anni '90' un nuovo paradigma di progettazione: **L'eco-design**.

L'eco-design costituisce un approccio progettuale che **integra le logiche tradizionali** della progettazione e della gestione con una **visione ambientale più consapevole**, includendo sistematicamente le problematiche ecologiche nei processi decisionali.

Questo avviene considerando attentamente le dimensioni spaziali e temporali rilevanti, così da guidare scelte più responsabili lungo tutto il ciclo di vita del prodotto o del sistema.

### 3.2.1 Obiettivi dell'Eco-design

Gli **obiettivi** che cerca di raggiungere l'eco-design sono molteplici, in questo paragrafo verranno affrontati in modo più generale, mentre nel capitolo successivo verranno riportati i principi puntuali del paradigma, che permettono di raggiungere tali obiettivi.

#### 1. Soddisfare i bisogni umani essenziali

L'economia umana dipende inevitabilmente dalle risorse naturali per cibo, energia, materiali e benessere. L'obiettivo dell'eco-design è garantire che lo sfruttamento di tali risorse **non superi i limiti ecologici**, evitando danni irreversibili agli ecosistemi.

#### 2. Promuovere la sostenibilità delle risorse

Un'economia sostenibile si basa sull'uso responsabile delle risorse rinnovabili, a differenza di quelle non rinnovabili, che si esauriscono. L'eco-design **incoraggia l'efficienza, il riutilizzo e il riciclo** per ridurre sprechi e danni ambientali, mantenendo la qualità dei beni e servizi.

#### 3. Mantenere l'integrità ecologica:

Gli ecosistemi supportano la biodiversità e i servizi fondamentali per l'uomo (acqua, aria, clima, ecc.). L'eco-design cerca di **integrare le attività umane con la struttura e il funzionamento degli ecosistemi**, valutando attentamente gli impatti e la capacità di carico ambientale del territorio.

#### 4. Imitare i processi naturali:

I sistemi naturali sono reti complesse e dinamiche. L'eco-design si ispira a questi modelli per pianificare attività umane più "naturali" e interconnesse, dove gli scarti di un processo diventano risorse per un altro. È l'approccio delle sinergie industriali, che riducono rifiuti e consumi energetici.

#### 5. Eliminare il debito ecologico

Molte attività economiche causano danni ambientali non affrontati nei costi, generando un "debito verso la natura". L'eco-design mira a includere questi costi lungo **tutto il ciclo di vita di un progetto**, dalla produzione allo smaltimento, per raggiungere un vero profitto sostenibile.

#### 6. Proteggere gli habitat naturali

Anche i progetti più attenti possono avere impatti ambientali. Per questo l'eco-design prevede misure di compensazione, come aree protette, per tutelare specie e ecosistemi non compatibili con l'attività economica proposta.

#### 7. Aumentare l'alfabetizzazione ambientale

La tutela ambientale è una responsabilità collettiva. L'eco-design richiede la collaborazione tra progettisti, istituzioni, imprese e cittadini, che devono essere consapevoli delle conseguenze ambientali delle proprie scelte. L'educazione ambientale è quindi un elemento chiave per il successo di qualunque strategia sostenibile. (Shu-Yang et al., 2004)

### 3.2.2 Caso studio: Paper Softwall

**Paper Softwall** è un prodotto sviluppato dallo studio canadese Molo design, fondato da Stephanie Forsythe e Todd MacAllen. Realizzato in **carta kraft** riciclata o tessuto non tessuto è un esempio eccellente di eco-design applicato all'interior ed exhibit design, in quanto combina funzionalità, sostenibilità e innovazione estetica.

Si tratta di un setto divisorio autoportante, piegabile e flessibile, capace di adattarsi a qualsiasi forme lineare o curva, in base alle esigenze e ai contesti in cui si utilizza.

Si tratta di un **prodotto modulare**, composto da singole parti di una lunghezza massima di 4,5 metri le quali si compattano fino ad arrivare ad uno spessore di una decina di centimetri in

fase di disuso.

Tali moduli sono realizzati con sovrapposizioni di strati di materiale disposto in geometrie alveolari.

Essendo fatti in cartone o pet riciclato, **limitano i suoni** e garantiscono privacy al visitatore, oltre che ad essere **riciclabili o biodegradabili** e facilmente montabili e smontabili.

Paper Softwall è stato esposto in diversi musei internazionali, tra cui il MoMA di New York, ed è stato premiato per il suo valore innovativo sia in termini di design che di sostenibilità. (Molo Design, n.d.)

### 3.2.3 Approccio LCA

L'Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment, o **LCA**) è uno strumento analitico impiegato per **valutare gli impatti ambientali** potenziali e le risorse utilizzate lungo tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto, partendo dall'estrazione delle materie prime fino alla fase di dismissione o riciclo, sia per modelli "**cradle to cradle**" che "cradle to grave".

Il metodo LCA è stato formalizzato nel 1990 dalla **Society of Environmental Toxicology and Chemistry** (SETAC), e successivamente integrato, nel 1993, negli standard **ISO 14000** per la gestione ambientale da parte dell'Organizzazione Internazionale per la Normazione (ISO).

Secondo l'ISO, l'LCA consiste nella **raccolta e valutazione sistematica di input, output e impatti ambientali** potenziali legati a un sistema prodotto lungo l'intero ciclo di vita.

Ad oggi, l'LCA rappresenta uno strumento ampiamente riconosciuto a livello internazionale e applicato in vari settori: gestione ambientale, **produzione industriale, trasporti, l'energia, architettura**. È considerato fondamentale per l'eco-design e lo sviluppo sostenibile. (Liu et al., 2024)

Risulta interessante integrare questo approccio con i **principi di eco-design** per l'ottenimento di soluzioni di progetto sostenibili a partire dall'analisi del contesto e del processo.

L'LCA fornisce infatti una **base metodologica** rigorosa per identificare gli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita di un prodotto. Questa analisi consente ai progettisti di individuare le fasi più critiche e intervenire con strategie migliorative già nella fase concettuale del design.

L'eco-design allo stesso tempo mira a ridurre

gli impatti ambientali agendo a monte del processo produttivo. L'integrazione con l'LCA consente di sostituire un approccio **riparativo** con uno **preventivo**, anticipando criticità anziché gestirle a posteriori. Per fare ciò l'LCA fornisce dati quantitativi che supportano decisioni progettuali consapevoli, ad esempio nella scelta di materiali, processi produttivi o strategie di fine vita. Questo rende l'eco-design più oggettivo e misurabile

Per terminare è importante dire che l'integrazione tra LCA ed eco-design non è lineare, ma **ciclica**. Ogni cambiamento del progetto può essere valutato attraverso l'LCA per verificare se le modifiche apportate portano effettivamente a un miglioramento ambientale. Questo è utile per sviluppare versioni sempre più ecologiche dello stesso prodotto. (Mattos Batista De Moraes et al., 2025)

## 3.3 SECONDO PARADIGMA: GREEN ECONOMY

Il termine “**Green economy**” è stato definito alla conferenza di Rio+20 e si tratta di un approccio e una guida da seguire per ottenere o seguire una produzione ed un'economia sostenibile.

Il primo riferimento alla green economy è stato effettuato da un gruppo di economisti britannici guidati da **David Pearce, Anil Markandya** e **Edward Barbier** nel 1989, in risposta alla svalutazione dei problemi sociali ed ambientali nel sistema economico dell'epoca. (Pearce, D., Markandya, A., & Barbier, E. (1989). *Blueprint 1: for a green economy*. Routledge.)(Barbier, 2013)

Nel corso degli anni la definizione di green economy è stata ampliata, nel 2011 l'**UNEP** (United Nations Environment Programme) definisce la green economy come un'economia che porta a un miglioramento del “**benessere e dell'equità sociale, riducendo significativamente i rischi ambientali e le scarsità ecologiche**”.

La “crescita verde” riguarda lo sviluppo della crescita economica assicurando che le risorse naturali e i servizi ambientali da cui dipende la nostra sopravvivenza e benessere non vengano compromessi.

Per fare questo essa deve essere sostenuta da **investimenti** che permettano la ricerca di nuove innovazioni che creino crescita continuativa per le nuove generazioni. La green economy è un'economia **qualitativa**, e **pulita**, vale a dire che è efficiente nell'uso delle risorse naturali e che riduce al minimo l'inquinamento e i danni ambientali.

Inoltre, la green economy è stata utilizzata per affrontare le crisi finanziaria e climatica ed è un elemento essenziale per raggiungere gli obiettivi di mitigazione climatica definiti durante la riunione di Parigi. (Loiseau et al., 2016)

### 3.3.1 Principi della Green Economy

I principi della green economy rappresentano le basi **etiche, sociali ed ecologiche** su cui costruire un'economia sostenibile, inclusiva e resiliente.

Essi guidano la trasformazione dei modelli economici tradizionali, orientandoli verso uno sviluppo che non comprometta il benessere delle persone né la salute del pianeta.

I principi di cui si parla sono:

- **Giustizia**

determina che ogni persona ha diritto all'accesso equo alle risorse naturali, ai servizi ambientali e ai benefici dello sviluppo.

- **Sostenibilità**

sancisce che le attività economiche devono rispettare la capacità di carico degli ecosistemi, evitando di oltrepassare i limiti del pianeta terra.

- **Pianeta sano**

ha l'obiettivo di proteggere e ripristinare la biodiversità e le funzioni del pianeta indispensabili per la sopravvivenza umana.

- **Dignità**

decreta che ogni persona merita condizioni di vita dignitose, avere un lavoro decente e soddisfacente, vivere in sicurezza ed essere libera da povertà energetica e idrica.

- **Inclusione**

sancisce che nessuno dev'essere escluso dai benefici della transizione verde.

- **Buona governance**

pretende trasparenza, anticorruzione, regole chiare e responsabilità condivisa negli investimenti green.

- **Generazionale**

stabilisce che le scelte odierne non devono compromettere le opportunità delle generazioni future.

- **Efficienza e sufficienza**

invita ad usare le risorse in modo efficiente e a promuovere modelli di consumo che evitino sprechi e domanda eccessiva.

- **Resilienza**

dice che i sistemi economici e sociali devono poter assorbire cambiamenti e crisi climatiche, sanitarie e finanziarie senza collassare. (Zvarych et al., 2023)

Figura 19, Paper Softwall,  
Molo design

### 3.3.2 Caso studio: Broken Nature: Design Takes on Human Survival

Un esempio rilevante di progetto sviluppato sui temi della green economy è **“Broken Nature: Design Takes on Human Survival”**, XXII Esposizione Internazionale tenutasi alla Triennale di Milano nel 2019, curata da **Paola Antonelli**, Senior Curator d del MoMA di New York.

La mostra esplora il concetto di **“design ricostituente”**, ovvero un design capace di riparare i legami compromessi tra esseri umani e natura, uno dei principi centrali della green economy, che promuove uno sviluppo sostenibile, circolare e socialmente equo. (Ceccarelli, 2019)

Broken Nature racconta lo **sfruttamento delle risorse** naturali da parte dell'uomo, ma propone anche riflessioni e soluzioni per un futuro più responsabile. Il design viene presentato come strumento attivo e rigenerativo, capace di stimolare nuovi comportamenti sostenibili.

L'obiettivo non è evitare un destino già compromesso, ma **immaginare scenari alternativi**, coinvolgendo i visitatori in un percorso educativo e sensoriale. In linea con la green economy, la mostra invita a ripensare il rapporto con il pianeta, promuovendo una transizione ecologica anche culturale.

Un tema centrale è la **comunicazione** dei dati ambientali: il linguaggio del design viene utilizzato per rendere accessibili e comprensibili fenomeni complessi come il riscaldamento globale o la perdita di biodiversità, contribuendo alla formazione di una cittadinanza più consapevole.

Le installazioni spaziano tra **visioni possibili del futuro e proposte concrete**, come sistemi naturali per la filtrazione dell'acqua, dispositivi antismog o materiali alternativi alla plastica.

Una sezione è dedicata al design sostenibile e all'economia circolare, con progetti come quello dello studio **SWINE**, che ha realizzato sgabelli in alluminio ricavato dal riciclo delle lattine, mostrando come i rifiuti possano diventare risorsa estetica e funzionale.

Altre sezioni affrontano temi fondamentali della transizione ecologica, come la produzione di energia solare, la gestione dei rifiuti elettronici e l'utilizzo responsabile delle risorse naturali.

La mostra si conclude con una riflessione profonda: il design, attraverso oggetti e concetti, può influenzare questioni ambientali e politiche

urgenti, diventando veicolo di nuove modalità di discussione pubblica.

In questo senso, Broken Nature rappresenta un chiaro esempio di applicazione dei principi della green economy nel mondo del design e della comunicazione culturale.

(Lionello, 2019)

### 3.3.3 Confronto con la progettazione Biomimetica

La green economy è un **modello di sviluppo sostenibile** che mira a ridurre l'impatto ambientale delle attività economiche, promuovendo un uso efficiente delle risorse naturali, il riciclo, le energie rinnovabili e l'inclusione sociale.

Questo approccio punta a conciliare **crescita economica, tutela dell'ambiente e benessere** delle comunità, stimolando investimenti e innovazioni sostenibili.

La **biomimesi** invece è una **metodologia progettuale e tecnologica** che prende ispirazione dai processi e dai meccanismi della natura per sviluppare soluzioni più efficienti e sostenibili. Imita i cicli chiusi degli ecosistemi, i materiali e le strutture naturali per ridurre l'uso di risorse e limitare l'inquinamento, offrendo strumenti utili anche per la **transizione ecologica**.

Questi due approcci presentano forti **punti di contatto**, come:

- **Sostenibilità**

Entrambi condividono l'obiettivo di costruire un futuro sostenibile. La green economy promuove un'economia a basse emissioni e a basso impatto, mentre la biomimesi contribuisce attraverso soluzioni ispirate alla natura che favoriscono l'efficienza energetica, il riciclo e la riduzione degli sprechi.

- **Innovazione**

La green economy si basa su tecnologie e pratiche innovative per trasformare i settori produttivi, e la biomimesi rappresenta una fonte importante di ispirazione per queste innovazioni, suggerendo modelli presi direttamente dal mondo naturale.

Tuttavia, presentano anche alcune **differenze**, in particolare per quanto riguarda:

- **Ambito e finalità**

La green economy è un modello economico complessivo, che comprende politiche, investimenti, produzione e consumo sostenibili. La biomimesi, invece, è un approccio metodologico applicabile a diversi settori, focalizzato sulla progettazione e sull'innovazione tecnologica ispirata alla natura.

- **Scala e applicabilità**

Le strategie della green economy sono spesso orientate a cambiamenti sistemici e possono essere adottate a livello politico, economico e sociale. La biomimesi richiede invece spesso tempi più lunghi e risorse elevate per la ricerca, rendendone a volte più complessa l'implementazione su larga scala.

Nonostante queste differenze, biomimesi e green economy si rafforzano a vicenda in modo **complementare**.

Da un lato, la biomimesi offre **soluzioni innovative e sostenibili** che trovano applicazione diretta nei settori promossi dalla green economy, come l'energia, l'edilizia, il design e l'agricoltura. Ispirandosi ai meccanismi della natura, contribuisce a ridurre sprechi, ottimizzare l'uso delle risorse e migliorare l'efficienza dei processi produttivi.

Dall'altro lato, la green economy fornisce il **contesto ideale per la diffusione di tecnologie biomimetiche**, grazie a politiche di sostegno, incentivi economici e normative orientate alla sostenibilità.

In questo modo, crea terreno fertile per la ricerca e l'adozione su larga scala di soluzioni ispirate alla natura, trasformando l'innovazione biomimetica in un **motore concreto per la transizione ecologica**. (Koho, s.d.)

## 3.4 TERZO PARADIGMA: BLUE ECONOMY

Il secondo paradigma progettuale di cui parleremo, la **Blue Economy**, è successivo all'eco-design, più in particolare nasce nel 2010 quando l'economista belga **Gunter Pauli** ne teorizza i principi e lo definisce concretamente per la prima volta nel suo libro **“Blue Economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs “**.

La Blue Economy, secondo Gunter Pauli nel suo Rapporto al Club di Roma, è un paradigma economico complesso, di stampo sistemico e rigenerativo che si distingue profondamente dai processi tradizionali industriali e anche dai più recenti modelli di sviluppo sostenibile, come la green economy.

Si fonda su un principio base, ovvero l'imitazione del funzionamento degli ecosistemi naturali, applicando i processi della biomimetica per creare di un nuovo sistema di produzione in grado di creare nuovi posti di lavoro e promuovere il benessere ambientale e sociale, partendo da risorse locali e riducendo gli scarti. L'ispirazione fulcro della blue economy parte dall'**utilizzo e reimpiego delle risorse** prodotte dai differenti ecosistemi. (Pauli, 2010)

### 3.4.1 Storia della Blue Economy

Come spiegato nel paragrafo precedente il concetto di Blue economy viene teorizzato da Gunter Pauli per la prima volta nel 2010, dove viene descritto un nuovo modello di economia che crea valore dagli scarti. Pauli mette un accenno sulla potenzialità **dell'acquacultura, energie rinnovabili** e il settore delle **biotecnologie** per l'ottenimento di una crescita economica legata alla crescita della sostenibilità ambientale.

Da questo momento in poi la blue economy ha ottenuto sempre maggiori supporti e credibilità grazie agli investimenti e alle politiche promosse da organizzazioni internazionali, come le Nazioni unite e la banca mondiale. Ad oggi è diventata un punto cardine per lo sviluppo sostenibile e una strada da seguire per ottenere e rispettare gli **SDG's** (Sustainable Development Goals), in particolare il numero 14, che si concentra sulla conservazione e sullo sfruttamento sostenibile delle risorse idriche degli oceani.

Oltre a Pauli altri eventi hanno contribuito all'affermazione di questo paradigma, come ad esempio la **Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente e lo Sviluppo** (UNCED) del 1992 a Rio, la quale ha portato all'adozione dell'**agenda**

**21**, un progetto per lo sviluppo sostenibile che riconosce gli oceani, i mari e le fonti idriche come soggetti necessari al cambiamento. In questo senso è stato promosso la necessità di una gestione integrata e dell'uso sostenibile delle risorse oceaniche e degli ecosistemi.

Il Vertice Mondiale sullo Sviluppo Sostenibile (**WSSD**) del 2002 a Johannesburg inoltre ha identificato nella Blue Economy un motore di crescita economica e riduzione della povertà. È stato creato un programma Globale di Azione per la Protezione dell'Ambiente Marino dalle Attività Provenienti dalla Terra. Più recentemente invece è l'unione europea stessa che ha sviluppato una strategia di crescita che promuove l'uso sostenibile delle risorse marine.

Nel complesso, il concetto di blue economy ha le sue radici nell'evoluzione dello sviluppo sostenibile e si è evoluto per diventare una via fondamentale per raggiungere la sostenibilità ambientale, la crescita economica e lo sviluppo sociale. (Youssef, 2023)

### 3.4.2 Principi della Blue Economy

A differenza della green economy, la **Blue Economy** non si basa sulla conservazione passiva, ovvero un approccio che mira a non peggiorare lo stato ambientale attuale limitandosi a ridurre l'impatto lavorativo dei processi, ma sulla **rigenerazione attiva** dei sistemi naturali e sociali, ovvero un **approccio propositivo, evolutivo** e di cambiamento che crea nuovo valore a partire da scarti.

Il suo scopo è dimostrare che è possibile creare **più valore con meno risorse**, stimolando innovazione, resilienza e competitività senza danneggiare il pianeta.

Al centro del pensiero di Pauli c'è la convinzione che la natura sia il sistema produttivo più efficiente: in essa nulla viene perso, **ogni scarto diventa risorsa**, ogni elemento ha una funzione, e ogni processo è interconnesso in modo da garantire l'equilibrio tra organismi e ambiente.

Applicare questi principi all'economia significa:

- **Trasformare** i rifiuti in materie prime, integrando flussi produttivi in realtà locali.
- **Ridisegnare** i sistemi industriali e abitativi seguendo flussi naturali di luce, aria, energia, ecc.

- **Utilizzare la conoscenza scientifica** per generare tecnologie ispirate alla natura che siano accessibili, economicamente vantaggiose e adattabili localmente.

- **Valorizzare il capitale naturale e sociale**, riscoprendo il ruolo delle comunità, dei territori, della cultura e delle specificità ambientali locali come principi per uno sviluppo integrato e armonioso.

- **Favorire la biodiversità imprenditoriale** e locale, superando il modello di economia lineare e centralizzato basato su pochi prodotti globalizzati e promuovendo invece una rete di iniziative locali interconnesse.

In questo contesto, la Blue Economy non è solo un insieme di soluzioni tecnologiche, ma una vera e propria **visione sistemica e sociale**, che promuove un cambiamento di paradigma: dalla massimizzazione del profitto si passa alla **creazione di valore condiviso**, dall'efficienza disinteressata si passa alla sufficienza consapevole, e infine dal core business semplificato si passa alla complessità degli ecosistemi.

Infine, la Blue Economy è una risposta concreta alla crisi ambientale, sociale ed economica globale, in quanto propone 100 innovazioni imprenditoriali replicabili in tutto il mondo, capaci di creare 100 milioni di posti di lavoro. (Pauli, 2010)

### 3.4.3 Caso studio: Recupero di acqua senza osmosi

Il biologo marino **Andrew Parker**, professore di zoologia dell'università di Oxford in Gran Bretagna, ha pensato e sviluppato l'idea di questo caso studio all'inizio degli anni 2000.

Questo progetto nasce dalla ricerca di una risposta ad una sfida globale: la **disponibilità di acqua**. Parker ha cercato una soluzione meno energeticamente dispendiosa della bonifica dell'acqua salata dei mari in acqua potabile.

Per fare questo ha osservato e studiato il comportamento e la forma/caratteristiche di una particolare specie di **coleottero**, il tenebrionide, il quale vive nel deserto del Namib. Questo insetto è in grado di **recuperare l'acqua dall'aria** e farla fluire dove è necessario solo per forza di gravità e senza la necessità di modificare il corso di fiumi, costruire dighe o installare apparecchiature per effettuare l'osmosi inversa, oltre ad apportare un notevole risparmio energetico.

Per fare questo il coleottero presenta un esoscheletro molto particolare sul dorso,

formato da **strutture idrofile** che attirano l'acqua su strutture però **idrofobe**, che dunque ne impediscono l'assorbimento. Grazie a questo meccanismo è possibile ottenere riserve d'acqua senza la necessità di trattamenti invasivi esterni.

L'obiettivo di questo esperimento è appunto quello di **recuperare acqua potabile senza la necessità di effettuare un processo di Osmosi**, processo di filtrazione che sfrutta una membrana semipermeabile per separare l'acqua dalle impurità disciolte, come sali minerali, metalli pesanti e contaminanti, effettuato principalmente su acqua proveniente da mari o fiumi.

Questa innovazione potrebbe essere applicata in grandi città per diminuire il calore portato dall'assenza di vegetazione e vicinanza dei grattacieli, ad esempio Tokyo, Londra e Chicago, riducendo anche le emissioni di anidride carbonica.

Se applicate diffusamente e in affiancamento a quelle già esistenti, queste tecnologie consentirebbero una risposta più efficace alle carenze idriche. (Pauli, 2010, p.281)

### 3.4.3 Confronto con la progettazione Biomimetica

In sintesi, dunque la Blue Economy si riferisce a un paradigma di crescita sostenibile che mira a **sfruttare le risorse marine in modo responsabile**, promuovendo attività economiche che siano ecologicamente sostenibili, inclusive e innovative, come la pesca sostenibile, le energie rinnovabili offshore, il trasporto marittimo e il turismo responsabile.

La biomimetica invece è un campo di ricerca e innovazione che si ispira alle **caratteristiche biologiche e comportamentali** delle specie viventi e organismi naturali per sviluppare nuove tecnologie e applicazioni industriali. Esso si basa sull'**osservazione e l'imitazione del funzionamento della natura** per risolvere problemi di design e ingegneria, come ad esempio materiali più resistenti o sistemi di movimento ispirati alle forme marine.

Questi due paradigmi sono molto vicini per quanto riguarda alcuni aspetti, come:

#### • Sostenibilità

entrambi enfatizzano l'importanza di un utilizzo responsabile delle risorse marine. La Blue Economy mira a un uso sostenibile delle risorse, mentre la biomimetica può contribuire alla sostenibilità riducendo l'impatto ambientale tramite innovazioni che, ad esempio, riducono inquinamento.

### •Innovazione

entrambi si basano sulla valorizzazione dell'ecosistema, nel primo caso marino, nel secondo si parla di ecosistema in generale, come fonte di innovazioni. La Blue Economy promuove tecnologie innovative per lo sviluppo economico, mentre la biomimetica rappresenta un paradigma di innovazione tecnologico ispirato alla natura

Mentre **differiscono** per altri aspetti come:

#### • Obiettivo primario

la Blue Economy si concentra soprattutto sulla gestione sostenibile e sullo sviluppo della produzione partendo da **materie prime locali o/e di scarto**, con un'attenzione particolare all'aspetto economico, sociale e ambientale. La biomimetica invece, si focalizza sulla **ricerca e lo sviluppo di tecnologie** ispirate alla natura, senza necessariamente essere legato alla gestione diretta delle risorse primarie.

#### • Applicazione e benefici

La Blue Economy include **attività industriali e locali**, che possono avere impatti ambientali e sociali più immediati e tangibili, promuovendo idee di economia circolare e gestione dei rifiuti. La biomimetica si applica come una tecnologia o un **approccio per innovare in vari settori**, spesso con benefici "intangibili" come la riduzione dell'impatto ambientale o il miglioramento delle tecnologie, ma che dipendono dall'applicazione tecnologica e dai regolamenti europei e mondiali.

È possibile quindi affermare che la **Blue Economy** e la biomimetica condividono l'obiettivo comune di un uso responsabile e sostenibile delle risorse: la prima **valorizzando gli scarti** delle risorse come fonte di innovazione e sviluppo, mentre la seconda attraverso una **progettazione consapevole**. La differenza principale consiste nell'obiettivo che si pone ognuna delle metodologie progettuali, infatti la Blue Economy ha come obiettivo quello di promuovere nuovi modelli di progettazione sostenibile, mentre la biomimetica mantiene un obiettivo più mirato ad un livello tecnico e progettuale.

(Blasiak et al., 2022)

## 3.5 INTEGRAZIONE E CONFRONTO TRA BIOMIMETICA ED ECO-DESIGN

Nei prossimi paragrafi di approfondimento verranno ripresi i principi fondamentali dell'**ecodesign** e della **biomimetica** per definire in modo articolato i criteri per la progettazione di un exhibit design sostenibile.

L'obiettivo sarà individuare un insieme di **linee guida** che permettano di rispondere efficacemente a entrambi i paradigmi, generando **spazi espositivi innovativi, responsabili** e coerenti con le sfide ambientali contemporanee.

### 3.5.1 Principi della Biomimetica

Riprendendo l'introduzione svolta nel capitolo uno riguardante la storia della biomimetica e i metodi di ricerca e di applicazione di questa, andremo adesso a toccare un tema differente: i **principi** della biomimetica.

Questi principi, anche chiamati **Life's Principles** (LP), sono sei in totale, e sono prospettive e linee guida tratte direttamente dalla natura.

Si basano sull'idea che la vita sulla terra è interconnessa e interdipendente, e che tutte le forme viventi sono soggette alle stesse condizioni ambientali.

Questi principi rappresentano schemi ricorrenti osservati tra le specie che hanno avuto successo sulla Terra, e se studiati è possibile sviluppare soluzioni progettuali innovative valutandone l'impatto rispetto a questi modelli.

#### • Evolvere per sopravvivere

si basa sull'idea che la vita evolve costantemente per garantire continuità e adattabilità. In questo senso, replicare strategie che si sono dimostrate efficaci, integrare elementi imprevisi trasformandoli in opportunità e riorganizzare le informazioni in modi innovativi sono pratiche che permettono di migliorare e adattarsi nel tempo.

#### • Adattarsi ai cambiamenti

invita a **rispondere ai cambiamenti ambientali in modo dinamico**. La natura lo fa integrando la diversità per aumentare la capacità di reazione. Inoltre, mantiene efficaci i processi tramite l'auto-rinnovamento, e sviluppa resilienza distribuendo le funzioni in modo che nessuna dipenda interamente da una sola componente.

#### • Essere sintonizzati e reattivi con il contesto locale

si riconosce che la natura è profondamente radicata nei suoi contesti locali. Gli organismi sfruttano cicli naturali ricorrenti, utilizzano materiali ed energie disponibili (locali) e rispondono ai cambiamenti grazie feedback continui. Inoltre, hanno relazioni di cooperazione, creando sistemi basati sul vantaggio reciproco.

#### • Integrare sviluppo e crescita

si riferisce alla capacità della vita di far evolvere struttura e funzione in modo complementare. In natura, i sistemi si auto-organizzano, costruiscono dal basso verso l'alto, ovvero da semplici unità modulari, e integrano componenti ripetibili che rendono la crescita efficiente, adattabile e scalabile.

#### • Essere efficienti nelle risorse

sottolinea come la natura sia maestra nell'uso efficiente delle risorse. Riduce al minimo il consumo energetico adottando **processi a bassa energia**, realizza design multifunzionali in cui un solo elemento risponde a più esigenze, ricicla completamente tutti i materiali in cicli chiusi e adatta la forma degli organismi alla loro funzione, ottenendo così prestazioni ottimali con il minimo spreco.

#### • Utilizzo di processi chimici atossici

si ispira alla chimica naturale, che è sicura, efficiente e non tossica. I materiali biologici si decompongono in elementi innocui, vengono creati con un **numero limitato di elementi chimici** per semplificarne la gestione dei rifiuti, e si sviluppano attraverso reazioni chimiche che avvengono in acqua, un solvente naturale, evitando sostanze pericolose o inquinanti.

In sintesi, questi sei principi e le relative strategie offrono una guida preziosa per progettare in modo **rigenerativo**, in armonia con i sistemi naturali e in linea con i valori della sostenibilità. (Stevens et al., 2022, p. 4)

### 3.5.2 Principi dell'Eco-design

Come accennato in precedenza nei paragrafi riguardanti la storia e gli obiettivi dell'ecodesign, analizzeremo ora i principi e le **linee guida progettuali** della progettazione sostenibile. Infine, confronteremo queste informazioni con i principi del paragrafo precedente al fine di trarre conclusioni concrete.

Le **linee guida dell'eco-design** costituiscono un insieme di criteri progettuali utili per tradurre i principi della sostenibilità ambientale in **scelte di processo** e prodotti concrete. In particolare, sono state racchiuse in macrocategorie principali, suddivise in sottocategorie con indicazioni più puntuali.

Un primo tema è quello della **prevenzione dei rifiuti e la riduzione dell'uso di materiali e risorse**.

Questo implica l'adozione di strategie per evitare gli scarti già nelle prime fasi della progettazione, come:

- **l'ottimizzazione** delle **quantità** di materiale impiegato;

- la **riduzione di spessori** e dimensioni;

- la **dematerializzazione**, ossia la sostituzione di oggetti fisici con funzioni digitali o integrate.

Tale approccio si traduce in un ciclo di vita più efficiente e sostenibile, estendendosi anche alla:

- **minimizzazione dei consumi** energetici durante tutte le fasi: produzione, distribuzione, uso e dismissione.

Il secondo tema riguarda la **scelta consapevole dei materiali**.

Si incoraggia l'uso di:

- **materiali riciclati o riciclabili**, provenienti da fonti rinnovabili a ciclo breve, e facilmente identificabili per facilitarne la raccolta e il fine vita.

È inoltre raccomandato l'uso di materiali tra loro compatibili sotto il profilo ecologico, evitando accostamenti che rendano difficile lo smaltimento, come nel caso di componenti trattati con sostanze tossiche o metalli pesanti.

Il terzo tema fondamentale riguarda la **progettazione per la sostenibilità ambientale e territoriale**.

Questo si sviluppa attraverso l'utilizzo di pratiche come:

- **Il design modulare;**
- **La standardizzazione**, che facilita insieme al design modulare la riparazione, la sostituzione delle parti e l'aggiornamento tecnologico del prodotto.

- **Ottimizzazione trasporto e stoccaggio**, nei confronti sia del packaging che del prodotto, entrambi progettati in tutte le fasi del loro ciclo di vita.

Vengono inoltre valorizzati aspetti legati al comfort d'uso, come:

- **La riduzione dei consumi energetici** e delle emissioni acustiche.

Infine, l'ultimo tema riguarda l'adozione di una visione fondata sul **Life Cycle Thinking**. Ciò implica:

- **La valutazione degli impatti ambientali** lungo tutto il ciclo di vita del prodotto, dalla progettazione iniziale fino alla dismissione. Questo approccio promuove:

- **Uso di risorse rinnovabili;**

- **La riduzione delle emissioni** e dei rifiuti;

- **Il riutilizzo "a cascata" dei materiali**, favorendo sistemi produttivi che rispettano le comunità e il contesto locale. (Lanzavecchia, 2012., p. 158)

### 3.5.3 Casi studio

Per verificare la tesi per la quale la biomimetica applicata non risponda totalmente ai criteri di sostenibilità ambientale sopra citati presenti invece nella sua versione teorica è stata presa in analisi **un'ampia gamma di casi studio** differenti, afferenti a settori di applicazione molto differenti tra loro.

L'applicazione della biomimetica si estende a numerosi ambiti, dall'architettura al design, fino all'ingegneria.

Analizzando il catalogo dei casi studio, emerge chiaramente che la **macroarea** più influenzata dalla biomimetica è quella delle **tecnologie su micro e nano scala**. Questa categoria, caratterizzata da innovazioni recenti e ad alto contenuto tecnologico, rappresenta circa il **37%** del totale dei progetti esaminati.

Segue la macroarea **dell'architettura** e dell'**exhibit design**, che copre il **34%** dei casi. I progetti si concentrano principalmente su edifici residenziali e pubblici, ambiti in cui l'integrazione

di soluzioni biomimetiche e sostenibili richiede generalmente un significativo investimento economico.

Il restante **29%** riguarda il **product design**, con applicazioni diversificate che spaziano dalla medicina al design di arredi, fino al fashion design.

Le tecnologie impiegate per realizzare questi progetti sono molto eterogenee. Si va dalle **tecniche tradizionali** dell'edilizia, supportate da software di modellazione 3D, fino a soluzioni più avanzate come la **robotica** (presente in 4 casi studio), il **generative design** (presente in un solo caso) e la **stampa 3D** (utilizzata in 5 casi). Contrariamente a quanto si potrebbe pensare, le tecnologie tradizionali non escludono l'innovazione: in ben 19 casi sono stati utilizzati processi consolidati come lo stampaggio a iniezione, la compressione e la sinterizzazione, che si sono dimostrati efficaci nell'implementazione di principi biomimetici.

Dal punto di vista temporale, circa il **77%** dei casi studio è stato sviluppato **dopo il 2000**, e ben **14 di questi dopo il 2014**. Questo dato evidenzia una chiara tendenza all'innovazione negli ultimi anni, non solo tecnologica ma anche culturale, con un orientamento sempre più marcato verso una progettazione sostenibile e in armonia con l'ambiente.

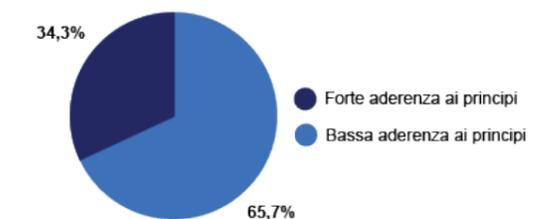
Per quanto riguarda le fonti di ispirazione biologica, i casi studio si distribuiscono in tre principali categorie:

- **Ispirazione animale:** il **45%** dei progetti trae spunto da caratteristiche del mondo animale, come geometrie, texture cutanee o comportamenti specifici.

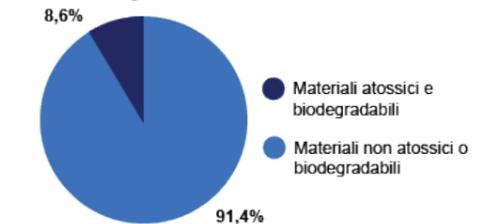
- **Ispirazione vegetale:** il **34%** si ispira al mondo delle piante, considerando aspetti come le strutture interne o i processi di crescita.

- **Ispirazione inanimata:** il restante **21%** fa riferimento a elementi naturali non viventi, come rocce, conchiglie o ambienti marini.

Coerenza biomimesi ed Eco-design



Utilizzo materiali atossici e biodegradabili



Scelta locale e consapevole dei materiali

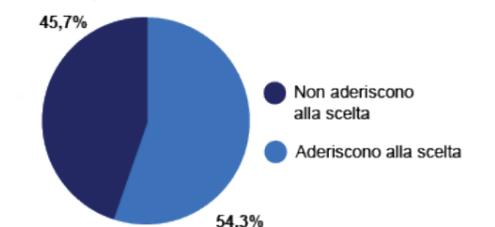


Figura 20, grafici a torta /comparazione

### 3.5.4 Analisi critica dei casi studio

Nel grafico seguente sono riportati nella colonna centrale i casi studio analizzati organizzati in tre macro-gruppi: **micro, meso e macro-scala**.

Ogni macrogruppo è collegato alla colonna di sinistra, che comprende i **principi della biomimetica** utilizzati nei casi studio, e alla colonna di destra, che comprende i **principi dell'eco-design** ritrovati nei casi studio.

Questa tipologia di rappresentazione permette di capire nell'immediato le relazioni tra i vari principi e i casi studio, così come l'importanza di ogni principio o meno all'interno del macrogruppo, evidenziata dallo spessore della linea di connessione.

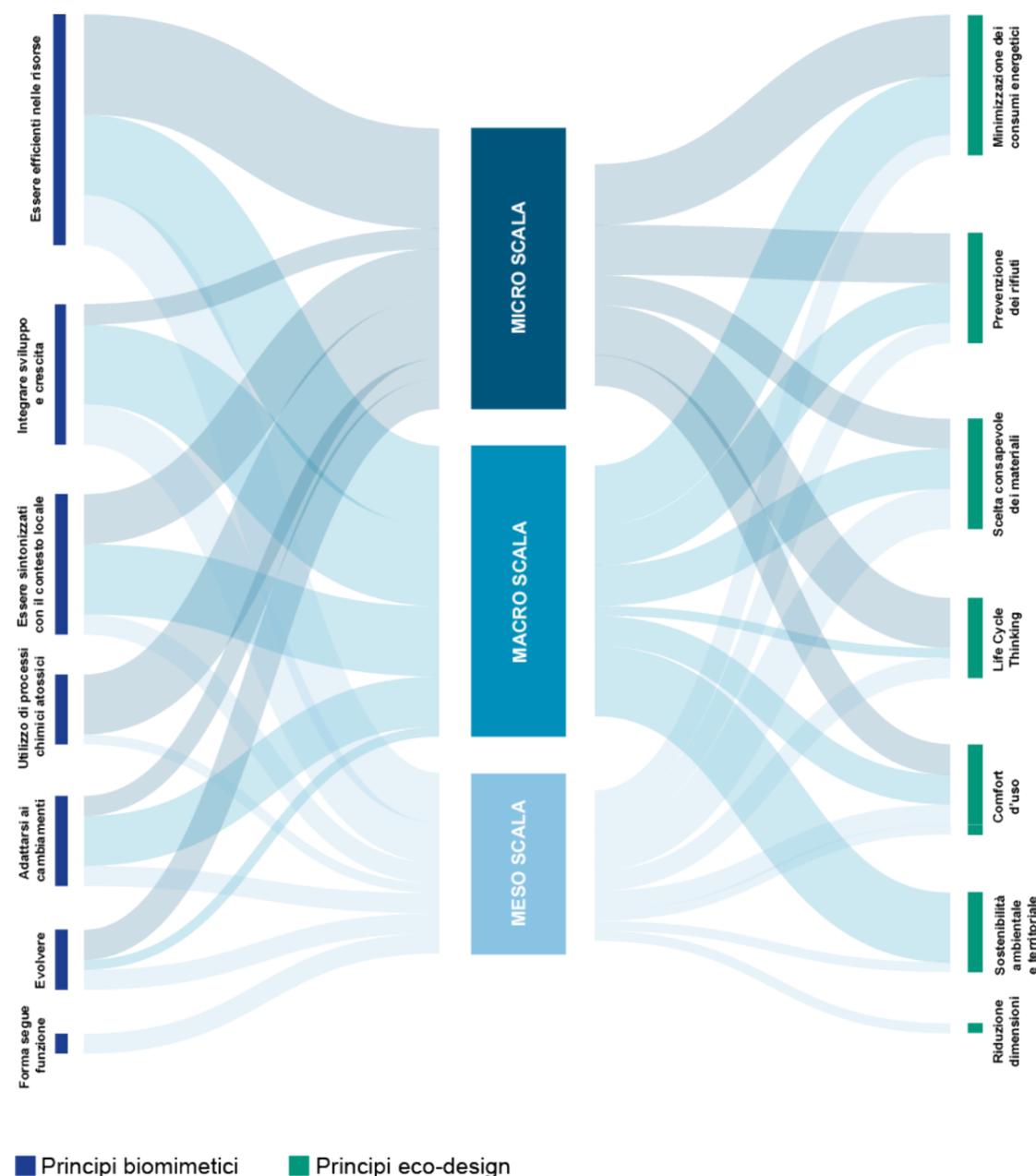


Figura 21, Sankey diagram

Il ventaglio di casi studio analizzati rivela una notevole coerenza con i principi della biomimesi, evidenziando come **l'ispirazione dalla natura sia un motore per l'innovazione** in design e architettura.

Idealmente, tutti i casi studio dimostrano un'applicazione di strategie biomimetiche, dalla reinterpretazione di forme e strutture (come nel caso del Geko Tape che riorganizza il concetto di adesione del Geco o nel Shinkansen che ripensa il design del treno basandosi sul Martin pescatore ) all'adattamento ai cambiamenti (come l'hygroscope che risponde all'umidità come la Pigna ) e all'efficienza delle risorse (si pensi alla Bone Chair che ottimizza il materiale ispirandosi alle Ossa o all'Eastgate centre che riduce i consumi energetici imitando il Termitaio).

Tuttavia, la coerenza con i **principi** della biomimesi più strettamente legati alla **sostenibilità**, come l'utilizzo di processi chimici atossici, **è meno uniformemente presente**. Solamente l'**8,5%** circa dei casi studio adottano l'uso di materiali atossici o biodegradabili (ad esempio, Bio Knit con micelio), suggerendo una **minore attenzione su questo specifico aspetto**.

Passando all'**eco-design**, l'analisi rivela un quadro più eterogeneo. Sebbene l'ottimizzazione delle quantità di materiale e la riduzione dei consumi energetici siano presenti in un numero significativo di progetti (ad esempio, Elytra filament pavillon con riduzione del materiale e Smart flower solar che sfrutta i girasoli per l'energia), altri criteri fondamentali dell'ecodesign mostrano una minore adozione esplicita. In particolare, per quanto riguarda la **scelta consapevole dei materiali** (riciclati, riciclabili, rinnovabili, facilmente identificabili e compatibili ecologicamente), solo un sottoinsieme dei casi studio fornisce informazioni dettagliate o implica una chiara adesione a tali principi. Ad esempio, materiali come il legno o l'alluminio riciclabile (Swirl faucet ) vengono menzionati, ma per numerosi altri casi, il **45,71%** circa, le **descrizioni sui materiali sono generiche o non specificano la loro sostenibilità**. Ciò significa che quasi la metà dei casi studio non risponde esplicitamente o chiaramente a questo specifico carattere dell'ecodesign.

Allo stesso modo, i principi di **design modulare, standardizzazione per facilitare riparazione e aggiornamento**, e ottimizzazione di trasporto e stoccaggio, pur essendo implicitamente presenti in alcuni progetti che si auto-organizzano o utilizzano componenti ripetibili (come nel Panelite a nido d'ape), **non sono presenti nella maggior parte dei casi studio**.

L'obiettivo dell'analisi è quello di discernere la coerenza di questi progetti con entrambi i

gruppi di principi di eco-design e biomimetica. Sebbene tutti i casi studio rispondano idealmente ai principi biomimetici (a parte le sfumature sulla sostenibilità appena citate), un'analisi più rigorosa sull'ecodesign rivela che circa il **45,71% dei casi studio non fornisce prove sufficienti** o non mostra una chiara adesione **ai principi di scelta consapevole dei materiali e di progettazione per la sostenibilità ambientale e territoriale**.

In sintesi, mentre **l'ispirazione dalla natura è ampiamente presente**, l'applicazione sistemica e trasparente di tutti i principi dell'ecodesign è un'area che potrebbe beneficiare di maggiore interesse ed attenzione.

Infine, il **34% dei casi studio mostra una forte aderenza sia ai principi della biomimesi che a quelli dell'ecodesign**, evidenziando come l'integrazione di queste due discipline sia una via promettente per un design più sostenibile e innovativo.

### 3.5.5 Riflessioni e conclusioni

Dall'analisi dei principi fondamentali dei due approcci emergono **numerosi punti in comune**, che dimostrano come la progettazione biomimetica e quella ecocompatibile non siano percorsi paralleli ma complementari:

#### Efficienza nell'uso delle risorse e dell'energia

presente in entrambi, sottolinea l'importanza di ridurre gli sprechi, utilizzare cicli chiusi e adottare materiali multifunzionali.

#### Modularità e adattabilità

sia la biomimesi (con lo sviluppo dal basso e l'autorganizzazione) sia l'ecodesign (con il design modulare e la standardizzazione) promuovono soluzioni flessibili e riparabili.

#### Utilizzo consapevole dei materiali

entrambi gli approcci enfatizzano l'importanza della compatibilità ecologica, della riciclabilità e della provenienza sostenibile.

#### Contesto e territorio

il principio biomimetico di "essere localmente sintonizzati" trova corrispondenza nel focus dell'ecodesign su filiere corte, packaging efficiente e riduzione dell'impatto territoriale.

Tuttavia, ciascun paradigma mantiene anche **aspetti propri e caratteristici**:

La biomimesi si distingue per l'approccio orientato ad un'**emulazione della natura**, da un punto di vista principalmente progettuale, si caratterizza per processi di auto-organizzazione, l'evoluzione continua e l'uso di **chimica "life-**

**friendly**". Sono elementi teoricamente solidi ma spesso più difficili da applicare direttamente nei contesti industriali su larga scala.

L'**eco-design**, d'altra parte, è più orientato alla fattibilità pratica e al rispetto di normative e standard, integrando strumenti come il Life Cycle Thinking e l'Analisi del Ciclo di Vita (LCA), che permettono una valutazione quantitativa dell'impatto ambientale.

Dalla fusione di questi due sistemi emergono **criteri progettuali avanzati**, che rispondono tanto agli ideali rigenerativi della natura quanto alle esigenze concrete della sostenibilità applicata. L'obiettivo è superare l'ispirazione teorica, propria della biomimetica, per tradurla in azioni progettuali verificabili, grazie alle metodologie dell'ecodesign.

Nel prossimo paragrafo verranno quindi rielaborati questi principi e riadattati con l'obiettivo di creare un insieme coordinato di **linee guida progettuali per l'exhibit design**, capace di rispecchiare fedelmente entrambi i paradigmi, e di guidare la progettazione verso soluzioni innovative, durature e armoniche con il contesto ambientale e sociale.

### 3.5.6 Estrapolazione linee guida

L'analisi dei casi studio biomimetici e delle loro connessioni con i principi dell'ecodesign ha permesso di elaborare una **sintesi dei concetti fondamentali** per una progettazione sostenibile. Questa riflessione si traduce in un insieme aggiornato di principi che integra approcci ispirati alla natura con strategie dell'ecodesign, dando vita a una visione progettuale più consapevole, sistemica e adattabile.

Il **primo principio** emerso è l'**efficienza nell'uso delle risorse e dell'energia**, volto a ridurre al minimo l'impiego di materiali, l'energia e gli sprechi, favorendo soluzioni ottimizzate e multifunzionali. A questo si collega l'**integrazione nel contesto ambientale e culturale**, che promuove l'uso di risorse locali, il rispetto degli ecosistemi e la progettazione in sintonia con l'ambiente.

L'**adattabilità ai cambiamenti** rappresenta un ulteriore valore chiave, attraverso sistemi modulari, riparabili e aggiornabili, capaci di evolversi nel tempo. Allo stesso modo, il principio di **crescita e costruzione intelligente** prende ispirazione dai processi naturali, suggerendo strategie bottom-up, auto-organizzate e scalabili, basate su unità semplici ma ripetibili.

Fondamentale è poi l'**impiego di materiali**

**sicuri e a ciclo chiuso**, ovvero rinnovabili, riciclabili, non tossici e compatibili tra loro, che semplificano i processi di smaltimento e riducono l'impatto ambientale. A supporto di ciò, il principio del **Life Cycle Thinking** invita a considerare ogni fase del ciclo di vita del prodotto, dalla progettazione alla dismissione, promuovendo strategie di prevenzione dei rifiuti, riuso e riciclo.

La **sinergia tra funzione e forma**, si dimostra centrale nella creazione di oggetti e architetture che uniscono estetica e prestazione. Infine, il **comfort d'uso**, inteso come benessere dell'utente, qualità sensoriale e fruibilità del progetto, completa la visione sostenibile, mettendo al centro l'esperienza umana.

Accanto a questi otto principi principali, è necessario integrare anche due elementi trasversali, oggi imprescindibili: da un lato, **l'equità e l'inclusività sociale**, che richiamano la necessità di progettare per tutti, in modo accessibile ed etico; dall'altro, **l'uso di tecnologie appropriate, innovative ma proporzionate**, semplici da mantenere e adattabili ai diversi contesti.

Nel prossimo capitolo vedremo come adattare questi 8 principi in modo più accurato ad una progettazione di exhibit design.

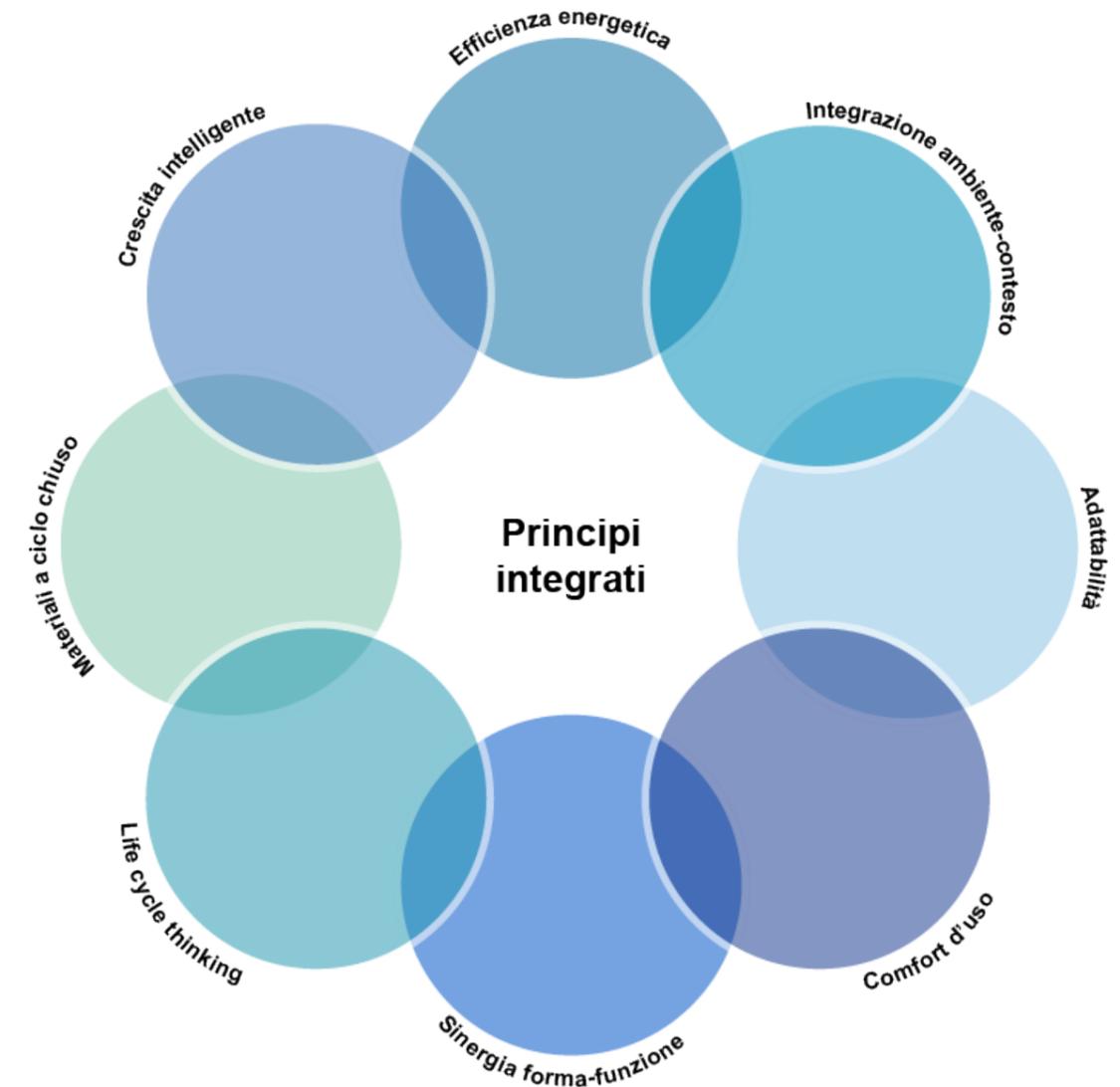


Figura 22, otto principi



## 4. EXHIBIT DESIGN E SOSTENIBILITÀ BIOMIMETICA

In questo capitolo si approfondirà una specifica branca della progettazione: **l'exhibit design**. Verranno analizzate in particolare le caratteristiche che distinguono questa disciplina, evidenziando come i suoi criteri e processi differiscano da quelli propri dell'architettura e del design tradizionale.

A partire da questa premessa, e facendo riferimento ai casi studio analizzati in ambito biomimetico applicato agli spazi espositivi, saranno riletti e adattati gli otto principi progettuali individuati nel capitolo precedente. L'obiettivo è verificarne **l'efficacia e la coerenza rispetto al contesto specifico della progettazione museale**, con l'intento di individuare criteri più mirati e aderenti alle peculiarità dell'exhibit.

L'analisi si articolerà attorno a diversi aspetti fondamentali dell'exhibit design, quali: **l'illuminazione**, la **dimensione sonora**, la **scelta e l'impiego dei materiali**, la **mobilità e flessibilità degli elementi**, i **cicli chiusi e l'economia circolare**, oltre alla **coerenza con i tre livelli di ispirazione biomimetica** già introdotti nei capitoli precedenti. Per ciascuno di questi ambiti si cercherà di individuare corrispondenze con almeno la metà dei principi progettuali, al fine di testarne la reale applicabilità in contesto museale.

Ad accompagnare questa riflessione teorica sarà presentato il progetto personale **"Oltre onda"**, sviluppato secondo i criteri di sostenibilità e ispirazione naturale descritti, e volto a dimostrare concretamente l'efficacia dell'approccio biomimetico all'interno del campo dell'exhibit design.

### 4.1 INTRODUZIONE ALL'EXHIBIT DESIGN

**L'Exhibit Design** è una disciplina progettuale orientata alla creazione di spazi espositivi temporanei o permanenti, in cui la disposizione degli oggetti, la narrazione e la spazialità concorrono a trasmettere un contenuto culturale, informativo o esperienziale.

Si tratta di un campo profondamente multidisciplinare, che integra **architettura**, **comunicazione**, **scenografia** e **tecnologie** interattive per generare ambienti immersivi capaci di coinvolgere il pubblico. (IDEA Associazione Italiana Exhibition Designers, n.d.)

Oltre a organizzare lo spazio fisico, l'exhibit design costruisce un **percorso interpretativo**, guidando la comprensione attraverso forme, materiali, luci e messaggi. Come evidenzia l'IDEA (Associazione Italiana Exhibition Designers), esso rappresenta **"l'arte di esporre, di mostrare qualsiasi cosa"**, delineando un processo comunicativo in cui oggetti, luogo e pubblico entrano in relazione. (Idea Associazione Italiana Exhibition Designers, n.d.)

Nel contesto della ricerca, ci si riferisce in particolare all'exhibit design applicato al mondo delle **mostre temporanee**, e non all'architettura museale permanente.

Questa distinzione è fondamentale, in quanto implica un **diverso approccio progettuale**, orientato alla **temporaneità**, alla **flessibilità** e alla **reversibilità** dell'allestimento.

A differenza degli spazi espositivi permanenti, l'exhibit design effimero prevede **tempi di vita limitati**, adattabilità a diversi luoghi e contesti, e una maggiore attenzione all'ottimizzazione delle risorse.

Cambiano quindi i materiali, spesso leggeri, riciclabili o facilmente assemblabili, e le tecnologie utilizzate, privilegiando soluzioni rapide da montare e smontare, con attenzione allo smaltimento sostenibile e alla logistica di trasporto.

Questa caratteristica effimera non riduce il valore progettuale dell'exhibit design, anzi lo aumenta in **complessità e consapevolezza**, poiché impone di rendere coordinati impatto visivo, chiarezza comunicativa e sostenibilità ambientale in uno spazio che, per sua natura, è effimero. (Ottolini, 2017)

## 4.2 APPROCCIO PROGETTUALE SOSTENIBILE NELL'EXHIBIT DESIGN

Adottare un approccio sostenibile a livello ambientale ad oggi risulta un tema fondamentale per le installazioni temporanee, nel settore dell'arte e delle mostre, infatti, la progettazione sostenibile non rappresenta solo una scelta etica, ma anche **un'esigenza strategica** per affrontare le crescenti criticità ambientali.

La produzione e l'allestimento di mostre e esposizioni tradizionali comportano un elevato consumo di risorse (materiali, energia, acqua) e generano notevoli quantità di rifiuti ed emissioni di gas serra, contribuendo così all'inquinamento e al cambiamento climatico.

L'exhibit design sostenibile si rivolge all'adozione di **pratiche e prodotti che riducono l'impatto ambientale e migliorano l'efficienza complessiva dell'intero ciclo di vita delle esposizioni**. Questo approccio include l'utilizzo di materiali riciclati, biodegradabili e a basso impatto, la progettazione di sistemi modulari e riutilizzabili, e l'utilizzo di energie rinnovabili e tecnologie a basso consumo energetico.

Le motivazioni principali alla base di questo tipo di progettazione sono:

#### • Riduzione delle emissioni di gas serra

L'utilizzo di tecnologie efficienti e materiali sostenibili permette di diminuirne l'impatto, contribuendo alla lotta contro il cambiamento climatico.

#### • Risparmio economico nel lungo termine

sebbene i costi iniziali possano sembrare elevati, le pratiche di riuso e riqualificazione di materiali riducono le spese ricorrenti di allestimento e smantellamento, oltre a ottimizzare l'utilizzo di energia.

#### • Coinvolgimento di visitatori e stakeholder

sempre più pubblico, colleghi e sponsor richiedono pratiche trasparenti e responsabili che rispettino l'ambiente; così, integrare la sostenibilità può migliorare l'immagine delle istituzioni.

#### • Innovazione e competitività

l'adozione di soluzioni sostenibili stimola la creatività e può rappresentare un elemento distintivo nel settore culturale, attirando un pubblico più consapevole e attento all'ambiente.

#### • Integrazione con principi di economia circolare

promuovendo il riuso di materiali, la progettazione modulare e il riciclo, si riducono gli sprechi e si promuove un modello più responsabile e sostenibile di allestimento.

Ad oggi però **non risulta frequente e scontato** applicare questa tipologia di pensiero e progettazione a questo settore, e ciò dipende da differenti motivazioni derivanti da fattori **economici, culturali, regolamentari** e di **consapevolezza**. Andando più nello specifico alcune motivazioni principali possono essere:

#### 1. Costi iniziali elevati

L'adozione di materiali ecocompatibili, tecnologie di alimentazione energetica sostenibile, sistemi di riciclo e progettazione modulare richiede spesso investimenti più alti rispetto alle pratiche tradizionali. Questo scoraggia molti organizzatori e istituzioni, soprattutto in assenza di incentivi o normative che favoriscano pratiche sostenibili.

#### 2. Mancanza di normative stringenti

L'assenza di leggi e regolamentazioni rigorose su materiali e pratiche di allestimenti spesso porta a un comportamento di "business as usual", vale a dire che molte attività continuano a seguire pratiche consolidate, non vincolate a requisiti ambientali.

#### 3. Limitata consapevolezza e formazione

Curatori, progettisti e allestitori, non sono ancora pienamente informati sulle tecnologie e metodologie sostenibili disponibili. La mancanza di formazione e di una cultura alla sostenibilità impedisce un cambio di paradigma.

#### 4. Resistenza culturale e tradizionale

Il settore delle mostre e degli allestimenti è spesso ancorato a pratiche consolidate e standard di mercato che privilegiano l'impatto estetico e immediato rispetto alla sostenibilità. Questo atteggiamento conservatore ostacola l'innovazione e l'adozione di pratiche sostenibili.

#### 5. Priorità di budget e tempistiche

Spesso, le aziende e le istituzioni si focalizzano sui costi più immediati e sul rispetto delle scadenze, trascurando considerazioni di sostenibilità che richiedono pianificazione, ricerca di materiali e soluzioni più complesse e costose.

### 6. Mancanza di linee guida e standard condivisi

L'assenza di linee guida universalmente riconosciute o standard di best practice nel settore ostacola la diffusione di approcci sostenibili. La mancanza di un quadro normativo specifico lascia il settore a un livello di auto-regolamentazione spesso inadeguato. (Wong, 2024., pp. 20–40)

Oltre ai criteri legati principalmente alla sostenibilità ambientale, è possibile applicare anche altri **principi propri della biomimetica** per migliorare l'efficacia e la sostenibilità di un progetto di exhibit. Come già discusso nel primo capitolo, il progetto può essere sviluppato secondo tre livelli biomimetici: **formale, funzionale e sistemico.**

**• LIVELLO FORMALE**

si basa sull'imitazione dell'aspetto esteriore o della forma fisica di un organismo naturale. Risulta essere il più presente nei casi analizzati.

**• LIVELLO FUNZIONALE**

consiste nell'imitare il funzionamento, i meccanismi o i processi attraverso cui gli organismi naturali operano. Presente in parte nello studio.

**• LIVELLO SISTEMICO**

si ispira all'intero ecosistema o alle strategie sistemiche adottate dalla natura per garantire equilibrio, resilienza ed efficienza. Presente in un numero limitato di casi.

Sono stati analizzati casi studio specificamente **legati al campo delle installazioni effimere**, con l'obiettivo di verificare se e in che modo la pratica progettuale rispecchi l'approccio biomimetico. I risultati del catalogo dei casi studio, esaminati in relazione agli otto principi individuati nel capitolo precedente, sono i seguenti:

**Materiali sicuri a ciclo chiuso**



**Funzione e forma**



**Efficienza risorse ed energia**



**Adattabilità ai cambiamenti**



**Integrazione nel contesto**



**Crescita intelligente**



**Life Cycle Thinking**



**Comfort d'uso**



Figura 23, percentuale di aderenza ai principi

I grafici mostrano un'applicazione parziale e disomogenea dei criteri biomimetici e di eco-design integrati; è evidente come alcuni principi siano stati adottati con **maggiore frequenza**, mentre altri risultano ancora poco utilizzati nella pratica progettuale.

In particolare:

• **Funzione e forma** è l'unico principio presente nel **100%** dei casi, a conferma di una forte attenzione all'aspetto estetico e formale in linea con un'estetica ispirata alla natura.

• **Comfort d'uso** registra un'adesione del **62%**, segnalando una sensibilità diffusa verso l'esperienza dell'utente e l'ergonomia del progetto.

• **I principi Efficienza delle risorse ed energia, Integrazione nel contesto, Adattabilità ai cambiamenti e Materiali sicuri a ciclo chiuso** mostrano tutti un grado di applicazione del **38-46%**, indicando una consapevolezza ancora parziale rispetto a strategie sostenibili.

• **Crescita intelligente**, che implica una progettazione capace di evolversi nel tempo in modo sostenibile, è presente solo nel **31%** dei casi.

• Il principio meno applicato è **Life Cycle Thinking** (presente nel **23% dei casi**), segnalando una criticità nella progettazione secondo una visione circolare che consideri tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto.

Terminando con l'analisi applicativa degli ultimi due livelli di progettazione biomimetica, **funzionale e sistemico**, possiamo dire che dal punto di vista **funzionale**, i progetti analizzati mostrano una certa fragilità: benché alcuni adottino soluzioni innovative nei materiali o nella gestione dell'energia, l'imitazione dei meccanismi e processi naturali è ancora limitata. Solo **pochi casi** tentano di riprodurre logiche operative ispirate alla natura, come l'autoregolazione, l'autopulizia o l'efficienza energetica integrata.

Sul piano **sistemico**, l'approccio biomimetico è ancora meno considerato e presente. I bassi livelli di applicazione dei principi di **“Crescita intelligente”** e **“Life Cycle Thinking”** suggeriscono che la progettazione non tiene ancora conto dell'intero ciclo di vita dell'installazione né di una visione ecologica totale simile a quella di un ecosistema naturale. Manca dunque una vera e propria **progettazione sistemica**, capace di integrare i singoli componenti in una rete efficiente, resiliente e circolare.

## 4.3 LINEE GUIDA PER UNA PROGETTAZIONE SOSTENIBILE: INTEGRAZIONE BIOMIMETICA ED ECO-DESIGN

Nei paragrafi successivi verranno analizzati in modo approfondito gli ambiti progettuali fondamentali per la realizzazione di installazioni espositive temporanee, con un focus particolare sulla loro coerenza con gli otto principi progettuali per la sostenibilità individuati nel capitolo precedente.

Ogni ambito, **dall'illuminazione ai materiali**, dal **suono** alla **logistica**, sarà esaminato in relazione ai principi al quale risponde e in che modo tali criteri si traducono concretamente nelle scelte progettuali.

Parallelamente, verranno esplicitati i **livelli di biomimesi** (formale, funzionale, sistemica) presenti all'interno di ciascuna componente, evidenziando come il riferimento alla natura, e in particolare al mondo marino, guidi l'intero processo ideativo.

A supporto e come caso studio esemplificativo, si prenderà in considerazione il progetto universitario **"Oltre onda"**, un'installazione concepita per la Basilica Palladiana di Vicenza, incentrata sul tema della cura degli oceani e sulla sensibilizzazione ambientale attraverso linguaggi visivi, tattili e spaziali ispirati alla biomimetica marina.

## 4.4 PROGETTO ESECUTIVO: OLTRE ONDA

**"Oltre Onda"** è una mostra user-oriented incentrata sull'interazione tra visitatore, spazio espositivo e allestimento.

Si tratta di un'installazione temporanea della durata di sei mesi, ospitata all'interno della storica Basilica Palladiana di Vicenza, capolavoro architettonico di Andrea Palladio.

L'interazione con il pubblico si sviluppa su più livelli, con particolare attenzione agli aspetti illuminotecnici e acustici, per creare un'esperienza multisensoriale coinvolgente.

Il percorso espositivo si articola in quattro aree tematiche, ognuna delle quali esplora un aspetto differente del concetto di sublime, ispirato alle molteplici manifestazioni del mare e degli oceani:

- **Calma**
- **Distruzione**
- **Cambiamento**
- **Fantasia**

Oltre all'esperienza immersiva, la mostra mira a **sensibilizzare il pubblico** sulle problematiche ambientali legate al mare. A questo scopo, sono

presenti banner informativi e pannelli esplicativi che illustrano come l'installazione risponda a queste sfide, promuovendo in particolare l'impiego di materiali riciclati e provenienti da scarti marittimi.

Il linguaggio progettuale **evita rappresentazioni figurative troppo dirette del mare**, preferendo invece una rappresentazione biomimetica, capace di **evocare le sensazioni e le forme marine in modo astratto**. Questo approccio è stato integrato con criteri di progettazione sostenibile, al fine di ottenere una sinergia tra ispirazione naturale e responsabilità ambientale, valorizzando entrambi i concetti in modo equilibrato ed efficace.

In seguito, verranno approfondite tutte le macroaree di progettazione dell'allestimento allestimento più nel dettaglio.

### 4.4.1 Illuminazione

Il **lighting design** riveste un ruolo fondamentale nella progettazione di spazi espositivi e museali, poiché l'illuminazione non solo valorizza gli oggetti e le opere d'arte, ma contribuisce anche a creare un'atmosfera che coinvolge e comunica con i visitatori, trasmettendo emozioni e rappresentando un mezzo per narrare storie e significati.

La progettazione dell'illuminazione museale deve essere studiata considerando aspetti fisiologici, psicologici ed estetici, evitando problemi come l'inquinamento luminoso e l'utilizzo eccessivo di energia.

(Song et al., 2024)

La sostenibilità ambientale nel confronto con questo aspetto progettuale affronta diverse sfide legate alla **conservazione delle opere**, è infatti necessario calibrare perfettamente la scelta dell'illuminazione al fine di trovare un equilibrio tra funzionalità ed estetica. Tali scelte hanno implicazioni dirette sul **consumo energetico**, argomento sempre più vicino ai musei e alle sale da esposizione. L'intersezione tra progettazione dell'illuminazione e sostenibilità si manifesta attraverso **soluzioni a basso consumo energetico**, riduzione delle emissioni di gas serra e consapevolezza ecologica.

(Oyeyipo et al., 2024)

Nel progetto sono state fatte scelte consapevoli e mirate ad ottenere il minor impatto energetico possibile; in particolare sono stati integrati **impianti piezoelettrici** a calpesto ad apparecchi di **illuminazione LED**. L'integrazione tra questi due sistemi ha permesso di ridurre significativamente il fabbisogno energetico esterno, in quanto l'energia viene prodotta al passaggio dei visitatori. Oltre a questo, ha permesso di aumentare l'aspetto **interattivo** e di consapevolezza, grazie ad appositi banner disposti all'ingresso della mostra.

Per la progettazione illuminotecnica sono stati presi in considerazione **cinque** degli otto principi, in particolare:

- **Efficienza nell'uso delle risorse ed energia**

Utilizzo di led e piezoelettrici

- **Integrazione nel contesto ambientale e culturale**

L'atmosfera luminosa evoca il mondo sottomarino, creando una sintonia percettiva con il tema della mostra, invitando il visitatore a contemplare gli spazi e il contesto nel quale si ritrova.

- **Sinergia tra forma e funzione**

Le luci non hanno solo funzione estetica, ma

contribuiscono all'orientamento e alla fruizione narrativa dello spazio.

- **Comfort d'uso**

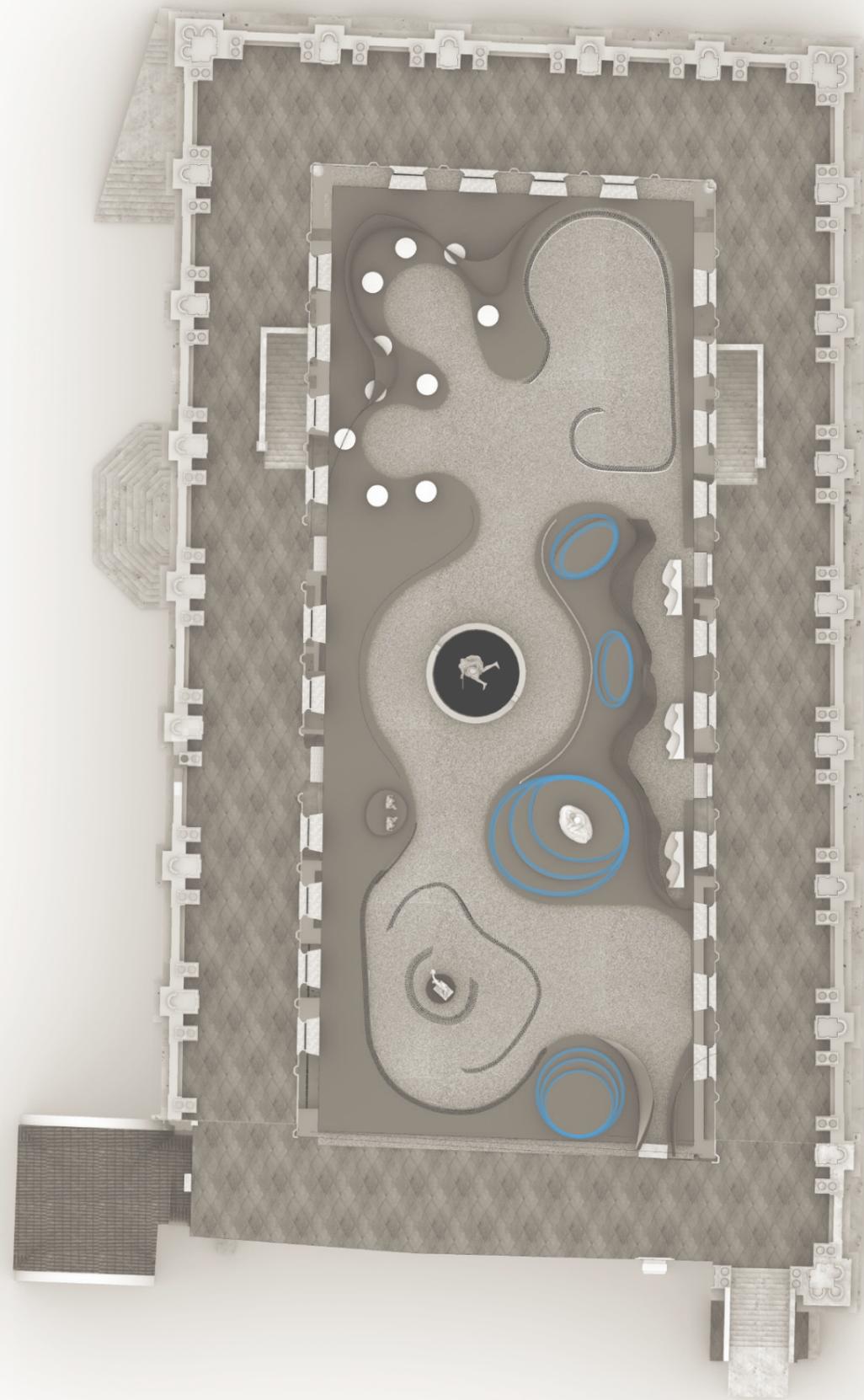
L'illuminazione controllata evita abbagliamenti e regola la luminosità in base alla presenza, migliorando il benessere visivo. Inoltre, l'esperienza diventa personale e coinvolgente: il visitatore percepisce la sua influenza nell'ambiente.

- **Crescita e costruzione intelligente**

Il sistema è modulare e riconfigurabile: i pannelli illuminati possono essere riposizionati facilmente in altri ambienti espositivi.

Il progetto luce è stato progettato partendo da un'ispirazione biomimetica pensata sul livello **formale**, per quanto riguarda la riproduzione della bioluminescenza marina e riflessi blu, viola, verdi, **funzionale**, in quanto i sensori attivano o modulano l'intensità luminosa reagendo al movimento del visitatore, simulando il comportamento degli organismi presenti negli abissi.

**Sistemica**, grazie all'utilizzo di pavimentazione piezoelettrica, replicando un microciclo di energia autonoma come avviene in ecosistemi naturali autosufficienti.



■ Illuminazione led-piezoelettrica

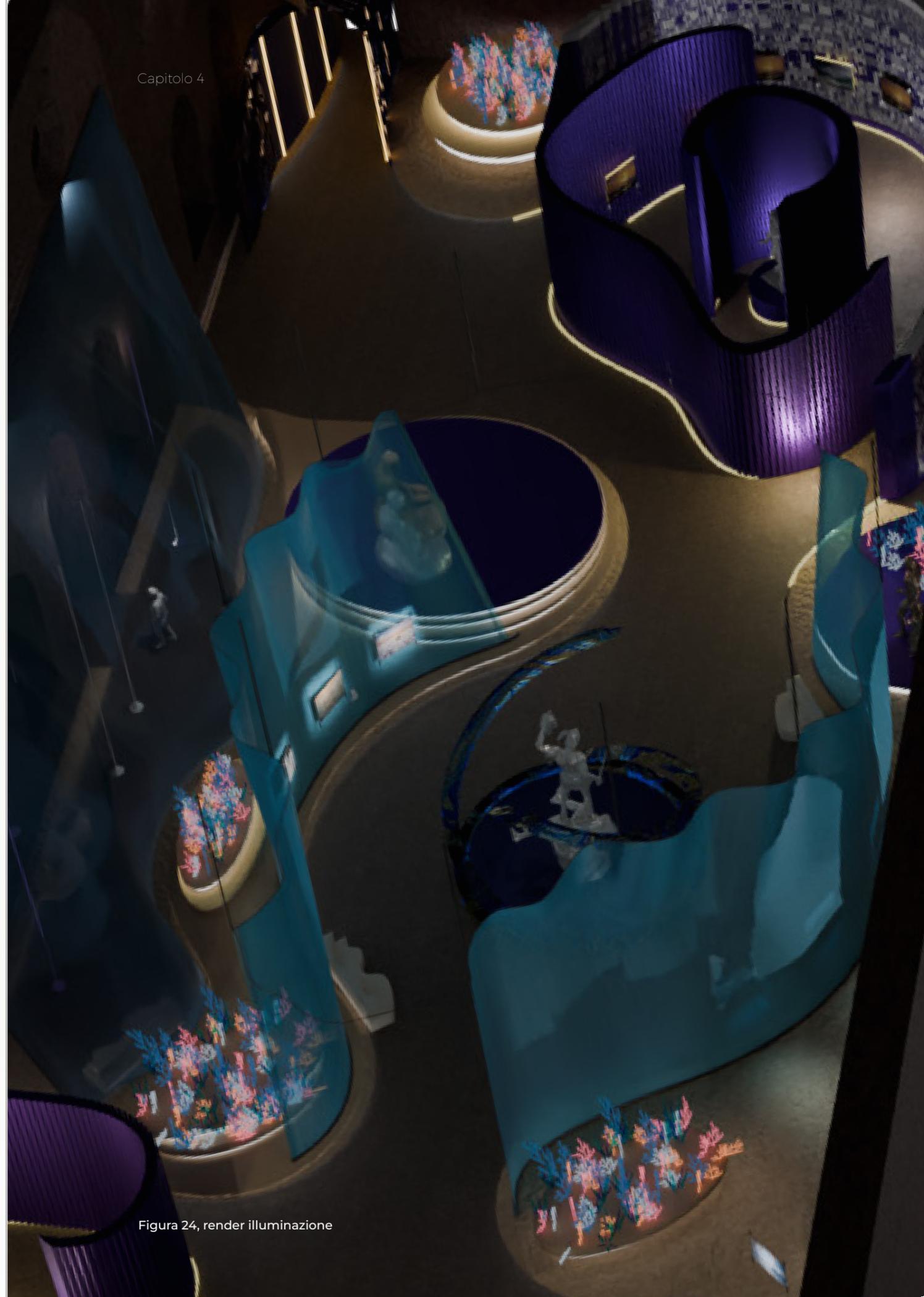


Figura 24, render illuminazione

## 4.4.2 Acustica

Cambiando macrotema, anche il progetto di **acustica**, o sound design, rappresenta un elemento sempre più centrale nella progettazione di spazi espositivi e museali.

Il suono non si limita a essere un supporto narrativo o ambientale, ma contribuisce attivamente a **modellare l'esperienza del visitatore** stimolando l'immersione sensoriale, la memoria e l'interpretazione dei contenuti esposti. Risulta possibile costruire un **paesaggio sonoro coerente e suggestivo**, capace di dare profondità emotiva e concettuale all'allestimento.

(Everrett, 2019)

Anche osservando questa parte di progetto è possibile integrare aspetti di **sostenibilità ambientale** all'interno dell'installazione sonora, sia attraverso aspetti concreti legati al **consumo** e all'impatto portato dall'utilizzo di sorgenti differenti, sia attraverso aspetti più astratti e sensoriali.

Questi ultimi in particolare possono essere un indirizzamento verso una consapevolezza ambientale e l'educazione sulla sostenibilità, attraverso **soundscapes** e **installazioni sonore che evidenziano tematiche ecologiche**. Oppure ancora un altro esempio è l'utilizzo e la riproduzione di risorse naturali, includendo suoni ambientali o segnali acustici di materiali sostenibili, per comunicare valori di sostenibilità e circolarità.

(Marentakis & Dal Palù, 2024)

In "Oltre onda" anche il sound design è stato studiato con l'obiettivo di ridurre al minimo l'impatto e l'inquinamento acustico, anche attraverso l'ispirazione a meccanismi naturali.

Anche per quanto riguarda l'acustica sono stati rispettati **cinque** degli otto parametri chiave, in particolare:

- **Comfort d'uso**

lo scopo è ridurre stress e sovraccarico uditivo, favorendo la concentrazione e l'esperienza immersiva. Questo si ottiene anche attraverso l'inserimento di "zone di silenzio", in cui si può sostare per una pausa.

- **Integrazione nel contesto ambientale e culturale**

Le frequenze basse e armoniche ricordano l'ambiente oceanico, integrandosi perfettamente con lo spazio circostante.

- **Adattabilità ai cambiamenti**

I sistemi audio sono reattivi e sensibili al numero e alla posizione dei visitatori. Come gli ecosistemi naturali, si rimodulano in tempo reale. Inoltre, le installazioni possono essere riprogrammate all'infinito.

- **Sinergia tra forma e funzione**

l'audio guida il percorso, segnala differenti aree dello spazio e ne descrive il significato.

- **Efficienza nell'uso delle risorse**

vengono utilizzati diffusori direzionali a basso consumo, i quali limitano l'inquinamento sonoro.

Così come per l'illuminazione, anche l'acustica è stata sviluppata a partire dai tre livelli di biomimetica: **Formale**, i suoni si ispirano all'acustica del mare, molti suoni sono ovattati e stratificati per simulare la densità dell'acqua. **Funzionale**, il suono si attiva o modula in base alla presenza e ai movimenti delle persone, come fanno gli organismi con impulsi e stimoli che reagiscono ai cambi di contesto.

**Sistemica**, l'ambiente sonoro infatti non è isolato ma interagisce dinamicamente con lo spazio, adattandosi all'affollamento o all'ora del giorno, regolando volume e tipo di frequenza, come un sistema ecologico in equilibrio.



■ Apparecchi acustici - Docce sonore

### 4.4.3 Scelta dei materiali

Allo stesso modo anche la scelta e l'impiego dei materiali possiedono la stessa importanza.

I **materiali**, infatti, non solo definiscono l'estetica e la percezione dell'allestimento, ma contribuiscono anche a costruire un **dialogo coerente con l'esposizione** e l'ambiente circostante. I materiali e i supporti non sono semplicemente funzionali, ma parte integrante della narrazione, capaci di evocare suggestioni tattili, visive e simboliche che arricchiscono l'esperienza del visitatore, oltre che a contribuire alle variazioni di illuminazione e acustica.

Una progettazione attenta dei materiali richiede la valutazione di **fattori tecnici, sensoriali e ambientali**, con particolare attenzione alla sostenibilità. In questo senso, i materiali diventano strumenti espressivi e responsabili, capaci di coniugare valore estetico, coerenza narrativa e attenzione ecologica.

In particolare, le **attenzioni da mantenere** durante questa scelta per quanto riguarda il concetto della sostenibilità comprende l'individuazione di materiali **compostabili o biodegradabili**, provenienti da cicli di produzione controllati e con un fine vita altrettanto programmato. Da non sottovalutare sono gli aspetti di **isolamento termico e acustico/luminoso**, che può variare totalmente al cambiare dei materiali scelti. (Wong, 2024)

In "Oltre onda" questo è stato l'aspetto studiato più in profondità. In particolare, sono state adottate soluzioni di ispirazione ai concetti della blu economy.

Per questo aspetto progettuale sono stati rispettati **5** degli 8 principi chiave:

- **Materiali sicuri e a ciclo chiuso**

È stato utilizzato **l'Econyl** per la maggior parte dei setti espositivi, un materiale riciclato e riciclabile ottenuto a partire dagli scarti delle reti da pesca disperse in mare. Sono stati utilizzati anche sistemi in cartone che simulassero le onde marine, per fare questo è stato utilizzato **"Paper softwall"**, caso studio citato nel capitolo precedente.

- **Efficienza nell'uso delle risorse e dell'energia**

I materiali vengono scelti per la loro **multifunzionalità** (decorativi, acustici e strutturali insieme). Inoltre, il peso e l'ingombro ridotto riducono l'energia impiegata per il trasporto e il montaggio.

- **Life Cycle Thinking**

l'intero ciclo vita è considerato: dai fornitori certificati, alla tracciabilità, fino allo smaltimento o riutilizzo finale, inoltre tutte le componenti sono facilmente separabili.

- **Integrazione nel contesto ambientale**

I materiali evocano ambienti marini, creando un linguaggio coerente e immersivo.

- **Sinergia tra forma e funzione**

Le texture naturali non sono solo estetiche; diffondono il suono, guidano la luce, creano interazione tattile.

Per la scelta dei materiali il livello biomimetico **formale** è rappresentato da forme sinuose e texture irregolari, che riprendono l'immaginario delle onde e del fondale marino. Per quanto riguarda l'aspetto **funzionale** in questo caso riguarda più la parte di comunicazione valoriale; infatti, i materiali rispondono ad esigenze differenti tra loro, strutturali, di rivestimento e di comunicazione.

Infine per il livello **sistemico** è presente nell'utilizzo di ECONYL, utilizzo di materiali provenienti da flussi di scarto marino e biomateriali compostabili, in un sistema a ciclo chiuso e a impatto ridotto.

Figura 25, render acustica /docce sonore



Tende in Ecoln - materiali di scarto

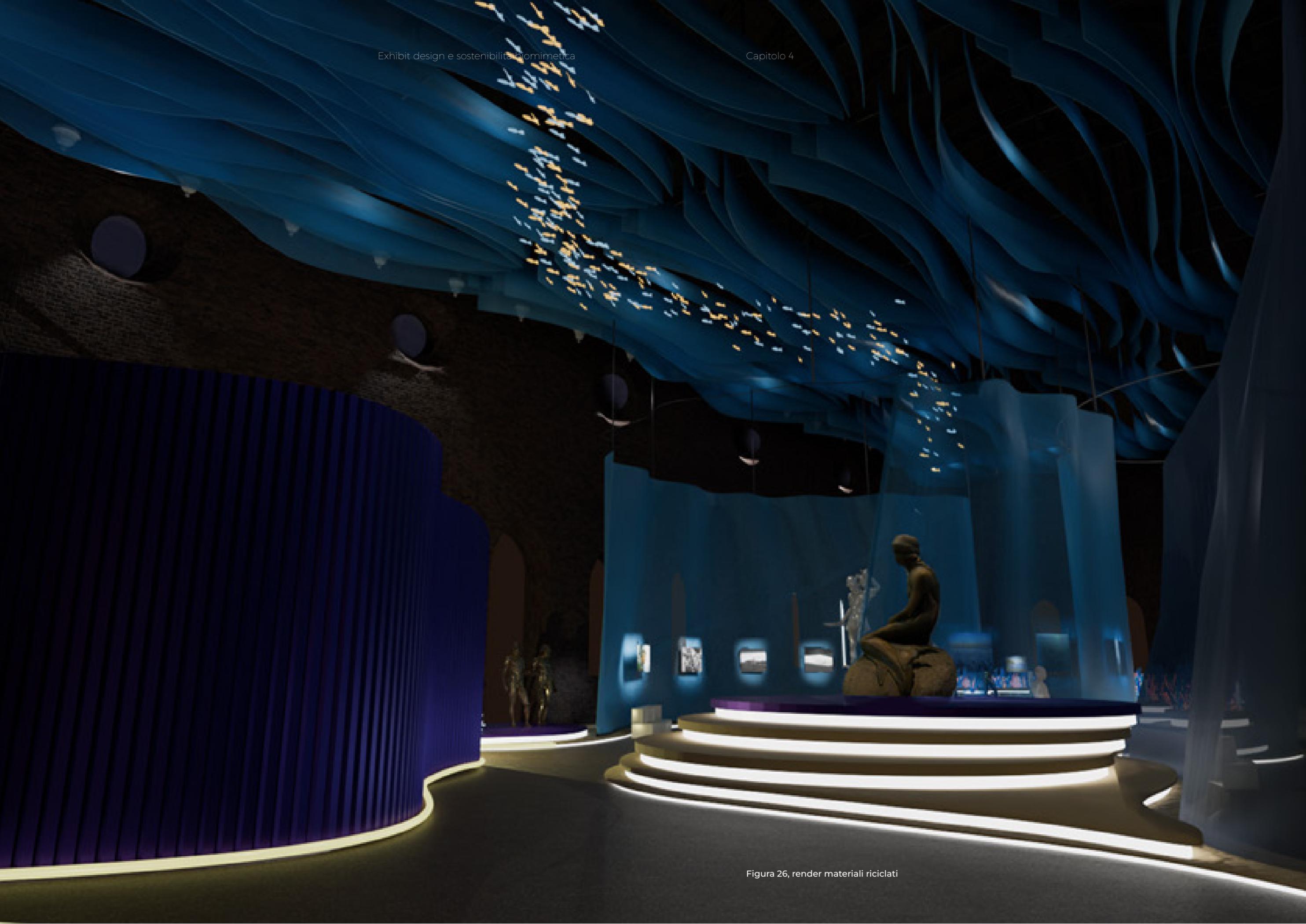


Figura 26, render materiali riciclati

#### 4.4.4 Mobilità e trasporto

Un altro aspetto fortemente legato al precedente riguarda lo studio legato al **trasporto degli elementi e alla loro flessibilità di utilizzo**. Risultò infatti essenziale progettando in un'ottica di sostenibilità ambientale ricorrere a soluzioni **modulari** e facilmente riconfigurabili, o smontabili, una volta terminato l'utilizzo in un determinato contesto.

Mettere in pratica strategie sostenibili riguardanti questo aspetto può essere difficile.

La **breve durata** degli allestimenti e i **costi** legati alla produzione e allo smontaggio rendono complicata una gestione pienamente efficiente. Spesso, quando non si pianifica cosa fare con i materiali una volta terminata la mostra, questi finiscono accatastati nei depositi oppure vengono buttati, senza possibilità di essere riutilizzati.

Anche se in alcuni casi è accettabile smaltire materiali compostabili o biodegradabili, esistono soluzioni alternative che puntano al **riuso**.

Una di queste è quella di **favorire il trasporto e lo scambio di materiali in modo sostenibile**, permettendo agli elementi di allestimento di essere utilizzati in più contesti. Per farlo è importante pensare al ciclo di vita del progetto fin dall'inizio e sfruttare reti collaborative che rendano possibile lo scambio di materiali tra luoghi diversi.

Piattaforme come **"Non Si Butta Via Niente"** o **"Circular Arts Network"** permettono, ad esempio, di condividere e riutilizzare strutture e componenti espositivi, riducendo costi e sprechi.

Questo approccio non solo evita spostamenti inutili, ma aiuta a costruire un sistema più circolare. Anche l'introduzione di **regole chiare e linee guida pratiche** potrebbe rendere più semplice organizzare il trasporto e la movimentazione dei materiali in modo sostenibile.

(Acocella, Dal Buono, & Scodeller, 2022)

Nel progetto questo tema è stato affrontato da differenti punti di vista, rispondendo però in questo caso solamente a **tre** degli otto criteri fondamentali individuati in precedenza. In particolare:

- **Adattabilità ai cambiamenti**

Tutti i componenti sono modulari, riposizionabili e combinabili tra loro, adattandosi a diversi ambienti espositivi.

- **Crescita e costruzione intelligente**

Ogni modulo ripete e compone l'intero sistema contribuendo alla resa visiva finale.

- **Efficienza nell'uso delle risorse**

I moduli riducono sprechi di spazio, peso e trasporto, abbattendo anche i costi energetici logistici. Ancora una volta ne è un esempio **Paper Softwall**, modulo che si richiude totalmente su se stesso in disuso, permettendo una profondità di pochi centimetri.

Inoltre, un solo elemento svolge più funzioni (**parete, supporto, contenitore**).

Esternamente a questi criteri però per rispondere meglio al tema si è voluto inserire il progetto all'interno di queste reti d'influenza, rendendo possibile la comunicazione con altri enti o siti museali per il riuso delle installazioni.

Si parla anche in questo caso di biomimetica **formale** in quanto i singoli moduli utilizzati sono ispirati e ricordano nelle forme, nei colori e anche nel movimento il tema del mare e degli abissi.

A livello **sistemico** il tema centrale è la possibilità di riconfigurare lo spazio a seconda di ogni evenienza come un sistema vivente, che si adatta al numero di persone o agli eventi ospitati all'interno della mostra, come un opening o una chiusura.



■ Paper soft-wall - Setti modulari



Figura 27, render setti modulari

### 4.4.5 Comunicazione

Nel contesto dell'exhibit design, la **comunicazione** museale gioca un ruolo importante non solo per spiegare i contenuti, ma anche per coinvolgere le persone e renderle più consapevoli.

Si tratta di tutti quegli strumenti come **testi, immagini, grafiche o percorsi visivi**, che aiutano i visitatori a capire il significato di ciò che viene esposto. In particolare, quando una mostra affronta il tema della sostenibilità, la comunicazione può diventare un vero mezzo di educazione ambientale.

Attraverso schede informative, didascalie o materiali stampati, è possibile raccontare al pubblico come sono stati pensati e realizzati gli allestimenti: che materiali sono stati scelti, come verranno riutilizzati o smaltiti, e quali azioni sono state messe in atto per ridurre gli sprechi.

Questo tipo di comunicazione aiuta a rendere **visibili le logiche che stanno dietro al progetto** e può far riflettere su temi spesso poco considerati, come il destino dei materiali una volta conclusa la mostra.

Da questo punto di vista, la comunicazione museale è legata anche al principio dei **cicli chiusi e dell'economia circolare**: non si limita infatti a spiegare un contenuto, ma racconta come la mostra stessa si inserisce in un processo sostenibile.

Esporre queste informazioni rende più forte il messaggio ecologico e può portare il pubblico a fare scelte più consapevoli anche fuori dal museo. Così, il progetto diventa non solo un momento espositivo, ma anche un'occasione per **promuovere piccoli cambiamenti concreti**. (Bao, 2020)

Partendo da una visione più ampia la comunicazione della mostra è stata analizzata seguendo i suoi collegamenti con l'economia circolare ed i cicli chiusi, in ogni sua singola parte.

In seguito, vedremo dunque come Oltre Onda risponde ai criteri analizzati per tutti gli altri aspetti progettuali nel suo senso più astratto e generale, e nell'obiettivo che ha voluto comunicare al pubblico.

Anche in questo caso i principi rispettati sono **cinque**:

- **Life Cycle Thinking**

la progettazione dell'allestimento è stata fatta con una mentalità "Cradle to Cradle", includendo gli aspetti di ritiro, stoccaggio, riciclo.

- **Materiali sicuri e a ciclo chiuso:**

Tutti i materiali sono compatibili e separabili.

- **Integrazione nel contesto ambientale**

L'installazione comunica attivamente l'importanza dell'equilibrio tra uomo e natura, anche nei suoi materiali e nel suo funzionamento.

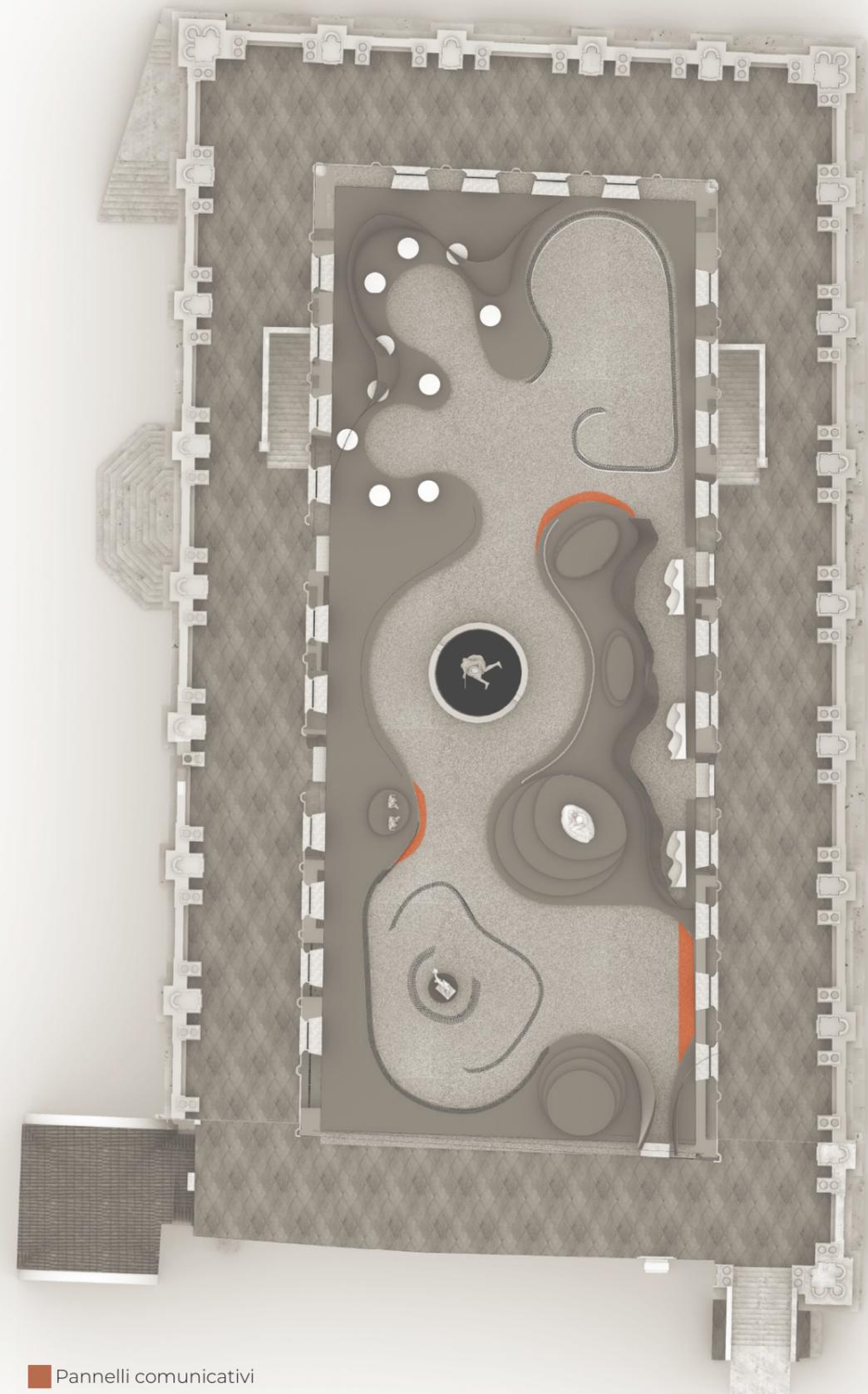
- **Crescita e costruzione intelligente**

Gli elementi possono essere riutilizzati in altri progetti espositivi o diventare parte di laboratori didattici.

- **Efficienza delle risorse**

Il progetto ottimizza peso, volume, imballo e riduce la produzione di rifiuti a monte, non solo nel fine vita

In questo ultimo caso, dal punto di vista comunicativo e narrativo a livello **formale** il progetto riprende la biomimetica raccontando ed evidenziando la vita e l'interazione tra uomo e organismi marini; a livello **funzionale** è esplicito l'obiettivo di far conoscere le soluzioni utilizzate di reimpiego all'interno del cuore del progetto; a livello **sistemico** infine l'intero exhibit è concepito e promosso come un organismo unico, non come un oggetto isolato, capace di integrare e valorizzare risorse, energia e scarti secondo logiche circolari.



■ Pannelli comunicativi

#### 4.4.6 Analisi e confronto finali

Per concludere l'analisi svolta è necessario confrontare il progetto Oltre Onda con i casi studio di exhibit design analizzati in precedenza.

Ciò ha permesso di osservare in che misura il progetto riesca a tradurre in pratica gli otto principi fondamentali individuati nel percorso di ricerca. Dai risultati emerge chiaramente una **forte aderenza ai valori dell'eco-design**, ma soprattutto una presenza consapevole e strutturata dei principi della **biomimetica**, intesi nei tre livelli, formale, funzionale e sistemico.

L'ispirazione alla natura non viene qui utilizzata solo come riferimento estetico, ma si traduce in **strategie progettuali concrete**, che guidano le scelte legate ai materiali, all'energia, alla comunicazione e alla configurazione spaziale.

In particolare, il progetto si distingue per una marcata attenzione all'**efficienza delle risorse**, all'impiego di **materiali provenienti da cicli di recupero** e alla logica del **ciclo di vita completo**.

Anche la narrazione dell'allestimento, il linguaggio grafico e la scelta di suoni e luci seguono logiche ispirate al funzionamento degli ecosistemi marini, rafforzando la connessione tra contenuto e forma.

In questi ambiti, Oltre Onda si posiziona in modo solido rispetto alla media dei casi analizzati, superando in molti aspetti le soluzioni tradizionali in termini di sostenibilità e coerenza progettuale.

Alcune **criticità** e punti poco sviluppati sono presenti, in particolare emergono nei principi legati all'**adattabilità e alla crescita intelligente**.

Sebbene siano presenti elementi modulari e soluzioni scalabili, queste caratteristiche risultano meno approfondite rispetto ad altri aspetti del progetto. Questo perché, trattandosi di un'installazione effimera, **non è sempre facile immaginare le sue evoluzioni nel tempo** o riconfigurazioni che vadano oltre il singolo evento.

Queste difficoltà riflettano i limiti pratici di un progetto temporaneo, o più semplicemente che ci siano ancora margini di esplorazione per riuscire ad applicare questi principi in modo più completo.

Nel complesso, terminando, Oltre Onda dimostra come la **fusione tra biomimetica ed ecodesign possa dare forma a una progettazione capace di rispondere alle sfide ambientali attuali**, non solo attraverso l'uso di tecnologie o materiali innovativi, ma anche con una **nuova visione del progetto stesso**.

Una visione in cui l'allestimento non è solo un contenitore, ma un **sistema vivo**, in dialogo costante con il suo contesto, il pubblico e l'ambiente. Questo lavoro rappresenta un primo tentativo di portare avanti un approccio più **sistemico e naturale alla progettazione espositiva**, consapevole che ci siano ancora aspetti da indagare, ma fiducioso nel potenziale di questa direzione.



Figura 28, render comunicazione



## 5. CONCLUSIONI

A conclusione di questo percorso, nelle riflessioni successive si ripercorrerà il percorso svolto e si valuterà la coerenza con gli obiettivi e i risultati dell'elaborato di tesi.

Attraverso questo lavoro, è emerso come la **biomimesi**, quando integrata con i principi dell'**eco-design**, possa offrire una base solida per un nuovo modo di progettare, capace di coniugare innovazione, bellezza e sostenibilità.

L'analisi dei diversi paradigmi progettuali ha evidenziato come solo un **approccio sistemico**, che tenga conto di tutti gli aspetti del ciclo di vita del progetto, possa rispondere in modo concreto alle sfide ambientali contemporanee.

Nel caso del progetto "**Oltre Onda**", questa integrazione si è tradotta in un'installazione che risponde concretamente agli otto principi di progettazione sostenibile individuati, con un'alta aderenza soprattutto nei settori della scelta dei materiali, dell'illuminazione e della comunicazione.

Su un totale di cinque ambiti progettuali analizzati, tutti rispondono ad almeno **quattro principi**, e alcuni ne soddisfano fino a cinque. I principi più ricorrenti sono stati **l'efficienza delle risorse e la sinergia tra forma e funzione**, seguiti da comfort d'uso e integrazione nel contesto ambientale. I criteri che risultano meno applicati sono life cycle thinking e materiali a ciclo chiuso, che, pur presenti, richiederebbero strumenti di gestione più strutturati e continuità nel tempo.

La **biomimesi**, in questo progetto, ha agito su tutti e tre i livelli, formale, funzionale e sistemico, permettendo una progettazione capace non solo di evocare la natura ma di comportarsi come essa: ottimizzando risorse, adattandosi al contesto, generando valore attraverso reti collaborative e soluzioni a basso impatto.

Nonostante gli sforzi, alcune criticità permangono: la limitata durata delle installazioni espositive e la difficoltà nel programmare il fine-vita di alcuni componenti restano ostacoli strutturali, più culturali che tecnici.

Inoltre, la trasversalità della biomimesi può generare incertezza metodologica se non supportata da strumenti e reti adeguate. Tuttavia, proprio per questo, essa si rivela anche un **campo ancora fertile per la ricerca e la sperimentazione**, in grado di accompagnare la progettazione verso un futuro più consapevole.

Il lavoro svolto non intende proporre una formula definitiva, ma **aprire un varco**.

Una strada in cui progettare ispirandosi alla natura non significa solo imitarla, ma collaborare con essa per creare sistemi più giusti, resilienti e armonici.

# Bibliografia

· Acocella, A., Dal Buono, V., & Scodeller, D. (Eds.). (2022, December). MD Journal (No. 14, Year VI). **Laboratorio Material Design – Università di Ferrara**. <https://www.materialdesign.it/>

· Alanbari, D. H. A., & Al, H. (2022). **Biomimicry Design Spiral : Nature as A model. Journal of Algebraic Statistics**, 3(2).

· Alanbari, D. H. A., & Al, H. (2022). **Biomimicry Design Spiral : Nature as A model. Journal of Algebraic Statistics**, 4(2).

· Alnaieli, H. A., Jadallah, A. A., & Numan, A. H. (2024). **Design, Fabrication, and Experimental Analysis of a PV Panel for a Smart Sunflower System. Tikrit Journal of Engineering Sciences**, 31(1), 113–126. <https://doi.org/10.25130/tjes.31.1.10>

· Aalto, A., & Schildt, G. (1998). **Alvar Aalto in his own words** / edited and annotated by Göran Schildt. Rizzoli.

· Arruda, A. J. V., & Palombini, F. L. (A c. Di). (2024). **Biomimetics, Biodesign and Bionics: Technological Advances Toward Sustainable Development. Springer Nature Switzerland**, 175. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-51311-4>

· Arruda, A. J. V., & Palombini, F. L. (A c. Di). (2024). **Biomimetics, Biodesign and Bionics: Technological Advances Toward Sustainable Development. Springer Nature Switzerland**, 227. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-51311-4>

· Arruda, A. J. V., & Palombini, F. L. (A c. Di). (2024). **Biomimetics, Biodesign and Bionics: Technological Advances Toward Sustainable Development. Springer Nature Switzerland**, 228. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-51311-4>

· Awouda, A., Traini, E., Bruno, G., & Chiabert, P. (2024). **IoT-Based Framework for Digital Twins in the Industry 5.0 Era. Sensors**, 24(2), 594. <https://doi.org/10.3390/s24020594>

· Baldussu, A., & Cascini, G. (2015). **About integration opportunities between TRIZ and biomimetics for inventive design. Procedia Engineering**, 131, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.342>

· Bao, J. (2020). **Whole life cycle oriented temporary exhibition design for sustainability** (Master's thesis, Politecnico di Milano & Tongji University).

· Pearce, D., Markandya, A., & Barbier, E. (1989). **Blueprint 1: for a green economy**. Routledge.

· Benyus, J. M. (2002). **Biomimicry: Innovation inspired by nature**. Mariner Books, 7.

· Benyus, J. M. (2002). **Biomimicry: Innovation inspired by nature**. Mariner Books, 9.

· Benyus, J. M. (2002). **Biomimicry: Innovation inspired by nature**. Mariner Books, 11.

· Blasiak, R., Jouffray, J.-B., Amon, D. J., Moberg, F., Claudet, J., Søgaard Jørgensen, P.,

Pranindita, A., Wabnitz, C. C. C., & Österblom, H. (2022). **A forgotten element of the blue economy: Marine biomimetics and inspiration from the deep sea. PNAS Nexus**, 1(4), pgac196. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgac196>

· Bogatyrev, N., & Bogatyreva, O. (2015). **TRIZ-based algorithm for biomimetic design. Procedia Engineering**, 131, 377–387. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.417>

· Casa Batlló. (n.d.). Interno. In **Casa Batlló**. <https://www.casabatllo.es/it/antoni-gaudi/ca-sa-batllo/interno/>

· Ceccarelli, C. (2019, maggio 29). **Broken Nature: Il contributo del design alla lotta al cambiamento climatico. MEMO Grandi Magazzini Culturali**. <https://grandimagazzini-culturali.it/2019/05/broken-nature/>

· Dabija, D., & Năstase, C. (2024). **Exploring the Evolution of Sustainability Paradigms: From Linear to Circular Economy Models. Proceedings of the International Conference on Business Excellence**, 18(1), 754–769. <https://doi.org/10.2478/picbe-2024-0066>

· Domus. (2016, maggio 10). ICD/ITKE **Research Pavilion [Padiglione biomimetico]**. Domus. Retrieved April 2025, from [https://www.domusweb.it/it/notizie/2016/05/10/icd\\_itke\\_research\\_pavilion.html](https://www.domusweb.it/it/notizie/2016/05/10/icd_itke_research_pavilion.html)

· Ekmekci, I., & Nebati, E. E. (2019). **TRIZ methodology and applications. Procedia Computer Science**, 158, 303–315. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.056>

· Everrett, T. (2019). **A Curatorial Guide to Museum Sound Design. Curator: The Museum Journal**, 62(3), 313–325. <https://doi.org/10.1111/cura.12305>

· **Gallery of Agence d'Architecture A. Bechu & Associés** wins competition for new university campus in Moroccan oceanside town—1. (n.d.). ArchDaily. Retrieved April 19, 2025, from [https://www.archdaily.com/...](https://www.archdaily.com/)

· Habib, M. K. (2025). **Mechatronics in industry 4.0 and 5.0: Advancing synergy, innovations, sustainability, and challenges. Mechatronics Technology**. <https://doi.org/10.55092/mt20250002>

· Horani, L. F. (2023). **Sustainable design concepts and their definitions: An inductive content-analysis-based literature review. Technological Sustainability**, 2(3), 225–243. <https://doi.org/10.1108/TECHS-10-2022-0041>

· **IDEA Associazione Italiana Exhibition Designers**. (n.d.). Home. Retrieved June 26, 2025, from <http://www.ideassociazione.it/>

· Ilvitskaya, S., Lobkova, V., & Lobkov, V. (2020). **Visual comfort in the organic architecture of an individual residential building**.

· Iris van Herpen. (n.d.). **Roots of Rebirth**. Retrieved June 26, 2025, from <https://www.irisvanherpen.com/collections/roots-of-rebirth>

· Islam, M. A., Ahmmed, I., Mahi, T., & Ahmed, S. (2024). **Biomimetics approaches in structural design: A review of potential applications and challenges in the context of Bangladesh**.

· Koho, J. (n.d.). **The connections between green economy and biomimicry**. (Bachelor's thesis, Degree Program in Sustainable Development).

· Kunzmann, C., Aliakbarpour, H., & Ramezani, M. (2023). **Biomimetics design of sandwich-structured composites. Journal of Composites Science**, 7(8), 315. <https://doi.org/10.3390/jcs7080315>

- Lanzavecchia, C. (2012). **Il fare ecologico: Il prodotto industriale e i suoi requisiti ambientali** (P. Tamborrini & S. Barbero, Eds.). Edizioni Ambiente.
- Lascari, G. (2023). **An approach to incorporate generative artificial intelligence as a means to include biomimicry within industrial design** (Master's thesis, Auburn University). Auburn University Graduate School.
- Lionello, C. (2019). **Broken Nature – XXII Triennale di Milano**. In *Op.Cit.*, (165), 77–80. Electa.
- Liu, M., Zhu, G., & Tian, Y. (2024). **The historical evolution and research trends of life cycle assessment**. *Green Carbon*, 2(4), 425–437. <https://doi.org/10.1016/j.green-ca.2024.08.003>
- Loiseau, E., Saikku, L., Antikainen, R., Droste, N., Hansjürgens, B., Pitkänen, K., Leskinen, P., Kuikman, P., & Thomsen, M. (2016). **Green economy and related concepts: An overview**. *Journal of Cleaner Production*, 139, 361–371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.024>
- Marentakis, G., & Dal Palù, D. (2024, giugno 23). **It sounds sustainable: Practices in designing sound for sustainability**. DRS2024: Boston. <https://doi.org/10.21606/drs.2024.791>
- Mattos Batista De Moraes, F., Kulay, L., & Trianni, A. (2025). **Integrating life cycle assessment and ecodesign to improve product effectiveness and environmental performance: A novel approach**. *Sustainable Production and Consumption*, 55, 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.02.006>
- Molo Design. (n.d.). **Paper Softwall Folding Wall**. Retrieved June 26, 2025, from <https://molodesign.com/collections/space-partitions/paper-softwall-folding-wall/>
- Montes Serrano, C., Galván Desvaux, N., & Moral García, Á. (2019). **Trabajando con maquetas: Eero Saarinen y Charles Eames en la Organic Design Competition, MoMA, 1941**. *EGA Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 24(37), 26. <https://doi.org/10.4995/ega.2019.12684>
- Ottolini, G. (2017). **Architettura degli allestimenti** (R. Rizzi, A c. Di). Altralinea edizioni.
- Oyeyipo, F. J., Sholanke, A. B., & Anosike, D. I. (2024). **Review of lighting strategies for enhancing users' experience and achieving environmental sustainability in art museums. 2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG)**, 1–8. <https://doi.org/10.1109/SEB-4SDG60871.2024.10630022>
- Pauli, G. (2010). *The blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs*. Paradigm Publications.
- Pauli, G. (2010). *The blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs*. Paradigm Publications, p. 281.
- Panchal, S. (2000). **A search of organic expression in architecture through works of Frank Lloyd Wright**, 14.
- Panchal, S. (2000). **A search of organic expression in architecture through works of Frank Lloyd Wright**, 15.
- Primrose, S. B. (2020). **Biomimetics: Nature-inspired design and innovation**. Wiley-Blackwell, 12.
- Primrose, S. B. (2020). **Biomimetics: Nature-inspired design and innovation**. Wiley-Blackwell, 13.
- Primrose, S. B. (2020). **Biomimetics: Nature-inspired design and innovation**. Wiley-Blackwell, 14.
- Rahman, Md. M., Khatun, F., Jahan, I., Devnath, R., & Bhuiyan, Md. A.-A. (2024). **Cobotics: The evolving roles and prospects of next generation collaborative robots in Industry 5.0**. *Journal of Robotics*, 2024(1), 2918089. <https://doi.org/10.1155/2024/2918089>
- Şenel Solmaz, A. (2025). **From blueprint to reality: How digital twins are shaping the architecture, engineering, and construction landscape**. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 5(1), 399–435. <https://doi.org/10.61112/jiens.1572660>
- Shu-Yang, F., Freedman, B., & Cote, R. (2004). **Principles and practice of ecological design**. *Environmental Reviews*, 12, 97–112. <https://doi.org/10.1139/a04-005>
- Song, B., Puntien, P., Inkuer, A., & Mayusoh, C. (2024). **The light design in exhibition spaces**, 9(4).
- Stevens, L. L., Fehler, M., Bidwell, D., Singhal, A., & Baumeister, D. (2022). **Building from the bottom up: A closer look into the teaching and learning of Life's Principles in biomimicry design thinking courses**. *Biomimetics*, 7(1), 25. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7010025>
- **The complete history of biomimicry (with examples)**. (n.d.). Retrieved April 14, 2025, from <https://www.learnbiomimicry.com/blog/history-of-biomimicry>
- Verria, C. (2022). **Design di prodotti biomimetici = Design of biomimetic's products** [Tesi di laurea, Politecnico di Torino]. Webthesis Politecnico di Torino. <http://webthesis.biblio.polito.it/25126/1/tesi.pdf>
- Wong, C. (2024). **Towards sustainable exhibition practices: Assessing and enhancing sustainability in art exhibitions** (Master's thesis, Sotheby's Institute of Art). Digital Commons @ SIA. [https://digitalcommons.sia.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1192&context=stu\\_theses](https://digitalcommons.sia.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1192&context=stu_theses)
- Xu, Q., Zhang, W., Dong, C., Sreeprasad, T. S., & Xia, Z. (2016). **Biomimetic self-cleaning surfaces: Synthesis, mechanism and applications**. *Journal of The Royal Society Interface*, 13(122), 20160300. <https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0300>
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). **Industry 4.0 and Industry 5.0 Inception, conception and perception**. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530–535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Youssef, M. (2023). **Blue Economy Literature Review**. *International Journal of Business and Management*, 18(3), 12. <https://doi.org/10.5539/ijbm.v18n3p12>
- Zari, M. P. (2019). **Regenerative urban design and ecosystem biomimicry**. Routledge.
- Zvarych, R., Masna, O., & Rivilis, I. (2023). **Methodological principles of the formation the concept of green economy**. Herald.