

# Il progetto biomimetico. Eteronomia ed autopoiesi nell'integrazione tra tecnologia e biologia

SAGGI E PUNTI  
DI VISTA/  
ESSAYS AND  
VIEWPOINT

Carlo Caldera<sup>1</sup>, Valentino Manni<sup>2</sup>, Luca Saverio Valzano<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, Italia

<sup>2</sup> Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia

carlo.caldera@polito.it

valentino.manni@polito.it

luca.valzano@polito.it

**Abstract.** L'applicazione del pensiero sistemico alla risoluzione della complessità nel progetto biomimetico consente di pervenire all'integrazione tecnologica tra sistemi biologici ed artificiali, realizzando un organismo edilizio autopoietico. L'emulazione della Natura nel progetto esige la contaminazione e l'ibridazione dei saperi. Le soluzioni di tipo meccanico o quelle legate alle proprietà dei materiali non sono le sole a cui l'architettura adattiva può fare ricorso nel replicare i processi naturali. Si illustrano esperienze che applicano, sia alla scala del manufatto architettonico sia alla scala urbana, strategie adattive autopoietiche del mondo naturale mediante l'integrazione tra tecnologia e biologia, al fine di mettere in luce il nesso tra progetto biomimetico ed eteronomia disciplinare.

**Parole chiave:** Progetto biomimetico; Integrazione tecnologica; Sistema biologico; Autopoiesi; Pensiero sistemico.

## Premessa e background culturale e scientifico

Il tema dell'interdisciplinarietà e della contaminazione dei saperi nel campo dell'architettura si

confronta con la gestione della complessità del processo edilizio e delle sue fasi, dall'ideazione, alla progettazione, costruzione, gestione, dismissione o riconversione del manufatto architettonico. La complessità dell'intero processo converge nella fase di progetto, in quanto prodromica delle fasi successive.

Nella progettazione si agisce all'interno di un sistema complesso confrontandosi con altri sistemi essi pure complessi. La progettazione in architettura, costantemente coinvolta nella risoluzione di problematiche complesse, deve essere innanzitutto improntata ad una metodologia operativa basata su una visione sistemica in cui, in considerazione dell'ampio spettro delle istanze da espletare, si intrecciano la dimensione tecnico-progettuale e quella scientifico-culturale.

«Operare secondo una visione sistemica significa saper cogliere le connessioni e le intersezioni tra le parti ed il tutto. L'attitudine

Biomimetic design.  
Heteronomy and  
autopoiesis in the  
integration between  
technology and biology

**Abstract.** Applying systemic thinking to the resolution of complexity in biomimetic design allows technological integration between biological and man-made systems, thereby creating an autopoietic building organism. Emulating Nature in projects requires know-how cross-fertilization and hybridization. Mechanical solutions and those associated with the properties of materials are by no means the only options adaptive architecture can resort to in reproducing natural processes. This paper illustrates experiences that adopt adaptive autopoietic strategies at both urban and architectural product level. These strategies are typical of the natural world and involve the integration of technology and biology. The described experiences aim at highlighting the link between biomimetic design and the heteronomy of disciplines.  
**Keywords:** Biomimetic design; Technological integration; Biological system; Autopoiesis; Systemic thinking.

ad operare con la complessità è tipica di un metodo di lavoro interdisciplinare e sovradisciplinare che attinge pienamente dalla tradizione della cultura tecnica italiana ed europea» (Caldera *et al.*, 2019).

Attraverso l'applicazione al progetto del pensiero sistemico, è possibile organizzare ed ottimizzare tutte le parti di un sistema edilizio in modo che esse possano svilupparsi realizzando con l'ambiente una rete autopoietica di relazioni tra flussi di materia, energia ed informazioni, evolvendo coerentemente con esso.

Una rete autopoietica è un «sistema che ridefinisce continuamente sé stesso e si sostiene e riproduce dal proprio interno» (Maturana and Varela, 1985).

L'enunciazione dell'autopoiesi trae i propri fondamenti teorici dalla disciplina della cibernetica, la quale interpreta i processi come reti di relazioni tra elementi in ingresso e in uscita, basate su meccanismi di autoregolazione e di retroazione.

Luisi e Capra (2015) aggiungono che nei sistemi autopoietici «lo scambio con l'ambiente esterno è fondamentale anche dal punto di vista epistemico e cognitivo: quella con l'ambiente è infatti sempre una interazione cognitiva. [...] ogni organismo vivente è un organismo cognitivo».

In virtù di quanto esposto, sarebbe lecito domandarsi se il sistema edilizio, a cui venga conferita capacità autopoietica (mediante la dotazione di sistemi tecnologici adattivi), possa essere considerato un organismo vivente (e cognitivo).

Nell'era della Quarta Rivoluzione Industriale, è interessante determinare in quale misura il contributo della sensoristica, dell'IoT e delle tecnologie digitali possa fornire elementi significativi per rispondere a tale quesito ed eventualmente sostenere e

## Foreword and cultural-scientific background

In the field of architecture, interdisciplinarity and know-how cross-fertilization face the challenge of managing the complexity of the construction process and its stages. These range from conception to design, construction, management and decommissioning or reconversion of architectural products.

The complexity of the whole process lies in the design stage, as it sets the scene for the subsequent phases.

The design effort takes place within a complex system and requires interacting with other complex systems. Indeed, architectural design is constantly involved in solving complex issues. Hence, it should first of all be guided by an operating method based on a systemic perspective. Given the broad spectrum of requirements to be

fulfilled, the technical design and the scientific-cultural dimensions are intertwined in such a method.

«Operating according to a systemic perspective means being capable of grasping the links and intersections among the parts and the whole. The ability to operate on complexity is typical of interdisciplinary and supradisciplinary working methods. Such methods exploit to the fullest extent the traditions of the Italian and European technical culture» (Caldera *et al.*, 2019).

All the elements of a building system can be organized and optimized by applying the systemic perspective to a project. This in turn allows such elements to develop and create an autopoietic network with the environment, a network made up of relationships among matter, energy and information flows that evolves in a coherent fashion with the environment.

rafforzare tale affermazione. In ogni caso si colgono similitudini. Ad esempio, i sistemi di sensori nelle tecnologie adattive presentano una grande analogia con i sistemi neurali autopoietici (Neural Networks, NN) basati anch'essi sull'interconnessione e sullo scambio delle informazioni.

### Applicazioni del pensiero eco-sistemico al progetto biomimetico

La biomimesi, disciplina che studia e imita la natura, costituisce una delle punte avanzate delle ricerche nel campo della tecnologia. Essa «ha l'obiettivo di applicare le regole e le procedure dei processi naturali ad altri processi [...] nei quali però l'uomo interviene con delle proprie modalità e secondo delle proprie esigenze» (Zannoni, 2015).

Come rileva Chayaamor (2011), dal passato al presente, l'approccio biomimetico è stato applicato in vari campi del progetto, come l'intelligenza artificiale, la robotica, l'ingegneria dei materiali, l'architettura ma anche la sociologia e l'ecologia dell'ambiente umano.

La natura può essere emulata non soltanto in termini di efficienza funzionale, ma anche come modello di processi circolari, di efficienza energetica, di auto-adattamento, riciclo e riuso. Si possono apprendere dalla natura strategie appropriate per l'uso di fonti di energia rinnovabili, per il reimpiego dei rifiuti, fino a giungere a strategie complesse, come quelle basate sulle capacità (autopoietiche) di auto-monitoraggio e di auto-riparazione (come la riparazione tessutale negli organismi viventi).

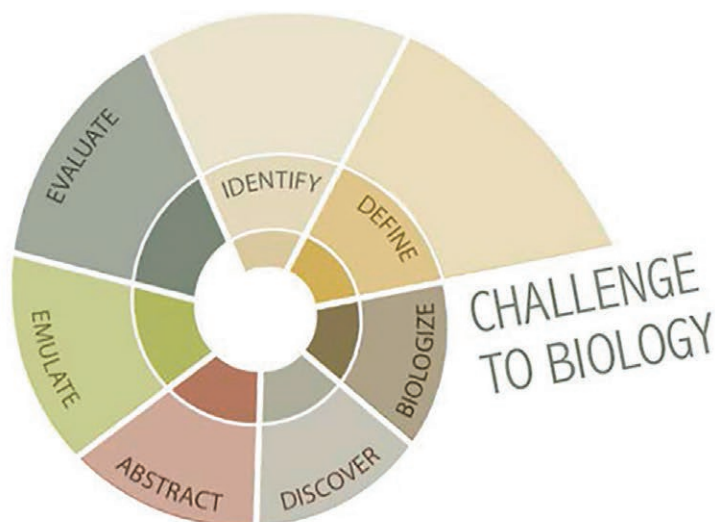
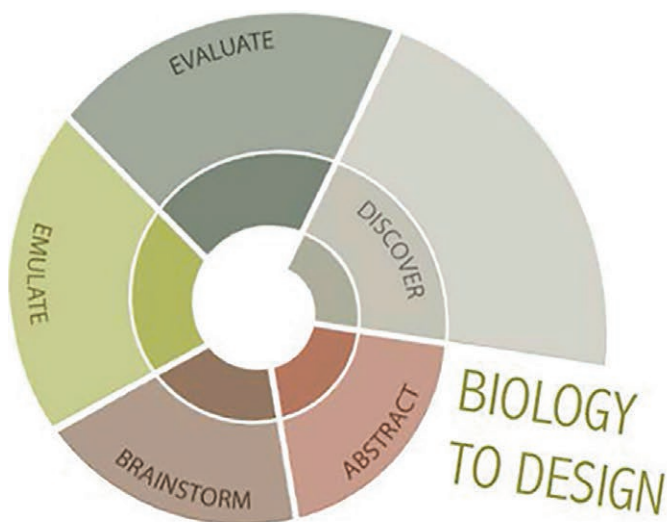
Tra i molteplici contributi nel campo della biomimesi, il tentativo più compiuto volto alla definizione di una metodologia analitica a supporto di un approccio progettuale è riferibile a Janine

Benyus (1997) la quale, attraverso la divulgazione delle proprie osservazioni nel campo delle scienze biologiche, ha promosso il trasferimento delle logiche dei processi naturali al campo tecnologico, al fine di superare la mera imitazione formale (biomorfismo) e di pervenire all'emulazione cosciente dei processi funzionali per una progettazione sostenibile dell'ambiente umano.

La metodologia progettuale postulata, di ispirazione eco-sistemica, si sviluppa in due approcci meta-progettuali distinti: dalla biologia al progetto (from biology to design) e dalla sfida progettuale, intesa come sforzo intellettuale volto al raggiungimento degli obiettivi prefissati, alla biologia (from challenge to biology). Nel primo caso, partendo dall'osservazione dei fenomeni naturali, si perviene alle possibili applicazioni nel design dei meccanismi osservati. Nel secondo caso, prefissato un obiettivo, si coglie la sfida progettuale indagando nel mondo naturale al fine di trovare fenomeni biologici che possano ispirare il progetto (Fig. 1).

Il carattere multidisciplinare di questa metodologia, fondata sull'implementazione interdisciplinare dei livelli di conoscenza, è evidente nel rapporto che intercorre, nel primo approccio, tra l'osservazione fenomenologica nel campo biologico, l'ideazione ed il trasferimento tecnologico in altri domini e, nel secondo approccio, tra la definizione di un quadro esigenziale, l'indagine dei processi naturali e la loro applicazione al mondo artificiale. Il paradigma alla base della metodologia illustrata consiste «nell'emulazione cosciente del genio della vita» (*ibidem*).

L'emulazione dei processi naturali è un tema di rinnovato interesse nell'architettura contemporanea. Nel pensiero progettuale corrente, si sta progressivamente consolidando il concetto di adattività, mutuato dal mondo naturale, che induce a concepire



l'organismo edilizio come un sistema che si adatta omeostaticamente, al variare delle sollecitazioni ambientali nel tempo. Come sostiene Tillmann Klein del TU Delft, «*the idea of "adaptive architecture" has emerged from the debate on efficient building systems, meaning a form of architecture that constantly adapts itself to changing climatic conditions depending on the time of day or season. Not dissimilar to nature, it responds dynamically to change*» (Mazzucchelli, 2020).

Secondo Schnädelbach (2010), l'architettura adattiva è un campo di studi multidisciplinare il cui carattere si manifesta attraverso il confronto tra architettura, computer science, scienze sociali, pianificazione urbana ed arti. Ciò rafforza l'idea che l'architettura adattiva sia fonte di cambiamenti non solo per quanto concerne aspetti tecnologici ma anche il modo stesso in cui viene considerato il costruito in termini culturali.

### Esperienze e sperimentazioni progettuali

L'osservazione dei processi naturali, di cui si avvale la biomimesi, è grande fonte di ispirazione per la concezione di sistemi tecnologici adattivi. Quando l'approccio biomimetico, applicato al progetto in architettura, dà forma ad un edificio adattivo, si consegue il miglioramento del livello prestazionale e, dunque, della qualità globale dell'organismo edilizio, ottenendo, al contempo, la razionalizzazione del consumo delle risorse necessarie al metabolismo eco-sistemico di cui l'edificio è parte integrante. L'adattabilità conferita all'organismo edilizio dal paradigma progettuale biomimetico è di norma maggiormente evidente nel design dell'involucro. I sistemi di involucro di tipo dinamico, particolari sistemi tecnologici adattivi concepiti per rispondere

An autopoietic network is a «system capable of reproducing and maintaining itself by creating its own parts and eventually further components» (Maturana and Varela, 1985).

The enunciation of autopoiesis draws its conceptual underpinnings from cybernetics. This discipline describes all processes as networks of relationships among input and output elements. Such networks are based on feedback and self-adjustment mechanisms. Luisi and Capra (2015) further state that in autopoietic systems «the exchange with the external environment is also essential from an epistemic and cognitive viewpoint. Actually, any interaction with the environment is always a cognitive one, [...] each living organism is a cognitive organism».

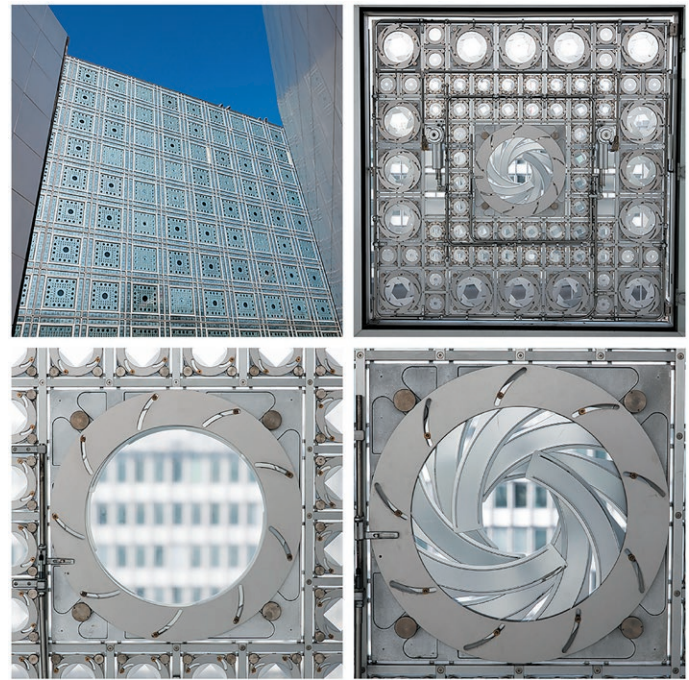
In the light of the foregoing, one may wonder whether a building system endowed with autopoietic capacity

(by means of adaptive technological systems) could be considered a living (and cognitive) organism.

In the era of the Fourth Industrial Revolution, it is interesting to ascertain to what extent the contribution offered by sensors, IoT and digital technologies could provide significant elements to answer such a question, possibly supporting and reinforcing the above statement. Similarities can, however, be identified. The sensor systems of adaptive technologies, for instance, display considerable similarities with the autopoietic neural systems (Neural Networks, NN). The latter are also based on interconnections and information exchanges.

#### Applications of eco-systemic thinking to biomimetic projects

Biomimetics is a discipline that studies and imitates Nature. It is one of



alle sollecitazioni ambientali (irradiazione solare, variazioni di temperatura, precipitazioni, etc.) rappresentano uno dei temi tecnologici di maggiore attualità della ricerca nell'architettura, in relazione ad istanze di carattere ambientale, energetico, formale e funzionale.

Tra gli esempi più noti vi è il fronte sud dell'Institut du Monde Arabe a Parigi, opera di Jean Nouvel ed Architecture Studio (Fig. 2). Grazie a un sistema di sensori fotoelettrici, i diaframmi inseriti nella facciata sono in grado di aprirsi e di chiudersi in funzione dell'irraggiamento solare incidente, modulando l'ingresso della radiazione solare, al fine di ottenere adeguati livelli di illuminazione naturale all'interno dell'edificio e di ricreare la percezione della luce tipicamente associata alle schermature dell'architettura tradizionale araba.

the most advanced research areas in the field of technology. Biomimetics «aims at adopting the rules and procedures of natural processes to other processes [...] in which, however, man intervenes with his own methods and according to his own needs» (Zannoni, 2015).

As pointed out by Chayaamor (2011), the biomimetic approach has been adopted from the past to the present in several design fields, such as artificial intelligence, robotics, material engineering and architecture, as well as in sociology and human environment ecology too.

Nature can be emulated not only in terms of functional efficiency, but also as a model for circular processes, energy efficiency, self-adaptation, recycling and reuse. Appropriate strategies can be learned from Nature concerning the use of renewable energy sources, waste

reuse and even complex strategies. These may include strategies based on (autopoietic) self-monitoring and self-repair capabilities (such as tissue healing in living organisms).

Among the many contributions to the field of biomimetics, the most comprehensive effort aimed at defining analysis methods supporting a design approach can be ascribed to Janine Benyus (1997). Through the dissemination of her observations in the field of life sciences, Benyus promoted the transfer of the rationale underpinning natural processes to the field of technology. She did so in order to move beyond mere formal imitation (biomorphism) and to attain the conscious emulation of functional processes. Her final goal was to achieve a sustainable design of the human environment. The advocated design methods are based on an eco-systemic perspective.



Il ricorso a soluzioni meccaniche è il denominatore comune con altre architetture sperimentali. L'One Ocean Pavilion a Yeosu, progettato da Soma Architects per l'Expo Korea 2012 (Fig. 3), è un esempio di architettura adattiva cinetica, esito di un approccio nella concezione architettonica che mira a conferire all'edificio la capacità di modificare la propria geometria attraverso il movimento dei propri elementi costituenti.

Un ulteriore esempio di architettura dinamica di tipo meccanico è rappresentato dalle facciate delle Al Bahr Towers ad Abu Dhabi sviluppate da ARUP (Fig. 4). Esse sono caratterizzate da una doppia pelle: un primo involucro vetrato è protetto da uno schermo avanzato costituito da pannelli mobili ancorati alla struttura portante tramite elementi metallici. È possibile elencare numerosi altri progetti assimilabili ai casi illustrati, tra cui il padiglione Quadracci del Milwaukee Art Museum di Calatrava

oppure il Q1 Thyssenkrupp Quarter ad Essen di Chaix & Morel et Associés.

L'introduzione nel campo delle costruzioni di nuovi prodotti e di inedite modalità di impiego delle proprietà dei materiali fornisce al progetto biomimetico nuovi strumenti che consentono di superare la fragilità intrinseca dei sistemi tecnologici adattivi basati su meccanismi cinematici.

Materiali come i PCM (Phase Change Materials) ed i TIM (Transparent Insulation Materials) possono trasformare l'involucro in un elemento interattivo e dinamico.

L'adattamento può essere ottenuto anche attraverso lo sfruttamento della sensibilità igroscopica o termica di alcuni materiali o mediante l'accoppiamento materico, al fine di ottenere comportamenti differenziali nel prodotto composito.

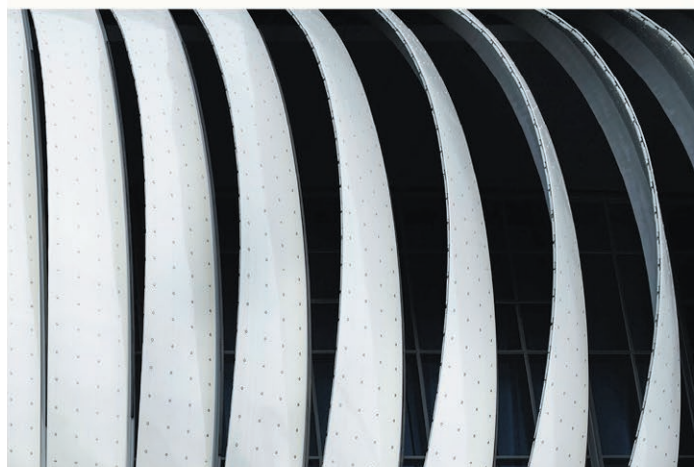
Le ricerche condotte da Chao Chen (2015) presso il Royal Col-



(a)



(b)



(c)



(d)

04 |



They develop into two different meta-design approaches. One of them goes from biology to design, the other from challenge to biology. Design challenges are seen as intellectual efforts aimed at attaining pre-set goals. The former approach starts from the observation of natural phenomena, reaching potential design applications of the observed mechanisms. In the latter approach, once the goals are set, the design challenge is taken up by investigating the natural world to identify biological phenomena that may inspire the design (Fig. 1).

These approaches rest on the interdisciplinary implementation of various levels of knowledge. The multidisciplinary nature of their methods is clear. In the former approach, it is highlighted by the relationship among phenomenological observations in life sciences, conceptualization and tech-

nological transfer to other domains. In the latter approach, the multidisciplinary character is brought out by the links among the requirement framework, the investigation of natural processes and their implementation in the man-made world. The described methodology rests upon the paradigm of «conscious emulation of the genius of life» (*ibidem*).

The emulation of natural processes has attracted renewed interest in contemporary architecture, and adaptivity is a gradually consolidating concept in current design thinking. This concept, borrowed from the natural world, suggests that building complexes could be conceived as organisms adapting in a homeostatic way as environmental conditions change over time.

Tillmann Klein from TU Delft claims that «the idea of “adaptive architec-

ture” has emerged from the debate on efficient building systems, meaning a form of architecture that constantly adapts itself to changing climatic conditions depending on the time of day or season. Not dissimilar to nature, it responds dynamically to change» (Mazzucchelli, 2020). According to Schnädelbach (2010), adaptive architecture is a multidisciplinary field of study, whose character manifests itself through exchanges among architecture, computer science, social sciences, urban planning and the arts. This reinforces the idea that adaptive architecture is a source of change as it concerns not only technological aspects, but also the way built products are perceived in cultural terms.

**Design experiences and experiments**  
Biomimetics relies on the observation of natural processes, a rich source of

inspiration to devise adaptive technological systems. Indeed, various benefits arise when the biomimetic approach to design produces an adaptive building. As a matter of fact, performance and, therefore, the overall quality of the building organism improve. At the same time, resources are used more rationally, and are needed for the eco-systemic metabolism, since the building is both an integral and an integrated part of the same.

The biomimetic design paradigm provides building organisms with an adaptability that is usually more evident in the design of their envelopes. Dynamic envelope systems are special technological systems conceived to adapt to environmental stresses (solar radiation, temperature changes, rainfall, etc.). They are among the most topical technological subjects in architectural research, and are related

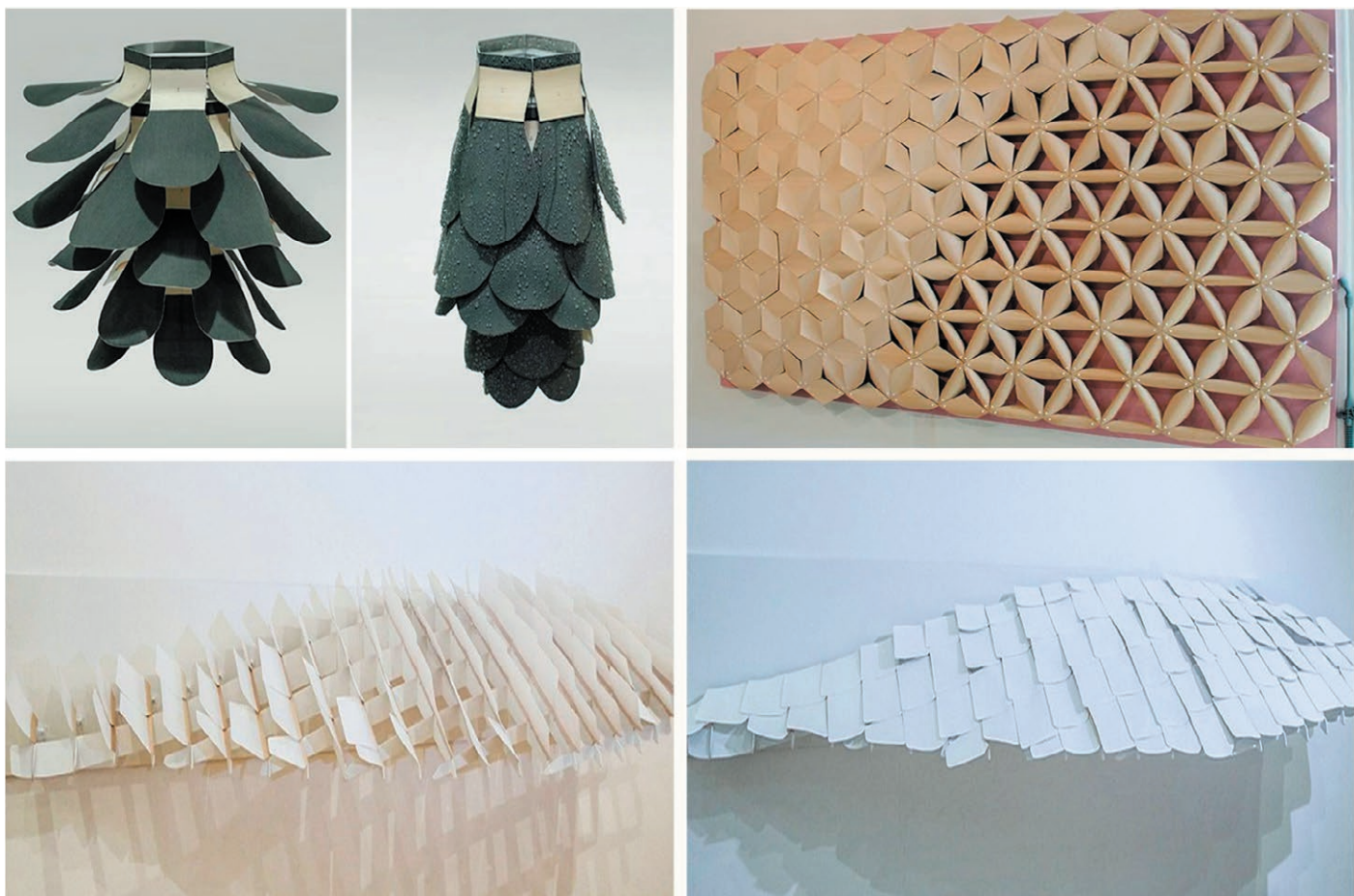


lege of Arts di Londra, partendo dall'osservazione della reazione all'acqua della pigna, hanno ispirato l'ideazione di un materiale composito ottenuto dalla stratificazione di nylon, poliestere, stirene e essenze vegetali, in grado di deformarsi in relazione all'igroscopicità. Sull'igroscopia si basa anche il comportamento adattivo dell'involucro dell'HygroScope Pavilion a Parigi di Achim Menges. Questo approccio consente di concepire nuovi sistemi di involucro adattivi e biomimetici (Fig. 5).

La sperimentazione di sistemi adattivi è stata, finora, prevalentemente condotta attraverso l'impiego di dispositivi meccanici o ricorrendo allo sfruttamento delle proprietà chimico-fisiche dei materiali da costruzione. Tuttavia, lo scenario generato dall'intersezione tra il progresso delle scienze biologiche e lo sviluppo delle tecnologie costruttive e di quelle dell'era digitale prefigura nuove soluzioni tecnologiche ed inedite influenze della biologia nel progetto, sollecitando la ridefinizione del paradigma della progettazione biomimetica. L'architettura biomimetica può evolvere, passando dalla "emulazione cosciente della Natura" all'integrazione tra

sistemi biologici ed artificiali attraverso l'ibridazione tecnologica. Infatti, l'IoT e la connessione digitale conferiscono agli organismi edilizi capacità cognitive e computazionali e li inseriscono in una rete di relazioni, generando un sistema di sistemi, un organismo metabolico ed autopoietico in grado di partecipare al più ampio metabolismo ambientale, all'interno di una visione eco-sistemica. Negli ultimi anni un numero sempre maggiore di interventi e di sperimentazioni, sia a scala architettonica sia a scala urbana, ha riguardato l'integrazione tecnologica tra artificiale e naturale. Tra le esperienze condotte o ancora in corso, al momento ancora pionieristiche ed in numero esiguo, si segnalano i progetti in cui sono state impiegate le colture microalgali.

Grazie alla loro elevata efficienza fotosintetica, le microalghe rappresentano una promettente soluzione per la riduzione della concentrazione di biossido di carbonio nell'atmosfera (Singh and Ahluwalia, 2013). Inoltre, in virtù delle loro proprietà fito-depurative, le microalghe possono essere opportunamente impiegate nella realizzazione di rivestimenti di facciata in grado di purifica-



| 05



re le acque reflue degli edifici (Marino and Giordano, 2015). «I vantaggi unici di queste bio-facciate, che combinano cicli tecnici e biologici, inaugurano un approccio innovativo alla sostenibilità, integrando valori ambientali, energetici e iconici» (Elrayies, 2018). Secondo Proksch (2013), l'integrazione archi-

to environmental, energy, formal and functional issues.

The most renowned examples include the southern front of the Institut du Monde Arabe in Paris, France, a piece of work by Jean Nouvel and Architecture Studio (Fig. 2). A system of photocells allows the diaphragms, integrated into the façade, to open and close during the day, depending on incoming solar radiation. This, in turn, allows to modulate absorption in order to ensure adequate natural lighting inside the building, and to re-create the perception of light typically associated with light screening in traditional Arabic architecture.

The adoption of mechanical solutions is the common denominator shared with other experimental architectural works. The One Ocean Pavilion in Yeosu (South Korea) was designed by Soma Architects for Expo Korea 2012

(Fig. 3). It is an example of adaptive kinetic architecture and results from an approach that aims at enabling buildings to change their geometry by moving their elements.

A further example of dynamic mechanical architecture is offered by the façades of the Al Bahr Towers in Abu Dhabi, which were developed by ARUP (Fig. 4). These façades are characterized by a double skin. A first glazed envelope is protected by an advanced screen consisting of mobile panels anchored to the load-bearing structure through metal elements. Many other instances comparable to the illustrated cases can be provided. These include the Quadracci Pavilion by Calatrava at the Milwaukee Art Museum (USA), or the Q1 Thyssenkrupp Quarter by Chaix & Morel et Associés in Essen (Germany).

New products and original ways of us-

tetturale di coltivazioni di microalghe apre nuove dimensioni nel campo della sostenibilità per designer ed architetti.

La peculiarità dei progetti che sfruttano le proprietà delle microalghe richiede una buona conoscenza ed una chiara comprensione di tali organismi biologici e dei processi da essi attuati.

ing the properties of materials were introduced, offering biomimetic design new tools to overcome the intrinsic fragility of adaptive technological systems based on kinematic mechanisms. Such novelties as Phase Change Materials (PCMs) and Transparent Insulation Materials (TIMs) can turn the envelope into an interactive, dynamic element.

Adaptation can also be achieved by exploiting the hygroscopic or thermal sensitivity of some materials, or by suitably coupling materials in order to obtain differential behaviors of the composite product.

The research work carried out by Chao Chen (2015) at the Royal College of Arts of London started by the observation of pine cone reactions to water. They inspired the development of a composite material obtained by overlapping layers of nylon, polyester, sty-

rene and plant veneers. The obtained material can change shape depending on its hygroscopic properties. The adaptive behavior of the envelope of Achim Menges' HygroScope Pavilion in Paris (France) is based on hygroscopic principles too. This approach allows new biomimetic and adaptive envelope systems to be devised (Fig. 5). So far, adaptive system trials were mainly carried out by using mechanical devices or by exploiting the chemical and physical properties of building materials. A new scenario, however, has arisen at the intersection between life science advances and building and digital era technologies. It foreshadows new technological solutions and original influences of biology on design, thereby stimulating a redefinition of the biomimetic design paradigm. Biomimetic architecture can evolve from the "conscious emulation of Nature" to the integration between bio-



Inoltre, è imprescindibile l'adozione di una visione sistemica al fine di poter cogliere connessioni con altri domini all'interno del progetto (Peruccio and Vrenna, 2019).

Un esempio in cui questi concetti trovano applicazione è la BIQ House di Amburgo di ARUP (Fig. 6), intervento di edilizia sperimentale in cui una facciata innovativa composta da pannelli fotobioreattori (PBR) a microalghe è in grado di produrre la biomassa e l'energia termica necessarie al fabbisogno dell'edificio. L'irraggiamento solare diretto catalizza il processo di proliferazione delle microalghe che producono energia e al contempo creano uno strato coibente naturale in grado di svolgere anche la funzione di sistema schermante.

Tra le diverse recenti realizzazioni (dimostratori, installazioni artistiche, padiglioni espositivi, ecc.) si segnalano Algaevator di Tyler Stevermer e Jie Zhang, Algae Dome di SPACE10, Urban Algae Folly, BIOtech-HUT e Algae Canopy di ecoLogicStudio.

Le ricerche condotte da ecoLogicStudio nel corso di un decennio si sono concentrate sullo studio dell'eco-sistema, inteso, nell'era dell'antropocene, quale unione dell'*urbanosfera* e della biosfera. Il rapporto che intercorre tra i due sub-sistemi è caratterizzato da mutua interazione e stretta interdipendenza. Gli organismi biologici prendono parte al metabolismo del costruito, ibridando la tecnologia ed evolvendo verso un modello bio-integrato.

L'attività di studio ha portato alla creazione, nel 2018, di Photo.Synt.Ethica, un cluster di ricerca che coinvolge l'Urban Morphogenesis Lab dell'University College London e il Synthetic Landscapes Lab, dell'Università di Innsbruck.

Gli obiettivi ultimi della ricerca consistono nell'integrazione della Natura nella città in modo armonioso ed efficiente, nel retrofitting degli edifici in bio-hub energetici, nell'assorbimento e

nella metabolizzazione dell'inquinamento atmosferico e nell'integrazione dei processi fotosintetici nell'ambiente costruito.

La ricerca di Photo.Synth.Etica ha prodotto una serie di soluzioni tecnologiche bio-integrate (rivestimenti di facciata, coperture, installazioni urbane) basate sullo sfruttamento dei processi fotosintetici di bioreattori a microalghe, in grado di assorbire e metabolizzare le sostanze inquinanti presenti in atmosfera e di produrre ossigeno e biomassa (per uso energetico ed alimentare) attraverso l'impiego dell'energia solare (ecoLogicStudio, 2018) (Fig. 7a, b).

Il sistema tecnologico di base consiste in un modulo ripetibile ed accoppiabile in diverse configurazioni, costituito da tre sottosistemi: sottosistema *hardware* (elementi di involucro in EFTE in cui è confinata la coltura microalgale); sottosistema *wetware* (coltura microalgale, liquido colturale e nutrienti); sottosistema *software* (apparato digitale per la gestione del sistema generale, anche cognitiva, per l'interfaccia con l'utente e con l'ambiente circostante).

La soluzione tecnologica si configura, in virtù delle caratteristiche illustrate, quale Sistema Adattivo Complesso (CAS). I CAS sono casi speciali di sistemi complessi. Sono complessi in quanto multicomponenti e composti da molteplici elementi interconnessi; sono adattivi in quanto hanno la capacità di cambiare ed imparare dall'esperienza.

Questo sistema tecnologico trova applicazione sia alla scala del manufatto architettonico (Fig. 7c) sia alla scala urbana o territoriale (Fig. 7d). Infatti, come nel caso del progetto Aarhus Wetcity (ecoLogicStudio, 2018), la dispersione e la connessione in rete di una molteplicità di tali dispositivi possono creare una rete cibernetica di bioreattori e di biosensori in grado di rilevare

logical and man-made systems through technological hybridization.

Indeed, IoT and digital connections endow building organisms with cognitive and computational capabilities. They introduce such organisms into a network of relationships, thereby giving rise to a system of systems, a metabolic and autopoietic organism capable of participating in the broader environmental metabolism, within an eco-systemic framework.

In recent years, a growing number of interventions and trials dealt with the technological integration of man-made and natural materials at both the architectural and the urban scale. Projects employing microalgae cultivations are worth mentioning among the completed or ongoing trials, which are currently just a few and still in a pioneering stage.

Owing to their high photosynthetic

efficiency, microalgae are a promising solution to reduce atmospheric carbon dioxide concentration levels (Singh and Ahluwalia, 2013). Thanks to their phyto-purifying properties, microalgae can also be used to implement façade claddings, which can purify the wastewaters of buildings (Marino and Giordano, 2015).

«The unique benefits of bio-façades combining technical and biological cycles open up an innovative approach to sustainability by integrating environmental, energy and iconic values» (Elrayies, 2018). According to Proksch (2013), the architectural integration of microalgae cultivations opens up new dimensions in the field of sustainability to designers and architects.

The peculiar character of the projects exploiting the properties of microalgae requires a sound knowledge and a clear understanding of such biological

organisms and of their processes. The adoption of a systemic perspective is also essential to take advantage of the connections with other project domains (Peruccio and Vrenna, 2019). The BIQ House in Hamburg, a project by ARUP (Fig. 6), is an example of application of these concepts. An innovative façade was implemented in the framework of this experimental construction activity. The façade is made up of photo-bioreactors (PBR) and microalgae capable of producing the biomass and the thermal energy required by the associated building. Direct sunlight catalyzes the growth of microalgae, which generate energy while at the same time providing a natural insulation layer that acts as a screening system.

The Algaevator by Tyler Stevermer and Jie Zhang, the Algae Dome by SPACE10, the Urban Algae Folly, the

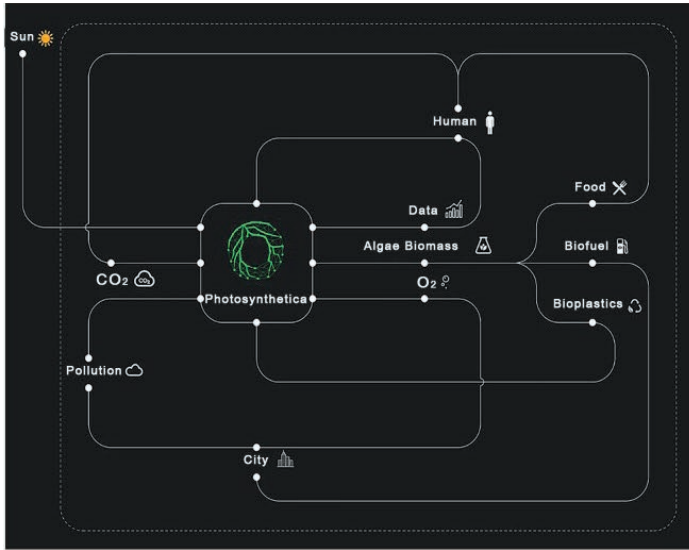
BIOtech-HUT and the Algae Canopy by ecoLogicStudio are worth mentioning among the various recent implementations (demonstrators, artistic installations, exhibition halls, etc.).

The research work carried out by ecoLogicStudio over a decade focused on the study of the ecosystem. In the Anthropocene, this means a combination of *urbanosphere* and biosphere. The relationship between the two subsystems is characterized by mutual interactions and close interdependence. Biological organisms take part in the metabolism of the implemented building, thereby hybridizing technology and evolving towards a bio-integrated model.

In 2018, the study activities gave rise to Photo.Synt.Ethica, a research cluster involving the Urban Morphogenesis Lab of University College London, and the Synthetic Landscapes Lab of the University of Innsbruck.



07 |



(a)



(b)



(c)



(d)

The research work ultimately aims at harmoniously and efficiently integrating Nature into cities, at retrofitting buildings into energy bio-hubs, at absorbing and metabolizing air pollution and at integrating photosynthetic processes into the built environment. Photo.Synth.Etica's research work generated a set of bio-integrated technological solutions (façade claddings, coverings and urban installations). Such solutions exploit the photosynthetic processes of bioreactors and microalgae. They can absorb and metabolize air pollutants to produce

oxygen and biomasses (for energy and nutrition) using solar energy (ecoLogicStudio, 2018) (Fig. 7a, b). The basic technological system consists of repeatable modules, which can be coupled in various configurations. It is made up of three subsystems, i.e., a *hardware* subsystem (EFTE envelope elements where the microalgae cultivation is confined), a *wetware* subsystem (microalgae cultivation with the associated liquid and nutrients), and a *software* subsystem. This includes the digital equipment needed to manage the

overall system even at the cognitive level, as well as the interface with the users and the surrounding environment. Owing to the illustrated characteristics, the technological solution is a Complex Adaptive System (CAS). CASes are special complex systems. They are complex because they consist of multiple components and interconnected elements. They are adaptive because they are capable of changing and learning from experience. These technological systems are applicable both at the architectural product

level (Fig. 7c) and at the urban and territorial level (Fig. 7d). Indeed, as with the Aarhus WetCity project (ecoLogicStudio, 2018), many such devices can be distributed and networked into a cybernetic network of bioreactors and biosensors. Such a network can detect environmental conditions, implement autopoietic adaptive processes and guide the man-made environment's development and transformations. Table 1 summarizes the critical analysis of the mentioned experiences. This analysis involved a comparison of several biomimetic technological

Tab.01 | Confronto multidisciplinare tra sistemi tecnologici biomimetici applicati all'involucro nel progetto di architettura  
 A Multidisciplinary Comparison of the Biomimetic Technological Systems Applied to Architectural Project Envelopes

Tab.01

BIOMIMETIC ARCHITECTURAL DESIGN										
Biomimetic Technological Systems Multi-Criteria Comparison										
Project Name <i>Designer(s)</i>	Place	Year	Adaptive Envelope Typology	Solution(s) for Adaptation	Functions	Main Involved Scientific Disciplines	Biomimetic Design Approach	Model(s) in Nature	Functional Complexity*	Structural Complexity*
<b>Arab World Institute (AWI)</b> <i>Jean Nouvel Pierre Soria Gilbert Lezénés Architecture Studio</i>	Paris France	1987	Kinetic	Mechanical	Daylight Control Thermal Control	Mechanics Physics Cybernetics Animal Biology ...	From Challenge to Biology	Eye's Iris	●	●●●
<b>Quadracci Pavilion Milwaukee Art Museum (MAM)</b> <i>Santiago Calatrava</i>	Milwaukee USA	2001	Kinetic	Mechanical	Daylight Control Thermal Control	Mechanics Physics Cybernetics Animal Biology ...	From Challenge to Biology	Birds' Wings	●	●●
<b>Q1 Thyssenkrupp Head Quarter</b> <i>Chaix &amp; Morel et Associés JSWD Architekten</i>	Essen Germany	2010	Kinetic	Mechanical	Daylight Control Thermal Control	Mechanics Physics Cybernetics Animal Biology Vegetal Biology ...	From Challenge to Biology	Butterflies' Wings Birds' Wings Mimosa Pudica	●	●●
<b>One Ocean Pavilion</b> <i>Soma Architects</i>	Yeosu South Korea	2012	Kinetic	Mechanical	Daylight Control Thermal Control Ventilation	Mechanics Physics Materials Science Cybernetics Vegetal Biology ...	From Challenge to Biology	Strelitzia Reginae	●	●●
<b>Al Bahr Towers</b> <i>Aedas Architects ARUP Group</i>	Abu Dhabi UAE	2013	Kinetic	Mechanical	Daylight Control Thermal Control Ventilation	Mechanics Physics Materials Science Cybernetics Animal Biology Vegetal Biology ...	From Challenge to Biology	Lotus Flowers Wax Flowers Honeycombs	●	●●
<b>Bio Intelligent Quotient (BIQ) House</b> <i>Splitterwerk Arup Engineers Colt Int. GmbH SSC GmbH</i>	Hamburg Germany	2013	Kinetic	Mechanical Integrated Biological - Manmade	Daylight Control Thermal Control Ventilation Energy Generation Air Pollution Reduction	Mechanics Physics Chemistry Materials Science Cybernetics Vegetal Biology ...	From Biology to Design	Arthrospira (Spirulina) Leaves	●●●	●●●
<b>HygroScope Pavilion</b> <i>Achim Menges Oliver David Krieg Steffen Reichert</i>	Paris France	2013	Static	Physical - Chemical	Water Protection	Mechanics Physics Chemistry Materials Science Vegetal Biology ...	From Biology to Design	Pine Cones	●	●
<b>Water-reactive Envelope</b> <i>Chao Chen</i>	London UK	2015	Static	Physical - Chemical	Water Protection	Physics Chemistry Materials Science Vegetal Biology ...	From Biology to Design	Pine Cones	●	●
<b>Algae Canopy</b> <i>EcoLogicStudio</i>	Milan Italy	2015	Static	Integrated Biological - Manmade	Daylight Control Thermal Control Ventilation Energy Generation Air Pollution Reduction	Physics Chemistry Cybernetics Vegetal Biology ...	From Biology to Design	Arthrospira (Spirulina) Leaves	●●●	●●●
<b>Aarhus Wet City</b> <i>Photo.Synth.Etica EcoLogicStudio</i>	Aarhus Denmark	2017	Static	Integrated Biological - Manmade	Daylight Control Thermal Control Ventilation Energy Generation Air Pollution Reduction	Physics Chemistry Cybernetics Vegetal Biology ...	From Biology to Design	Arthrospira (Spirulina) Leaves	●●●	●●●
<b>Algae Curtain</b> <i>Photo.Synth.Etica EcoLogicStudio</i>	Dublin Ireland	2018	Static	Integrated Biological - Manmade	Daylight Control Thermal Control Ventilation Energy Generation Air Pollution Reduction	Physics Chemistry Cybernetics Vegetal Biology ...	From Biology to Design	Arthrospira (Spirulina) Leaves	●●●	●●

\*Functional Complexity and Structural Complexity are evaluated by comparing case studies among themselves.  
 ● lower    ●● average    ●●● higher



le condizioni ambientali, di attuare processi adattivi di natura autopoietica e di indirizzare lo sviluppo e le trasformazioni del contesto antropizzato.

L'analisi critica degli esempi e delle esperienze riportate, condotta attraverso il confronto multicriteriale tra sistemi tecnologici biomimetici applicati all'involucro nel progetto di architettura, è sintetizzata nella tabella riportata (Tab. 1). L'elencazione dei casi, procedendo secondo un ordine cronologico, ne mette in evidenza la recente evoluzione. Sono posti a confronto la tipologia adattiva dell'involucro, le soluzioni tecnologiche, le funzioni assolte, le principali discipline scientifiche coinvolte, l'approccio biomimetico nel design, i modelli naturali di riferimento e i gradi di complessità funzionale e strutturale delle soluzioni tecnologiche adottate.

## Conclusioni

Lo scenario illustrato esprime un approccio olistico e sistemico dell'iter progettuale in grado di ispirarne la concezione e di guidarne le fasi successive e richiede l'adozione della contaminazione dei saperi quale requisito irrinunciabile per una corretta progettazione.

Ciò sollecita l'evoluzione dei canoni del progetto in architettura, tradizionalmente aderente ad un'ortodossia metodologica autoreferenziale consolidatasi nel tempo, verso un'eteronomia procedurale in cui il processo progettuale riceve, fuori da sé, la norma della propria azione, in virtù delle nuove relazioni di interdipendenza stabilite con i molteplici campi specialistici.

Questa considerazione è corroborata dagli esempi illustrati, in quanto l'approccio biomimetico alla progettazione è il medium attraverso cui le discipline scientifiche collaterali e sinergiche

systems applied to envelopes in a few architectural projects. The analysis was carried out following multiple criteria. The reviewed cases are listed in chronological order, thereby highlighting their character as recent developments. The following aspects were compared, precisely, adaptive envelope typology, technological solutions, performed functions, main involved scientific disciplines, biomimetic design approach, natural reference models and degrees of functional and structural complexity of the adopted technological solutions.

## Conclusions

The outlined scenario describes a holistic and systemic approach to the project cycle. Such an approach can inspire the conceptual phase and guide the subsequent stages. It as-

sumes know-how cross-fertilization as a mandatory requirement for adequate design.

This, in turn, fosters the evolution of architectural design canons. Architectural design traditionally sticks to self-referential methodological orthodoxy consolidated over time. The endpoint of the mentioned evolution is a procedural heteronomy whereby the design process is guided by external rules. These rules arise from the new interdependent links with many specialized areas.

The above considerations are underpinned by illustrated examples. Indeed, the biomimetic design approach is the medium through which collateral scientific disciplines synergistic to architecture introduce their rules. This is achieved by means of an interactive and iterative refinement process where the architectural out-

all'architettura impongono le loro regole secondo un processo di affinamento interattivo e iterativo nel quale l'esito architettonico rappresenta la sintesi degli apporti multidisciplinari.

Il caso specifico dell'integrazione tra sistemi biologici e sistemi artificiali, che può essere interpretato come l'ennesimo stadio evolutivo della disciplina biomimetica, è il dominio in cui coesistono organismi viventi, manufatti dell'uomo e le dimensioni cibernetica e digitale. Questo dominio è immerso nell'eco-sistema di cui tutti e tutto sono parte e concorre al suo metabolismo. Le sollecitazioni ambientali catalizzano i processi adattivi ed autopoietici di questa macchina bio-integrata ed innescano la trasformazione delle sostanze occorrenti al metabolismo ecosistemico, come avviene nei recenti casi dei sistemi integrati biologico-artificiali.

La diffusione di manufatti architettonici bio-integrati ed autopoietici nell'ambiente costruito conferisce alla città nuove capacità. La città diviene un «sistema significante, intelligente e autopoietico» (Caruso, 2013).

La riflessione condotta stimola il dibattito sul dominio scientifico del progetto a procedere verso l'eteronomia disciplinare ma, soprattutto, verso il grande tema del pensiero sistemico che consente di «vedere la foresta e gli alberi».

come is a synthesis of the input coming from multiple disciplines.

The integration of biological and man-made systems is a special case. Seen as a further evolutionary step of biomimetics, it is the domain where living organisms and man-made products coexist with cybernetic and digital dimensions. This domain is embedded in the ecosystem to which everything and everyone belong and contributes to its metabolism. Environmental stresses act as catalysts of the adaptive and autopoietic processes of this bio-integrated machine. They also trigger the transformation of the substances needed by the eco-systemic metabolism, as in the recent integrated biological man-made systems.

The spread of bio-integrated and autopoietic architectural products across the built environment provides cities with new capabilities. Cities become

«meaningful, smart and autopoietic systems» (Caruso, 2013).

The ongoing reflection prods the debate on the scientific domain of design to move towards disciplinary heteronomy. Above all, it fosters a shift towards the broad subject of systemic thinking, which allows to «see the forest and the trees».

## REFERENCES

- Archtonic (2013), “BIQ House”, available at: <https://www.architonic.com/it/project/arup-biq-house/5101636> (accessed 30 September 2020).
- Benyus, J.M. (1997), *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, HarperCollins Publisher, New York.
- Caldera, C., Manni, V. and Valzano, L.S. (2019), “Il progetto esecutivo come modello integrato in relazione all’Industria 4.0”, *Techné, Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 18, Firenze University Press, pp. 110-119.
- Caruso, I., “Tegumenti tecnologici. Design per le superfici energetiche interattive”, available at: <https://digicult.it/it/news/technological-integuments-design-interactive-energetic-surfaces/> (accessed 20 December 2020).
- Chayaamor, C. (2011), “Biomimetica e sostenibilità: lo scenario internazionale”, *Scienza e filosofia*, Vol. 6, Università degli Studi di Napoli Federico II, available at: [http://www.scienzae filosofia.com/wp-content/uploads/2018/03/res611954\\_04-CHAYAAMOR.pdf](http://www.scienzae filosofia.com/wp-content/uploads/2018/03/res611954_04-CHAYAAMOR.pdf) (accessed 29 September 2020), pp. 25-30.
- Chen, C. (2015), “Chao Chen Creates Biomimetic Water-Reactive Material Using Pine Cones”, available at: <https://www.designboom.com/design/chao-chen-biomimetic-water-reaction-material-pine-cones-06-30-2015/> (accessed 29 September 2020).
- Designboom (2012), “Aedas: Al-Bahr Towers in Abu Dhabi”, available at: <https://www.designboom.com/architecture/aedas-al-bahar-towers/> (accessed 29 September 2020).
- ecoLogicStudio (2018), “Photo.Synth.Etica”, available at: <https://www.photosynthetic.co.uk/> (accessed 29 September 2020).
- Elrayies, G.M. (2018), “Microalgae: Prospects for greener future buildings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, Elsevier, pp. 1175-1191.
- IMA (2020), “Architecture”, available at: <https://www.imarabe.org/en/architecture> (accessed 29 September 2020).
- Luisi, P.L. and Capra, F. (2015), “Storia ed evoluzione del pensiero sistemico”, *Riflessioni sistemiche*, Vol. 12, AIEMS, pp. 39-47.
- Marino, V. and Giordano, R. (2015), “Requirements and Performances of a Façade Integrated Microalgae Photo-bioreactor for Domestic Wastewater Recycling”, in Astudillo, J. et al. (Eds.), *Proceedings of the VII International Congress on Architectural Envelopes*, Tecnalia Research and Innovation, San Sebastián, Spain, pp. 79-86.
- Maturana, H. and Varela, F.J. (1985), *Autopoiesi e cognizione: la realizzazione del vivente*, Marsilio, Venice, Italy.
- Mazzucchelli, E.S. (2018), “L’Involucro di edifici complessi: aspetti progettuali e costruttivi”, *Modulo*, Vol. 415, BE-MA Editrice, pp. 78-83.
- Peruccio, P.P. and Vrenna, M., (2019), “Design e microalghe. Sistemi sostenibili per le città”, *Agathon*, Vol. 6, Palermo University Press, pp. 218-227.
- Proksch, G. (2013), “Growing Sustainability - Integrating Algae Cultivation into the Built Environment”, *Edinburgh Architectural Research Journal*, Vol. 33, ESALA, pp. 147-162, available at: [sites.eca.ed.ac.uk/ear/files/2014/07/147-1621\\_Updated.pdf](http://sites.eca.ed.ac.uk/ear/files/2014/07/147-1621_Updated.pdf) (accessed 22 August 2019).
- Rutzinger, S. (2013), *Soma - Kinetic Façade*, YouTube video, 00:00:35, available at: [https://youtu.be/C2\\_H8peGhMw](https://youtu.be/C2_H8peGhMw) (accessed 30 September 2020).
- Schnädelbach, H. (2010). “Adaptive Architecture - A Conceptual Framework”, *Proceedings of MediaCity 2010*, Weimar, Germany.
- Singh, U.B. and Ahluwalia, A.S. (2013), “Microalgae: a Promising Tool for Carbon Sequestration”, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 18, Issue 1, Springer, pp. 73-95.
- Transsolar Energietechnik GmbH (2020), “Projects: One Ocean - Pavillion EXPO 2012, Yeosu, South Korea”, available at: <http://transsolar.com/projects/one-ocean-pavillon-expo-2012> (accessed 30 September 2020).
- Zannoni, G. (2015), “Quale natura ci dominerà?”, in Pagani, R., Chiesa, G. and Tulliani, J.M. (Eds.), *Biomimetica e architettura. Come la natura domina la tecnologia*, Franco Angeli, Milan, Italy, pp. 7-8.