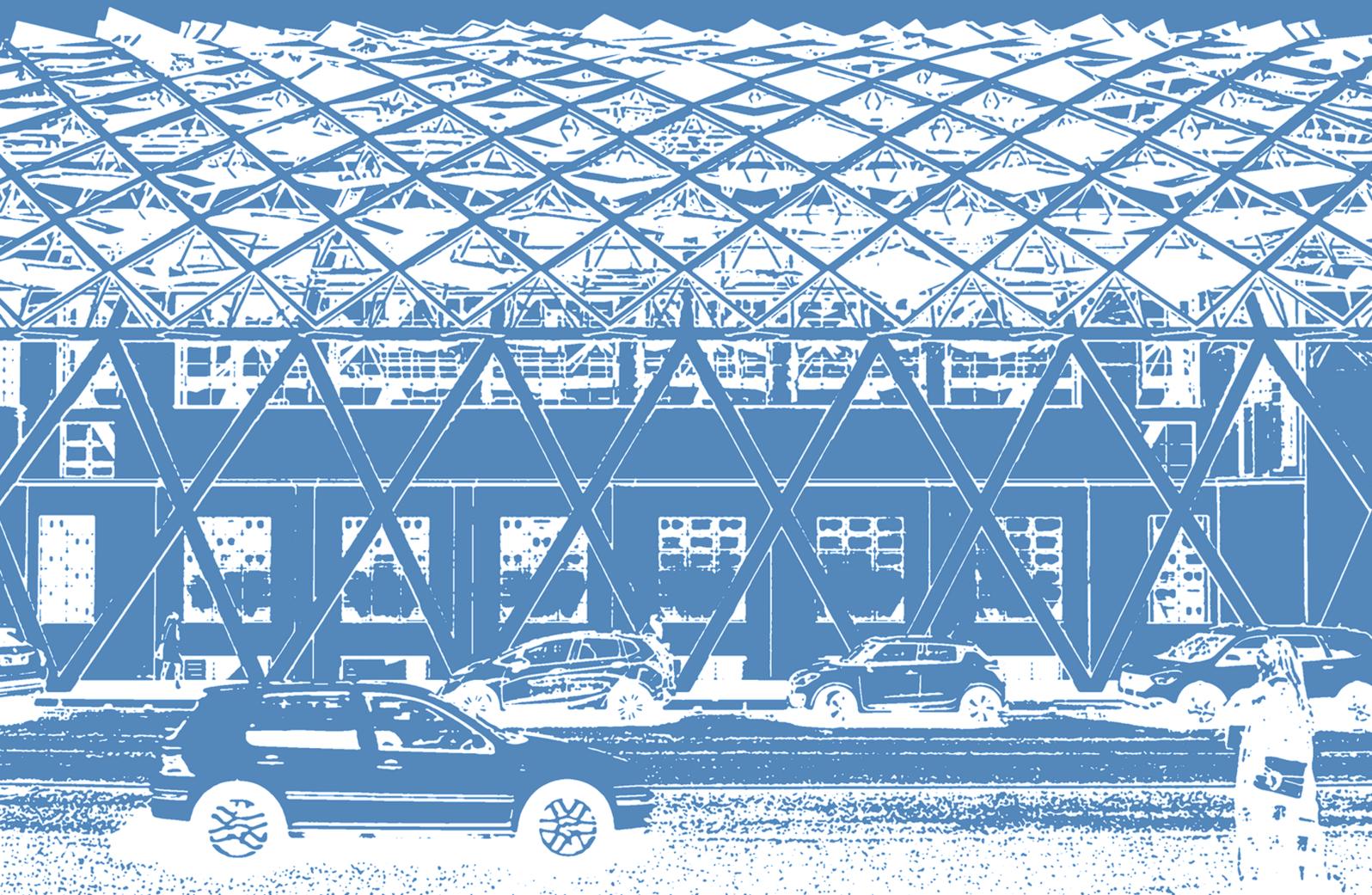


ALBERTO PONS

RESPONSIVE WAVE

PROGETTAZIONE PARAMETRICA DI UNA SCHERMATURA
RESPONSIVA PER IL CONTROLLO DELLA RADIAZIONE SOLARE



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile

Anno Accademico 2020/2021



Tesi di Laurea Magistrale

RESPONSIVE WAVE

Progettazione parametrica di una schermatura
responsiva per il controllo della radiazione solare

Relatore
Prof. Carlo MICONO

Candidato
Alberto PONS

Correlatori
Prof. Fabio FAVOINO
Prof. Roberto GIORDANO

A mamma e papà

INDICE

ABSTRACT (ita)	12	1.3 PATRIK SCHUMACHER E IL MANIFESTO	69
ABSTRACT (en)	14	La nascita di un nuovo stile	
INTRODUZIONE	16	L'ottimizzazione per la sostenibilità	
Il rapporto tra involucro architettonico e ambiente		1.4 LA GESTIONE DELL'ALGORITMO	81
01. L'ARCHITETTURA PARAMETRICA	26	Introduzione al software Grasshopper	
1.1 LA PROGETTAZIONE PARAMETRICA	28	02. DAL PARAMETRICISMO ALL'ARCHITETTURA RESPONSIVA	88
Form Making vs Form Finding		2.1 UN'ARCHITETTURA "IN MOVIMENTO"	90
1.2 PROGETTARE ATTRAVERSO PARAMETRI	47	Evoluzione storica	
I pionieri dell'approccio parametrico		La ricerca della massima efficienza energetica	
La figura del computational designer		2.2 ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE	107
		Al Bahar Towers	
		One Ocean Pavillion	
		Institut du Monde Arabe	
		Media - ICT	
		Hygro Skin	
		Resonant Chamber	
		Q1 Building - Thyssenkrupp Quarter	
		University of Southern Denmark	
		Kiefer Technic Showroom	
		Aegis Hyposurface	
		03. RESPONSIVE WAVE	148
		3.1 LA PISCINA MONUMENTALE	150
		3.2 COMFORT ILLUMINOTECNICO	156
		Daylight Analysis	
		UTCI Analysis	
		3.3 DESCRIZIONE DEL PROGETTO	178
		Processo utilizzato per la realizzazione della nuova schermatura	

3.4 VANTAGGI E RISULTATI OTTENUTI	186
Applicazione della schermatura perpendicolare al vettore solare	
Applicazione della schermatura ottimizzata	

CONCLUSIONI	224
--------------------	------------

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	226
----------------------------------	------------

RIFERIMENTI FOTOGRAFICI	238
--------------------------------	------------

RINGRAZIAMENTI	246
-----------------------	------------

ABSTRACT (ita)

La crescente attenzione rivolta alle tematiche ambientali, unita alla volontà di ridurre i consumi energetici e l'inquinamento atmosferico, ha portato a nuove sperimentazioni in campo architettonico, puntando su sistemi più performanti e sostenibili. Tra le tecnologie più recenti impiegate per il raggiungimento di questo scopo vi sono le facciate dinamiche, in grado di muoversi e cambiare la loro conformazione nel tempo, adattandosi alle condizioni esterne, in modo da garantire la migliore soluzione in ogni momento. Queste tipologie di involucro possono essere una valida alternativa ai tradizionali sistemi di oscuramento che, pur garantendo la riduzione della radiazione solare in ambiente, possono presentare una minore capacità di adattamento alla variazione delle sollecitazioni climatiche e alle esigenze dell'utenza. La facciata di un edificio assume, quindi, un ruolo nuovo: non viene più considerata solamente come elemento di confine tra ambiente interno ed esterno ma, attraverso il movimento, diventa un filtro selettivo in grado di regolare le interazioni tra le mutevoli condizioni ambientali e le esigenze di comfort degli occupanti. L'involucro dinamico caratterizza l'immagine dell'edificio secondo un processo in cui non è unicamente la forma a seguire la funzione o la funzione a seguire la forma, ma forma e funzione dei singoli componenti tecnologici, e dei sistemi nel loro complesso, seguono le sollecitazioni climatiche. Per poter simulare, e successivamente applicare ad un caso concreto questo sistema, non sono sufficienti software di modellazione tradizionali, ma è necessario utilizzare sistemi più complessi ed efficienti: strumenti di programmazione visuale basati su algoritmi generativi, attraverso cui creare degli elementi in grado di modificare la propria

conformazione in base agli stimoli provenienti dall'ambiente in cui vengono inseriti. Questa metodologia viene chiamata "progettazione responsiva", dal momento che reagisce in risposta agli impulsi ricevuti. L'obiettivo è il miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio, attraverso il movimento dei suoi componenti al variare delle condizioni ambientali esterne e delle esigenze interne. La conformazione finale sarà dunque generata in funzione dei parametri ambientali scelti come *input* e corrisponderà alla migliore soluzione possibile basata su requisiti precisi. Nel presente progetto di tesi viene applicato il processo di progettazione responsiva, utilizzando software di modellazione parametrica, attraverso la definizione di un sistema di schermatura dinamica, collocata sul fronte sud della Piscina Monumentale di Torino, in grado di adattarsi alle condizioni climatiche esterne per garantire adeguati livelli di *comfort* interni. Il nuovo sistema di involucro ha l'obiettivo di modulare la luce naturale per evitare il fenomeno dell'abbagliamento, limitare la necessità di illuminazione artificiale, ridurre il *discomfort* causato dalla radiazione, diminuire il carico termico dell'edificio e, grazie alle celle fotovoltaiche che rivestono i pannelli mobili, produrre energia da fonte rinnovabile.

ABSTRACT (en)

The growing attention paid to environmental issues, combined with the desire to reduce energy consumption and air pollution, has led to new experiments in the architectural field, focusing on more efficient and sustainable systems. Among the most recent technologies used to achieve this goal are dynamic facades, able to move and change their shape over time, adapting to external conditions, in order to guarantee the best solution at all times. These types of casing can be a valid alternative to traditional shading systems which, while ensuring the reduction of solar radiation in the environment, may have a lower ability to adapt to the variation of climatic stresses and the needs of users. Therefore, the facade of a building takes on a new role: it is no longer considered only as a border element between the internal and external environment but, through movement, it becomes a selective filter capable of regulating the interactions between changing environmental conditions and comfort needs of the occupants. The dynamic envelope characterizes the image of the building according to a process in which it is not only the form that follows the function or the function that follows the form, but the form and function of the individual technological components, and of the systems as a whole, follow climatic stresses. In order to simulate, and subsequently apply this system to a concrete case, traditional modeling software is not enough, but it is necessary to use more complex and efficient systems: visual programming tools based on generative algorithms, through which to create elements capable of modifying its conformation based on the stimuli coming from the environment in which they are inserted. This methodology is called "responsive design", since it reacts in response

to the impulses received. The goal is to improve the energy performance of the building, through the movement of its components as the external environmental conditions and internal needs vary. The final conformation will therefore be generated according to the environmental parameters chosen as input and will correspond to the best possible solution based on precise requirements. This thesis project applies the responsive design process using parametric modeling software, through the definition of a dynamic shading system, located on the south facade of the Piscina Monumentale in Turin, able to adapt to the external climatic conditions to ensure adequate interior comfort levels. The new envelope system aims to modulate natural light to avoid glare, limit the need for artificial lighting, reduce the discomfort caused by radiation, reduce the thermal load of the building and, due to the photovoltaic cells that cover the mobile panels, produce energy from renewable sources.

INTRODUZIONE

Il rapporto tra involucro architettonico e ambiente

«Se intendiamo l'involucro come "pelle" dell'edificio che protegge l'interno dagli agenti atmosferici ma che allo stesso tempo ne sfrutta in modo funzionale la potenza, allora possiamo pensare alla creazione di uno spazio protetto controllabile. In questo caso le condizioni ambientali esterne diventano una risorsa e non una forza contro cui lottare, mentre l'involucro una "pelle reattiva" che migliora il benessere interno ed evoca molte possibilità di cambiamento»

Thomas Herzog

Oggi le città consumano un'elevata quantità di energia e sono responsabili di elevate emissioni di gas serra in ambiente. Per fronteggiare l'impatto che queste problematiche hanno sul pianeta Terra diventa necessario gestire le questioni urbane in modo responsabile, attraverso leggi che ne limitano i consumi e ne regolano la crescita. Secondo le stime del Consiglio europeo attualmente gli edifici sono responsabili del 40% del consumo energetico e del 36% delle emissioni di CO₂ in ambiente; inoltre il 50% dei materiali estratti è destinato all'edilizia. Il tessuto urbano dunque può essere considerato uno dei maggiori responsabili dei problemi legati al cambiamento climatico, ma, come vedremo, anche una parte fondamentale della soluzione.¹

Per ridurre l'impatto del settore delle costruzioni l'Unione europea ha

¹: KAMAL-CHAOUI L., ROBERT A., *Competitive cities and climate change*, OECD Publishing, Parigi, 2009

promosso una serie di programmi con l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica degli edifici attraverso la ricerca e l'innovazione; alcuni di questi riguardano la riqualificazione degli edifici esistenti, altri impongono regole stringenti per le nuove realizzazioni e altri ancora implicano l'installazione di sistemi ad alta efficienza energetica. Tuttavia vi è un elemento comune al centro delle sperimentazioni attuali, considerato il più importante per risolvere i problemi legati all'impatto ambientale degli edifici: l'involucro edilizio.²

L'involucro è la parte di edificio designata per fare da mediatore nel rapporto tra ambiente e uomo, ovvero tra fattori climatici esterni e le esigenze interne degli occupanti. Questo tipo di elemento tecnologico deve essere in grado di reagire alle sollecitazioni che riceve e può essere definito come limite di separazione tra spazio architettonico e non costruito.

Da sempre l'uomo ha avuto la necessità di realizzare, per mezzo delle risorse presenti in natura, un habitat che lo proteggesse dall'esterno: un involucro-rifugio, inizialmente semplicemente protettivo, poi sempre più sicuro e sofisticato. Ad esempio la parete da "portante" è diventata dapprima "portata", fino a diventare "autoportante", e le sue dimensioni, inizialmente contenute in base alla statica e al linguaggio architettonico, sono cresciute abbandonando le caratteristiche di semplice elemento monostrato e diventando involucro doppio, triplo, multistrato con differenti usi e funzioni, in grado di sviluppare sempre di più le sue capacità di filtro dinamico e selettivo rispetto ai fattori climatici. Un'evoluzione concreta è avvenuta anche nella scelta dei materiali da impiegare, passando da involucri in prevalenza massivi in materiale lapideo ad altri sempre più leggeri, caratterizzati da superfici trasparenti. Di conseguenza è cambiato anche il concetto stesso di involucro architettonico: da semplice elemento di divisione tra interno ed esterno energeticamente passivo a elemento dinamico e interattivo in grado di regolare il funzionamento dell'edificio e caratterizzarne l'immagine.³

²: CROXFORD B., LOPEZ M., MARTIN S., RUBIO R., *How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, volume 67, gennaio 2017, in <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.biblio.polito.it/science/article/pii/S136403211630510X>

³: CONATO F., CINTI S., *Architettura e involucro*, BE-MA Editrice, Milano, 2012

La facciata, interagendo con l'ambiente esterno, è in grado di svolgere diverse funzioni: isolare, impermeabilizzare, filtrare, accumulare, controllare e proteggere meccanicamente il manufatto edilizio. Queste azioni possono avere un'efficacia diversa in funzione dell'intensità di alcuni fattori locali specifici, come la radiazione solare, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, l'intensità delle precipitazioni e la velocità del vento. Inoltre la conformazione della facciata è influenzata dal contesto urbanistico/formale in cui è inserita e dalle risorse locali che si hanno a disposizione.

L'involucro però deve rispettare anche alcuni requisiti interni, come mantenere un adeguato livello di comfort degli occupanti⁴, garantire la visibilità verso l'ambiente esterno, separare lo spazio pubblico da quello privato e ridurre la quantità di sostanze inquinanti.⁵

La facciata dunque può essere interpretata come "membrana" o "pelle" con una duplice valenza: elemento di protezione e rivestimento e, allo stesso tempo, strumento di relazione e interfaccia con l'ambiente esterno. Se si considera l'involucro come una "terza pelle" dell'uomo, oltre al corpo e agli abiti, dovrà essere concepito in modo da avere le stesse caratteristiche di adattamento, riducendo le variazioni di temperatura causata dai fattori climatici esterni, con l'obiettivo di garantire un clima costante indipendentemente dalle condizioni del momento.⁶

Il corpo umano è omotermo, ovvero è in grado di reagire e adattarsi ai cambiamenti che lo riguardano con il meccanismo della compensazione cercando di mantenere quasi invariata la sua temperatura interna. Al variare di alcuni fattori, come temperatura, umidità, irraggiamento, salute, metabolismo, gli esseri umani si adattano per mantenere un adeguato livello di comfort attraverso diversi gesti: vestirsi, svestirsi, coprirsi e asciugarsi. La pelle delle persone viene considerata come un filtro protettivo tra l'ambiente esterno e l'organismo stesso, dunque può garantire protezione ma è anche sensibile alle variazioni che la riguarda. Per gli edifici non è così, infatti, per garantire prestazioni elevate e un

funzionamento ottimale, la facciata dovrebbe essere progettata in modo da proteggere l'organismo edilizio come la pelle protegge l'organismo vivente, diventando un filtro selettivo in grado di ottimizzare le interazioni tra interno ed esterno, regolando il funzionamento dell'edificio e caratterizzandone l'immagine attraverso materiali e tecnologie.

L'involucro edilizio non viene più considerato come semplice elemento di separazione tra lo spazio interno e l'ambiente esterno, ma come una schermatura in grado di soddisfare le esigenze di sostenibilità, funzionalità e benessere.⁷

Le facciate diventano così elementi di altissima qualità ed elevata complessità tecnologica, caratterizzate da un crescente aspetto innovativo, distinguibili in tre diverse categorie in base al loro funzionamento: attivi, passivi e ibridi.

I sistemi di involucro passivo sfruttano al massimo le risorse naturali presenti in ambiente al fine di garantire un elevato livello di comfort interno senza dover ricorrere all'utilizzo di impianti meccanici di condizionamento. Diventa dunque fondamentale una corretta progettazione dell'edificio in modo da sfruttare al massimo gli apporti gratuiti, inserendo spazi tampone per la protezione dal freddo e per catturare l'energia del sole nel periodo invernale; mentre in estate diventa necessario inserire delle schermature esterne al fine di evitare fenomeni di surriscaldamento. L'involucro edilizio viene definito attivo quando fa uso e integra nella propria struttura gli impianti di condizionamento, quelli per la trasformazione dell'energia solare e quelli per la ventilazione meccanica degli ambienti interni. Rispetto a quello passivo è più efficiente e più controllabile, anche se risulta maggiormente energivoro e dispendioso sotto il profilo dei consumi. L'inserimento di alcune componenti impiantistiche permettono di ottenere condizioni di comfort ottimale in qualsiasi momento dell'anno e in qualsiasi località. Le sperimentazioni compiute sugli involucri precedenti hanno portato ad una soluzione ottimale, in grado di svolgere funzioni diverse di modificare le sue prestazioni nel tempo in relazione

4: Per mantenere adeguati livelli di comfort in ambiente diventa necessario ridurre il più possibile le variazioni climatiche, mantenendo temperatura e umidità adeguate, un buon livello di qualità dell'aria, una corretta quantità di illuminazione e un'acustica a norma

5: HERZOG T., KRIPPNER R., LANG W., *Atlante delle Facciate*, Utet, Torino, 2005

6: ALTOMONTE S., *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile*, Editrice Alinea, Firenze, 2004

7: JONES L., *Atlante della Bioarchitettura*, Utet, Torino, 2002

alle condizioni climatiche e alle necessità dell'utenza: l'involucro ibrido. Sfruttare gli apporti gratuiti forniti dall'ambiente integrandoli con sistemi impiantistici efficienti garantisce a questo sistema consistenti vantaggi in ambito prestazionale. Vi è un risparmio economico dovuto alla riduzione dei consumi, oltre ad un notevole calo delle emissioni di CO₂, tuttavia i costi di costruzione risultano di gran lunga superiori rispetto agli involucri standard.⁸

La facciata dunque non è più vista come un problema da "eliminare", semplicemente aumentando l'isolamento termico, ma diventa un'opportunità da sfruttare per gestire efficacemente gli apporti energetici naturali. La ricerca e l'innovazione nel campo delle facciate avviene in un periodo storico in cui, a causa dell'aumento della densità urbana, vi è una tendenza degli edifici a crescere in altezza a causa della scarsa disponibilità di suolo nelle città. La maggiore realizzazione di edifici alti, caratterizzati dunque da una superficie di facciata che tende ad aumentare a discapito di quella del tetto o del pavimento, comporta un incremento del valore dell'involucro in se e della sua performance.

L'energia consumata da un edificio durante la fase operativa, come per l'illuminazione, il riscaldamento e il raffreddamento, rappresenta un'elevata percentuale (circa il 60%) rispetto a quella totale utilizzata durante l'intero ciclo di vita. La corretta progettazione dei sistemi di facciata influisce notevolmente sull'efficienza energetica degli edifici e può ridurre i consumi di gestione, garantendo un'ottimizzazione dell'involucro basato sui vincoli variabili: le condizioni climatiche esterne. Dunque i tradizionali approcci alla progettazione, come i sistemi di facciata statici, risultano obsoleti e non adatti a risolvere adeguatamente le variazioni climatiche. Diventa fondamentale utilizzare un sistema adattivo, in grado di rispondere ai cambiamenti esterni modificando le sue proprietà in base alle variabili ambientali.⁹

Il crescente interesse legato alle tematiche ambientali ha permesso di realizzare un involucro edilizio sempre efficiente dal punto di vista

energetico, in grado di reagire in maniera duttile al cambiamento delle condizioni climatiche, sfruttando gli apporti gratuiti al fine di migliorare il comfort abitativo. Attraverso la migliore gestione dei sistemi di facciata è possibile ottenere importanti risultati dal punto di vista prestazionale, minimizzando le dispersioni termiche in inverno e limitando l'aumento della temperatura in estate. E' dunque possibile dividere gli edifici in base a quattro differenti modelli energetici di involucro: conservativo, selettivo, rigenerativo, bioclimatico.¹⁰

1. Involucro conservativo

L'obiettivo di questo modello è aumentare al massimo l'inerzia termica, in modo da mantenere in ambiente le condizioni di comfort ottenute ed evitare le dispersioni termiche verso l'esterno, attraverso l'utilizzo di masse murarie con grandi spessori, volumi compatti e poche aperture di dimensioni limitate. Viene utilizzato soprattutto in climi estremi, caratterizzati da temperature eccessivamente alte e basse.

2. Involucro selettivo

Questo modello si basa su principi analoghi all'involucro conservativo ma cerca di sfruttare gli apporti energetici gratuiti forniti dall'ambiente, facendo uso di grandi superfici trasparenti per l'illuminazione degli ambienti interni e il riscaldamento passivo. L'applicazione dell'involucro selettivo comporta l'anisotropia prestazionale dell'edificio: la facciata esposta a nord avrà una massa muraria importante con piccole aperture, invece la facciata a sud avrà ampie vetrate per ottenere il massimo rendimento dall'irraggiamento solare diretto. E' molto diffuso nei climi tropicali, caratterizzati da elevati valori dell'umidità relativa, soleggiamento e ventilazione.

3. Involucro rigenerativo

L'involucro rigenerativo si affida totalmente a impianti di condizionamento

8: MENCAGLI P., *Le mutazioni dell'involucro architettonico*, 24 agosto 2015, in <https://www.ingenio-web.it/4259-le-mutazioni-dellinvolucro-architettonico>

9: BUI D., GHAZLAN A., NGO N., NGO T., NGUYEN T., *Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach*, Applied Energy, volume 265, 1 maggio 2020, in <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.biblio.polito.it/science/article/pii/S0306261920303093>

10: GUERRA A., *I modelli energetici di Banham: conservativo, selettivo, rigenerativo e bioclimatico*, 12 dicembre 2009, in <https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/criteri-progettuali/modelli-energetici-banham-conservativo-selettivo-rigenerativo-bioclimatico>

artificiale per mantenere all'interno dell'abitazione le condizioni climatiche desiderate, relegando la facciata a semplice barriera per ridurre l'interazione tra l'interno e l'esterno. Gli edifici rigenerativi sono dotati di isotropia in facciata: le caratteristiche prestazionali sono uguali per tutte le esposizioni. Questa caratteristica li rende adattabili a qualsiasi tipo di clima e dunque utilizzabile a tutte le latitudini.

4. Involucro bioclimatico avanzato

Questo modello si basa sull'armonia tra contesto ed edificio al fine di ottenere condizioni climatiche ottimali all'interno dell'ambiente. Per una corretta progettazione architettonica sarà dunque necessario considerare e sfruttare al meglio gli elementi naturali come vento, sole e terreno e progettare i componenti di involucro in funzione dell'orientamento dell'edificio e della gestione degli spazi interni. I flussi di energia vengono gestiti e regolati da meccanismi fissi o ad assetto variabile, come frangisole o bocchette di ventilazione, in base al tipo di utenza e alla complessità dell'involucro. Questo sistema si basa sull'anisotropia dinamica, ovvero la capacità della facciata di creare soluzioni diverse in base all'esposizione dell'edificio, in cui la variazione dell'orientamento in relazione alle condizioni climatiche locali provoca una diversa modulazione dei flussi ambientali.

L'involucro bioclimatico avanzato è la sintesi dei primi tre modelli ed è quello che si dovrebbe utilizzare per la realizzazione di architetture che non influiscano eccessivamente sull'ambiente, ma che possano diventare parte di esso: edifici in grado di evolversi e trasformarsi come elementi naturali.

Con architettura bioclimatica si fa riferimento a quella specifica branca della sostenibilità finalizzata al raggiungimento di un adeguato comfort ambientale all'interno degli edifici, attraverso la minimizzazione dei consumi energetici di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione

diurna e la limitazione del livello di inquinamento dell'ambiente circostante. Diventa dunque necessario sfruttare gli apporti energetici naturali "gratuiti", come la radiazione solare, la temperatura, l'umidità relativa e l'acqua piovana, e cercare di trarre il maggior vantaggio possibile dal microclima locale, in modo da soddisfare le esigenze progettuali e ottenere edifici con prestazioni sempre più elevate.¹¹

Sfruttare al meglio le caratteristiche climatiche dell'area attraverso un involucro bioclimatico permette di raggiungere elevate prestazioni. Nonostante ciò potrebbe non bastare, dal momento che le facciate tradizionali sono statiche e necessitano di un'elevata quantità di energia per garantire il comfort interno. La soluzione è ricorrere a sistemi di involucro dinamici in modo da ridurre la domanda di energia destinata al condizionamento degli spazi interni, migliorando inoltre la qualità dell'aria e i livelli di comfort termico e visivo.¹²

La posizione dei componenti può variare dinamicamente per adattarsi in modo adeguato alle diverse condizioni, considerando gli effetti del trasferimento di calore a breve termine e l'accumulo di energia negli edifici. Le prestazioni di questo tipo di involucri dipendono principalmente dal loro stato di adattamento durante la fase operativa, che deve essere realizzata al meglio per ottenere i risultati desiderati.

Le facciate dinamiche trovano la loro massima espressione quando sono in grado non solo di gestire i flussi di energia tra interno ed esterno, ma di ottimizzare questa operazione. Per raggiungere questo risultato non sono sufficienti i tradizionali software di modellazione usati per la progettazione ma bisogna ricorrere a sistemi più complessi ed efficienti. Attraverso strumenti di programmazione basati su algoritmi generativi è possibile creare un elemento in grado di modificare la propria forma in risposta agli stimoli derivati dall'ambiente in cui viene inserito. Questa tecnica prende il nome di architettura responsiva e ha come obiettivo il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici in base alla sollecitazione ricevuta, garantendo il rispetto dei valori di comfort interno

11: HEGGER M., *Atlante della Sostenibilità*, Utet, Torino, 2008

12: COSTOLA D., HENSEN J.L., LOONEN R., TRCKA M., *Climate adaptive building shells: State of the art and future challenges*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 25, settembre 2013, in <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002670>

attraverso il movimento dei suoi componenti.

Questo tipo di metodologia progettuale utilizza i principi dell'architettura parametrica, che verrà trattata in seguito, e si basa sulla relazione tra gli elementi che costituiscono l'involucro. La forma finale non sarà più il risultato delle dirette azioni del progettista ma sarà generata in funzione dei parametri ambientali scelti in modo da garantire un risultato finale, basato sui requisiti energetici definiti, preciso: il migliore.

01 L'ARCHITETTURA PARAMETRICA



1.1 LA PROGETTAZIONE PARAMETRICA

«I “parametri” e le loro interrelazioni divengono così l’espressione, il codice, del nuovo linguaggio architettonico, la “struttura”, nel senso originario e rigoroso del vocabolo, deficiente le forme che quelle funzioni esaudiscono. Alla determinazione dei “parametri” e loro interrapporti, debbono chiamarsi a coadiuvare le tecniche e le strumentazioni del pensiero scientifico più attuali; particolarmente la logica-matematica, la ricerca operativa e i computer, specie questi per la possibilità che danno di esprimere in serie cicliche autocorrettive le soluzioni probabili dei valori dei parametri e delle loro relazioni»

Luigi Moretti

Negli ultimi anni il termine progettazione parametrica è stato associato all’uso di avanzate tecnologie digitali impiegate all’interno del processo produttivo di manufatti complessi. Però ancora oggi il concetto risulta poco definito, considerando questa pratica legata esclusivamente all’utilizzo di strumenti per la generazione di forme elaborate, piuttosto che alla gerarchia delle relazioni che le lega; infatti la vera innovazione portata da questo tipo di approccio è la gestione del processo che da origine ad una determinata risultato.

Il termine parametrico fa riferimento ad un tipo di progettazione basata sull’utilizzo di parametri: costante arbitraria da cui dipende l’andamento di una funzione. La gestione del processo avviene attraverso un linguaggio di programmazione visuale costituito da algoritmi.

Figura 1 (pagine precedenti): Centro culturale Heydar Aliyev a Baku progettato dallo studio Zaha Hadid Architects

Secondo la definizione¹³ riportata dal dizionario Treccani un’equazione parametrica è determinata da un insieme di variabili indipendenti: i parametri. I risultati che si possono ottenere da essa dipendono dalla modifica delle variabili tramite funzioni esplicite. Un esempio può essere l’equazione cartesiana della curva catenaria¹⁴, utilizzata da Gaudì nelle sue opere per distribuire uniformemente il peso lungo tutti i punti dell’arco e fornire sinuosità e verticalità all’edificio. Nella formula si distinguono due parametri, a e t , che variando danno luogo a diversi valori di x e y attraverso le due funzioni esplicite. Dunque a e t sono messi in relazione tra loro attraverso l’equazione della catenaria e il loro variare influisce direttamente sui valori di x e y , dunque sui risultati finali.

Il connubio tra matematica e architettura può essere accostato anche ad altre personalità rilevanti; ad esempio Le Corbusier utilizza la sezione aurea, ripresa e rivisitata in alcune opere tra cui Ville Savoye, e il Modulor, ovvero il prototipo umano che seguendo delle misure tipo porta alla creazione di una serie di elementi di arredo su misura, quindi su parametri geometrici fissati. Attualmente il concetto di matematica in architettura non è solamente in continua espansione ma sta diventando sempre più indispensabile per la creazione di edifici di forma complessa, irrealizzabili senza l’ausilio di modelli precisi e software in grado di gestirli. Alcuni esempi sono le geometrie frastagliate di Eisenman, le forme curve di Gehry e i volumi fluidi e sinuosi di Hadid.¹⁵

Questa nuova metodologia progettuale basata su parametri si differenzia da quella manuale, o tramite software di modellazione tradizionale, poiché non si interviene direttamente sul modello finale che si vuole ottenere, ma si stabilisce il processo con cui dovrà essere generato. In passato veniva utilizzato il disegno a mano, pratica che permette di rappresentare in modo schematico l’oggetto ma non tiene in considerazione alcuni aspetti fondamentali (strutturali, fisici e dimensionali) che possono influenzare la forma. Con l’utilizzo dei programmi CAD questo problema è rimasto invariato, poiché anche con questo metodo non vi era la possibilità di

13: parametrico agg. [der. di parametro] Relativo a uno o più parametri. In partic.: a. In matematica, sono dette equazioni p. le equazioni che definiscono un luogo (curva, superficie, ecc.), non assegnando legami diretti tra le coordinate dei suoi punti, bensì esprimendo tali coordinate in funzione di una o più variabili indipendenti (parametri), l’eliminazione dei quali porta a una o più relazioni dirette tra le coordinate dei punti del luogo (per es., alla sua equazione cartesiana, se si usano coordinate cartesiane) in <https://www.treccani.it/vocabolario/parametrico/>

14: Equazione curva catenaria
 $x(a,t) = t$
 $y(a,t) = a \cosh\left(\frac{t}{a}\right)$

15: AZZINI G., *Matematica e Architettura: dall’antichità fino ad oggi*, 23 marzo 2015, in <https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/criteri-progettuali/matematica-architettura-281>

Figura 2 (pagina successiva, a sinistra): Schematizzazione del Modulor di Le Corbusier basata sulle proporzioni dell'essere umano

Figura 3 (pagina successiva, a destra): Curve di "equiappetibilità" visiva utilizzate da Luigi Moretti per la creazione della forma di uno stadio

16: TEDESCHI A., *Il processo è più importante del risultato*, in http://www.arturotedeschi.com/wordpress/?page_id=1475

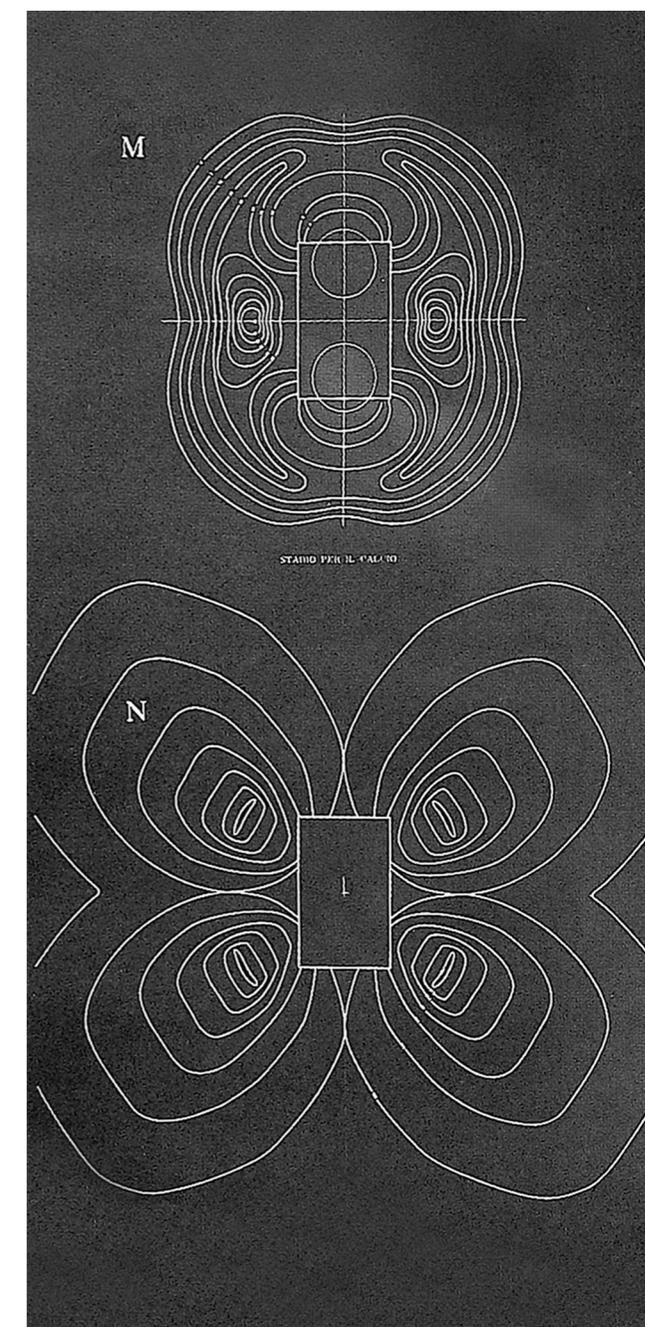
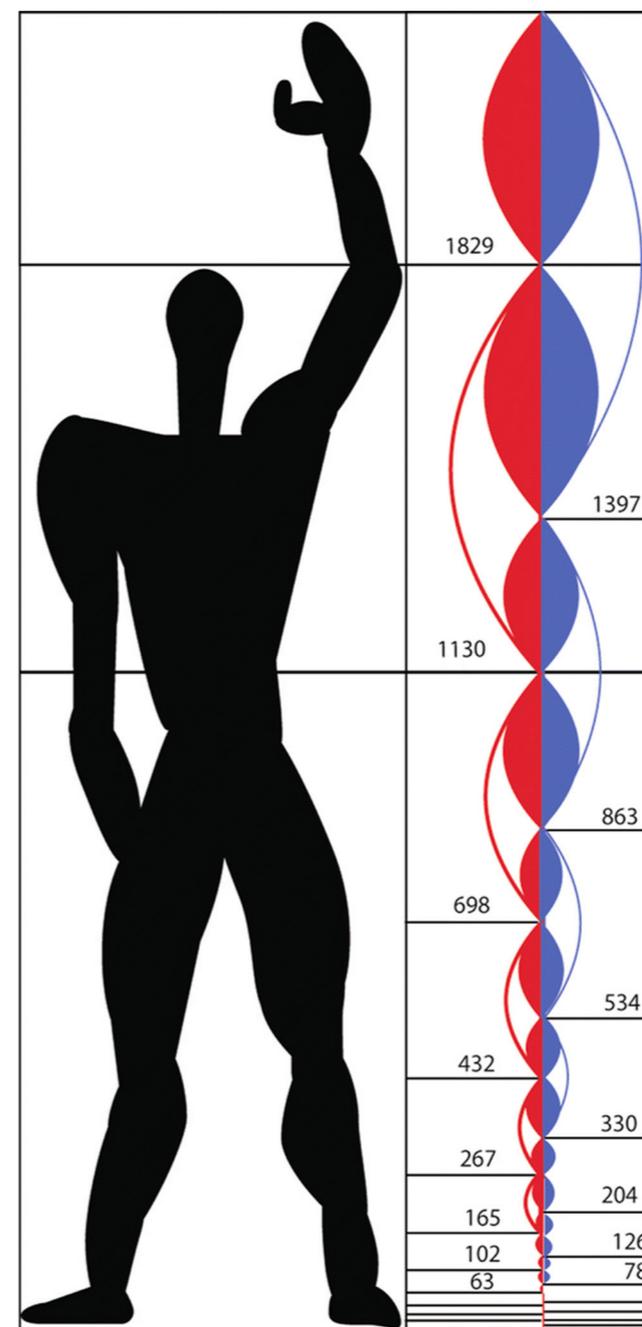
17: TEDESCHI A., *Il processo è più importante del risultato*, in http://www.arturotedeschi.com/wordpress/?page_id=1475

gestire tutti gli aspetti progettuali. A partire dalla metà del XX secolo i designer hanno iniziato ad affiancare ai metodi tradizionali l'utilizzo di calcolatori per la gestione di opere più complesse e questo ha portato alla creazione dei primi esperimenti di architettura parametrica. Il tentativo di unire progettazione architettonica e funzioni parametriche risale al 1960 con la collaborazione tra l'architetto Luigi Moretti e il matematico Bruno De Finetti per il prototipo di uno stadio, concepito grazie all'utilizzo di un computer IBM 610, in cui la forma veniva generata in funzione di alcune regole basate sul comfort visivo dello spettatore.¹⁶

Negli ultimi anni questo metodo progettuale è stato definito Parametricismo, termine coniato dall'attuale direttore dello studio Zaha Hadid Architects Patrik Schumacher. La progettazione parametrica però non si limita alla realizzazione di forme complesse ma è orientata all'adattabilità delle geometrie generate. Dunque si andrà verso architetture in grado di rispondere non più solo a particolari esigenze formali, ma a input sociali e ambientali così da garantire il massimo delle prestazioni raggiungibili in quel frangente.

Il recente sviluppo informatico ha portato numerosi vantaggi nei diversi campi di applicazione in cui è stato utilizzato, sia per la velocità di esecuzione delle operazioni, che per la possibilità di gestire modelli complessi e ricchi di informazioni. In architettura l'evoluzione digitale ha permesso di incrementare l'utilizzo del computer: da strumento utile a svolgere operazioni non più manuali si è evoluto in un sistema in grado di generare e controllare nuove sperimentazioni formali. Per poter realizzare forme complesse in ambito architettonico sono state introdotte tecniche di programmazione (*scripting*) attraverso software parametrici, che hanno offerto ai progettisti nuove possibilità, considerate fino a quel momento utopiche o irrealizzabili.¹⁷

La progettazione parametrica si fonda prevalentemente su due principi: variazione e correlazione. Al variare dei parametri selezionati dal designer all'interno dell'algoritmo la forma generata viene plasmata



di conseguenza; questo è reso possibile dalla connessione dei diversi componenti che costituiscono il codice e generano tra loro un rapporto causa-effetto. Vi sono molte analogie con l'architettura organica ma questo nuovo stile sfrutta i software più recenti per realizzare forme complesse ed elaborate, inimmaginabili con gli strumenti del passato. Viene generato un sistema dinamico non lineare in grado di gestire contemporaneamente le diverse fasi del progetto attraverso i dati che lo compongono. Il processo algoritmico non ha come obiettivo la scoperta di una determinata forma, ma il ricercare nuove metodologie per realizzare manufatti architettonici contemporanei di elevata complessità. Per poter arrivare ad un risultato di questo tipo è necessario essere a conoscenza e saper gestire tutti le fasi, in modo da poter raggiungere il risultato migliore.

Questo si contrappone all'idea di produzione industriale in serie in cui tutti gli oggetti vengono realizzati a partire dalla stessa matrice e hanno dunque lo stesso aspetto. Nel caso del *computational design* invece è possibile creare l'algoritmo che dà origine alla forma e la modifica di un suo parametro porterà alla variazione del risultato finale, in un processo ripetibile all'infinito. Gli oggetti prodotti in questo modo, in contrapposizione a quelli industriali, potranno essere unici e originali anche se derivanti dalla stessa matrice. I modelli generati con i software computazionali possono essere utilizzati direttamente dalle macchine industriali o dalle stampanti 3D, allo stesso modo di come venivano gestiti gli oggetti prodotti in serie. Il campo di applicazione di questa metodologia può superare i confini della progettazione architettonica entrando nel campo dell'urbanistica, della moda, dell'arte e dell'*interior design*.¹⁸

I computer nel corso della storia hanno aiutato i progettisti nell'elaborazione grafica degli oggetti che stavano creando, simulando le forme geometriche in relazione allo spazio in cui sono inserite. Negli ultimi tempi la figura del *computational designer* ha assunto un ruolo fondamentale per la sua

capacità di unire la geometria tradizionale con la creazione di algoritmi, realizzando forme complesse ma gestibili e controllabili in ogni fase. In campo architettonico nasce dunque la possibilità di progettare con curve e superfici irregolari sfruttando questo tipo di metodologia per superare le limitazioni convenzionali. La progettazione non avviene più tramite la creazione e la gestione di forme geometriche ma attraverso il flusso degli algoritmi composti da una serie di dati, in cui ciascuno è indipendente ma allo stesso tempo dipende dall'altro. Le geometrie generate possono essere facilmente regolabili dopo il processo generativo, modificando i parametri all'interno dell'algoritmo e di conseguenza aggiornando il risultato ottenuto. In questo frangente risulta determinante, per la buona riuscita del lavoro, la competenza del designer nella gestione del processo.¹⁹

L'architettura parametrica può svolgere un ruolo determinante all'interno della progettazione sostenibile grazie ad una delle sue caratteristiche principali: l'adattabilità. Utilizzando opportuni plug-in e inserendo come dati di input i parametri locali, come file climatici EPW, è possibile adeguare il progetto alla loro variazione e dunque ottenere diverse soluzioni. Questo processo, oltre a ottimizzare le prestazioni termofisiche dell'edificio in funzione del periodo, come giorno, mese o anno, permette di creare dalla stessa base tanti modelli diversi tra loro

Questa operazione prende il nome di "personalizzazione di massa" e fa riferimento sia alla monotonia della produzione in serie che all'originalità di quella artigianale. La differenza è che i diversi risultati possono essere ottenuti dallo stesso algoritmo, dunque l'analogia con la ripetitiva produzione industriale, ma generano forme potenzialmente tutte diverse tra loro e uniche, esattamente come il lavoro manuale di un artigiano.

In architettura i primi esperimenti riconducibili alla progettazione tramite parametri hanno origini molto più antiche rispetto all'avvento dei computer e agli strumenti di rappresentazione moderni. L'esempio più antico, e per certi versi più significativo, risale al I secolo a. C. quando

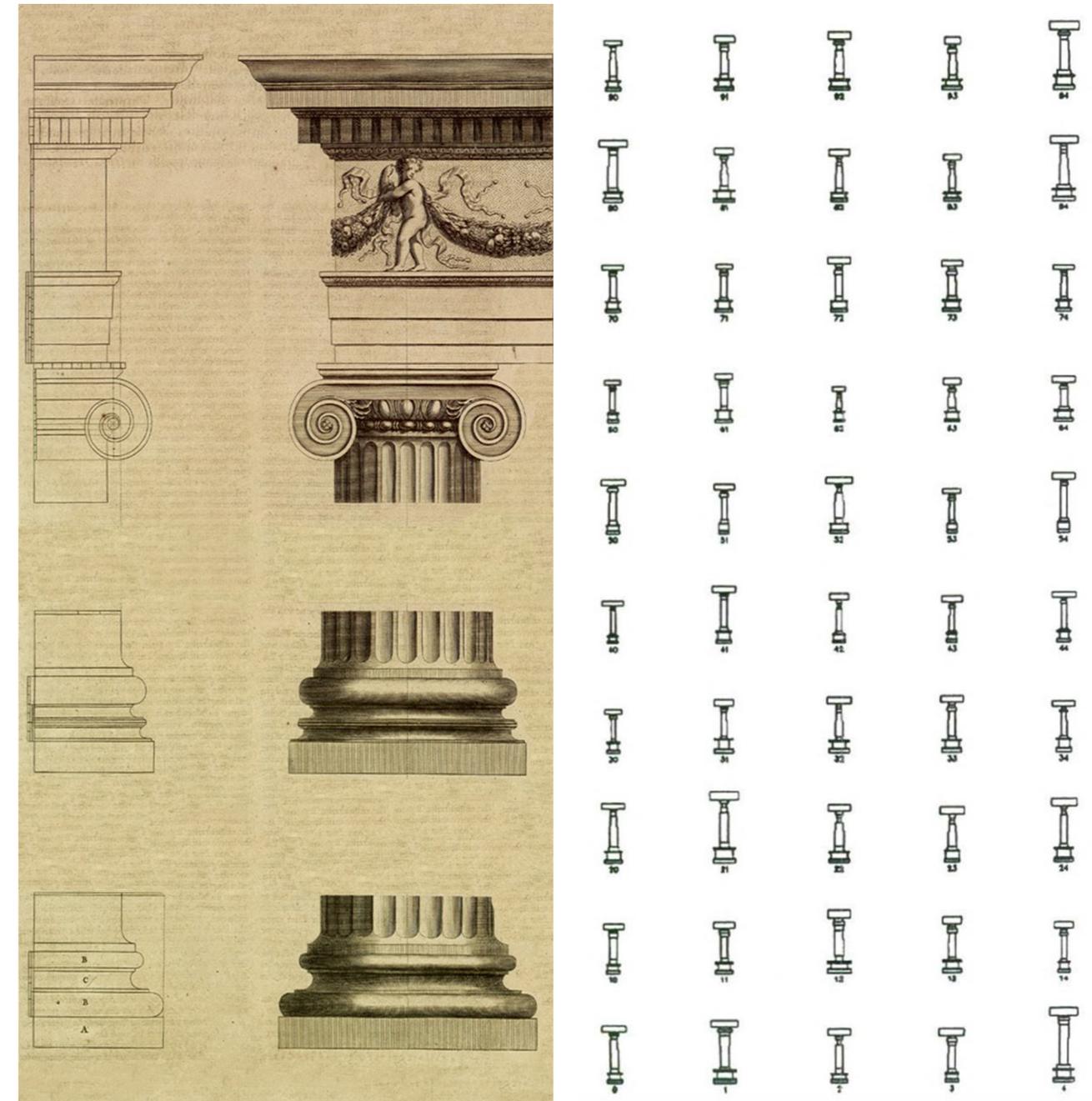
18: *Computational design, algoritmi generativi e modellazione parametrica: come sta cambiando il mondo dell'Architettura*, 2 settembre 2016, in <https://www.dama.academy/computational-design-algoritmi-generativi-e-progettazione-parametrica/>

19: CONVERSO A., *Il progetto digitale per la costruzione. Cronache di un mutamento professionale*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2010

Vitruvio scrisse il "De Architectura": opera in dieci volumi riguardante teorie e tecniche costruttive degli antichi romani. All'interno del trattato, oltre alle linee guida per la progettazione di differenti tipologie di edifici, vengono descritte le regole sulle proporzioni da rispettare per la corretta riproduzione di un manufatto. Ad esempio una colonna, realizzata con una sequenza di istruzioni definite, potrà avere dimensioni diverse ma le stesse relazioni proporzionali tra i vari elementi che la compongono, dal momento che è nata dalla ripetizione di una serie di azioni standardizzate. Le dimensioni di ogni elemento costruttivo (base, fusto, capitello ecc..) possono essere regolate in base all'altezza della colonna, che può variare. Dunque modificando quest'ultimo parametro si avrà un ridimensionamento anche degli elementi costruttivi ad esso collegati, che si adatteranno proporzionalmente in base alla relazione che c'è tra essi. Lo stesso principio è riscontrabile all'interno di un programma di modellazione algoritmica, in cui l'oggetto finale è dato dall'esecuzione di una serie di operazioni in un ordine stabilito e il risultato dipende dalle connessioni tra le parti: i parametri. Dato che non vi era la possibilità di codificare e controllare il processo produttivo come oggi le regole vitruviane generano una selezione di prodotti diversi, ma tutti simili, poiché condividono le stesse istruzioni e la stessa metodologia: lo script. Con l'avvento dell'industria e della produzione in serie questa metodologia ha lasciato posto a oggetti identici ai quali il Parametricismo ha cercato di opporsi, a partire dalla fine del XX secolo, portando avanti la propria rivoluzione; ovvero la possibilità di produrre manufatti variabili, come i trattati antichi, ma attraverso strumenti contemporanei, come nell'industria. Questo metodo può generare "variazioni in serie", il compromesso tra teorie arcaiche e strumenti contemporanei.

Figura 4 (pagina successiva, a sinistra): Proporzioni da rispettare per la corretta realizzazione di una colonna ionica riportate all'interno del "De Architectura" di Vitruvio

Figura 5 (pagina successiva, a destra): Evoluzione di una colonna toscana utilizzando le regole parametriche



SOFTWARE

La recente innovazione introdotta da software come Paracloud, Generative Components, Dynamo e Grasshopper consiste nell'aver convertito la consueta modalità di programmazione tramite sintassi scritta in un'interfaccia visuale con la possibilità di gestione grafica dei componenti, introducendo una nuova forma di interazione con l'applicativo. Questo sistema prende il nome di Linguaggio di Programmazione Visuale, detto V. P. L. (*Visual Programming Language*), e dà la possibilità al designer di lavorare con "espressioni visuali" e, se necessario, inserire parti di codice scritto testualmente. I vantaggi di questo sistema, rispetto a quello tradizionale, sono la facilità di apprendimento, poiché non sono richieste particolari conoscenze nel campo dell'informatica, e l'esplicitazione visuale dell'intero processo, così da poter individuare e correggere eventuali errori. La maggior parte dei software V. P. L. è basata sul metodo "boxes and arrows": i boxes, componenti contenenti dei dati, vengono posti in relazione tra loro tramite dei connettori simili a frecce, le arrows.²⁰

Ad esempio con il software Grasshopper, *plug-in* di Rhinoceros (McNeel e Associates), è possibile configurare e gestire attraverso un diagramma il sistema dei legami parametrici che costituisce il modello tridimensionale. La forma finale, dunque, non viene ottenuta mediante un procedimento basato sulla logica additiva, come con i programmi CAD, o la manipolazione virtuale, tipica dei software di modellazione tridimensionale, ma è generata tramite una sequenza di istruzioni: l'algoritmo. Questo procedimento, indipendentemente dall'uso del computer, consente di raggiungere il risultato desiderato a partire dai dati scelti come input e da una sequenza ordinata di istruzioni che costituiscono il processo.²¹

Con i software V. P. L. non è possibile modificare un oggetto attraverso la modellazione standard ma è necessario trasformare i parametri che

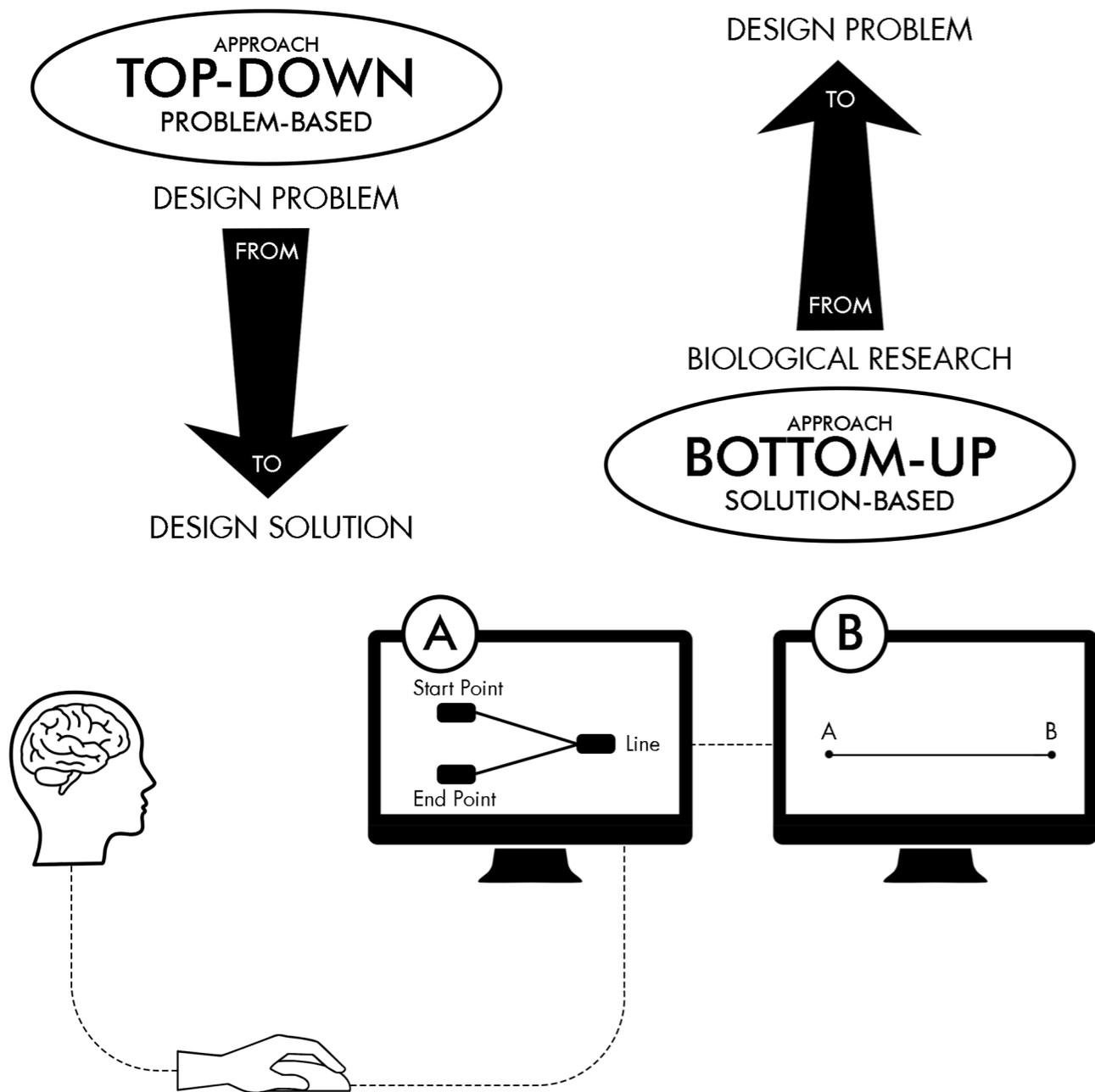
costituiscono l'algoritmo al fine di ottenere la nuova forma desiderata. Diventa fondamentale dunque saper gestire correttamente le informazioni che fanno parte dello script, chiamati dati, che possono essere di diverso tipo: testuali, numerici, alfanumerici, matematici, climatici, visivi e prestazionali. La loro connessione che dà vita al codice crea una struttura gerarchica di informazioni la cui corretta gestione risulta più difficoltosa tanto più è complesso l'algoritmo. I software utilizzati per gestire i processi parametrici danno la possibilità agli utilizzatori di organizzare i dati in sistemi associativi basati sulle relazioni tra le parti che costituiscono un sistema, agendo sui parametri posti all'origine del processo le modifiche verranno propagate anche sulle altre parti connesse.

Con la progettazione parametrica si utilizza un approccio diverso rispetto ai metodi tradizionali anche per quanto riguarda le diverse fasi del processo; infatti non si va dal generale al particolare (*Top-Down*) in cui viene definito il sistema globale per poi concentrarsi sui suoi dettagli, ma si segue la logica *Bottom-Up*, in cui inizialmente vengono progettati i singoli elementi che verranno assemblati successivamente al fine di realizzare un sistema completo ed efficiente. La forma elaborata, essendo stata generata da un processo parametrico, rappresenta l'espressione della massima efficienza possibile, dunque corrisponde alla funzione.²² Nell'immagine 6 viene rappresentato graficamente il processo che porta alla creazione di algoritmi visuali, in questo caso di una linea. L'idea, che parte dal cervello e viene eseguita dalla mano, viene trasposta come riportato sullo schermo A in figura: due componenti che rappresentano i punti di inizio e di fine della linea sono uniti tramite due connettori al componente "line", che favorisce la congiunzione dei punti e la generazione del segmento. Lo schermo B assolve la funzione di visualizzatore dell'algoritmo rappresentato sullo schermo A e, modificando lo script, cambierà immediatamente il modello 3D. Le modifiche alla geometria generata, in questo caso una linea, possono essere applicate solo attraverso il codice presente sullo schermo A e non

20: TEDESCHI A., *Il processo è più importante del risultato*, in http://www.arturotedeschi.com/wordpress/?page_id=1475

21: TEDESCHI A., *AAD Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*, Le Penseur, Brienza, 2014

22: TEDESCHI A., *Il processo è più importante del risultato*, in http://www.arturotedeschi.com/wordpress/?page_id=1475



direttamente sull'oggetto come nei tradizionali software di modellazione tridimensionale.²³

Ai componenti "start point" ed "end point" dello schermo A sono associati dei parametri, le coordinate dei punti nello spazio, che vengono stabiliti all'interno dell'algoritmo. Cambiando le coordinate x, y, z di uno dei punti questo modificherà la sua posizione nel piano ma non la connessione con l'altro punto, dal momento che la correlazione con il componente linea resta invariata. A seguito di questa operazione cambieranno anche le proprietà (posizione, orientamento, lunghezza) della linea, in funzione delle nuove coordinate associate al punto. Questo algoritmo, seppur molto semplice, segue le regole della modellazione parametrica, poiché al variare di un parametro, le coordinate di un punto, la geometria generata, in questo caso la linea, si adatta al cambiamento modificando l'output tridimensionale.

Per creare un processo algoritmico efficace è necessario scomporlo in un determinato numero di passaggi semplificati così da poterlo gestire in tutte le sue fasi. Questo approccio, sintesi di riflessioni cognitive, può essere codificato e sviluppato su un computer attraverso l'utilizzo di algoritmi. La soluzione di un problema, che può essere il procedimento che porta alla risoluzione di un progetto, diventa un percorso tramite il quale diventa possibile ottenere un risultato partendo da dati iniziali. Questi vengono definiti *input* (dati in ingresso) e i risultati prendono il nome di *output* (dati in uscita). L'algoritmo è dunque quel procedimento che, partendo dai dati di *input*, permette di raggiungere il risultato desiderato attraverso una successione di istruzioni definite dal progettista e rielaborate dal computer. Dunque, una volta individuato il problema di partenza e definiti i dati in ingresso, è possibile raggiungere il vero scopo dell'algoritmo, rappresentato non tanto dall'*output* quanto piuttosto nell'esplicitazione del procedimento costituito. Questo permette, variando i parametri che lo compongono, di avere diversi dati in uscita e dunque generare forme diverse ma accomunate da un procedimento comune.²⁴

Figura 6 (pagina precedente, in alto): Schematizzazione dell'approccio Top_Down e Bottom-Up

Figura 7 (pagina precedente, in basso): Processo che porta alla generazione di una linea attraverso un algoritmo

23: TEDESCHI A., *AAD Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*, Le Penseur, Brienza, 2014

24: TEDESCHI A., *Architettura parametrica: introduzione a Grasshopper*, Le Penseur, Brienza, 2010

Viene considerato un algoritmo generativo quel tipo di *script* che genera una geometria che può essere più o meno complessa. La realizzazione di modelli tridimensionali attraverso questa pratica viene chiamata "modellazione generativa" o "modellazione algoritmica". Invece il termine "modellazione parametrica" deriva dal ruolo centrale che ricoprono i dati di input all'interno del processo generativo, che hanno la funzione di parametri dai quali dipende la configurazione geometrica del modello creato attraverso algoritmi. Un modello 3D parametrico, al contrario di quelli tradizionali creato attraverso primitive geometriche, è un sistema dinamico costituito da relazioni tra i diversi oggetti che lo compongono.²⁵

Le forme verranno dunque generate dall'algoritmo e si relazioneranno tra loro tramite dei parametri scelti dal progettista che, se opportunamente modificati, genereranno una propagazione di modifiche, visualizzabili in tempo reale. Le variazioni possono essere diffuse lungo tutto il codice proprio a causa della connessione tra i componenti e della specificità stessa dell'algoritmo: la "parametricità", ovvero la proprietà di dipendere da parametri stabiliti. La modifica di un input dà la possibilità al progettista di generare forme diverse in poco tempo e con poche operazioni e di vederne immediatamente le conseguenze sul modello. I cambiamenti possono avvenire anche alle diverse scale del progetto e, se l'algoritmo è stato realizzato in modo corretto dal designer, la variazione di un componente ad una scala ampia porterà alla modifica parametrica di un dettaglio a scala minore e viceversa.

Ad esempio, è possibile dividere una superficie esistente in celle esagonali rapidamente grazie ad alcuni componenti presenti nel software di modellazione algoritmica. Nel caso fosse necessario apportare delle variazioni alle dimensioni dell'oggetto di base (macro), le stesse sarebbero riportate anche localmente sui pannelli esagonali coinvolti (micro) nella modifica. Quindi si avrà una diversa superficie con lo stesso tipo di "panelizzazione" esagonale ma con esagoni di differenti

dimensioni rispetto ai precedenti, oppure in numero minore, in base alla tipologia di operazione compiuta in precedenza. Quando si realizza la "panelizzazione" di una facciata si cerca di standardizzare gli elementi che la compongono, dividendola in elementi uguali geometricamente. Se non è possibile si parla di "customizzazione": ognuno deve essere realizzato ad hoc per quella porzione di superficie ed è diverso dagli altri. C'è una differenza economica sostanziale tra realizzare una facciata con elementi standardizzati o "customizzati", anche nel ciclo produttivo e nelle emissioni inquinanti. In una facciata con elementi "customizzati", se l'andamento lo permette, si può provare a raggruppare i pannelli aventi la stessa geometria e dunque produrli in serie, riducendo i costi e le lavorazioni.

25: TEDESCHI A., *Architettura parametrica: introduzione a Grasshopper*, Le Penseur, Brienza, 2010

Form-Making vs Form-Finding

Nel XIX secolo comincia la ricerca sul tema della combinazione tra materiali e superfici minime, che si traduce in un risparmio di materia prima e conseguente riduzione dei costi di produzione. Le sperimentazioni su questo tipo di teorie è tutt'ora in continuo sviluppo, in particolare per quanto riguarda l'ottimizzazione della forma strutturale. Da questa operazione deriva una redistribuzione del materiale resistente, con conseguente eliminazione degli eccessi, e il risultato è la realizzazione di architetture più leggere ed efficienti. La ricerca in questo senso si sta orientando verso soluzioni sempre più innovative dando la possibilità ai progettisti di realizzare le proprie idee, anche le più astratte, grazie a nuovi materiali da costruzione e al contributo di sistemi informatici basati sulla matematica.²⁶

Avere la possibilità ricavare la miglior forma per una determinata configurazione dell'edificio permette di ottenere da esso il massimo delle prestazioni. Questo è un principio fondamentale per l'architettura sostenibile, poiché comporta un risparmio energetico e una riduzione delle emissioni. L'applicazione della progettazione algoritmica consente al progettista di ottimizzare ogni singola fase del processo e di valutarne, grazie ad un feedback istantaneo del programma, i risultati prodotti dai cambiamenti in corso d'opera.

Il principio dell'ottimizzazione, raggiungibile tramite i software di modellazione algoritmica, permette di individuare la migliore soluzione realizzabile dato un obiettivo da raggiungere e stabiliti i vincoli progettuali. Il risultato integra la composizione architettonica con il progetto delle strutture e può portare a numerosi benefici, tra cui: forme organiche che sfruttano le forze agenti su esse e riduzione della quantità di materiale impiegato e dei costi di costruzione. Vi sono diverse tipologie di ottimizzazione ma tutte si basano sulla stessa metodologia: costruzione

di una geometria di base, definizione dei valori che devono assumere i parametri coinvolti nel processo ed esplicitazione delle funzioni di ottimizzazione. I parametri coinvolti nel processo devono essere definiti a priori dall'utente; a questi viene assegnato un range in cui il software può operare per raggiungere l'obiettivo.²⁷

La metodologia di ottimizzazione più diffusa è quella topologica: raggiungere, tramite un algoritmo, la conformazione ottimale di un componente nel rispetto dei vincoli prefissati. Nonostante i numerosi vantaggi legati all'utilizzo di questo approccio possono esserci delle difficoltà nell'applicazione nei progetti reali. Ad esempio con questo sistema si può raggiungere una geometria non realizzabile o il cui costo di produzione, data la forma risultante talvolta insolita, può essere maggiore della stessa geometria non ottimizzata, nonostante un risparmio di materiale. Tuttavia, in seguito a innovazioni nell'ingegneria strutturale legate allo sviluppo di nuovi metodi di progettazione computazionale unite a tecniche di ottimizzazione, si sta ampliando la gamma di possibilità di realizzare geometrie particolarmente complesse. La scoperta di queste opportunità, unita alle leggi che regolamentano l'utilizzo dei materiali e l'impronta di carbonio in edilizia, permette ai progettisti di soddisfare contemporaneamente requisiti estetici, prestazionali e ambientali, combinando molti degli aspetti dell'architettura parametrica con quelli dell'architettura sostenibile.

L'ottimizzazione in architettura si basa sulla ricerca della forma migliore per svolgere al meglio la funzione richiesta senza dover utilizzare più materiale del necessario. I principali riferimenti sono gli organismi presenti in natura, che interpretano questo concetto alla perfezione dall'inizio della loro esistenza. Sono numerose le strutture organiche che, considerate particolarmente efficienti, possono essere utilizzate nel campo dell'architettura. Gli esseri viventi possono essere considerati delle "macchine perfette" per la loro efficienza e composizione; infatti la natura, per evitare di portare un peso inutile, ottimizza il materiale

26: *Computational design, algoritmi generativi e modellazione parametrica: come sta cambiando il mondo dell'Architettura*, 2 settembre 2016, in <https://www.dama.academy/computational-design-algoritmi-generativi-e-progettazione-parametrica/>

27: TEDESCHI A., *AAD Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*, Leenseur, Brienza, 2014

necessario per la crescita di un organismo, distribuendolo solo dove è necessario. Si può dunque affermare che le strutture degli organismi viventi siano efficienti per natura, poiché nella loro fase di crescita materiale e forma si sviluppano contemporaneamente in base alle sollecitazioni esterne, concentrando la massa nei punti più opportuni. Questo perché la natura tende ad usare il giusto quantitativo di materiale (il minimo necessario a svolgere le funzioni richieste) sfruttando al meglio le caratteristiche meccaniche che possiede: il risultato sarà una forma ottimizzata, conseguita con la minor quantità di energia possibile.²⁸

L'ispirazione del mondo naturale messo in relazione con le tecniche di progettazione computazionali può portare alla realizzazione di edifici ottimizzati, controllati ma anche adattabili; infatti un'altra caratteristica presente nel mondo vegetale che si sta diffondendo anche in architettura è la realizzazione di supporti mobili che possano adattarsi a stimoli esterni per garantire le migliori prestazioni di comfort. Ad esempio gli alberi tendono a flettersi nella direzione in cui arriva il maggior quantitativo di radiazione luminosa per poter raccogliere la maggior quantità di nutrienti indispensabili per la loro crescita. In zone particolarmente ventose i rami e le cime di alcune specie arboree si oppongono alla corrente curvandosi in base alla sua provenienza.

Dunque ottimizzazione, massima efficienza ed economia, e adattamento, capacità di rispondere alle sollecitazioni esterne, sono i principi naturali riproducibili all'interno della progettazione architettonica per mezzo dei software computazionali. La forma raggiunta può essere definita come un momento di equilibrio di un processo di trasformazione costante finalizzato al raggiungimento della miglior soluzione ottenibile, attraverso modelli matematici che imitano l'ottimizzazione presente in natura. Applicando questa metodologia progettuale attraverso all'utilizzo degli strumenti informatici è possibile rinnovare l'aspetto dell'architettura contemporanea ed evitare l'applicazione di inefficaci formalismi.

L'obiettivo però non deve essere la riproposizione o l'adattamento in

architettura delle forme naturali ma, tramite i processi generativi digitali, la creazione di geometrie ottimizzate sotto l'aspetto funzionale, ambientale e strutturale per edifici capaci di adattarsi in maniera sostenibile al contesto.

Secondo questo principio in architettura si stanno diffondendo gli involucri "responsivi", dotati di tecnologie particolarmente avanzate che hanno la capacità di adattarsi agli stimoli esterni modificando la loro configurazione. Questo tipo di sistemi costruttivi possono essere regolati, ad esempio, dalla quantità di radiazione solare entrante in ambiente in modo da riuscire a gestire meccanicamente gli apporti energetici gratuiti. L'adattabilità e la maggiore controllabilità del manufatto architettonico consentono all'utente di gestire al meglio le condizioni climatiche interne, con un conseguente risparmio di energia altrimenti consumato per riscaldare o raffrescare.²⁹

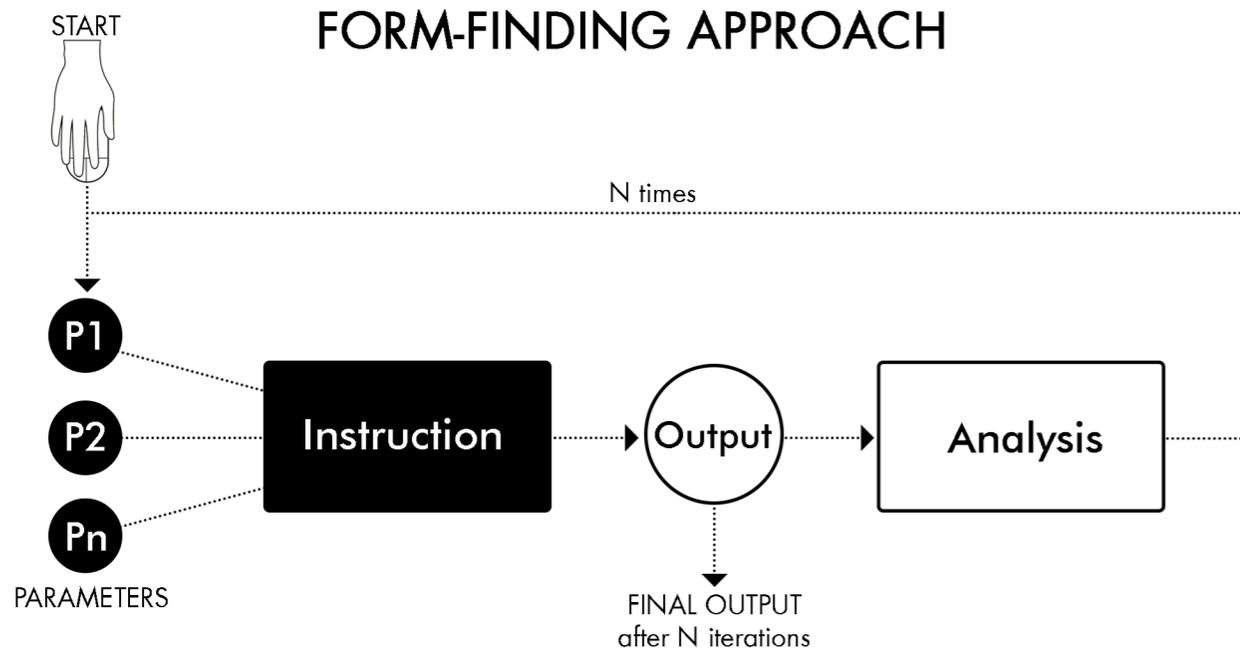
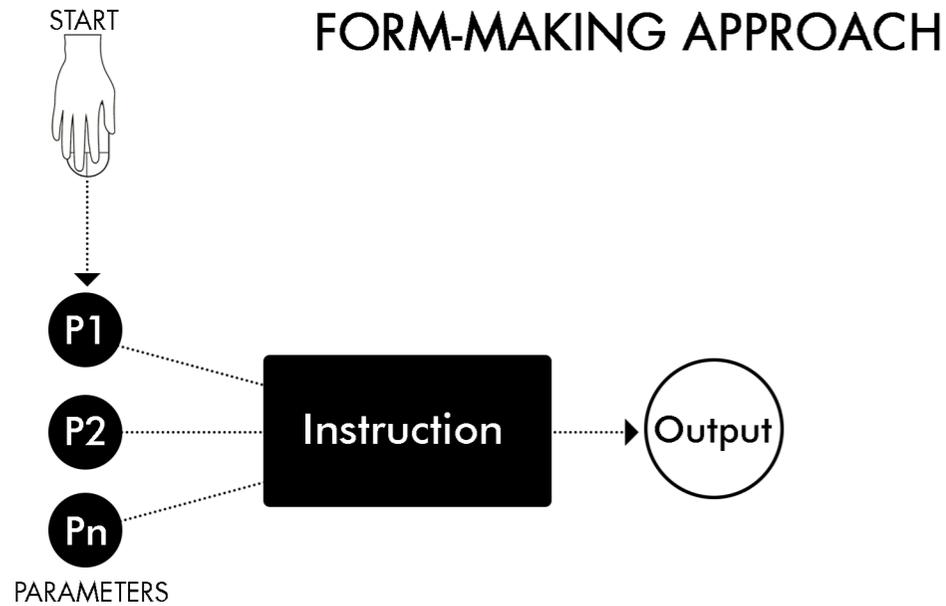
L'utilizzo di software parametrici diventa necessario per cercare di riprodurre la complessità della natura basandosi su legami matematici e fisici. Questa strategia progettuale consente al progettista di imitare il processo di crescita biologico, grazie alla relazione tra le parti dell'algoritmo che prende il nome di "generativo". Viene applicato in architettura quando si ricerca l'ottimizzazione della forma (*form-finding*), derivata da un processo "computerizzato" di crescita organica basato sulla sostenibilità del mondo naturale. Il risultato sarà una struttura generata attraverso un software in grado di riprodurre, attraverso funzioni matematiche e algoritmi, i principi e l'efficienza della natura.

Questa metodologia progettuale si oppone a quella classica che, attraverso l'utilizzo di programmi di disegno e modellazione tridimensionale, realizza la forma in base alle capacità e all'esperienza (*form-making*), al contrario dell'approccio *form-finding*: a partire da una geometria di base viene generato il miglior modello per quella soluzione, ottimizzando tutti i parametri.

28: WOODBURY R., *Elements of Parametric Design*, Routledge, Londra, 2010

29: SAGGIO A., *Introduzione alla rivoluzione informatica in architettura*, Carocci, Roma, 2007

1.2 PROGETTARE ATTRAVERSO PARAMETRI



La progettazione parametrica assume particolare importanza dal 2008, quando Patrick Schumacher presenta il suo Manifesto alla Biennale di Venezia, definendo questo tipo di approccio come il nuovo grande stile dopo il Modernismo.

L'architetto tedesco, collaboratore di Zaha Hadid dalla fine degli anni Ottanta e direttore dello studio dal 2016, ha avuto modo di applicare le sue teorie all'interno di progetti reali; infatti lo studio ZHA è considerato uno dei più prolifici e avanguardistici nell'approccio parametrico in architettura, rinunciando spesso alla composizione trilitica e alla standardizzazione degli elementi strutturali come solai, pilastri e muri. Alcuni esempi di edifici realizzati da Zaha Hadid, con la collaborazione di Patrick Schumacher, che assumono conformazioni organiche e seguono i principi sopra citati sono la Vitra Fire Station di Weil am Rhein, il Museo MAXXI di Roma e il BMW Central Building di Lipsia.³⁰

L'applicazione delle tecniche parametriche nella progettazione architettonica, urbana e nel design non è esclusiva di ZHA, ma altri studi contemporanei ne hanno fatto uso. Ad esempio Oscar Niemeyer utilizza forme sinuose nei suoi progetti, Santiago Calatrava si ispira alle sagome naturali per le sue opere di ingegneria, Frank Gehry realizza architetture di ispirazione zoomorfa realizzate attraverso il *computational design*, Shigeru Ban utilizza materiali naturali per realizzare profili curvi. Tuttavia il concetto di approccio parametrico è entrato a far parte del mondo dell'architettura alcuni decenni prima delle teorie di Schumacher, non a seguito della diffusione dei sistemi informatici ma in base alla volontà di cambiamento di un metodo consolidato ritenuto obsoleto. A

Figura 8 (pagina precedente, in alto): Schematizzazione dell'approccio Form-Making

Figura 9 (pagina precedente, in basso): Schematizzazione dell'approccio Form-Finding

30: <https://www.zaha-hadid.com/>

partire dagli anni Quaranta è possibile individuare numerosi progettisti che hanno contribuito alla ricerca di forme insolite finalizzata al raggiungimento dell'ottimizzazione strutturale sulla base degli elementi presenti nel mondo naturale, come conchiglie, steli di fiori e fusti di alberi. I pionieri dell'approccio parametrico, denominato "analogico" per l'assenza di software di supporto alla progettazione, sono Antoni Gaudì per il suo utilizzo dell'arco catenario, Richard Buckminster Fuller per la realizzazione delle cupole geodetiche, Frei Otto per gli esperimenti sulle membrane, Luigi Moretti per l'utilizzo di funzioni matematiche nella progettazione e Sergio Musmeci per aver studiato conformazioni innovative di manufatti ordinari.³¹

Figura 10 (pagina precedente, in alto): Vista esterna del MAXXI di Roma realizzato dallo studio Zaha Hadid Architects

Figura 11 (pagina precedente, in basso): Vista esterna della Walt Disney Concert Hall a Los Angeles realizzata da Frank Gehry

31: *Architettura parametrica, la diffusione dei software di progettazione digitale è la condizione necessaria, ma non sufficiente, per l'affermazione di una corrente architettonica che vuole materializzare la complessità del mondo contemporaneo, in <https://www.domusweb.it/it/movimenti/architettura-parametrica.html>*



I pionieri dell'approccio parametrico

ANTONI GAUDI'

Uno dei primi architetti ad utilizzare un approccio parametrico per la progettazione di edifici è stato Antoni Gaudì, celebre per aver realizzato architetture molto complesse e dettagliate che univano alla perfezione strutture complesse e forme appariscenti, spesso di derivazione naturale. La continua sperimentazione gli ha permesso di arrivare a risultati unici e sorprendenti rispetto alle costruzioni dell'epoca, integrando l'ottimizzazione della forma all'innovazione dei sistemi portanti.

Secondo Gaudì il corretto approccio progettuale doveva prevedere una riproposizione delle forme sinuose presenti in natura e non un'emulazione della geometria euclidea, come la maggior parte degli architetti di quel periodo, basata su forme semplici come triangoli, cerchi e linee rette. Queste teorie erano in netta contrapposizione con le regole del Movimento Moderno, di cui peraltro l'architetto catalano faceva parte, e si basavano su leggi geometriche e matematiche ben precise. La grande innovazione di Gaudì consiste nella realizzazione di edifici con forme sinuose costituite da archi parabolici invece dell'arco romano tradizionale. Gli studi sulla geometria, legati all'applicazione della Legge di Hooke sulla resistenza dei materiali, gli hanno permesso di raggiungere la forma ottimale per le strutture progettate.³²

I risultati ottenuti sono anche il frutto di esperimenti pratici su modelli ad archi sospesi, grazie ai quali riusciva a gestire la forma generata e verificarne il funzionamento strutturale. Questi esperimenti venivano condotti per mezzo di funi, che riprendevano le geometrie della struttura, alle quali venivano appesi dei sacchi di sabbia per simulare il peso proprio e quello portato. A seconda della distribuzione dei sacchetti la corda assumeva diverse configurazioni in base a come il peso agiva

su di essa. L'innovazione di Gaudì consisteva nel riuscire ad ottenere automaticamente la curvatura necessaria da impartire alla struttura in modo che fosse costantemente compressa in tutti i punti, grazie ai pesi applicati e alla forza di gravità, che generavano la conformazione ideale.

Gaudì dunque può essere considerato un precursore dell'approccio *form-finding* e dell'architettura basata su equazioni e parametri. Gli studi sull'ottimizzazione della forma gli hanno permesso di realizzare strutture insolite e spesso differenti da quelle contemporanee, ma generate attraverso un metodo basato sulle loro capacità portanti, garantendo eccellenti prestazioni e un minor impiego di materiale. Gli esiti delle ricerche condotte dall'architetto catalano hanno portato all'utilizzo della catenaria per la realizzazione di elementi strutturali, in modo da ottenere una ripartizione omogenea del peso e, lavorando solamente a compressione, eliminando tutti gli sforzi a trazione.³³

Con il termine curva catenaria si fa riferimento alla forma generata per effetto della forza di gravità da una catena (o una fune) sospesa alle due estremità. Teorizzata da Galileo come conforme ad una parabola e definita da Hooke come la forma ideale per la creazione di un arco e i relativi contrafforti, è stata utilizzata in molti dei suoi progetti, come Casa Milà, Parc Güell e nella Sagrada Família, considerata la sua opera più rappresentativa. Il progetto della basilica risale al 1877 e ad oggi non è stato ancora completato, ma prosegue secondo l'idea originale di Gaudì: l'utilizzo della curva catenaria come soluzione strutturale invece dell'imponente architettura gotica, considerata massiccia e priva di armonia.

32: BURRY M., *Antoni Gaudí and Frei Otto: Essential Precursors to the Parametricism Manifesto*, 11 marzo 2016, in https://www.researchgate.net/publication/301224573_Antoni_Gaud_and_Frei_Otto_Essential_Precursors_to_the_Parametricism_Manifesto

33: BURRY M., *Antoni Gaudí and Frei Otto: Essential Precursors to the Parametricism Manifesto*, 11 marzo 2016, in https://www.researchgate.net/publication/301224573_Antoni_Gaud_and_Frei_Otto_Essential_Precursors_to_the_Parametricism_Manifesto



RICHARD BUCKMINSTER FULLER

L'architetto statunitense Richard Buckminster Fuller è celebre per aver brevettato nel 1954 l'idea di cupola geodetica, sfera o semi-sfera costituita da triangoli, ed averla applicata in campo architettonico. I suoi studi basati sulla ricerca di nuove soluzioni costruttive volte a riprodurre le forme presenti nel mondo naturale lo hanno portato a realizzare strutture molto leggere e flessibili.

Fuller considera il triangolo la forma più efficiente della geometria, grazie alla sua indeformabilità: applicando una forza su un lato la sua forma non varia grazie alla rigidità data dalla posizione degli elementi che la compongono. Invece una figura geometrica con più di tre lati (quadrilatero, pentagono, esagono ecc..) sottoposta ad una spinta laterale cambierà sempre la sua conformazione in funzione della sollecitazione applicata. Questa proprietà dei triangoli, sfruttata per la realizzazione di ponti, tralicci, capannoni, capriate e gru, viene utilizzata da Fuller per lo studio e la costruzione della cupola geodetica.³⁴

Questa forma è costituita da un sistema di travi basato appunto sulle geodetiche, linee di minor estensione che uniscono due punti situati sullo stesso piano, che si intersecano formando dei triangoli che compongono una superficie approssimativamente sferica. La forma triangolare garantisce alla struttura un'elevata resistenza locale e le geodetiche generate da essi convogliano le tensioni in tutta la costruzione. La cupola geodetica diventa sempre più rigida all'aumentare delle dimensioni, così da poter essere impiegata come sistema strutturale per edifici di grandi dimensioni.

Fuller ha progettato il primo edificio a cupola con questo sistema costruttivo, molto leggero e autoportante, in grado di coprire luci molto ampie. La maggior produzione di geodetiche è stata fatta per ospitare depositi e basi militari, su ordine del Governo statunitense che ne aveva capito la grande portata. Nonostante alcune applicazioni non è stato

Figura 12 (pagina precedente, in alto): Modellino realizzato con corde e pesi da Gaudí per la distribuzione dei carichi e la ricerca della forma ottimale

Figura 13 (pagina precedente, in basso): Vista interna di Casa Milà in cui Gaudí fa uso dell'arco catenario

34: <https://www.bfi.org/>

possibile adottare questo tipo di soluzione per un edificio residenziale, soprattutto per via della forma non convenzionale che rendeva complicato l'inserimento degli elementi architettonici comuni: porte, finestre, impianti, tetti, camini. L'esempio più rilevante di cupola geodetica realizzata da Fuller è il Padiglione degli Stati Uniti per l'Expo del 1967 a Montreal, in cui mette in pratica il principio strutturale su cui si era cimentato realizzando un reticolo autoportante di tubolari in acciaio.³⁵ L'intelaiatura metallica raggiunge un diametro massimo di settantasei metri e consente di circoscrivere completamente l'edificio espositivo di sette piani contenuto al suo interno. A seguito di un periodo di abbandono viene ristrutturata dal governo canadese e convertita in spazio museale con il nome di Biosfera. Grazie ai suoi studi sulla ricerca di nuove forme al fine di raggiungere l'ottimizzazione strutturale, con materiali e tecniche versatili e accessibili, ha ispirato architetti e designer a rivedere le teorie date per scontate e a sperimentare nuove costruzioni innovative, generando un processo di trasformazione tutt'ora in corso.³⁶

Figura 14 (pagina successiva): La Biosfera di Richard Buckminster Fuller a Montreal, in precedenza padiglione americano all'Expo 67

35: <https://www.bfi.org/>

36: LANGDON D., *Classici AD: Montreal Biosphere / Buckminster Fuller*, 25 novembre 2014, in <https://www.archdaily.com/572135/ad-classics-montreal-biosphere-buckminster-fuller>



FREI OTTO

Frei Otto, dopo la laurea in architettura a Berlino nel 1948, ha conseguito il dottorato in ingegneria sul tema delle tensostrutture, strutture leggere caratterizzate da membrane tese, sul quale fonderà la sua carriera di ricercatore e professionista. Vincitore del premio Pritzker nel 2015, ha contribuito notevolmente agli studi sull'ottimizzazione della forma negli anni Sessanta con il supporto di modelli costituiti da pellicole di sapone, in modo da trovare la superficie minima necessaria allo scopo stabilito. In seguito Otto ha soprannominato questo metodo di sperimentazione *form-finding*, ovvero ricerca della forma, evidenziando la natura esplorativa di questo nuovo approccio in cui la forma diventa l'incognita da trovare e non più il punto di partenza. Può essere considerato un pioniere del parametricismo per via del suo approccio innovativo nella concezione delle strutture e per la riproposizione di elementi naturali all'interno delle sue opere.

L'ottimizzazione della forma e la ricerca di nuove tecnologie applicabili è stata possibile grazie alle sperimentazioni in laboratorio, in cui Otto realizzava modellini con reti, griglie, fili e strutture pneumatiche. L'obiettivo era di emulare le strutture naturali, cercando il minimo impatto ambientale e la riduzione del materiale impiegato, al fine di raggiungere la miglior prestazione strutturale del manufatto, attraverso campate molto ampie senza il supporto di tiranti.³⁷

I più importanti esempi di tensostrutture realizzate da Frei Otto sono il Padiglione tedesco per l'Esposizione di Montreal (1967), la copertura dell'Olympiapark di Monaco (1972) e il padiglione del Giappone ad Hannover (2000), nei quali riesce a coprire grandi luci per mezzo di strutture leggere. La ricerca e la sperimentazione formale per il raggiungimento della superficie minima di grandi strutture di Frei Otto può essere accomunato sotto diversi aspetti a quello svolto da Buckminster Fuller negli stessi anni.³⁸

Figura 15 (pagina successiva, in alto): Padiglione tedesco per l'Esposizione di Montreal del 1967

Figura 16 (pagina successiva, in basso): Vista aerea dell'Olympiapark di Monaco

37: BURRY M., *Antoni Gaudí and Frei Otto: Essential Precursors to the Parametricism Manifesto*, 11 marzo 2016, in https://www.researchgate.net/publication/301224573_Antoni_Gaudi_and_Frei_Otto_Essential_Precursors_to_the_Parametricism_Manifesto

38: *Expo '67*, in *Domus 446*, Milano, gennaio 1967, in <https://www.domusweb.it/it/dall-archivio/2011/07/14/expo-67.html>



LUIGI MORETTI

L'architetto Luigi Moretti è stato il primo ad aver elaborato la nozione di architettura parametrica alla fine degli anni Trenta, quindi decisamente prima dell'avvento dei sistemi informatici come supporto alla progettazione. Questa nuova metodologia, basata sulle relazioni tra gli elementi, è nata in contrapposizione alle teorie del Movimento Moderno, considerate eccessivamente convenzionali e inadeguate alle nuove esigenze funzionali.

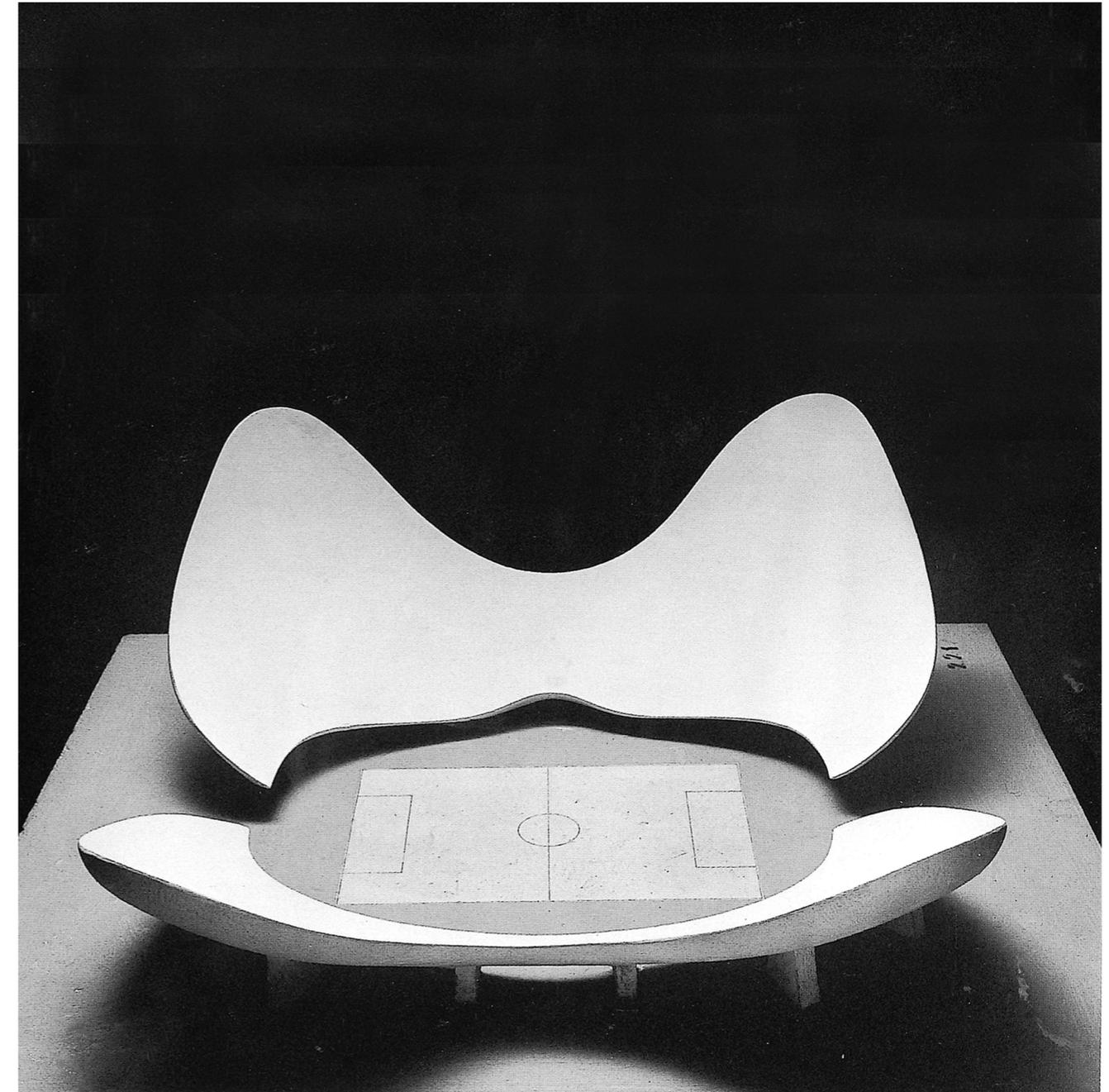
Secondo Moretti l'architettura dovrebbe seguire un approccio matematico e non più legato solamente ai riferimenti tipologici tradizionali, servendosi di modelli geometrici e individuando dei parametri attraverso i quali generare ordinatamente la struttura. Dunque i parametri, e la relazione tra di essi, diventano l'espressione del nuovo linguaggio architettonico, che permette al progettista di creare le forme in funzione del codice stabilito e i limiti entro cui questo può esistere.

Moretti adotta queste tecniche per il progetto della struttura di uno stadio non realizzato, che avrebbe potuto ospitare eventi sportivi di diverso genere (calcio, nuoto, tennis), generata attraverso curve di "equiappetibilità visiva" per la ricerca della visione ottimale. La forma nasce da relazioni geometriche tra i parametri coinvolti al fine di raggiungere l'obiettivo prefissato: garantire agli spettatori la migliore visibilità da qualsiasi posizione, indipendentemente dalla sua forma finale.³⁹

Lo studio di Moretti sulla ricerca della visione ottimale è stato possibile grazie alla realizzazione di numerosi modellini fisici, fondamentali per la ricerca della soluzione più adatta, in cui le curve venivano prese come parametro certo e la struttura era l'incognita da trovare. Il risultato è stato raggiunto grazie alla collaborazione con il matematico Bruno De Finetti e la forma generata, che in questo caso simulava l'aspetto di una farfalla, combaciava con la struttura secondo l'approccio *form-finding*.

Figura 17 (pagina successiva): Modello di uno stadio, generato attraverso curve di "equiappetibilità" visiva, realizzato da Luigi Moretti ed esposto alla XII Triennale di Milano del 1960

39: TEDESCHI A., *Il processo è più importante del risultato*, in http://www.arturotedeschi.com/wordpress/?page_id=1475



SERGIO MUSMECI

Il concetto di forma come incognita è stato applicato anche dall'ingegnere Sergio Musmeci per la progettazione del Ponte sul Basento (Potenza) del 1967. La sua ricerca ha modificato il processo progettuale basato sulla modellazione di elementi costruttivi tradizionali, come colonne, travi e archi, in favore di uno più avveniristico in cui la forma è l'incognita e le forze agenti il punto di partenza, e non viceversa.⁴⁰

Musmeci dunque è riuscito a raggiungere la forma necessaria a sorreggere il ponte grazie allo studio delle forze agenti su esso attraverso dei prototipi fisici. Proprio come Frei Otto, entrambi pionieri dell'approccio *form-finding*, ha utilizzato numerosi modellini in scala a base di neoprene, membrane e film di sapone. L'obiettivo era individuare la forma ottimale generata dalla propagazione delle forze agenti, cercando di risparmiare il materiale impiegato e riducendo il più possibile il peso della struttura, ribaltando così l'approccio tradizionale.

La forma come incognita, generata secondo le forze agenti su essa e non decisa a priori, appartiene al principio del *form-finding*, ma in particolare all'approccio "*structure first*", in cui dalla struttura dipendono la forma finale e la tipologia di materiale impiegato. Questa strategia ribalta il tradizionale processo di calcolo ed esenta il progettista dall'inventare le forme permettendogli di avvicinarsi il più possibile al mondo naturale. L'iter tradizionale, non utilizzato da Musmeci, prevede di partire da una forma decisa arbitrariamente che sarà da verificare con le tensioni di progetto. Se il modello resiste alle sollecitazioni viene considerato adeguato, altrimenti si cambia la sua conformazione fino al raggiungimento del rispetto dei requisiti.

Musmeci invece pone la forma come incognita e considera come elemento certo solamente le tensioni applicabili, ricercando il minimo strutturale e quindi la massima efficienza prestazionale e la minima quantità di materiale impiegato. Dunque non si verifica la capacità

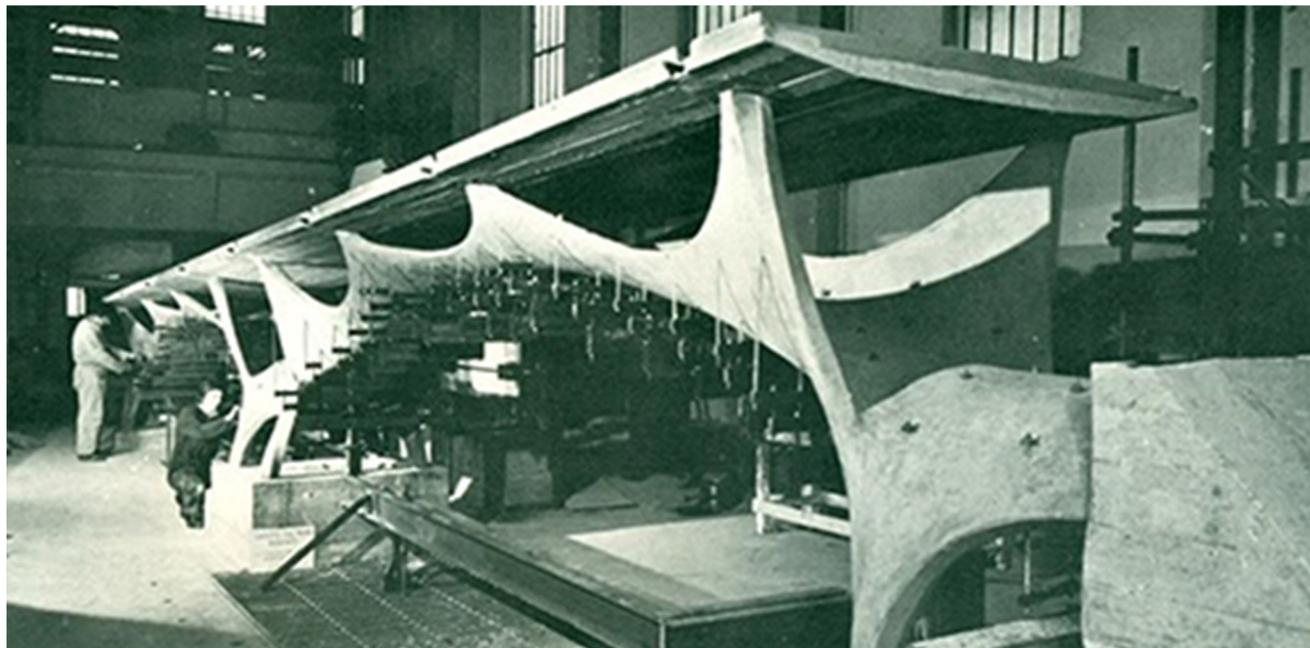
strutturale dell'oggetto noto ma si realizza una forma ad hoc ribaltando le incognite da risolvere. Partendo dalle sollecitazioni Musmeci ottiene una conformazione del modello che sia il più adatto possibile per quella soluzione, sfruttando al meglio le proprietà del calcestruzzo.⁴¹

La struttura ottenuta per il Ponte sul Basento, che rappresenta il minimo impiego di materiale per le proprietà meccaniche richieste, è costituita da un'alternanza di sinuose sagome concave e convesse che delineano quattro campate.

Un'altra applicazione dei concetti utilizzati per la realizzazione del Ponte sul Basento è riscontrabile nel progetto mai realizzato di un grattacielo per uffici a New York a metà anni Settanta, in collaborazione con l'architetto Manfredi Nicoletti. L'edificio, alto circa 550 metri, è caratterizzato da una forma elicoidale studiata matematicamente ispirandosi alla tecnologia dei ponti strallati, che consente di minimizzare i carichi portanti e gli ingombri strutturali verso un'ottimizzazione della forma in funzione delle prestazioni.

⁴⁰: TEDESCHI A., *Il processo è più importante del risultato*, in http://www.arturotedeschi.com/wordpress/?page_id=1475

⁴¹: TEDESCHI A., *Il processo è più importante del risultato*, in http://www.arturotedeschi.com/wordpress/?page_id=1475



La figura del computational designer

Negli ultimi decenni il computer ha assunto un ruolo centrale all'interno degli studi di architettura, prendendo il posto degli strumenti di progettazione d'altri tempi, come il tecnografo, o il disegno a mano libera. La svolta in questo senso è arrivata negli anni Ottanta con i programmi CAD (*Computer-Aided Design*), che permettevano al progettista di disegnare al computer, con maggiore rapidità e possibilità di apportare correzioni, e di realizzare modelli tridimensionali. Infatti questa tipologia di software (ad esempio AutoCad, Rhinoceros, ArchiCad, Catia, ecc..) permette di ottenere risultati più precisi del disegno a mano, ma ancora con elementi privi di informazioni.

Un cambiamento nella progettazione tramite computer avviene con lo sviluppo dei software BIM (*Building Information Modeling*), che consentono di associare ad un modello le sue caratteristiche specifiche, come materiali, dimensioni e proprietà fisiche. I programmi di questo tipo, oltre a gestire un maggior numero di informazioni, possono integrare le diverse fasi (architettonica, impiantistica, energetica e strutturale) della progettazione, elaborare il ciclo di vita dell'edificio, ridurre i costi e gestire al meglio l'intero processo. Nonostante i continui miglioramenti, i programmi utilizzati per la progettazione si basano tutti sullo stesso principio: il progettista elabora mentalmente i concetti che definiscono il modello e li ricrea digitalmente grazie al sistema informatico. La diffusione di una nuova strategia progettuale ha rivoluzionato il modo di approcciarsi ai software per la modellazione, superando i limiti dei programmi tradizionali e raggiungendo un livello di complessità mai ottenuto in precedenza. Questa metodologia prende il nome di *Algorithms-Aided Design* (AAD) ed è basata sull'uso di algoritmi per la progettazione, invece di generare direttamente il modello fisico di quello che si vuole rappresentare.⁴²

Figura 18 (pagina precedente, in alto): Una delle prime fotografie del Ponte sul Basento del 1967

Figura 19 (pagina precedente, in basso): Modello del ponte in scala 1:10 sottoposto ad elevate condizioni carico per determinare la migliore forma della campata

⁴²: TEDESCHI A., *AAD Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*, Le Penseur, Brienza, 2014

I software di modellazione algoritmica non richiedono capacità di programmazione per essere utilizzati e permettono al designer di avere maggior padronanza non solo del progetto, ma anche dello strumento utilizzato, determinando un cambiamento nel rapporto tra il software e il suo utilizzatore. La progettazione quindi assume altri connotati e non si riferisce più al disegno o alla modellazione tridimensionale, ma alla scrittura dell'algoritmo che genererà la forma richiesta, senza quindi crearla direttamente. Così per attività progettuale viene considerata la programmazione stessa dello script, che dà la possibilità ai progettisti di controllare in tutte le sue parti il modello generato.⁴³

Dunque diventa possibile velocizzare alcune operazioni particolarmente dispendiose e generare forme complesse, basate su regole matematiche precise. Inoltre, soprattutto in campo architettonico, dà la possibilità al progettista di effettuare simulazioni su diversi aspetti comportamentali di un edificio; infatti, grazie ai diversi *plug-in*, è possibile eseguire i test su diversi parametri prestazionali riproducendo gli effetti sull'edificio progettato, così da poter effettuare le modifiche necessarie direttamente in corso d'opera. Ad esempio è possibile simulare il comportamento di una struttura in condizioni di carico elevate, la resistenza di uno specifico materiale sottoposto a sforzi di compressione oppure la quantità di luce entrante in un dato edificio di una città precisa in un periodo definito. Grazie a questi strumenti diventa possibile non solo quantificare questo tipo di variabili, ma progettare in funzione di esse, valutando istantaneamente le ripercussioni sul modello e arrivando a generare la miglior soluzione per ciascun progetto specifico.⁴⁴

Queste nuove tecniche hanno permesso ad architetti e designer di assumere un ruolo diverso, avendo il pieno dominio sul processo generazionale, non essendone dipendenti. La creazione e la gestione dello script, ovvero la sequenza di algoritmi attraverso cui viene generato il modello, è sempre stato compito dei programmatori informatici, che compongono il software in tutte le sue parti. Tuttavia una crescente volontà

di personalizzazione, insieme allo sviluppo dei programmi V. P. L., ha portato alla creazione di una nuova figura professionale a cavallo tra progettista e programmatore, che non si limita ad utilizzare gli strumenti informatici classici con le loro "limitazioni", ma ha le competenze per poterli gestire.⁴⁵

Il progettista che utilizza questa tipologia di software prende il nome di "*computational designer*" e ha la capacità di unire la creatività alla gestione informatizzata degli oggetti per raggiungere la soluzione migliore. Questa figura professionale dunque ha un ruolo diverso dal solito anche nell'approccio, non solo nelle competenze; infatti il progettista stabilisce le condizioni dell'algoritmo che devono essere risolte (costi, dimensioni, vincoli, materiali ecc..) e attraverso il programma genera una serie di soluzioni sulla base dei parametri imposti. Applicando questo sistema diventa possibile accorciare i tempi per la creazione della forma, poiché l'esito migliore viene definito dal programma e non deve essere fatto in modo arbitrario da una persona, con conseguente possibilità di commettere errori o approssimazioni, e talvolta è possibile raggiungere soluzioni innovative troppo distanti dall'esperienza e dalla progettazione tradizionale.⁴⁶

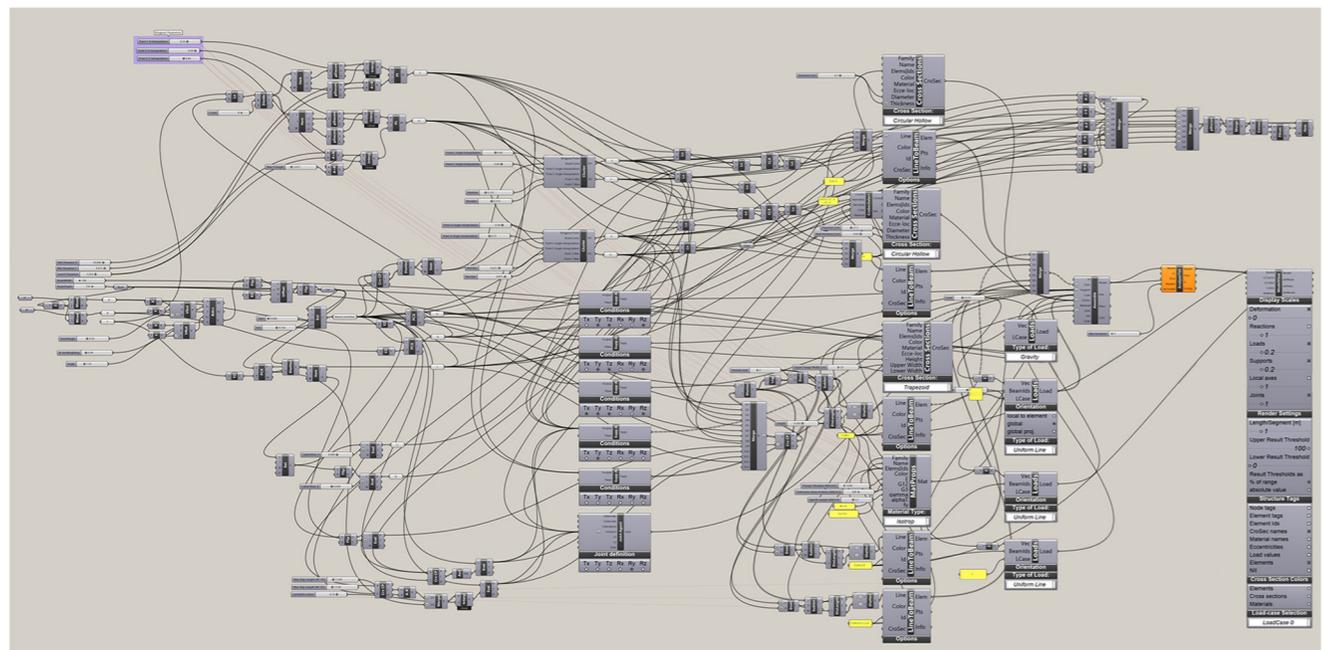
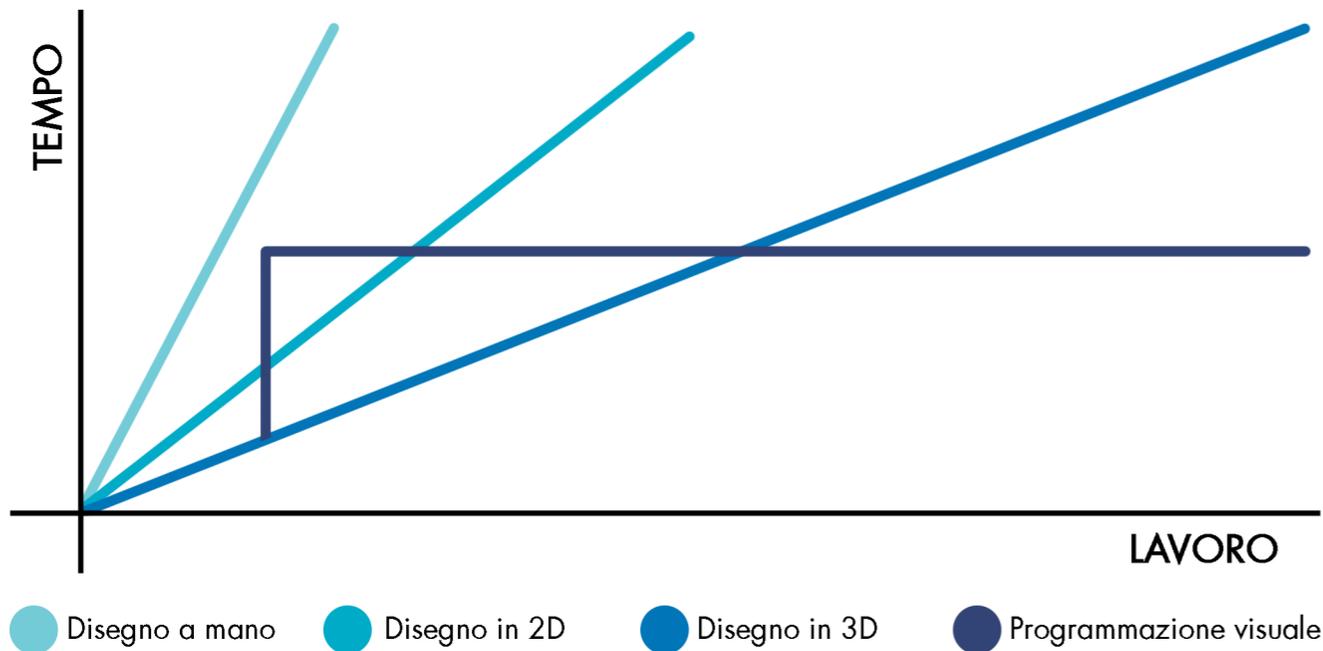
In ambito informatico con il termine programmazione si fa riferimento alla creazione, da parte di sviluppatori e programmatori, di un software scritto con uno specifico codice sorgente che verrà eseguito da un computer. Invece con programmazione visuale si intende quel tipo di attività compiuta attraverso un software già esistente e quindi utilizzabile anche senza la conoscenza del linguaggio informatico. Il progettista dunque ha la possibilità di scegliere se approfondire le metodologie di progettazione algoritmica o servirsi del software solamente come strumento per raggiungere gli obiettivi prefissati, sapendo che la figura del *computational designer* sta avendo un ruolo sempre più centrale all'interno dei grandi studi di progettazione. Infatti, le aziende che hanno la possibilità di investire sugli specialisti nel campo della

43: SAGGIO A., *Introduzione alla rivoluzione informatica in architettura*, Carocci, Roma, 2007

44: *Computational design, algoritmi generativi e modellazione parametrica: come sta cambiando il mondo dell'Architettura*, 2 settembre 2016, in <https://www.dama.academy/computational-design-algoritmi-generativi-e-progettazione-parametrica/>

45: CONVERSO A., *Il progetto digitale per la costruzione. Cronache di un mutamento professionale*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2010

46: *Computational design e algoritmi generativi per progettare meglio*, 4 maggio 2017, in <https://www.01building.it/strumenti/computational-design-algoritmi-generativi/>



programmazione algoritmica visuale, beneficeranno di una metodologia lavorativa che consentirà loro di gestire al meglio il lavoro in rapporto al tempo a disposizione, paragonata ad altri approcci metodologici, come il disegno a mano, il disegno in 2D e il disegno in 3D.⁴⁷

Come si evince dal grafico (Figura 20), in cui sono riportati quattro diversi approcci alla progettazione, la curva della programmazione visuale ha un andamento molto particolare rispetto alle altre. Il disegno a mano libera comporta l'impiego di un'elevata quantità di tempo per raggiungere un risultato con poche informazioni al suo interno e modificabile solamente cancellando, una parte o per intero, e ridisegnando. Questo sistema non viene utilizzato all'interno dei progetti contemporanei poiché, con l'avvento dei computer, sono nati programmi di disegno che permettono di realizzare un lavoro più preciso, replicabile e modificabile in minor tempo. Infatti i programmi di disegno 2D, come riportato nel grafico, consentono al progettista di svolgere una maggiore quantità di lavoro, oltre ai vantaggi già citati, nello stesso tempo. Un miglioramento del rapporto lavoro-tempo lo si ha con i programmi di modellazione 3D che, a fronte di un maggior impiego di risorse dovute alla creazione a gestione del modello, hanno la possibilità di esportare rapidamente un elevato numero di elaborati, come piante, prospetti e sezioni da un modello tridimensionale.

Infine vi è la curva della rappresentazione visuale, che ha un andamento diverso dalle precedenti, ed è caratterizzata da due rette parallele agli assi. Il primo segmento ha origine in corrispondenza della linea della modellazione 3D poiché la base di partenza potrebbe essere un oggetto 3D creato precedentemente non tramite V. P. L.. Prosegue dunque lungo l'asse verticale, parallelo alla linea del tempo, e fa riferimento alla fase di scrittura dell'algoritmo in cui non vi è ancora la percezione tangibile del lavoro svolto. Il punto in cui la retta cambia direzione passando da verticale a orizzontale, parallela all'asse del lavoro, corrisponde al momento in cui lo script viene completato e diventa possibile estrapolare

Figura 20 (pagina precedente, in alto): Grafico lavoro-tempo in cui sono riportati quattro diversi metodi progettuali

Figura 21 (pagina precedente, in basso): Esempio di algoritmo visuale realizzato con il software Grasshopper

⁴⁷: TERZIDIS K., *Algorithms for Visual Design: Using the Processing Languages*, Wiley Publishing, Indianapolis, 2009

qualsiasi informazione necessaria, senza dover impiegare altro tempo ma semplicemente modificando i parametri dell'algoritmo. La lunghezza della linea verticale è variabile e dipende dalle abilità del progettista e dalla difficoltà dell'algoritmo, ma una volta raggiunto il punto di intersezione con il segmento verticale tutti i dati necessari sono fruibili, esportabili e parametricamente modificabili senza dover impiegare altro tempo, o in minima parte.

Questo metodo consente di risparmiare una notevole quantità di tempo e permette al progettista di semplificare buona parte del lavoro, soprattutto durante la fase di esportazione degli elaborati. Anche le modifiche da apportare al modello possono essere fatte in maniera più efficace e rapida, poiché, dal momento che l'algoritmo è collegato la variazione di un parametro innesca una reazione a catena a tutti i componenti. Invece nei sistemi tradizionali, come il disegno o la modellazione tridimensionale, le correzioni devono essere fatte manualmente con conseguente aumento dei tempi e ripetizione delle azioni, quello che la progettazione algoritmica permette di evitare.⁴⁸

48: CONVERSO A., *Il progetto digitale per la costruzione. Cronache di un mutamento professionale*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2010

1.3 PATRIK SCHUMACHER E IL MANIFESTO

Patrik Schumacher, nato il 30 agosto 1961 a Bonn (Germania), ha studiato architettura all'Università di Stoccarda, laureandosi nel 1990, e successivamente alla Southbank University di Londra. Ha conseguito anche una laurea in filosofia presso l'Università di Bonn e un dottorato di ricerca in Scienze Culturali all'Università di Klagenfurt am Wörthersee. Nel 1988 ha iniziato la sua carriera lavorativa all'interno dello studio Zaha Hadid Architects, che lo ha portato a ricoprire diversi ruoli nel corso del tempo fino ad assumerne la guida dopo la morte della fondatrice anglo-irachena nel 2016. Attualmente, oltre a essere direttore dello studio ZHA, è docente all'università di Innsbruck, membro del RIBA (Royal Institute of British Architects) e della sezione dedicata all'architettura all'interno dell'Accademia delle Arti di Berlino.⁴⁹

Schumacher, considerato il creatore del termine Parametricismo e fondatore del movimento ad esso associato, ha contribuito alla diffusione delle sue teorie avanguardistiche con numerose pubblicazioni e conferenze, oltre ad averle applicate all'interno dei suoi progetti. I concetti fondamentali sono raccolti nel Manifesto del Parametricismo, presentato e discusso in occasione Biennale di Architettura di Venezia nel 2008, in cui definisce questo movimento il nuovo stile architettonico dopo il Modernismo.

Per Schumacher il Parametricismo è destinato a diventare il nuovo stile globale che prenderà il posto del Movimento Moderno, opponendosi alla sua rigidità e monotonia con un modello complesso ed eterogeneo basato sui processi generativi della natura. Il concetto su cui si basa risiede nella parametrica malleabilità dei suoi componenti architettonici e urbani basato sull'adattabilità al contesto, in contrapposizione alle

49: <https://www.zaha-hadid.com/>

ermetiche e rigide figure geometriche che contraddistinguevano tutti gli stili del passato. Il punto forte della modellazione parametrica risiede nella correlazione a seguito della variazione, innescando un processo a catena in tutti i componenti dell'algoritmo. Ogni elemento architettonico ha delle caratteristiche, come geometria, materiale e capacità prestazionali, che possono essere associate con una relazione causa-effetto con le altre presenti all'interno del progetto. Così il progettista raggiunge il risultato desiderato creando una successione di correlazioni di regole che legano le informazioni presenti nell'algoritmo, simili ai principi della natura.⁵⁰ Queste tecniche, che consentono di gestire al meglio la complessità delle forme, possono essere applicate anche al fine di raggiungere l'ottimizzazione del modello in relazione ai parametri ambientali in cui viene collocato; ad esempio è possibile creare un algoritmo in cui le schermature di un edificio possono variare per adattarsi alle condizioni di esposizione del sole in un determinato periodo temporale. Questo sistema permette di creare una schermatura adattiva capace modificare la sua forma in funzione dell'ottimizzazione della quantità di luce entrante in ogni punto della facciata, generando la miglior soluzione possibile per quella specifica necessità. Lo stesso principio è presente in natura, in cui le fronde degli alberi possono modificare la loro posizione in funzione dell'intensità della luce incidente, dunque plasmandosi conseguentemente agli stimoli esterni.

50: RAMCHURN R., *Schumacher: 'Parametricism the only movement for the digital age'*, 24 ottobre 2013, in <https://www.architectsjournal.co.uk/news/schumacher-parametricism-the-only-movement-for-the-digital-age/8654696.article>

La nascita di un nuovo stile

Schumacher definisce il Parametricismo come un'autopoiesi, ovvero un sistema autoreferenziale all'interno del quale i diversi componenti sono legati da un rapporto causa-effetto in cui la modifica di un parametro si ripercuote su tutti gli altri.⁵¹

Considera Frei Otto un precursore di questo stile, grazie ai suoi studi sulla ricerca della forma attraverso modelli fisici invece di ricorrere a configurazioni convenzionali o inventate, raggiungendo un risultato che eccelle per complessità ed eleganza. Per ottenere la soluzione migliore per le sue tensostrutture Otto ha studiato il percorso minimo che avrebbe fatto il materiale grazie ad esperimenti con bolle di sapone, finalizzate al raggiungimento della minor quantità di materiale da impiegare, dunque l'ottimizzazione.⁵²

*"L'obiettivo è quello di progettare la crescita e la trasformazione delle città come un processo sistematico morfogenetico che in gran parte si autoregola. (...) La premessa del parametricismo consiste nella parametrica malleabilità di tutti gli elementi architettonici e urbani. Invece di mettere insieme rigide ed ermetiche figure geometriche, come tutti i precedenti stili architettonici, il parametricismo avvicina componenti malleabili in un gioco dinamico di mutue risposdenze e di adattabilità al contesto."*⁵³

L'obiettivo del movimento di Schumacher è la riorganizzazione della società: dall'età modernista del fordismo, caratterizzata dalla produzione di massa, a quella contemporanea, in continua evoluzione in una rete complessa di sistemi di comunicazione globale. Architettura e urbanistica hanno il compito di riorganizzare la città adattandola ai nuovi stili di vita, basati sulla crescente complessità socio-economica dell'epoca post-

51: SCHUMACHER P., *Parametricism as Style - Parametricist Manifesto*, Londra 2008, presentato e discusso al Dark Side Club, 11 Biennale di Architettura, Venezia 2008, in <http://patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>

52: SCHUMACHER P., *Parametricism - A New Global Style for Architecture and Urban Design*, Londra 2008, pubblicato in: AD Architectural Design - Digital Cities, Vol. 79, Num. 4, luglio/agosto 2009, in <https://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20-%20A%20New%20Global%20Style%20for%20Architecture%20and%20Urban%20Design.html>

53: SCHUMACHER P., *La città parametrica*, in Being Zaha Hadid, Abitare 511, Milano, aprile 2011

fordista.

Secondo Schumacher l'unico modo per raggiungere un tale obiettivo è affidarsi a tecniche di programmazione innovative basate sulla simulazione e la ricerca della forma attraverso software di modellazione parametrica e *scripting*.

Lo stile creato da Schumacher si fonda su regole metodologiche da seguire (euristica positiva) e da evitare (euristica negativa) che devono aiutare il progettista per un'efficace progettazione parametrica. Con euristica si fa riferimento a quell'insieme di strategie e procedimenti necessari per la risoluzione di un problema, che si basano sui dogmi e tabù dell'avanguardia della cultura contemporanea. E' possibile fare una divisione tra modelli da ricercare e da evitare:⁵⁴

- Euristica negativa (tabù): definisce i limiti della progettazione per evitare di adottare schemi obsoleti e non coerenti con l'obiettivo da perseguire. Ad esempio evitare l'utilizzo di primitive geometriche rigide (triangoli, quadrati e cerchi) non malleabili, evitare la ripetizione casuale degli elementi, evitare l'inserimento di oggetti ermetici non coerenti con il contesto, evitare l'utilizzo di stereotipi funzionali ed evitare linee e angoli retti.

- Euristica positiva (dogmi): specifica le linee guida e le tecniche da adottare per realizzare correttamente il progetto. Ad esempio considerare tutte le strutture come forme morbide e parametricamente malleabili, utilizzare dei tassi di variazione che possano portare alla graduale differenziazione degli elementi, realizzare modelli correlati sistematicamente in modo da adattarsi reciprocamente ai cambiamenti, utilizzare script di progettazione parametrica per generare relazioni tra elementi e sottosistemi e realizzare superfici costituite da componenti adattativi basati su relazioni associative così che l'intero complesso possa variare in base alle diverse condizioni locali.

54: SCHUMACHER P., *Parametricism as Style - Parametricist Manifesto*, Londra 2008, presentato e discusso al Dark Side Club, 11 Biennale di Architettura, Venezia 2008, in <http://patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>

Questi dogmi e tabù teorizzati da Schumacher devono essere seguiti per realizzare un'adeguata progettazione parametrica, anche se non possono essere considerate delle regole ma piuttosto dei principi euristici che guidano il processo. Il Parametricismo diventa l'unico strumento in grado di rispondere adeguatamente alla crescente complessità e fluidità della società contemporanea. Nonostante la riproposizione di stili come il Modernismo, il Minimalismo, lo Storicismo, il Postmodernismo e il Decostruttivismo la ricerca attuale è indirizzata verso metodologie progettuali più efficaci. In passato vi è stata un'alternanza tra periodi di progresso di uno stile e periodi di transizione, in cui vi era un consolidamento degli ideali. Le espressioni ottenute sono il frutto di una ricerca che unisce gli sforzi di innovazione progettuale con l'obiettivo di migliorare le condizioni della comunità e aumentare la qualità degli edifici realizzati.⁵⁵

In architettura al momento non vi è un'altra corrente altrettanto innovativa in grado di portare a dei cambiamenti concreti nel tessuto urbano. Il Parametricismo di Patrik Schumacher è l'unico movimento nuovo in grado di risolvere problemi complessi adottando soluzioni le più appropriate e versatili, rispetto alle correnti del passato. Questo stile ormai può essere considerato maturo e adatto alle esigenze delle città, in continua evoluzione, del XXI secolo.

Secondo Schumacher la transizione dalle costruzioni vernacolari all'Architettura è cominciata con il Gotico, considerando gli edifici romanici medievali come appartenenti ad un non-stile. Gli stili però devono essere divisi in epocali, considerati i più significativi, e sussidiari, ovvero quelli di transizione tra gli altri. Ad esempio tra il Rinascimento e il Barocco, considerati stili epocali, c'è stato il transitorio Manierismo e dal Barocco è scaturito il Rococò.⁵⁶

Schumacher associa ai passaggi di stili epocali una volontà di adattamento dell'ambiente costruito al processo socio-economico di quel tempo, in modo che gli edifici rispecchiassero le esigenze della popolazione

55: Mario Coppola *conversata con Patrik Schumacher*, pubblicato in BLOOM 15, Facoltà di Architettura Università di Napoli, gennaio 2013, in https://www.patrikschumacher.com/Texts/Dogmi_Stili_Progresso_Storia%20ed%20Ecologia.html

56: SCHUMACHER P., *Patrik Schumacher on parametricism - 'Let the style wars begin'*, 6 maggio 2010, in <https://www.architectsjournal.co.uk/news/culture/patrik-schumacher-on-parametricism-let-the-style-wars-begin/5217211.article>

contemporanea; ad esempio il Barocco ha sostituito il Rinascimento perché era attrezzato per risolvere al meglio le necessità dei grandi stati-nazione, mentre il secondo era adatto alle più piccole città-stato. Nel corso del XIX si sono susseguiti diversi stili sussidiari, il Neorinascimentale, il Neogotico, il Neobarocco, l'Eclettismo, l'Espressionismo e l'Art Nouveau, considerati appunto transitori fino all'epocale Modernismo. Anche quest'ultimo ha avuto diversi sussidiari, come il White Modern, il Razionalismo, il Brutalismo, l'High-Tech, ma non è stato sostituito da nessun altro stile epocale adatto.⁵⁷

Alcuni celebri architetti modernisti hanno adottato soluzioni innovative per le regole di quel movimento, addirittura con richiami al Parametricismo. Ad esempio Oscar Niemeyer ha usato forme libere e curve nelle sue opere, concetti distanti da quelli del Movimento Moderno, ma sempre generate a partire da figure geometriche semplici, quindi non può essere considerato un pioniere dell'approccio parametrico. Anche Le Corbusier nel suo piano di espansione per Algeri anticipa il concetto di integrazione e corrispondenza tra edificio e contesto, come se il metodo si basasse su una logica associativa a partire dalle curve di livello.

Secondo Schumacher il Modernismo era il movimento adatto al secolo scorso, in quanto caratterizzato dall'industrializzazione, che ha portato ai sistemi di produzione di massa, e destinato ad una classe operaia uniforme. Questa idea di riproduzione in serie si è riversata nel metodo progettuale generando la separazione delle diverse funzioni urbane e la codificazione di ogni categoria di edificio all'interno di uno standard. In una società dinamica e diversificata come quella attuale, la ripetizione e la standardizzazione non si addicono più ed è necessario ricercare il nuovo stile nella complessità del Parametricismo.⁵⁸

Le opere parametriche sono basate sulla complessità organizzata che emula i sistemi naturali, dove le forme vengono generate da forze che interagiscono tra loro al fine di generare una forma coerente, e si fondano sul rispetto di cinque principi chiave.

1- Inter-articolazione parametrica dei sottosistemi

Ogni sistema è legato all'intero script, dunque la modifica di un parametro in una parte dell'algoritmo genera una variazione dell'intera struttura ad esso collegata.

2- Accentuazione parametrica

L'obiettivo è di aumentare l'aspetto organico delle forme grazie a complesse correlazioni che amplificano la curvatura invece di adottare soluzioni compensative o approssimative.

3- Figura parametrica

Il modello deve essere realizzato con molte variabili, non solo legate alla geometria dell'oggetto ma anche all'ambiente esterno o alle sensazioni dell'utente, in modo da renderli parte attiva del processo parametrico.

4- Reattività parametrica

Gli edifici devono essere progettati con una componente cinetica integrata in ciascuno di essi, in modo che possano adattarsi e riconfigurarsi in base agli stimoli che ricevono; creando dunque un modello di architettura reattiva nelle diverse fasi temporali.

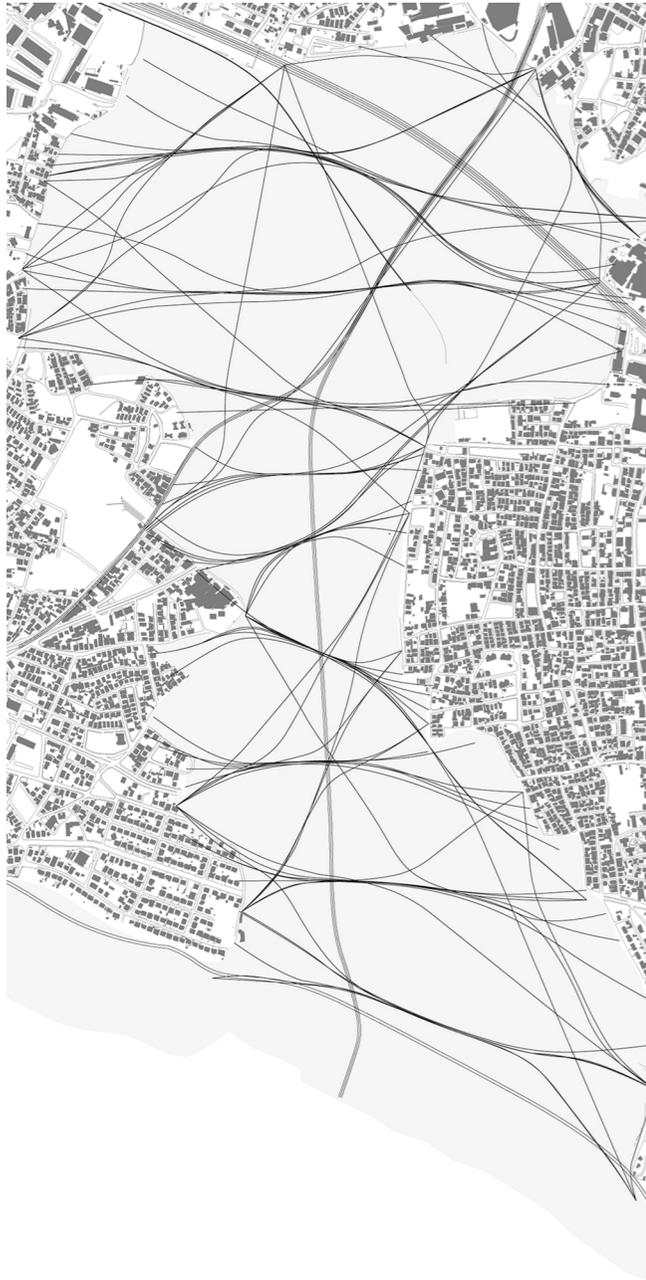
5- Urbanistica parametrica

Gli edifici che costituiscono le città plasmano un territorio in continua evoluzione e l'urbanistica parametrica consente di modificare la morfologia del costruito in funzione dei legami tra gli stessi e i fruitori. L'urbanistica parametrica ha l'obiettivo di costruire logiche basate sulla correlazione tra i sistemi urbani, come le strade, gli spazi aperti e gli edifici. Il risultato generato sarà una città elegante e facilmente percorribile generata tramite rigide linee guida. La nuova complessità ordinata prende il posto della monotonia delle consolidate espansioni urbane, caratterizzate dal caos visivo causato dall'espansione incontrollata.⁵⁹

57: Mario Coppola conversa con Patrik Schumacher, pubblicato in BLOOM 15, Facoltà di Architettura Università di Napoli, gennaio 2013, in https://www.patrikschumacher.com/Texts/Dogmi_Stili_Progresso_Storia%20ed%20Ecologia.html

58: SCHUMACHER P., *Patrik Schumacher on parametricism - 'Let the style wars begin'*, 6 maggio 2010, in <https://www.architectsjournal.co.uk/news/culture/patrik-schumacher-on-parametricism-let-the-style-wars-begin/5217211.article>

59: SCHUMACHER P., *Parametricism as Style - Parametricist Manifesto*, Londra 2008, presentato e discusso al Dark Side Club, 11 Biennale di Architettura, Venezia 2008, in <http://patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>



L'ottimizzazione per la sostenibilità

Con l'affermazione "le città del futuro possono essere sostenibili solo se diventano veramente parametriche" Schumacher definisce il Parametricismo come lo stile migliore per affrontare la sfida ecologica, grazie ai suoi principi di adattabilità e dinamicità dei suoi componenti morfologici attraverso le variazioni dei parametri ambientali. Ad esempio le dimensioni e la disposizione delle aperture, delle schermature e dei diversi elementi architettonici diventano le variabili che caratterizzano il progetto e permettono di raggiungere l'ottimizzazione in base alle condizioni in cui è inserito.⁶⁰

Le città sono responsabili di un elevato consumo di energia, acqua e aria e di una notevole quantità di emissioni dannose in ambiente durante il loro intero ciclo di vita. La sostenibilità ecologica si basa sulla capacità di trovare soluzioni intelligenti per sfruttare le risorse a disposizione cercando di ridurre l'inquinamento. Per perseguire questo obiettivo è necessario adottare strategie innovative sia dal punto di vista prestazionale che architettonico. La soluzione della progettazione parametrica a questo tipo di problematiche è creare città in grado di adattarsi in modo sostenibile al contesto in cui sono inserite, senza tuttavia arrestare lo sviluppo della civiltà.⁶¹

L'obiettivo non deve essere solamente salvare l'energia, ma è necessario portare avanti il progresso culturale. Per unire le due cose si può considerare la soluzione con la minore *carbon footprint*⁶², garantendo però la continua innovazione tecnologica, in quanto presupposto necessario per confermare lo sviluppo sostenibile in corso.

Questa metodologia, secondo Schumacher, è applicabile attraverso un processo morfogenetico che ha l'obiettivo di regolare il processo di crescita e trasformazione delle città, realizzata grazie a processi computazionali basati su algoritmi generativi.

60: Mario Coppola conversa con Patrik Schumacher, pubblicato in BLOOM 15, Facoltà di Architettura Università di Napoli, gennaio 2013, in https://www.patrikschumacher.com/Texts/Dogmi_Stili_Progresso_Storia%20ed%20Ecologia.html

61: SCHUMACHER P., *Parametricism - A New Global Style for Architecture and Urban Design*, Londra 2008, pubblicato in: AD Architectural Design - Digital Cities, Vol. 79, Num. 4, luglio/agosto 2009, in <https://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20-%20A%20New%20Global%20Style%20for%20Architecture%20and%20Urban%20Design.html>

62: Carbon footprint: E' un parametro utilizzato per calcolare le emissioni di gas serra causate da un prodotto; è espresso in tonnellate di CO2 equivalente

Figura 24 (pagina successiva, in alto): Modello tridimensionale del Masterplan di Zaha Hadid Architects per il quartiere Kartal-Pendik a Istanbul in cui il flusso ritmico del tessuto urbano parametrico dà un senso di coesione organica tra edifici e spazio non costruito

Figura 25 (pagina successiva, in basso): Particolare del modello tridimensionale del Masterplan di Zaha Hadid Architects per il quartiere Kartal-Pendik a Istanbul in cui sono presenti le torri a croce; questi edifici partecipano alla creazione di un tessuto urbano continuo che incornicia le strade e le piazze, mantenendo la totale continuità tra costruito e non costruito

63: SCHUMACHER P., *The Parametric City*, 2010, pubblicato in: Zaha Hadid – Recent Projects, A.D.A. Editore, Tokyo, 2010, in <https://www.patrikschumacher.com/Texts/The%20Parametric%20City.html>

Perché questo possa accadere tutti gli elementi urbani devono essere “parametricamente malleabili” per adattarsi al meglio al contesto, invece di adattare forme geometriche rigide e ed ermetiche come negli altri stili architettonici. In base a processi progettuali di variazioni e correlazione le proprietà specifiche (geometrica, spaziale e materica) di ogni manufatto architettonico possono essere associate, secondo il principio causa-effetto, a quelle di un altro manufatto presente nello stesso ambiente. Il progettista ha il compito di realizzare e gestire le correlazioni tra gli elementi, creando una coesione totale basata sui principi generativi della natura, che garantiscono una facile navigazione e una corretta leggibilità del costruito.⁶³

L’ottimizzazione architettonica attraverso strumenti parametrici permette di migliorare le prestazioni degli edifici rispetto ai principi della sostenibilità, programmando i parametri di output morfologici in modo da rispondere ai dati di input ambientali. Ad esempio i dati di una carta solare, su cui è possibile leggere l’intensità della radiazione in un determinato periodo temporale di una specifica città, possono diventare gli input per la creazione di un sistema di schermatura adattivo. Dunque i diversi elementi, come geometria, orientamento e densità, generati per l’ombreggiamento della facciata si adattano alle condizioni specifiche di esposizione al sole. Il risultato finale sarà una superficie capace di autoregolarsi al fine di ottimizzare la protezione solare in base alla quantità di luce entrante in qualsiasi punto della facciata. Questa modulazione adattiva genera una superficie eterogenea con un’estetica organica in base alle condizioni specifiche di un determinato luogo, sfruttando al meglio le condizioni ambientali locali.

Questa differenziazione e adattabilità dei componenti che costituiscono un edificio porta anche ad alcuni svantaggi, come difficoltà nella costruzione o costi di realizzazione elevati. Lo sviluppo di tecnologie innovative, capaci di affrontare in modo più approfondito tutte le fasi progettuali, hanno ridotto il margine tra ripetizione e variazione, dando la possibilità



al progettista di creare un insieme di componenti diversificato tanto velocemente quanto uno ripetitivo. Anche dal punto di vista economico, grazie agli investimenti sui nuovi sistemi di fabbricazione computazionale, i costi dovuti alla differenziazione e alla complessità degli oggetti si stanno riducendo. Queste operazioni finanziarie sperimentali danno la possibilità di aumentare capacità, risorse e tecnologie in funzione di un miglioramento dell'efficienza degli strumenti futuri; ad esempio da un modello parametrico BIM è possibile ottenere tutti i componenti che lo costituiscono con un solo passaggio, riducendo sia la quantità di lavoro che di costo del processo. La differenza del prezzo di realizzazione, secondo Schumacher, tra un modello tradizionale e un parametrico, varia tra il 5 e il 15%. Questo margine si sta riducendo in seguito ad ogni nuovo investimento su queste tecnologie d'avanguardia, che dovrebbero essere utilizzate e modificate, in modo da far progredire l'architettura in contemporanea al progresso generale che sta vivendo la nostra civiltà.⁶⁴

⁶⁴: Mario Coppola conversa con Patrik Schumacher, pubblicato in BLOOM 15, Facoltà di Architettura Università di Napoli, gennaio 2013, in https://www.patrikschumacher.com/Texts/Dogmi_Stili_Progresso_Storia%20ed%20Ecologia.html

1.4 LA GESTIONE DELL'ALGORITMO

Introduzione al software Grasshopper

I software parametrico-generativi, nella maggior parte dei casi, sono estensioni di programmi di modellazione tridimensionali che in origine non avevano la possibilità di svolgere all'interno di essi questo tipo di attività. L'interfaccia in cui si crea e gestisce l'algoritmo continua ad essere un elemento separato dal programma principale, che mantiene le sue funzionalità indipendentemente dall'utilizzo di eventuali applicativi, avente la sola funzione di visualizzatore dell'oggetto generato dall'algoritmo per mezzo del *plug-in*.

Il sistema di componenti e parametri che regola, attraverso *input* e *output*, la trasmissione dei dati è il principio su cui si basa questa tipologia di software. Il metodo progettuale è basato sulla logica relazionale permette di creare un sistema illimitato di legami che gestiscono i dati in *input* e, dopo averli rielaborati, li restituiscono sotto forma di *output*. L'ordine con cui vengono eseguite le azioni all'interno dell'algoritmo ha un andamento progressivo e lineare. Queste tipologie di software stanno diventando sempre più centrali nello sviluppo di un progetto particolarmente complesso, grazie alla possibilità di avere il controllo costante di tutte le sue parti. Diventa dunque possibile apportare variazioni progettuali locali che portano automaticamente alla modifica di tutti gli elementi dipendenti.

Il modello non è più un insieme di elementi distinti, ma diventa un sistema costituito da componenti interdipendenti che variano e si adattano in funzione dei cambiamenti applicati a livello locale o globale. Al momento questo tipo di applicativi vengono utilizzati in diverse fasi del progetto: il *concept* (generazione di forme insolite), la progettazione

(discretizzazione e razionalizzazione della forma allo scopo di rendere costruibile una forma complessa) e l'ottimizzazione (trovare la miglior soluzione energetica e strutturale in determinate circostanze).

Uno dei più diffusi è Grasshopper, software V. P. L. (*Visual Programming Language*) basato sulla programmazione algoritmica per la creazione di forme matematicamente complesse. E' stato sviluppato da David Rutten per l'azienda Robert McNeel & Associates e distribuito nel settembre del 2007 con il nome Explicit History. Questo appellativo risalente alla prima versione del programma si riferisce ad una delle sue caratteristiche principali: l'esplicitazione della storia, ovvero il processo creativo utilizzato per la creazione di un oggetto attraverso gli algoritmi.

Grasshopper funziona all'interno di Rhinoceros, programma di modellazione tridimensionale per la creazione di oggetti costituiti da curve e superfici NURBS, che diventa il visualizzatore della geometria generata attraverso il processo algoritmico. Le NURBS, acronimo di *Non Uniform Rational B-Splines*, sono la rappresentazione matematica utilizzata da alcuni software di modellazione per definire nel dettaglio la forma degli oggetti geometrici generati. A partire Rhinoceros 6.0 Grasshopper fa parte degli strumenti standard a disposizione dell'utilizzatore, invece nelle versioni precedenti era un plug-in ottenibile gratuitamente dal sito www.food4rhino.com.⁶⁵

Questo applicativo ha permesso di integrare la progettazione parametrica all'interno delle funzionalità di Rhinoceros, ampliandone le possibilità di utilizzo e l'impiego nella progettazione. I modelli vengono generati tramite algoritmi, creando relazioni complicate tra gli oggetti e generando forme molto complesse e caratteristiche. La versatilità del programma permette al progettista di utilizzarlo a diverse scale, dall'urbanistica al dettaglio tecnologico, in base al livello di dettaglio che si vuole raggiungere.

L'utente dunque realizza una sequenza di istruzioni attraverso un'interfaccia "boxes and arrows" che vengono convertite in modelli tridimensionali all'interno di Rhinoceros. Queste forme, create attraverso

la modellazione di algoritmi, non possono essere modificate direttamente da Rhinoceros ma cambiando l'algoritmo all'interno di Grasshopper.⁶ Nella parte alta dello schermo sono presenti i componenti di Grasshopper divisi in categorie, ad esempio: *Params, Maths, Vector, Curve, Surface, Mesh* ecc.. Da questo menù è possibile cercare il comando desiderato e inserirlo nell'area di lavoro sottostante, denominata *canvas* (ovvero tela, intesa come superficie libera su cui poter creare). In questo spazio è visibile lo *script* costituito dai parametri e dai componenti, che possono avere diverso colore in base al loro funzionamento: grigio (l'oggetto funziona correttamente), arancione (mancanza di dati di input), rosso (presenza di uno o più errori).⁶⁶

La differenza più importante tra i comandi di Grasshopper è quella tra parametri (contengono dati, dunque immagazzinano informazioni, come geometri, numeri e vettori) e componenti (contengono azioni, dunque permettono di svolgere determinate operazioni, come copiare, scalare e suddividere un oggetto).

Il componente può essere graficamente diviso in tre parti:

- Lato sinistro: sono presenti i parametri di input che corrispondono ai dati che il componente può ricevere ed elaborare

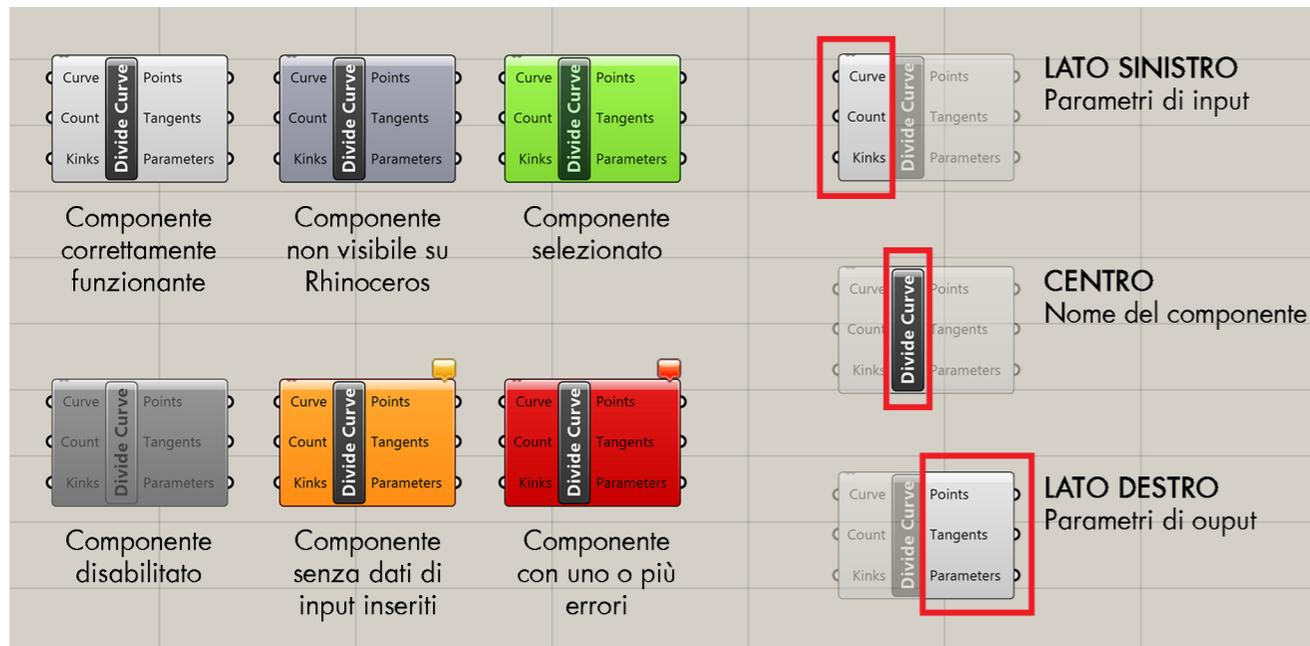
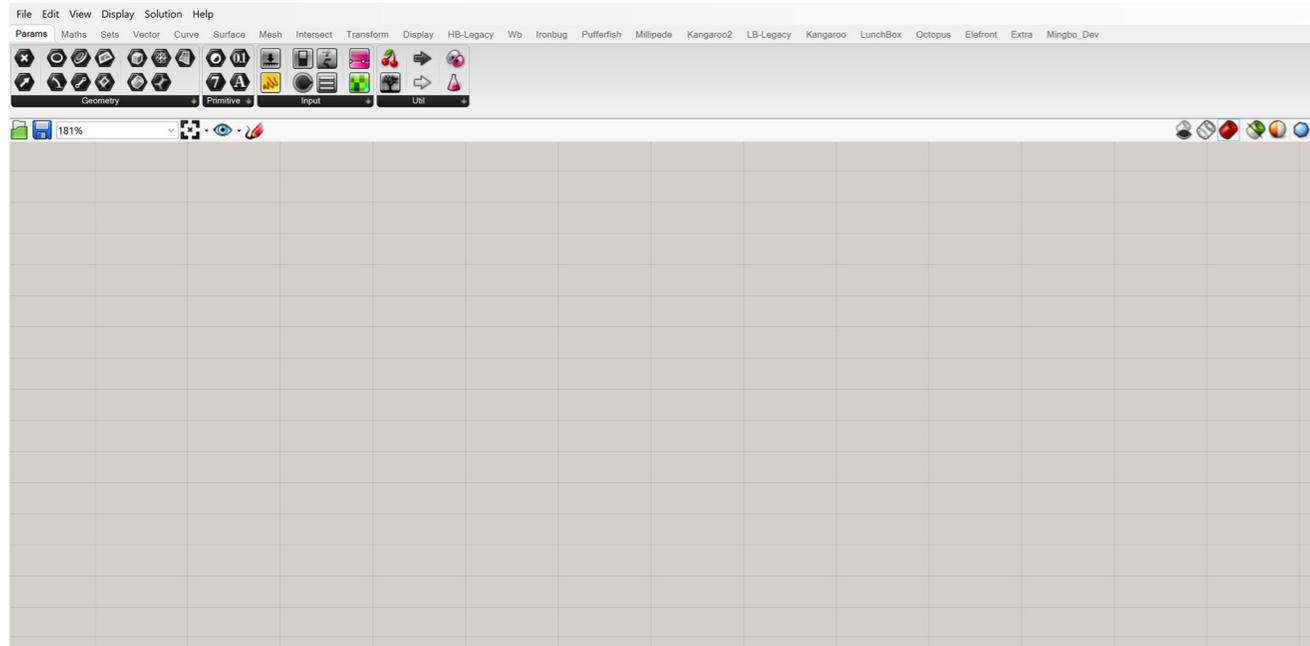
-Centro: nome del componente

- Lato destro: sono presenti i parametri di output che corrispondono ai dati di input rielaborati dal componente stesso

Grasshopper sta diventando uno strumento sempre più utilizzato all'interno degli studi di architettura grazie al suo metodo di modellazione innovativo, non presente all'interno degli altri programmi, e grazie ai numerosi aggiornamenti del software per renderlo adatto alle esigenze degli utilizzatori.

⁶⁵: <https://www.grasshopper3d.com/>

⁶⁶: <https://www.grasshopper3d.com/>



Questo strumento consente di andare oltre la progettazione tradizionale grazie alla ricerca di nuove forme, ma anche di effettuare analisi per l'ottimizzazione (ambientali, morfologiche e strutturali) delle geometrie generate. Infatti, grazie ai diversi plug-in, è possibile effettuare verifiche di diverso tipo così da poter modificare il modello sulla base dei risultati ottenuti, o addirittura generare soluzioni in funzione dei requisiti minimi da rispettare.⁶⁷

Nei software tradizionali per conoscere la soluzione migliore è necessario fare la simulazione in tutti i periodi dell'anno, così da poter conoscere i diversi valori associati elaborati dal programma. Impostando i corretti parametri su Grasshopper invece è possibile ottenere automaticamente l'esposizione ottimale dell'edificio realizzato in funzione del contesto in cui è inserito, nei diversi periodi dell'anno. Questo diventa possibile perché i requisiti di comfort diventano gli *input* dell'algoritmo e il modello generato sarà parametrico in funzione base di essi, evitando al progettista di dover fare tutte le simulazioni e fornendo immediatamente la migliore soluzione possibile. Nel caso fosse necessario simulare più di un parametro contemporaneamente Grasshopper permette al progettista di relazionare tra loro più variabili al fine di ottenere la combinazione più efficiente. Questo permette, oltre ad un notevole risparmio di tempo e lavoro, di trovare la miglior soluzione per un problema, non sempre risolvibile in altro modo.

Le geometrie realizzate in questo modo continueranno a essere parametriche e dunque successivamente modificabili variando i dati di *input*. Grazie a questi strumenti è facilmente comprensibile come la progettazione computazionale non serva solamente alla realizzazione di geometrie complesse, ma permetta al progettista di risolvere tutte le diverse problematiche presenti all'interno del progetto in un'unica soluzione: la migliore.⁶⁸

La progettazione parametrica, in particolare quella legata all'ottimizzazione della forma, può essere realizzata attraverso i

Figura 26 (pagina precedente, in alto): Schermata iniziale di Grasshopper in cui è presente la barra orizzontale con i comandi e l'area di lavoro un cui inserirli, denominata canvas

Figura 27 (pagina precedente, in basso): Classificazione dei componenti di Grasshopper in base al colore e spiegazione del funzionamento di dati in input e output

⁶⁷: <https://www.grasshopper3d.com/>

⁶⁸: TEDESCHI A., *Architettura parametrica: introduzione a Grasshopper*, Le Pensur, Brienza, 2010

numerosi *plug-in* presenti sulla piattaforma www.food4rhino.com. Su questo sito sono presenti centinaia di componenti aggiuntivi, in continuo aggiornamento, creati dagli utenti e condivisi con gli altri membri della *community*. I *plug-in* danno la possibilità al progettista di implementare le potenzialità del software sia per la generazione e gestione di forme complesse che per le diverse analisi. Di seguito sono riportati alcuni dei più utilizzati con una breve descrizione delle loro funzionalità.⁶⁹

LUNCHBOX

Con questo *plug-in* è possibile gestire forme matematiche, pannelli e griglie regolari in cui suddividere una superficie; ad esempio per dividere in celle esagonali un'area è necessario solamente definire la superficie di destinazione e il numero di suddivisioni volute, dopodiché il software applicherà la suddivisione richiesta.

WEAVEBIRD

Permette di gestire l'editing delle *mesh*, applicando modifiche, suddivisioni e trasformazioni. Rispetto al *plug-in* precedente opera su una diversa tipologia di elementi: le *mesh*, dall'inglese "rete", ovvero oggetti nello spazio composti da facce, spigoli e vertici.

KANGAROO

Attraverso una simulazione interattiva il progettista ha la possibilità di generare forme dinamiche ottimizzate e valutare le prestazioni dei componenti strutturali associati.

KARAMBA3D

Consente di realizzare l'analisi strutturale di un edificio in un sistema di modellazione parametrica in cui, al variare di alcuni *input*, è possibile quantificare in tempo reale la deformazione in base alla nuova sollecitazione applicata (ottimizzazione strutturale).

GALAPAGOS

Questo *plug-in*, basato su algoritmi evolutivi, consente di raggiungere l'ottimizzazione della forma in base ai parametri stabiliti dal progettista; ad esempio è possibile regolare automaticamente la posizione e l'orientamento dei frangisole su una facciata in base alla radiazione solare incidente.

LADYBUG

Attraverso questo *plug-in* è possibile effettuare analisi ambientali all'interno di Grasshopper grazie all'importazione del file EPW (*Energy Plus Weather*), contenente tutte le informazioni climatiche di una determinata località. Grazie all'elaborazione dei dati è possibile esportare grafici come percorso solare, rosa dei venti e gradi-giorno, umidità relativa, temperatura a bulbo secco e interfacciarsi direttamente con altri programmi di analisi ambientale come EnergyPlus, Radiance, Daysim e OpenStudio.

GECO

Consente al progettista di utilizzare all'interno di Grasshopper il programma Autodesk Ecotect Analysis, con cui è possibile effettuare analisi ambientali e simulare le prestazioni energetiche dell'edificio nelle varie fasi progettuali, in modo da migliorarne l'efficienza.

⁶⁹: <https://www.food4rhino.com/>

02 DAL PARAMETRICISMO ALL'ARCHITETTURA RESPONSIVA



2.1 UN'ARCHITETTURA "IN MOVIMENTO"

«L'architettura responsiva è il prodotto naturale dell'integrazione di potenza di calcolo negli spazi costruiti e nelle strutture, così da ottenere edifici più performanti e più razionali»

Nicholas Negroponte

Con il termine architettura responsiva fa riferimento ad un sistema in grado di modificare la propria forma in risposta agli stimoli provenienti dall'ambiente in cui è inserita. Il movimento dei componenti che costituiscono questo tipo di superficie variano in base alla sollecitazione ricevuta; infatti il dinamismo è dato dall'interazione tra i sensori e lo stimolo esterno recepito. L'obiettivo di queste tecnologie è il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici e il rispetto dei requisiti di comfort interno attraverso il movimento dell'intero edificio o di alcune parti. Nonostante le persone siano impegnate quotidianamente, anche con un piccolo contributo, sul fronte della sostenibilità il metodo progettuale non è cambiato; infatti gli edifici convenzionali sono strutture statiche che devono adattarsi alle condizioni climatiche esterne, che sono invece variabili. Questo comporta un distacco tra la struttura e l'ambiente in cui è inserita, che deve essere modificato se si vuole raggiungere un'elevata efficienza energetica.

Gli involucri responsivi sono in grado di rispondere al meglio a questa

Figura 28 (pagine precedenti):
One Ocean Pavilion
progettato dallo studio Soma
Architects

esigenza, grazie all'adattabilità dei componenti al variare delle condizioni climatiche esterne, alla leggerezza degli elementi costruttivi e alla versatilità dei sistemi elettronici; infatti possono essere utilizzati attivamente nel processo di trasferimento e immagazzinamento di luce, calore, aria ed acqua, essendo impiegati per svolgere alcune funzioni di controllo dell'edificio, come riscaldamento, raffrescamento, illuminazione e ventilazione. Gli elementi dinamici possono svolgere questo compito, adattandosi a quello che si verifica all'esterno con una relazione causa-effetto, tra i fenomeni climatici esterni (causa) e le ricadute sulla prestazione energetica complessiva (effetto).⁷⁰

Nonostante la sua origine arcaica è con la nascita dell'industria elettronica e la conseguente diffusione dell'informatica in diversi settori, tra cui quello delle costruzioni, che l'approccio responsivo ha avuto la sua massima applicazione. Grazie agli studi sulla domotica e allo sviluppo di elaborati sistemi di controllo utilizzati all'interno degli edifici è oggi possibile realizzare architetture dinamiche, basate su meccanismi di interazione tra i componenti edilizi e l'ambiente. Queste tecnologie hanno introdotto il tema della flessibilità in architettura, con una duplice valenza: estrinseca ed intrinseca. La prima è legata all'utilizzo del componente responsivo e fa riferimento al rapporto tra l'edificio e l'ambiente esterno; mentre la seconda si basa sulla relazione tra l'edificio e il suo fruitore. L'architettura responsiva attualmente rappresenta una minima parte del panorama contemporaneo, ma è stata utilizzata da progettisti di rilievo come Santiago Calatrava, Thomas Herzog, Jean Nouvel e Herzog & de Meuron.⁷¹

Questo tipo di metodologia progettuale, riprendendo i principi dell'architettura parametrica, si serve di algoritmi generativi per stabilire la relazione tra i componenti e non per produrre direttamente le forme geometriche. Il risultato finale non dipenderà più dalle dirette operazioni del designer ma verrà generato in funzione di parametri ambientali che si basano su precisi requisiti energetici. I fattori che influenzano

70: PERINO M., *State of the art review*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings* (Annex 44), Università di Aalborg (Danimarca), 2008

71: MUSACCHIO A., *Architetture cinetiche*, Maggioli Editore, Milano, 2009

il comportamento di un'architettura responsiva prendono il nome di agenti e possono essere, oltre ai fattori ambientali già citati, gli utenti e i componenti stessi che caratterizzano gli edifici. Questi ultimi devono essere progettati con il minor consumo di materiale possibile in modo da facilitare la qualità del movimento, gestito attraverso sensori sulla facciata.⁷²

Gli elementi responsivi di involucro possono essere divisi in due macro-categorie: facciate dinamiche e PCM.

Le facciate dinamiche, che si oppongono al concetto di immobilità che caratterizza gli edifici, hanno la possibilità di muoversi per ottenere la miglior conformazione possibile, e dunque generare la migliore soluzione in funzione delle condizioni ambientali.

I PCM (*Phase Change Material*) sono materiali che, raggiunta la temperatura di fusione, hanno la capacità di cambiare fase, solitamente passando da quella liquida e quella solida e viceversa. Possono essere usati come rivestimento di una facciata e, grazie alla loro dinamicità e adattabilità, modificano la propria conformazione in base alla temperatura esterna per garantire le condizioni di comfort in ambiente. Nonostante alcune differenze formali, legate alle funzioni che devono svolgere, i componenti edilizi responsivi posseggono alcune caratteristiche comuni che li contraddistinguono:⁷³

- adattabilità: è la caratteristica più importante, fondamentale per reagire alle sollecitazioni ambientali e adattarsi al clima esterno nel miglior modo possibile

- dinamicità: è la proprietà che rende un componente edilizio adattabile, per variare nel tempo e modificare la sua configurazione deve essere dinamico

- multifunzionalità: solitamente i componenti edilizi responsivi hanno

la possibilità di svolgere diverse funzioni, dal momento che hanno la capacità di adattarsi a condizioni climatiche variabili (comportamento diverso tra periodo di riscaldamento e raffrescamento)

- interoperabilità: per consentire il corretto funzionamento dei componenti edilizi responsivi è necessario che siano collegati ad un centro di controllo attraverso una programmazione adatta all'utilizzo richiesto

Attualmente le sperimentazioni su questo tipo di tecnologie vengono fatte dalle università, in cui si uniscono le differenti competenze di docenti e ricercatori con gli strumenti necessari per analizzare adeguatamente un campo ancora in esplorazione. Nonostante ciò i primi esempi di dinamismo in architettura, e talvolta di applicazione dei principi di responsività all'interno dei progetti, risale ad alcuni anni fa la sperimentazione in questo campo è aumentata notevolmente nell'ultimo periodo, grazie alla maggiore consapevolezza in merito ai consumi energetici degli edifici e al rapido sviluppo delle tecnologie informatiche.

72: KOLAREVIC B., PARLAC V., *Building Dynamics: Exploring Architecture of Change*, Routledge, Londra, 2015

73: PERINO M., *Responsive building elements*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings* (Annex 44), Università di Aalborg (Danimarca), 2008

Evoluzione storica

Il concetto di architettura responsiva è stato introdotto da Nicholas Negroponte, architetto greco-americano fondatore del Media Lab del MIT, alla fine degli anni Sessanta. Non vi è una definizione univoca del termine, ma tutti gli scienziati che hanno compiuto delle ricerche sull'argomento hanno concordato sul fatto che derivi direttamente dalla corrente parametricista, dal momento che anche in questa disciplina il risultato finale è condizionato da parametri che possono variare. La possibilità di creare manufatti in grado di mutare in base agli *input* che ricevono, legato agli occupanti o all'ambiente circostante, porta ad un cambiamento nel modo di intendere l'architettura: non più come una materia statica, ma dinamica e adattiva. Negroponte è stato uno dei primi ad utilizzare la cibernetica in campo architettonico, sviluppando sistemi computerizzati per adattare gli edifici alle esigenze degli utenti. L'obiettivo della sua ricerca era di realizzare involucri che potessero variare in base alle mutevoli condizioni esterne, legate agli agenti atmosferici e alla presenza di luce naturale, aprendosi e chiudendosi per garantire le migliori condizioni all'interno.

Nonostante ciò il concetto di dinamismo negli edifici risale a diversi secoli prima, infatti già nell'antica Roma si era diffuso il dinamismo applicato ad una costruzione. Un esempio è il "velarium" dell'Anfiteatro Flavio, ovvero il sistema di tendaggi mobili utilizzato per ripararsi dal sole o dalle intemperie, che poteva essere usato come copertura solo in caso di necessità. Queste chiusure dinamiche hanno diverse analogie con le tecniche utilizzate nel settore navale: i teli sono di canapa, vengono issati da funi, sorretti da aste di legno e gli anelli di movimento materiale ferroso.⁷⁴

Queste tecniche sono alla base degli esperimenti di Frei Otto negli anni Sessanta in cui, grazie alle sue numerose prove con le tensostrutture,

esplorava i concetti di leggerezza, adattabilità e dinamicità dell'architettura. Otto ricercava un'architettura minimale altamente performante, tramite nuovi strumenti di calcolo, al fine di realizzare edifici mobili e adattabili basati su forme naturali. Soluzioni analoghe vengono applicate ancora oggi per realizzare le coperture di strutture sportive o padiglioni espositivi, utilizzando nuovi materiali e soluzioni innovative sempre più leggere.

Il primo esempio di edificio interamente responsivo risale agli anni Trenta, quando l'ingegner Angelo Invernizzi e l'architetto Ettore Fagioli realizzano Villa Girasole. L'abitazione si trova a Marcellise, nei pressi di Verona, e può ruotare su stessa adattando il suo orientamento in base all'andamento del sole. L'unica parte fissa è quella centrale, in cui sono presenti i collegamenti verticali, mentre la restante porzione di edificio può muoversi attraverso dei rulli, rispondendo ai principi di adattabilità in funzione dei parametri ambientali propri dell'architettura responsiva.⁷⁵ Questo sistema prevedeva una variazione "manuale" dei componenti edilizi, che non erano gestiti da un meccanismo automatizzato. Il primo edificio in grado di auto-regolarsi attraverso apparecchi elettronici è stato realizzato solamente alla fine degli anni Ottanta, quando il costo dei processori e componenti elettronici si è ridotto a tal punto da poter essere impiegato per opere architettoniche di grandi dimensioni; è il caso dell'Istituto del Mondo Arabo di Parigi, centro culturale ad opera di Jean Nouvel. La facciata sud dell'edificio è caratterizzata da una schermatura che riprende forme le tradizionali dell'architettura araba e ha la possibilità di aprirsi e chiudersi ogni ora, regolando la quantità di luce entrante in ambiente. Questo sistema, il cui movimento è ispirato agli otturatori degli apparecchi fotografici, è il primo esempio di facciata dinamica che varia la sua conformazione in funzione della quantità di luce incidente, dunque responsiva.⁷⁶

La radiazione solare viene filtrata dall'involucro dinamico in modo direttamente proporzionale rispetto a quella proveniente dall'esterno: i

74: MUSACCHIO A., *Architetture cinetiche*, Maggioli Editore, Milano, 2009

75: BOZZOLA E., *Edifici che ruotano per seguire il sole: tre esempi storici*, 6 febbraio 2013, in <https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/edifici-ruotano-sole-esempi-175/>

76: WINSTANLEY T., *AD Classics: Institut du Monde Arabe / Enrique Jan + Jean Nouvel + Architecture-Studio*, 2011, in <https://www.archdaily.com/162101/ad-classics-institut-du-monde-arabe-jean-nouvel/>



sensori collocati sul lato esterno della facciata rilevano quantità di luce in ogni punto e regola in automatico l'apertura e la chiusura dei diaframmi, garantendo una condizione ottimale di illuminazione in tutti gli ambienti in ogni periodo dell'anno.⁷⁷

A partire dagli anni Novanta sono state effettuate numerose sperimentazioni su questo tipo di sistemi costruttivi, volte a garantire un aumento delle prestazioni dell'edificio oltre ad una particolare composizione formale. L'idea di realizzare involucri aggiuntivi, come una nuova "pelle", sta diventando una soluzione sempre più efficace per rispondere alle elevate necessità di comfort ed efficienza energetica. Tra gli esempi più significativi vi sono le Al Bahar Towers di Abu Dhabi, caratterizzate da una schermatura mobile composta da celle esagonali che si aprono e si chiudono in funzione della quantità di luce che devono far entrare in ambiente. Mentre in occasione dell'Expo del 2012 lo studio Soma ha realizzato la facciata Padiglione della Corea del Sud con delle lamelle in grado di ruotare individualmente, in modo da regolare la dissipazione del calore e l'ingresso della luce, oltre a consentire la ventilazione naturale.⁷⁸

Anche se il progetto di abitazione che interpreta al meglio l'architettura responsiva è il prototipo D* Haus, un'abitazione dinamica in grado di cambiare la sua conformazione in base al variare dell'orario del giorno, dei mesi e delle condizioni atmosferiche. L'abitazione, progettata dagli architetti David Ben Grünberg e Daniel Woolfson, oltre a ruotare in base ai movimenti del sole è formata da quattro moduli che possono comporre diverse combinazioni. La flessibilità dello spazio relazionata alle condizioni climatiche esterne permette di generare la soluzione migliore, cambiando la forma dell'edificio per rispondere agli *input* ambientali imitando il comportamento della natura. Ad esempio in inverno la casa è compatta, con poche aperture una minore superficie disperdente. Invece d'estate le parti che la compongono si muovono aprendosi verso l'esterno, come un fiore, e permette di sfruttare al massimo l'aria e la luce

Figura 29 (pagina precedente, in alto): Fotografia esterna di Villa Girasole a Marcellise

Figura 30 (pagina precedente, in basso): Vista renderizzata di D* Haus in cui sono evidenti i differenti volumi che costituiscono l'edificio e hanno la possibilità di ruotare

77: MUSACCHIO A., *Architetture cinetiche*, Maggioli Editore, Milano, 2009

78: LATINI F., *Facciate dinamiche: l'architettura diventa viva*, 29 gennaio 2015, in <https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/innovativi/facciate-dinamiche-215/>



naturale.⁷⁹

Nel futuro potrebbero essere gli interi a edifici a cambiare la loro posizione e conformazione al fine di ricercare la soluzione ottimale, non più solamente le facciate. Un esempio è la Suite Volland, realizzata nel 2001 a Curitiba (Brasile) dall'architetto Bruno de Franco, e considerata la prima costruzione rotante mai realizzata. La torre è alta più di cinquanta metri, per un totale di 11 piani, ed è costituita da una struttura portante in calcestruzzo armato. Ogni piano può ruotare su stesso sia in senso orario che antiorario, portando a termine un giro completo in un'ora. Lo stesso concetto è stato ripreso dall'architetto David Fisher per il progetto, mai realizzato, della Dynamic Tower: un grattacielo di ottanta piani in cui ognuno è realizzato in modo da poter ruotare su stesso.⁸⁰

Figura 31 (pagina precedente, a sinistra): Fotografia esterna di Suite Volland a Curitiba

Figura 32 (pagina precedente, a destra): Vista renderizzata della Dynamic Tower di David Fisher in una delle sue differenti configurazioni

79: <https://www.thedhaus.com/>

80: BOZZOLA E., *Edifici che ruotano per seguire il sole: tre esempi storici*, 6 febbraio 2013, in

<https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/edifici-ruotano-sole-esempi-175/>

Verso la massima efficienza energetica

L'architettura responsiva può essere considerata una branca dell'architettura parametrica incentrata sullo studio dell'efficienza energetica in edilizia; infatti è possibile adattare la geometria del manufatto in funzione delle variabili fisico-tecniche legate al contesto in cui viene inserito. Grazie a questo approccio è possibile compiere una progettazione dinamica, generando, al variare delle condizioni al contorno, la migliore soluzione possibile attraverso una continua modifica della forma dell'edificio. Lo sviluppo di un modello basato sulle condizioni ambientali esterne permette di ridurre le situazioni di discomfort generate dalla variabilità dei fattori climatici.

Configurare un elemento architettonico in base alle forze che agiscono su di esso è riconducibile ai principi di adattamento ed evoluzione teorizzati da Darwin, declinati nel settore dell'edilizia come emulazione del comportamento della natura da parte dell'involucro. Questo si traduce in un edificio estremamente complesso tecnologicamente, ma caratterizzato da prestazioni energetiche elevate, seguendo i principi del progetto sostenibile e della riduzione dell'inquinamento.

Questa disciplina prende il nome di biomimetica e rappresenta una corrente alternativa per ricercare la massima efficienza energetica attraverso l'adattabilità dell'involucro edilizio. Il termine deriva dal greco ed è dato dall'unione delle parole *bios*, che significa vita, e *mimesi*, nel senso di imitare e si pone l'obiettivo di risolvere problemi complessi sfruttando ingegnosi modelli derivati dal mondo naturale. Non vuole essere una riproposizione dei modelli biomorfici in architettura, ma è utile come strumento di analisi delle strategie con cui vengono risolti i problemi vengono risolti in natura, in modo poterli applicare come ispirazioni di design. La biomimetica dunque prende ispirazione da un mondo che è in continua evoluzione da milioni di anni e ha avuto modo

di sperimentare le forme più adatte in funzione delle diverse condizioni climatiche in cui venivano collocate. Attualmente i sistemi su cui si basa maggiormente la ricerca riguarda le piante, per via della loro capacità di crescita naturale e di risposta alle sollecitazioni esterne. Un edificio che si ispira ad un albero non deve avere la capacità di muoversi, ma la devono avere le diverse parti che lo costituiscono, in modo da adattarsi alle variazioni climatiche esterne e fornire riparo dagli agenti atmosferici, come se fossero petali di un fiore.

Gli elementi di involucro responsivi consentono di sfruttare al massimo gli apporti gratuiti per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici, così da integrarli all'interno del processo naturale e ridurre l'impatto ambientale. Perseguendo la strada dello sviluppo sostenibile diventa necessario superare le metodologie produttive considerate obsolete, che possono essere eccessivamente dannose per l'ecosistema e poco duttili dal punto di vista prestazionale. La ricerca dunque dovrebbe basarsi su due aspetti fondamentali: ottimizzare la quantità di materiale utilizzato, grazie allo sviluppo e alla diffusione di nuovi software che permettono di controllare forme complesse, e garantire la flessibilità delle parti che compongono l'edificio, creando un prodotto dinamico in grado di adattarsi a diverse funzioni o delle condizioni ambientali, evitando componenti statici destinati a diventare prematuramente obsoleti.⁸¹

L'edificio dunque assume una conformazione che gli permette di adattarsi al meglio agli stimoli che riceve attraverso gli elementi responsivi, che sono parte dell'involucro e possono modificare le proprie caratteristiche (termiche, fisiche o chimiche) in base alle condizioni esterne per garantire una condizione di comfort adeguata all'interno.⁸²

La risposta alla variazione dei fattori ambientali può essere assimilata dall'edificio attraverso i principi di robustezza e flessibilità, in base alla sua capacità di gestire il cambiamento. Ad esempio un sistema statico e non flessibile non ha la possibilità di variare la sua configurazione in funzione delle condizioni esterne, così si introduce una maggiore robustezza,

81: DISTEFANO D., RODONO' G., SAPIENZA V., *Cinematismi e superfici pieghevoli in architettura*, 27 ottobre 2016, in <https://www.ilprogettosostenibile.it/2016/10/27/cinematismi-e-superfici-pieghevoli-in-architettura/>

82: KOLAREVIC B., *Architecture in the digital age*, Taylor & Francis, New York, 2005

sovradimensionando gli elementi di involucro e aumentando le loro proprietà isolanti. Questo metodo ha l'obiettivo di ridurre le conseguenze negative dovute alle variazioni climatiche esterne, senza però eliminarne le cause. Invece i sistemi dinamici, come gli elementi responsivi, effettuano transizioni nel tempo per soddisfare le variabili circostanze e far fronte all'incertezza. Questo è reso della flessibilità, che permette una facile modifica della configurazione dei componenti dell'involucro e l'assenza di elementi rigidi e statici. Mentre i progetti robusti cercano di vanificare l'impatto delle variazioni esterne, quelli flessibili sfruttano i cambiamenti reagendo e anticipandone le conseguenze, al fine di ottenere i risultati più elevati in termini di comfort interno.⁸³

L'architettura responsiva diventa lo strumento più efficace per soddisfare i requisiti ambientali sfruttando la dinamicità dei suoi componenti; infatti l'unico modo in cui un edificio può massimizzare le sue prestazioni ed essere energeticamente efficiente è adattarsi al clima esterno nei diversi periodi dell'anno, modificandosi in base alle sollecitazioni che riceve. Il concetto di adattabilità dell'involucro esterno richiama il comportamento umano, che varia il suo abbigliamento in modo da adattarsi alle temperature esterne e garantire il benessere personale. I componenti responsivi applicano questi principi in campo architettonico, trasformando in adattabile un manufatto abitualmente statico, immutabile e consolidato. Dunque cambia il paragone con il corpo umano: non è più l'uomo che cambia gli indumenti in funzione del tempo, ma sono questi che cambiano automaticamente, in base alla variazione esterne, al fine di mantenere inalterata la temperatura interna.⁸⁴

I fenomeni naturali possono essere ciclici o accidentali e, anche se entrambi possono essere sfruttati ai fini del risparmio energetico, necessitano di metodologie di intervento differenti. Gli aspetti ciclici riguardano l'alternarsi delle stagioni e il susseguirsi del giorno e della notte e possono portare a determinate configurazioni architettoniche, in modo da ottimizzare l'efficienza energetica attraverso le istruzioni

provenienti da una centralina elettronica; questo permette di coordinare i movimenti dei componenti dell'edificio in funzione dei flussi energetici incidenti. Invece per soddisfare al meglio la variazione dei fattori naturali accidentali, ad esempio agenti atmosferici, è necessario integrare il sistema di controllo del benessere climatico dell'edificio: implementando i modelli di funzionamento della centralina elettronica con un'evoluta sensoristica che permette di rilevare le variazioni ambientali in modo dettagliato. Dunque la gestione dei flussi di energia tra interno ed esterno deve essere supportata da un impianto di controllo regolato da sensori, che permette all'involucro dell'edificio di muoversi in modo automatizzato.⁸⁵

L'evoluzione informatica ha portato alla creazione di tecnologie sempre più piccole ed efficienti che, unite a materiali leggeri e performanti, permettono agli edifici di reagire in modo efficace all'ambiente in cui sono inseriti e trarne beneficio. Nonostante un guadagno prestazionale derivato dallo sfruttamento delle risorse climatiche non è possibile considerare gli involucri responsivi dei sistemi tecnologici interamente sostenibili, soprattutto sotto l'aspetto del consumo di energia.

Lo sviluppo di questo tipo di dispositivi comporta inevitabilmente un maggiore costo di produzione, legato alla realizzazione e alla manutenzione dei sistemi dinamici, oltre all'assunzione di un fattore di rischio maggiormente elevato: la realizzazione dei componenti dinamici deve prevedere una fase preliminare di prototipazione tramite test e collaudi, necessari per sperimentare l'effettivo comportamento del sistema. Questa procedura di simulazione può costituire una spesa eccessiva, che finisce per rendere attuabili questo tipo di applicazioni solamente in opere molto importanti con il supporto di imprese altamente specializzate.⁸⁶

Il costo elevato dei dispositivi mobili, in relazione alle incognite legate alla gestione a lungo termine dei sistemi di questo tipo, li rende applicabili solamente in circostanze particolari, o quando si vuole avere

83: COSTOLA D., HENSEN J.L., LOONEN R., TRCKA M., *Climate adaptive building shells: State of the art and future challenges*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, volume 25, settembre 2013, in <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002670>

84: FOX K., KEMP M., *Interactive Architecture*, Princeton Architectural Press, New York, 2009

85: MUSACCHIO A., *Architetture cinetiche*, Maggioli Editore, Milano, 2009

86: MUSACCHIO A., *Architetture cinetiche*, Maggioli Editore, Milano, 2009

il pieno controllo sul manufatto attraverso un sistema di misurazione ed elaborazione dei dati. Questo impianto è reso funzionante dai sensori, considerate le terminazioni nervose dell'edificio, che hanno la capacità di elaborare le informazioni ambientali e, convogliate in un computer, attivare le strategie di comportamento necessarie.

Esistono diverse tipologie di sensori, distinti in base alla grandezza che rilevano o al loro funzionamento; i più diffusi sono: sensori di luce (fotocellule, fotodiodi), sensori di suono (microfoni, idrofoni), sensori di accelerazione (accelerometri, sensori sismici), sensori di temperatura (termoresistenze, termostati), sensori di temperatura (termoresistenze), sensori di calore (calorimetri), sensori di resistenza elettrica (ohmmetri, multimetri), sensori di corrente elettrica (galvanometri, amperometri), sensori di tensione elettrica (elettroscopi a foglia, voltmetri), sensori di potenza elettrica (wattmetri), sensori di pressione (barometri, altimetri), sensori di movimento (radar, microonde), sensori di orientamento (giroscopi), sensori di distanza (sensori ottici), sensori chimici (celle elettrochimiche). E' per mezzo di questi sistemi che avviene la completa interazione tra l'edificio e l'ambiente e/o il suo fruitore, convalidando il concetto di reattività all'interno dell'architettura dinamica.⁸⁷

Grazie a queste tecnologie diventa possibile concepire un'architettura legata all'ambiente in cui viene collocata e che può variare in funzione di esso. Questo tipo di interazione prende il nome di interattività ambientale e pone in primo piano la salvaguardia delle risorse naturali, cercando di ridurre i consumi e l'inquinamento.

L'architettura responsiva ha avuto una rapida diffusione soprattutto negli ultimi anni, quando si è reso necessario cercare di unire il più possibile la progettazione degli edifici allo sfruttamento delle risorse ambientali presenti in natura. Per rispettare queste prerogative, adattandosi alle condizioni climatiche esterne al fine di mantenere dei requisiti di comfort interno e benessere elevati, è necessario movimentare alcune parti che compongono l'edificio, o addirittura l'edificio stesso. Questo è reso

possibile dai considerevoli sviluppi tecnologici degli ultimi anni, che hanno permesso ai progettisti di servirsi di elementi in grado di produrre energia, come ricettori solari o cellule fotovoltaiche, per la realizzazione dei propri edifici.

Lo sviluppo di queste nuove tecnologie sta portando ad una variazione della ripartizione dei costi nel settore dell'architettura; ad esempio si sta riducendo la quantità di denaro destinata alla struttura in favore di sistemi intelligenti e tecnologie sostenibili da applicare sulle facciate. Questo andamento sta spostando gli investimenti su sistemi di rilevamento e controllo climatico sempre più efficienti, in modo da garantire elevate prestazioni degli edifici in funzione delle condizioni climatiche esterne. Esistono due diverse tipologie di sistemi in grado di adattarsi alle condizioni dell'ambiente esterno: il sistema Datasheet e il sistema Real-Time.

Sistema Datasheet

Questo sistema, basato sull'adattabilità in funzione degli stimoli esterni, permette di regolare il comportamento di un elemento architettonico prevedendo gli avvenimenti, invece che in risposta a loro. Questo tipo di modello funzionale viene programmato manualmente sulla base delle esigenze degli occupanti o delle variazioni dell'ambiente esterno, così che il software possa adattare i dispositivi alle richieste precedentemente stabilite. I database che vengono utilizzati per la gestione di questo sistema sono costituiti da fogli di calcolo in cui sono raccolte le informazioni necessarie al raggiungimento del benessere degli utenti. Dunque questo tipo di meccanismo funziona con dati già in possesso del progettista e non risponde in tempo reale agli stimoli. Un esempio particolarmente diffuso dell'applicazione di questo sistema sono i sistemi di ombreggiamento a frangisole (o brise-soleil), realizzati in base al percorso del sole e sulle coordinate della località in cui si trova l'edificio.

Sistema Real-Time

87: MUSACCHIO A.,
Architetture cinetiche,
Maggioli Editore, Milano,
2009

Il sistema Real-Time si basa sulla massima adattività ambientale da parte dell'edificio in cui viene applicato, in grado di autoregolarsi grazie all'utilizzo di sensori e di cambiare la sua conformazione in funzione delle migliori risultati ottenibile. Gli elementi architettonici non sono più componenti statici ma possono muoversi in funzione delle condizioni al contorno. Questo sistema influisce notevolmente sul processo di progettazione, modificando il ruolo dell'edificio da statico e passivo a dinamico e adattabile in base al contesto. Le variabili che generano il movimento degli elementi costruttivi non sono dati standard raccolti in precedenza, ma registrate in tempo reale e applicate all'edificio in base a livelli soglia definiti dal progettista.

2.2 ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE

Le facciate dinamiche sono una delle tecnologie responsive maggiormente utilizzate in architettura e sono caratterizzate da materiali e tecnologie che hanno la capacità di muoversi e variare nel tempo, reagendo alle variazioni climatiche per garantire le migliori condizioni interne. I fattori che influiscono sulla configurazione degli involucri di questo tipo sono la radiazione solare, le correnti d'aria, le precipitazioni e le variazioni di temperatura, che possono cambiare sia a livello stagionale che durante una sola giornata. La realizzazione di questi sistemi è possibile grazie alle potenzialità dell'informatica e dei mezzi digitali introdotti all'interno del processo progettuale, osservando la natura e i suoi comportamenti ed emulandone i meccanismi di adattamento. Questo processo è studiato in modo da poter svolgere funzioni differenti in base agli ambienti in cui vengono utilizzati, grazie ai sensori che monitorano le condizioni esterne e forniscono in risposta gli impulsi alla schermatura dinamica.

La facciata responsiva, oltre a svolgere un ruolo fondamentale in termini di progresso tecnologico e risparmio energetico, caratterizza l'edificio sotto il profilo estetico, determinando una nuova identità. Questa metodologia potrebbe modificare l'aspetto delle città e la relazione tra edificio e utente, ma anche tra edificio e ambiente. Di seguito vengono riportati e descritti alcuni esempi di tecnologie responsive realizzate negli ultimi anni. Ogni edificio è stato differenziato in base all'ubicazione, al periodo di realizzazione, al progettista, alla tipologia e al funzionamento dell'elemento di involucro responsivo. Le grandi differenze di materiali e tecnologie tra i diversi casi studio evidenziano il forte interesse sperimentale che contraddistingue la ricerca contemporanea.

AL BAHAR TOWERS

LUOGO: Abu Dhabi, Emirati Arabi

PERIODO DI REALIZZAZIONE: 2010 - 2012

PROGETTISTA: Studio Aedas + Arup

TIPOLOGIA: Uffici

FUNZIONAMENTO: Schermatura solare dinamica

Le due torri Al Bahar, di 25 piani ciascuna, sono uno degli esempi più importanti architettura responsiva realizzata su grande scala. Gli edifici, che raggiungono l'altezza di 150 metri, sono caratterizzati da una facciata intelligente, in grado di ottimizzare la radiazione solare incidente. L'obiettivo dei progettisti era la creazione di un'architettura iconica per il territorio, contraddistinta da tecnologie moderne ma tenendo in considerazione le tradizioni locali.

La forma delle torri è stata sviluppata utilizzando software di design parametrico partendo da due forme cilindriche e articolandole in modo da ridurre l'incidenza del sole sulle superfici maggiormente esposte. La particolarità però è il rivestimento della facciata, caratterizzato da una schermatura mobile automatizzata che reagisce al movimento del sole,

Figura 33 (pagina successiva):
Vista esterna delle Al Bahar
Towers con il sistema di
involucro dinamico in primo
piano



Figura 34 (pagina successiva, in alto): Vista esterna delle Al Bahar Towers

Figura 35 (pagina successiva, in basso): Quattro differenti configurazioni dell'involucro responsivo

87: LATINI F., *Facciate dinamiche: l'architettura diventa viva*, 29 gennaio 2015, in <https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/innovativi/facciate-dinamiche-215/>

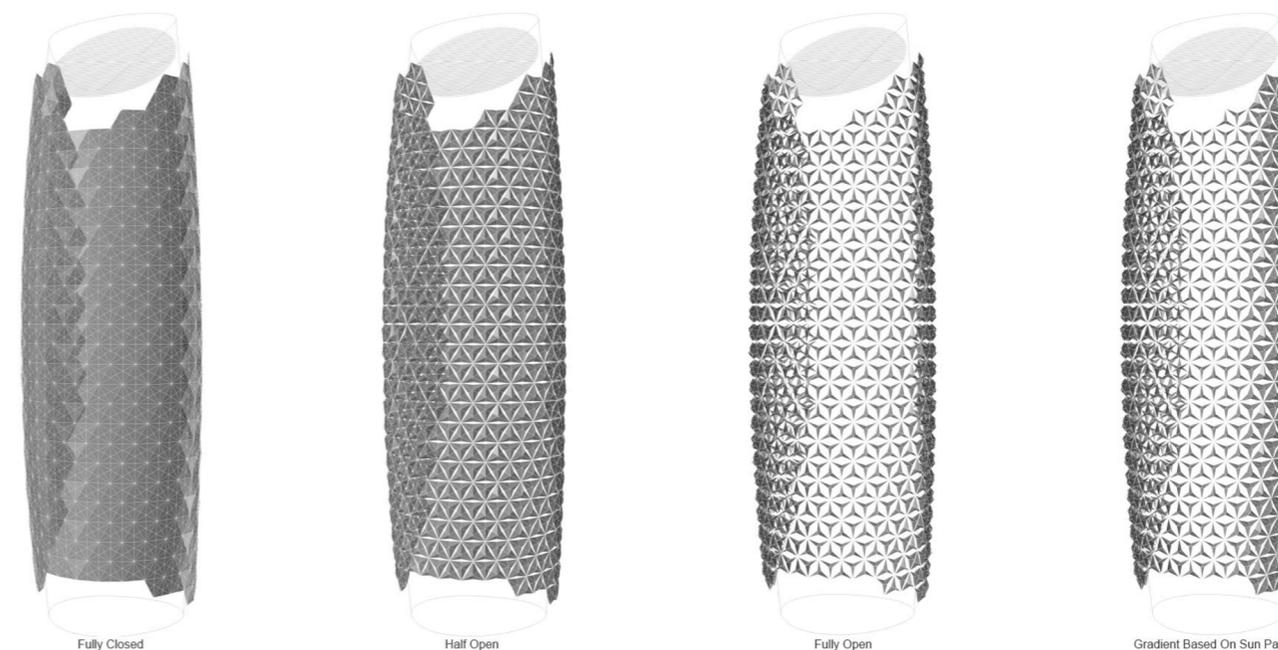
88: CILENTO K., *Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas*, 5 settembre 2012, in <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas/>

89: HOLLOWAY J., *Modernizing the mashrabiya: Smart-skinned Al Bahar Towers near completion*, 7 febbraio 2013, in <https://newatlas.com/al-bahar-towers/26139/>

costituita da una doppia pelle: l'involucro vetrato delle dell'edificio è riparato da un secondo composto da pannelli esagonali apribili, ancorati alla struttura portante attraverso elementi metallici.⁸⁷

Lo sviluppo di un sistema capace di sfruttare al meglio le risorse naturali a disposizione e al tempo stesso mitigarle non è stato un compito facile, soprattutto alle condizioni ambientali degli Emirati Arabi, caratterizzate da un clima tropicale secco con temperature massime estive intorno ai 45 gradi centigradi e da una quasi totale assenza di luce nei mesi invernali. La doppia pelle realizzata dallo Studio Aedas si ispira al concetto di "mashrabiya", particolare grata in legno tipica dell'architettura islamica, utilizzata in passato per garantire la privacy degli occupanti e al contempo ridurre la radiazione solare in ambiente. Le mashrabiya, reinterpretate in chiave moderna, costituiscono l'innovativa facciata delle torri Al Bahar e sono formati da una serie di elementi triangolari in politetrafluoroetilene (PTFE), a sbalzo di circa 3 m dalla struttura principale. I dispositivi in fibra di vetro sono raggruppati in un sistema a ombrello, che si apre e si chiude tramite un software collegato ad un macchinario di rilevazione dell'angolo solare incidente, controllato da un sistema centrale BMS (Building Management System) in grado di gestire tutte le unità individualmente.⁸⁸

L'obiettivo di questo doppia pelle è favorire l'illuminazione naturale cercando di ridurre l'eccessivo surriscaldamento che comporta l'utilizzo dei sistemi di raffrescamento. Inoltre questo sistema di ombreggiatura dinamica consente di evitare il fenomeno dell'abbagliamento e di ottenere una maggiore quantità di luce naturale, garantendo una migliore visibilità e una diminuzione dei consumi di luce naturale. La schermatura ha portato una considerevole riduzione degli apporti solari con conseguente riduzione dei consumi energetici: il 30% in meno rispetto a edifici analoghi esposti alle stesse condizioni ambientali.⁸⁹



ONE OCEAN PAVILLION

LUOGO: Yeosu, Korea del sud

PERIODO DI REALIZZAZIONE: 2008 - 2012

PROGETTISTA: Soma Architects

TIPOLOGIA: Padiglione espositivo

FUNZIONAMENTO: Lamelle elastiche rotanti

Il padiglione progettato da Soma Architects è stato uno dei più rappresentativi dell'Expo del 2012 di Yeosu e ne incarna il tema principale: *"The Living Ocean and Coast"*. Il programma dell'evento è incentrato principalmente sull'uso responsabile delle risorse, oltre che sul legame tra edificio e ambiente, e viene integrato nell'edificio attraverso un progetto un approccio biomimetico per la realizzazione della facciata cinetica. Il padiglione, situato sulla costa dell'oceano, sembra essersi plasmato dall'andamento sinuoso delle onde. E' collocato lungo una nuova via pedonale all'interno dell'area industriale del porto e caratterizzato da una attenta progettazione del paesaggio artificiale circostante, caratterizzato da pianori e sentieri panoramici.⁹⁰

L'andamento dinamico dell'edificio è costituito da superfici continue

Figura 36 (pagina successiva):
Vista esterna dell'ingresso del padiglione

90: SOMA, *One Ocean, Thematic Pavilion EXPO 2012*, 22 maggio 2012, in <https://www.archdaily.com/236979/one-ocean-thematic-pavilion-expo-2012-soma/>



orizzontali e verticali che si integrano tra loro al fine di generare un'architettura continua e armoniosa. All'interno fessure e coni verticali guidano il visitatore durante la visita alla mostra tematica. Le linee di costruzione che separano i pannelli del tetto si trasformano nelle lamelle che costituiscono la facciata cinetica: elemento distintivo dell'edificio in grado di attirare l'attenzione dei visitatori. Questo sistema rappresenta i temi principali dell'Expo: l'uso responsabile delle risorse attraverso il progresso tecnologico intelligente, fondato sui temi di sostenibilità e bioclimatica. L'impianto di facciata all'avanguardia è stato realizzato insieme a Knippers Helbig Advanced Engineering e ha l'obiettivo di regolare la quantità di luce solare entrante in ambiente al fine di ottenere un risparmio energetico, con conseguente riduzione dei consumi e delle emissioni.⁹¹

La facciata dinamica è costituita da 108 lamelle in polimeri rinforzati con fibra di vetro in grado di aprirsi e chiudersi per mezzo di una vite a ricircolo gestita da un servomotore. Un sistema computerizzato permette di sincronizzare gli attuatori e controllare individualmente ogni singola lamella; questo consente di realizzare suggestive coreografie oltre a regolare l'ingresso della luce nell'atrio principale. Il movimento di ogni elemento non è una semplice rotazione, ma una torsione che comporta il piegamento del materiale e consente il controllo della luce senza compromettere la visibilità. La facciata è lunga 180 metri e ha un'altezza che varia tra i 3 e i 13 metri e l'energia necessaria al movimento di ogni pannello deriva dai pannelli fotovoltaici posti in copertura, in modo da ridurre il consumo di energia e incrementare l'efficienza dell'intero edificio. Di notte gli elementi mobili generano effetti geometrici e giochi di luce grazie a barre lineari a LED collocate sul bordo anteriore della lamella.⁹²

Figura 37 (pagina successiva, a sinistra): Tre diverse configurazioni del padiglione in base all'apertura delle lamelle

Figura 38 (pagina successiva, a destra): Particolare della lamella rotante che caratterizza la facciata

91: MAIER F., *One Ocean - Padiglione tematico per EXPO 2012*, 11 maggio 2012, in <https://www.detail-online.com/article/one-ocean-thematic-pavilion-for-expo-2012-16339/>

92: <http://www.soma-architecture.com/>



INSTITUT DU MONDE ARABE

LUOGO: Parigi, Francia

PERIODO DI REALIZZAZIONE: 1981 - 1987

PROGETTISTA: Jean Nouvel

TIPOLOGIA: Edificio polifunzionale

FUNZIONAMENTO: Diaframmi fotosensibili

Uno degli esempi più significativi di architettura responsiva è l'Institut du Monde Arabe di Parigi, realizzato da Jean Nouvel alla fine degli Anni 80. Voluta dal presidente Mitterrand è stato realizzato con lo scopo di migliorare i rapporti diplomatici tra i Paesi Arabi e la Francia. Può essere considerata una sintesi simbolica tra architettura occidentale e orientale, grazie ai numerosi rimandi agli archetipi tradizionali orientali: gli interni, le cornici e i sistemi di modulazione della luce. L'esempio più significativo di questa doppia identità è la facciata meridionale, che reinterpreta alcune delle figure geometriche maggiormente utilizzate nella cultura araba, restituendo però una configurazione contemporanea di diaframmi mobili, simile quelli di una macchina fotografica.⁹³

Il centro è costituito da due volumi di nove e undici piani, che circoscrivono

Figura 39 (pagina successiva):
Prospetto principale dell'Institut
du Monde Arabe

93: <http://www.jeannouvel.com/projets/>



un cortile interno caratterizzato da una pavimentazione che riprende le geometrie della facciata. All'interno sono presenti un museo, una biblioteca, uno spazio espositivo, un auditorium e un atrio vetrato su più piani caratterizzato da ascensori interni a vista.

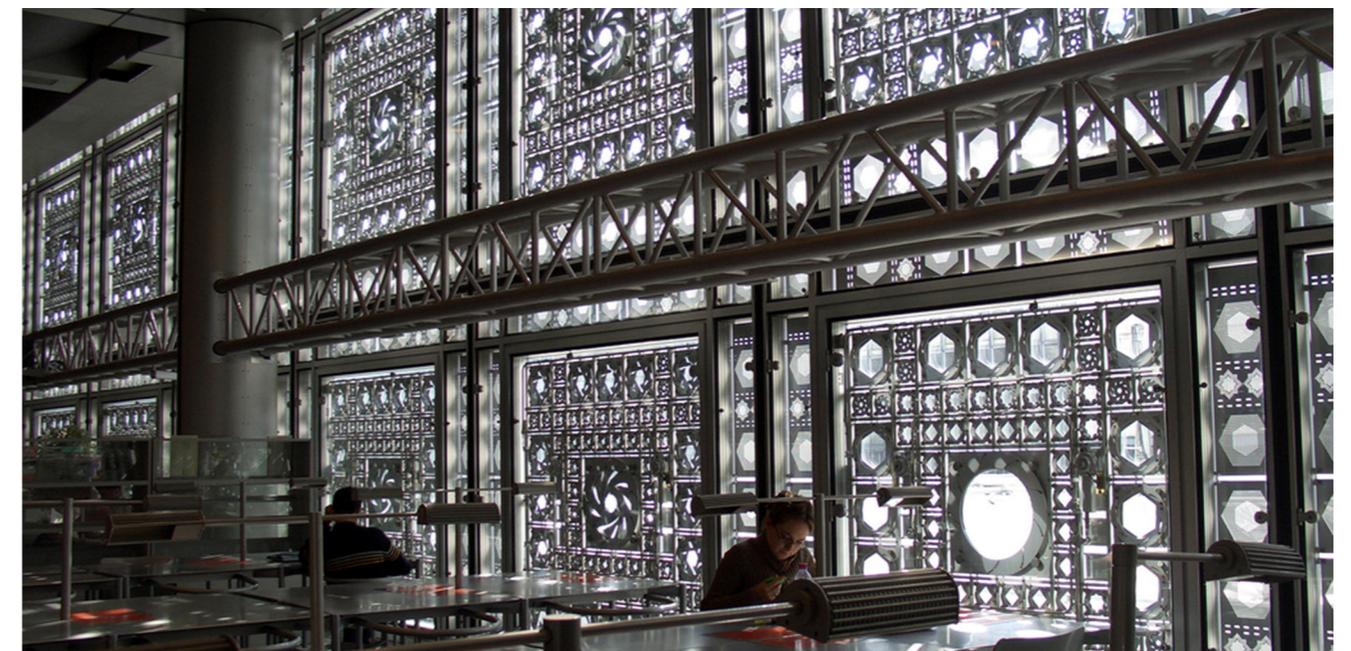
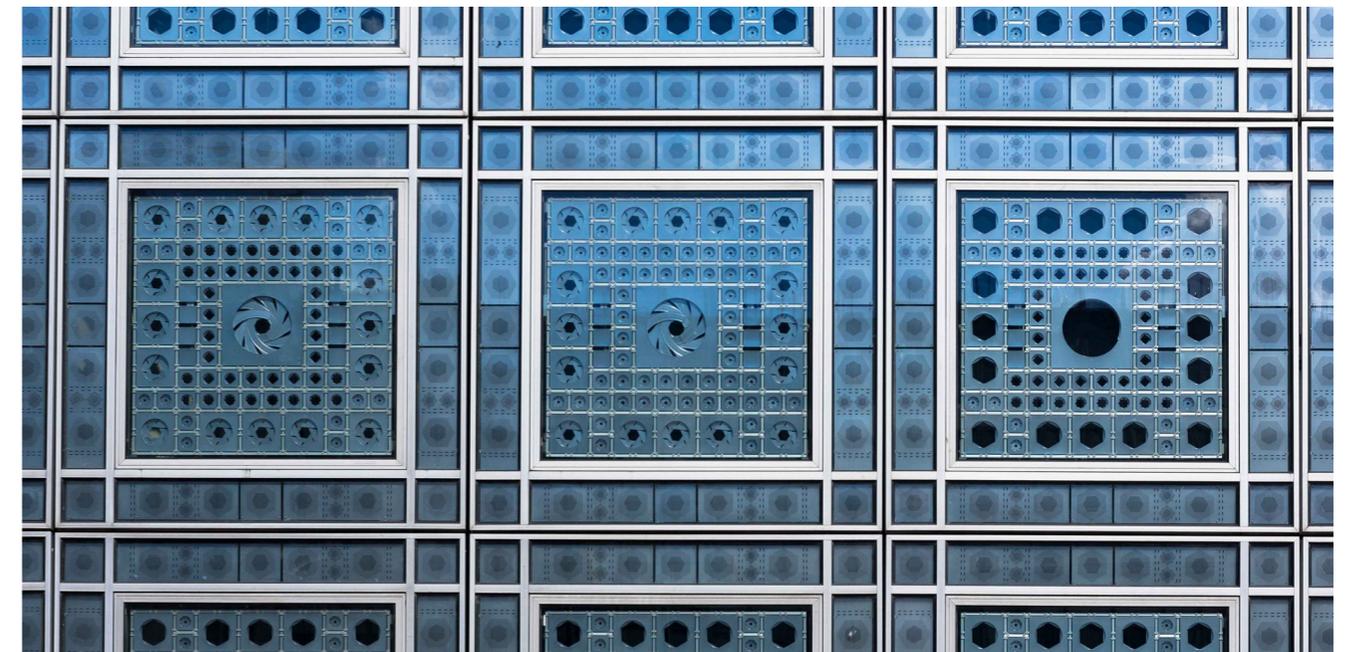
Il prospetto che caratterizza l'edificio è costituito da un complesso sistema di frangisole che richiama le schermature tipiche della tradizione medio-orientale: il *mashrabiyya*. La facciata, lunga circa 60 metri, è costituita da diaframmi fotosensibili che hanno la funzione di regolare la quantità di luce entrante nell'edificio. Durante le diverse fasi di apertura e chiusura dell'obiettivo viene generato un motivo geometrico variabile, composto da cerchi, quadrati e forme ottagonali.

La facciata è costituita da circa 240 pannelli vetrati sui quali sono posti i complessi sistemi di schermatura realizzati mediante diaframmi metallici. Il principio che permette loro di muoversi e funzionare correttamente è lo stesso dei meccanismi fotografici. Questi dispositivi sono efficienti anche sotto il profilo del controllo ambientale; infatti variano la dimensione dei fori in funzione del grado di soleggiamento, mantenendo una quantità di luce costante all'interno. I diaframmi, realizzati insieme allo studio di ingegneria ARUP, possono avere differenti gradi di apertura in relazione alla radiazione luminosa, che viene filtrata dalle cellule fotoelettriche.⁹⁴

Figura 40 (pagina successiva, in alto): Particolare dei diaframmi metallici che caratterizzano la schermatura

Figura 41 (pagina successiva, in basso): Vista interna dell'edificio

94: WINSTANLEY T., *Institut du Monde Arabe / Enrique Jan + Jean Nouvel + Architecture-Studio*, 2 ottobre 2011, in <https://www.archdaily.com/162101/ad-classics-institut-du-monde-arabe-jean-nouvel/>



MEDIA - ICT

LUOGO: Barcellona, Spagna

PERIODO DI REALIZZAZIONE: 2007 - 2010

PROGETTISTA: Enrique Ruiz-Geli + Cloud 9

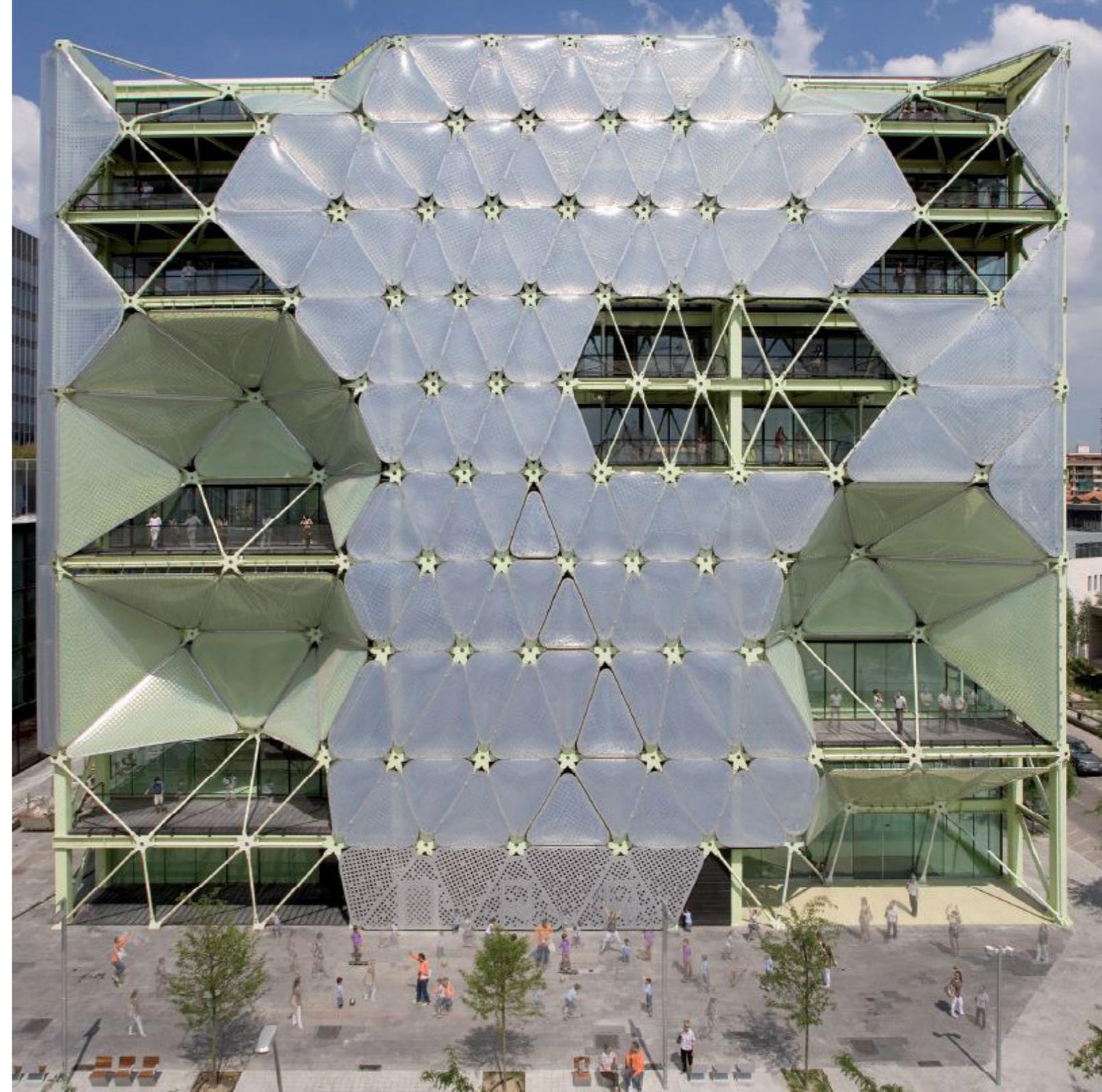
TIPOLOGIA: Uffici

FUNZIONAMENTO: Membrane in ETFE

Il MEDIA-Ict è un parallelepipedo di nove piani più due interrati che ospita al suo interno un centro per le tecnologie ICT (*Information and Communication Technologies*), oltre a ristoranti, negozi, uffici, aree espositive, un auditorium con una capienza di 300 posti a sedere, incubatori e spazi di ricerca legati al settore tecnologico e informatico. L'edificio è caratterizzato da una struttura metallica a forma di cubo rivestita su tre lati da membrane di ETFE (Etilene tetrafluoro-etilene), materiale leggero e trasparente che permette alla luce naturale di trapassarlo, assorbendo inoltre il calore per sfruttarne le potenzialità termiche. Questo sistema di forme gonfiabili e insolite rimanda all'architettura organica di Gaudì, infatti il MEDIA-Ict viene soprannominato "Digital Pedrera" (il soprannome di Casa Milà).⁹⁵

Figura 42 (pagina successiva):
Vista esterna del prospetto
principale del MEDIA-Ict

95: DRAGONE R., *Barcellona: la "Digital Pedrera" firmata Ruiz Geli*, 22 giugno 2007, in <https://www.archiportale.com/news/2007/06/architettura/barcellona-la-digital-pedrera-firmata-ruiz-geli/>



La struttura metallica a telaio, colorata con vernici aero-chimiche di colore verde, è volutamente lasciata ben visibile dall'esterno. I tamponamenti sono realizzati con cuscinetti di ETFE trattati come entità autonome: adottando configurazioni diverse in base alla necessità di protezione dai raggi del sole, caratterizzando l'estetica dell'edificio e la sua funzionalità. Le informazioni ambientali vengono ricevute dai sensori e, attraverso un computer, mandate agli attuatori che regolano il gonfiaggio e sgonfiaggio della membrana. La facciata dunque può subire variazioni, grazie all'insufflaggio di nitrogeno e aria, alterando il proprio volume in base alle sollecitazioni ambientali esterne, con l'obiettivo di ottenere elevati requisiti di comfort indoor.⁹⁶

I cuscinetti vengono gonfiati nei mesi invernali, sfruttando l'isolamento termico della massa d'aria, e sgonfiati nei periodi caldi, quando le elevate temperature di Barcellona devono essere contenute per mantenere un comfort interno adeguato e contenere la spesa energetica.

Le membrane, che si gonfiano in base alle sollecitazioni ambientali ricevute (umidità dell'aria, temperatura e pressione atmosferica), sono di diverse tipologie in base all'orientamento. Ad esempio la facciata principale, esposta a sud-est, è rivestita con cuscinetti in ETFE che ricordano i petali dei fiori e possono schermare fino al 65% dei raggi solari, mentre a sud-ovest, dove si ha il maggior rischio di surriscaldamento, i cuscinetti lineari vengono riempiti con un gas che consente di ridurre del 90% la quantità di radiazione entrante.

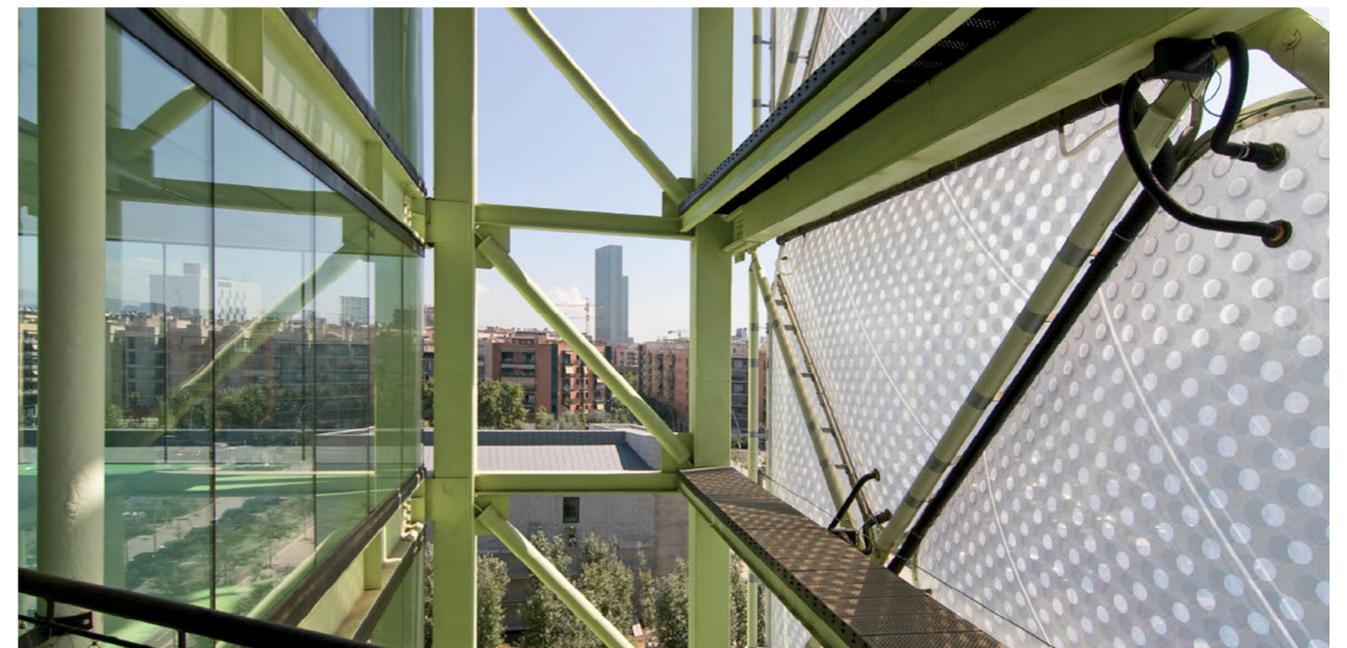
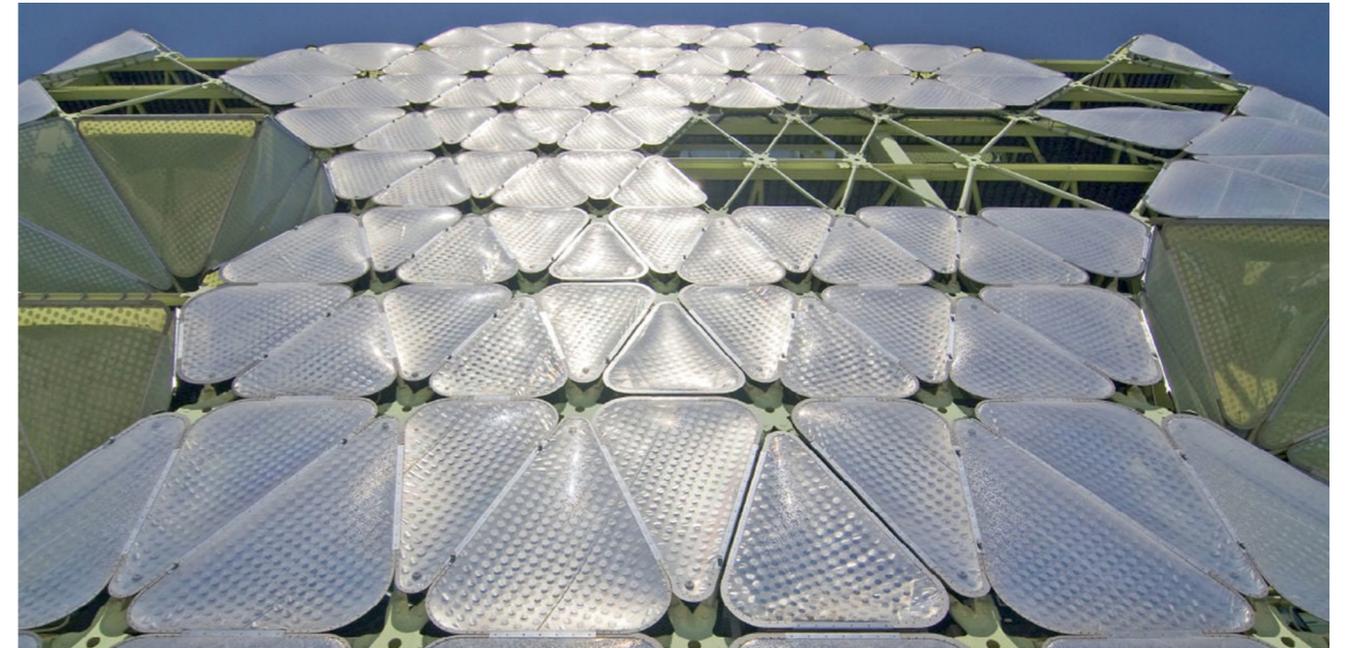
L'utilizzo di queste membrane non è l'unica scelta progettuale legata all'architettura sostenibile: sulla copertura è presente un giardino pensile di 60 metri quadrati, che regola il microclima riducendo l'impatto solare, e una superficie di 140 metri quadrati destinato a impianto solare fotovoltaico. Queste accortezze legate alla gestione sostenibile delle risorse hanno portato ad un risparmio dell'energia del 20% rispetto ad un edificio di riferimento realizzato con tecniche tradizionali. Il progetto ha ottenuto il riconoscimento World's Best Building of the Year nel 2011.⁹⁷

Figura 43 (pagina successiva, in alto): Particolare dei cuscinetti ETFE che caratterizzano la facciata

Figura 44 (pagina successiva, in basso): Particolare dell'intercapedine tra la facciata dell'edificio e la doppia pelle in ETFE

96: ZUNINO M. G., *Barcelona Media-tic*, 4 febbraio 2010, in <https://www.abitare.it/it/architettura/2010/02/04/barcelona/>
NOTA 95

97: DRAGONER., *Barcelona: la "Digital Pedrera" firmata Ruiz Geli*, 22 giugno 2007, in <https://www.archiportale.com/>



HYGRO SKIN

LUOGO: Orleans, Francia

PERIODO DI REALIZZAZIONE: 2011 - 2013

PROGETTISTA: Achim Menges

TIPOLOGIA: Installazione

FUNZIONAMENTO: Listelli di legno meteorosensibili

Il padiglione Hygro Skin si basa su una nuova modalità di architettura responsiva, legata alla capacità di deformazione del materiale stesso senza dover ricorrere a sistemi tecnologici e digitali avanzati; infatti la variazione dimensionale è legata all'igroscopicità del legno. Questa caratteristica permette a un materiale di scambiare (assorbire o cedere) umidità con l'ambiente a seconda della necessità.

Per la realizzazione di questo padiglione sono stati scelti dei pannelli di abete rosso, disposti in modo da sviluppare diverse configurazioni in base alla variazione dei parametri ambientali. Prima di essere realizzato il sistema è stato collaudato e verificato per alcuni anni in laboratorio e in un ambiente esterno adatto. I sottili fogli di materiale ligneo sono stati sviluppati secondo un processo di progettazione computazionale

Figura 45 (pagina successiva):
Vista esterna del padiglione
Hygro Skin



fondato sul loro comportamento elastico e sulla proprietà di generare superfici coniche.⁹⁸

Le aperture reagiscono alle variazioni di umidità comprese in un intervallo tra il 30% e il 90%, ovvero la quantità presente rispettivamente con un tempo soleggiato e piovoso in un clima moderato. La risposta quasi immediata dei pannelli in abete rosso rappresenta la capacità dell'involucro di percepire e reagire ciò che lo circonda al fine di regolare la trasmissione luminosa e la visibilità interna.

Il movimento non è energivoro ma dipende solo dalla proprietà intrinseche del materiale: l'igroscopicità e l'anisotropia, ovvero variabilità delle caratteristiche prestazionali in base alla direzione in cui le si misura. La variazione del quantitativo d'acqua presente al suo interno gli permette di reagire agli stimoli ambientali ricevuti: aprendosi quando è secco e chiudendosi quando è bagnato. Anche l'involucro del padiglione è realizzato computazionalmente flettendo sottili fogli di compensato al fine di creare 28 componenti unici dotati di 1100 pori sensibili all'umidità. La responsività ottenuta senza controlli meccanici estranei può essere definita come architettura meteorosensibile, dal momento in cui la forma generata è totalmente dipendente dall'ambiente esterno.

Figura 46 (pagina successiva, in alto): Due viste esterne del padiglione Hygro Skin in condizioni diverse: con i pannelli aperti e con i pannelli chiusi

Figura 47 (pagina successiva, in basso): Vista interna del padiglione Hygro Skin

98: MENGES A., KRIEG O., REICHERT S., *HygroSkin-Meteorosensitive Pavilion*, 9 settembre 2013, in <https://www.archdaily.com/424911/hygroskin-meteorosensitive-pavilion-achim-menges-architect-in-collaboration-with-oliver-david-krieg-and-steffen-reichert/>



RESONANT CHAMBER

LUOGO: Michigan, USA

PERIODO DI REALIZZAZIONE: 2011 - 2012

PROGETTISTA: RVTR + Arup

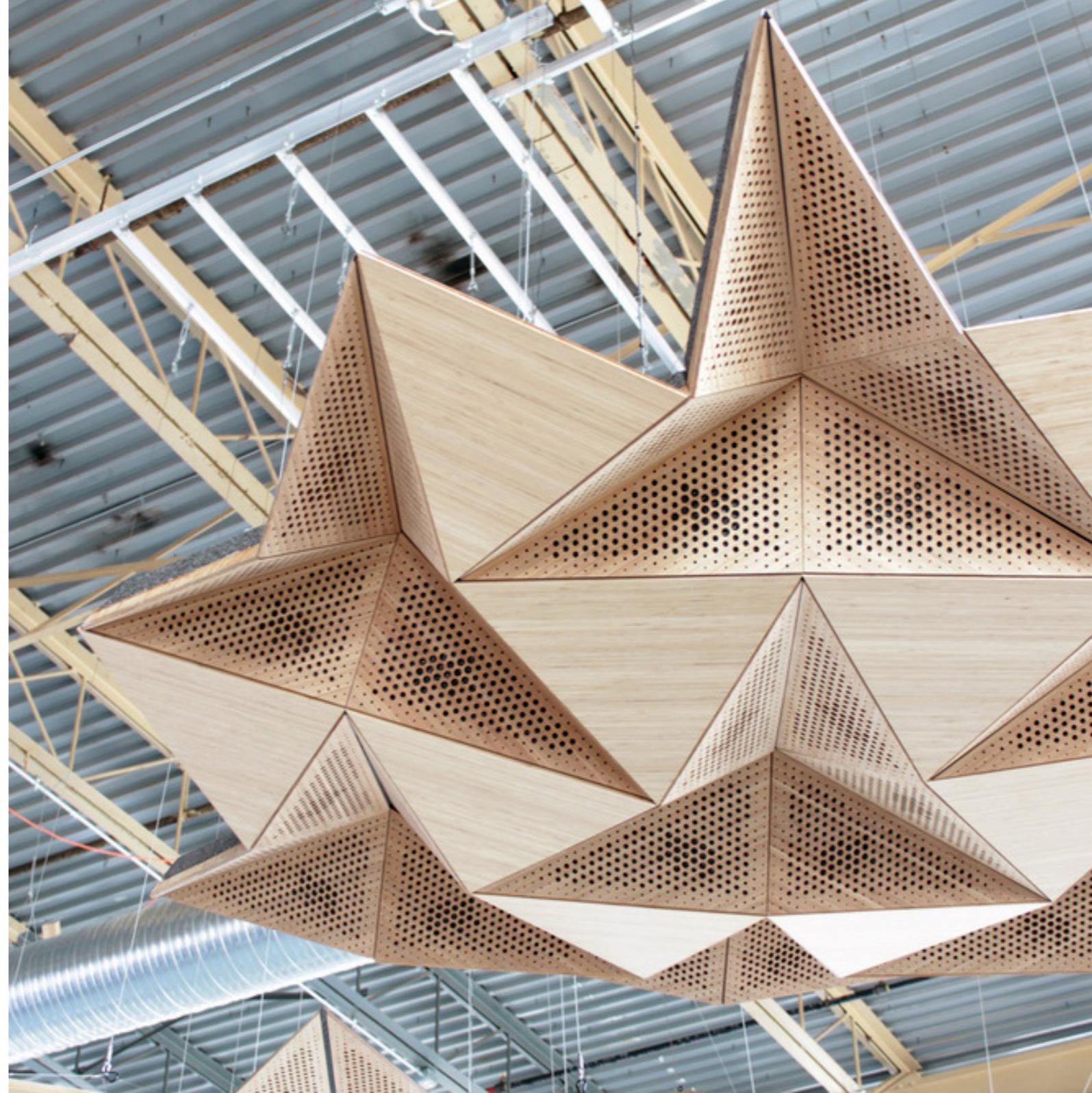
TIPOLOGIA: Installazione

FUNZIONAMENTO: Pannelli sensibili al suono

Resonant Chamber è un'installazione sviluppata dallo studio di designer statunitensi RVTE in collaborazione con ARUP Acoustics. La forma deriva dalla teoria degli origami rigidi e ha la funzione di camera di risonanza responsiva, capace di modificare la sua conformazione al variare delle frequenze acustiche in ambiente. L'installazione consiste in un soffitto modulabile costituito da pannelli in grado di modificare il loro aspetto nascondendo o mostrando la superficie, in modo da influire direttamente sulle condizioni del suono in ambiente.

La realizzazione e le conformazioni geometriche sono state modellate su Kangaroo, *plug-in* di Grasshopper, in grado di simulare la relazione fisica le forze applicate su un oggetto e la sua risposta. Questo tipo di prove ha permesso ai progettisti di realizzare la migliore configurazione dei

Figura 48 (pagina successiva):
Vista esterna dell'installazione
Resonant Chamber



pannelli in relazione ai vincoli di *input* come coefficiente di assorbimento, tempo di riverbero, risposta acustica e amplificazione direzionale.⁹⁹

I pannelli sono costituiti da tre strati con differenti funzioni: uno strato di compensato con inserti in bambù massiccio per riflettere il suono, uno strato in polipropilene espanso poroso per assorbirlo e uno strato elettroacustico in gradi di generarlo. La loro combinazione ottimale è stata sviluppata in collaborazione con ARUP Acoustics attraverso rigorose simulazioni digitali su materiali prototipi di pannelli fisici in scala, al fine di determinare la geometria e il materiale più adatto.

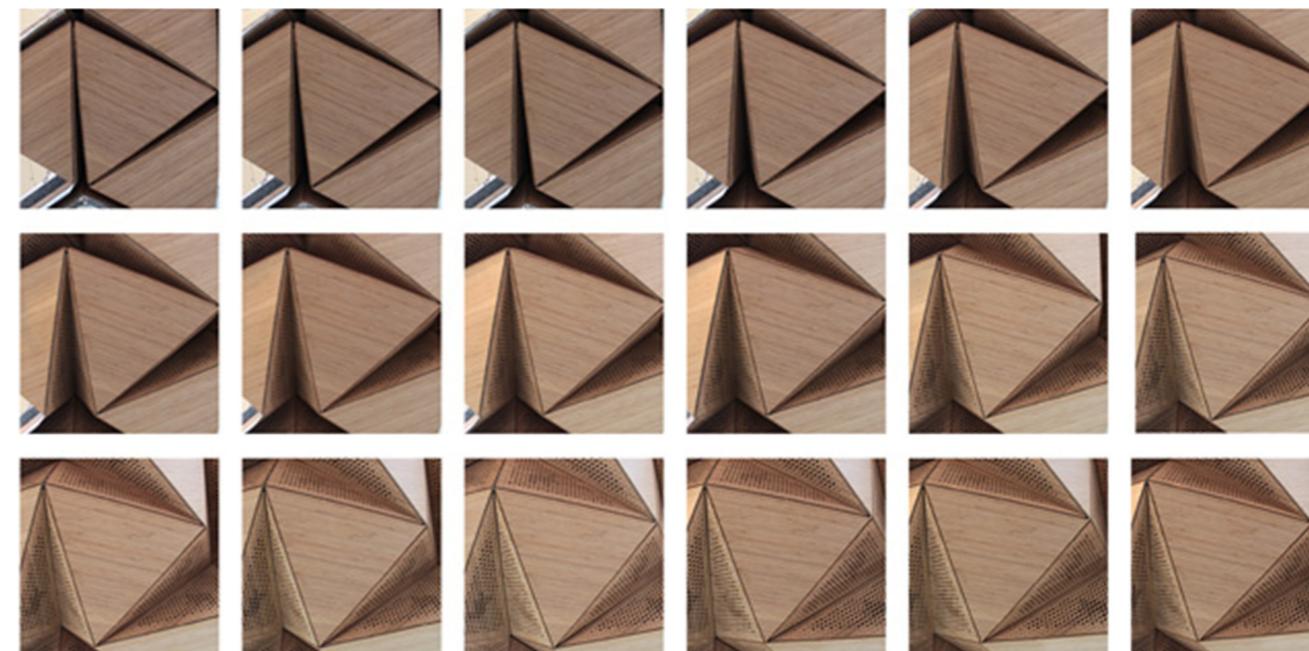
Ogni componente è dotato di un sistema di amplificazione che consente alla musica di essere riprodotta e non solamente riflessa, grazie alle vibrazioni introdotte da un eccitatore elettroacustico. Il pannello elettronico contiene sensori e attuatori per adattarsi agli input che riceve dall'ambiente e adattarsi in tempo reale ai parametri selezionati. I pannelli in polipropilene espanso poroso garantiscono una riduzione del rumore con un coefficiente di 0,85 e garantiscono un adeguato assorbimento acustico in base agli effetti di smorzamento del suono. La soluzione finale, dopo una serie di esperimenti, che garantisce la migliore resa acustica è a forma di "nuvola" divisa in triangoli di diverse dimensioni.¹⁰⁰

Figura 49 (pagina successiva, in alto): Vista esterna dell'installazione Resonant Chamber nelle sue diverse configurazioni

Figura 50 (pagina successiva, in basso): Rappresentazione dell'installazione Resonant Chamber nelle sue diverse fasi di apertura

99: FILIPPETTI J., *RVTR: pannelli acustici architettonici origami a camera di risonanza*, 3 maggio 2012, in <https://www.designboom.com/technology/rvtr-resonant-chamber-origami-architectural-acoustic-panels/>

100: FORUTO A., *Resonant Chamber / RVTR*, 19 aprile 2012, in <https://www.archdaily.com/227233/resonant-chamber-rvtr/>



Q1 BUILDING - THYSSENKRUPP QUARTER

LUOGO: Essen, Germania

PERIODO DI REALIZZAZIONE: 2006 - 2010

PROGETTISTA: JSWD Architekten + Chaix&Morel Associes

TIPOLOGIA: Uffici

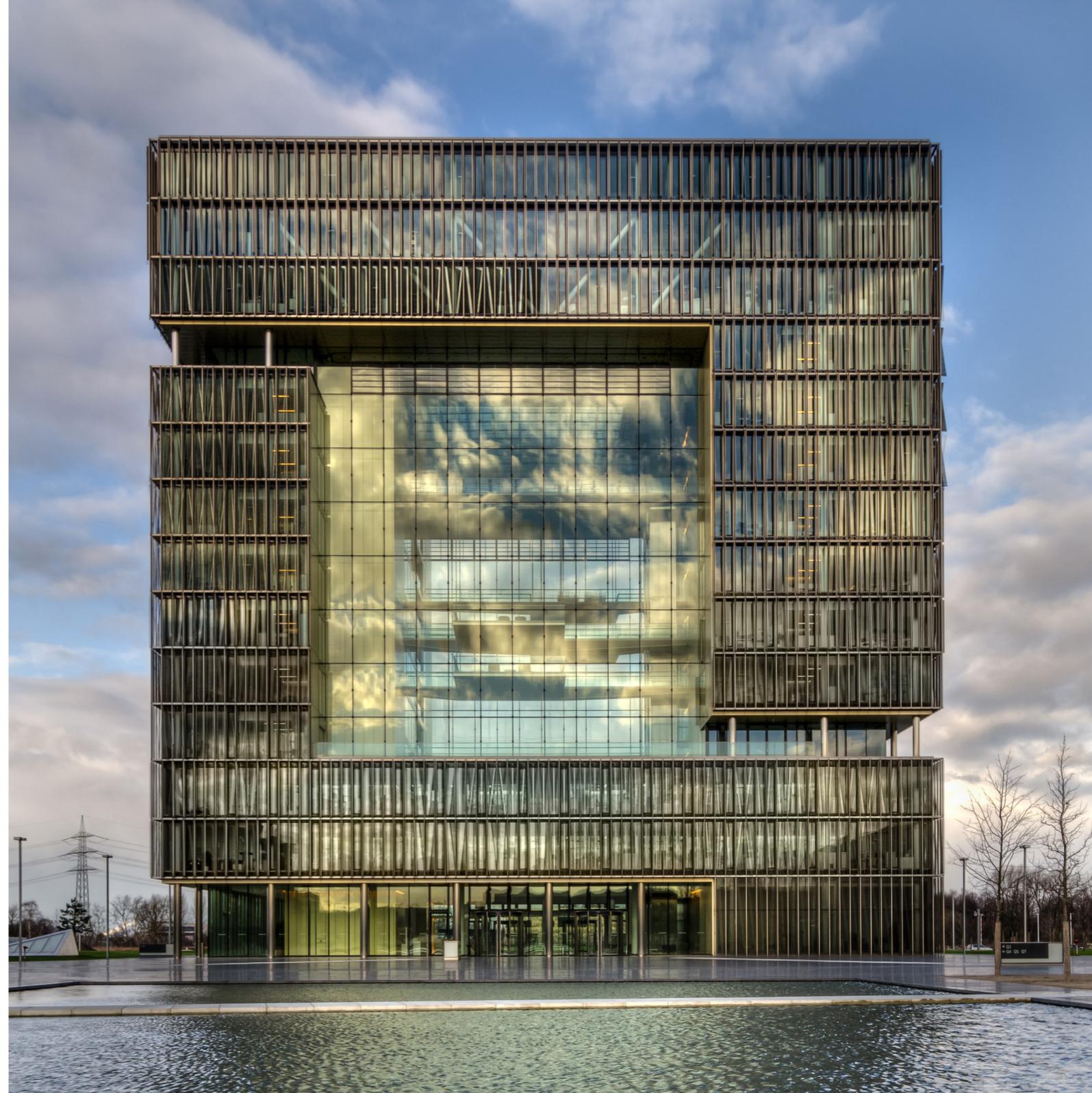
FUNZIONAMENTO: Brise - soleil cinetici

Q1 Building si inserisce all'interno del *masterplan* del quartier generale della sede di Essen della ThyssenKrupp, caratterizzato da diversi edifici collegati tra loro da una rete di percorsi pedonali e ampie aree verdi. Tutte le strutture del campus rispettano rigorosi standard di sostenibilità e sono sprovvisti di sistemi di ventilazione meccanica, sfruttando al massimo gli apporti naturali della zona. L'edificio, al cui interno sono collocate le sedi legali e gli uffici della multinazionale, si presenta come un cubo vetrato di undici piani, plasmato da addizioni e sottrazioni di volumi, con all'interno passerelle e doppie altezze.¹⁰¹

Un sofisticato sistema di schermatura solare dinamica permette di mantenere all'interno del Q1 Building una temperatura controllata nonostante l'assenza di aria condizionata. La doppia pelle è formata

Figura 51 (pagina successiva):
Vista esterna del Q1 Building

101: GERFEN K., *Quartiere ThyssenKrupp*, 6 ottobre 2010, in <https://www.architectmagazine.com/design/buildings/thyssenkrupp-quarter/>



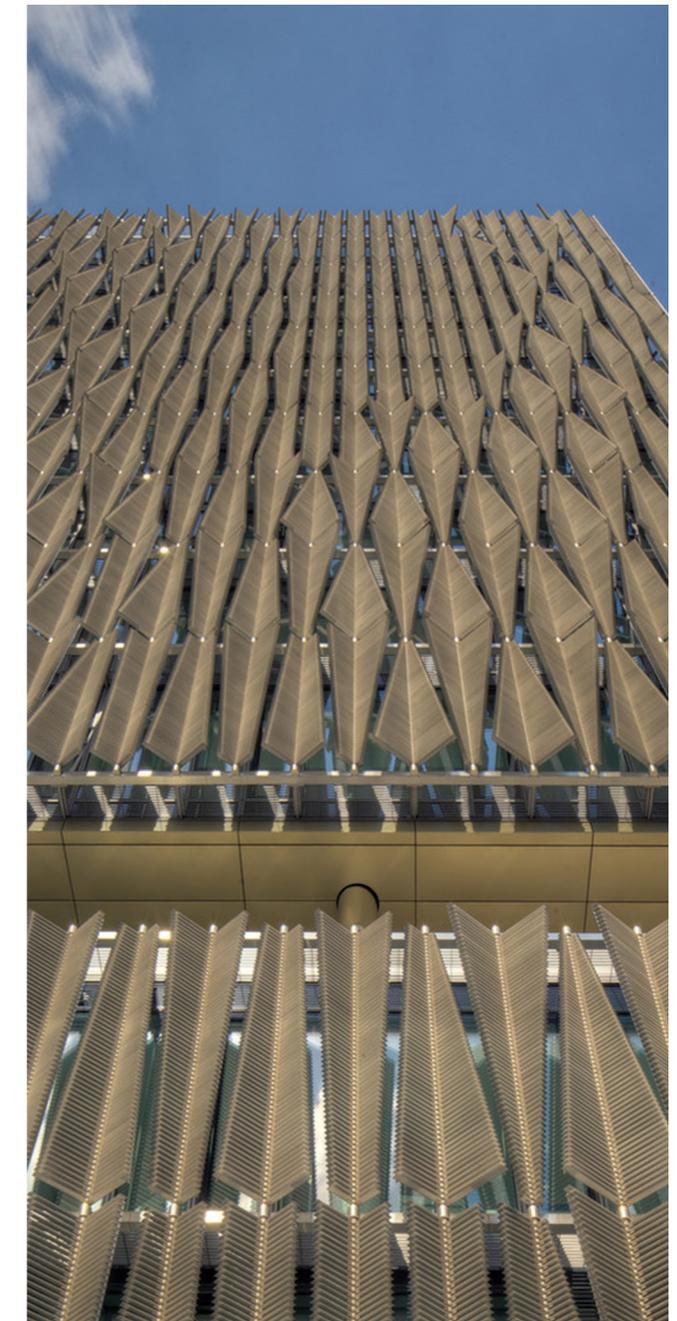
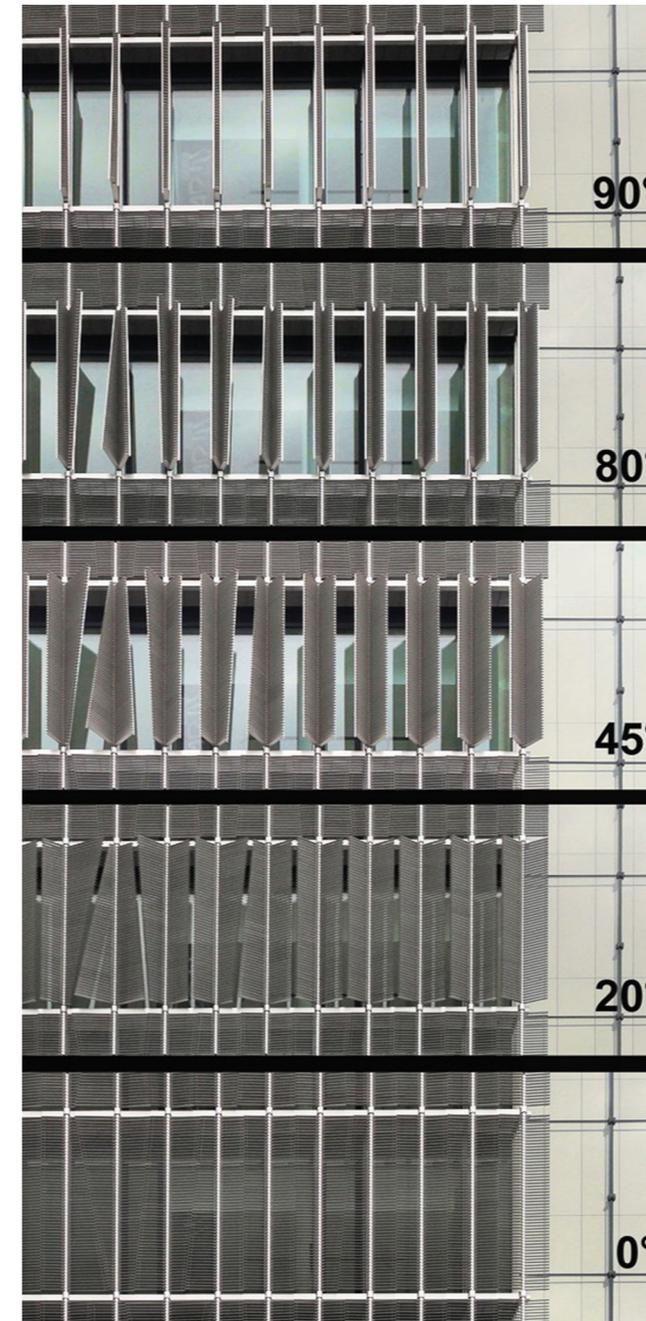
da circa quattrocentomila elementi in grado di muoversi in base alla direzione del sole, garantendo un'adeguata illuminazione degli ambienti interni e filtrando la luce diretta, senza però ostruire la visuale verso l'esterno. Il sistema di schermatura, dotato di alette quadrate, triangolari e trapezoidali, conferisce agli edifici del campus un aspetto caratteristico dato dall'effetto dell'acciaio inossidabile, in grado di cambiare colorazione in base alla quantità di luce incidente su di esso.

La sensazione che da l'edificio dall'esterno è di un volume vetrato avvolto in una seconda pelle di "piume" formata dai *brise-soleil* cinetici di diversa forma e dimensioni. Questo sistema di protezione solare, oltre ad essere particolarmente efficiente e funzionale, è un elemento chiave per la definizione dello stile degli edifici del campus, caratterizzati dal principio "shell-core".¹⁰²

Figura 52 (pagina successiva, a sinistra): Comportamento delle lamelle in base al loro angolo di rotazione

Figura 53 (pagina successiva, a destra): Vista esterna delle lamelle che caratterizzano la doppia pelle dell'edificio

102: JSWD ARCHITEKTEN + CHAIX & MOREL, Q1, ThyssenKrupp Quarter Essen / JSWD Architekten + Chaix & Morel et Associés, 4 febbraio 2013, in <https://www.archdaily.com/326747/q1-thyssenkrupp-quarter-essen-jswd-architekten-chaix-morel-et-associes>



UNIVERSITY OF SOUTHERN DENMARK

LUOGO: Kolding, Danimarca

PERIODO DI REALIZZAZIONE: 2008 - 2014

PROGETTISTA: Henning Larsen Architects

TIPOLOGIA: Campus universitario

FUNZIONAMENTO: Pannelli dinamici

L'University of Southern Denmark viene considerata la prima università danese sostenibile, grazie al basso impatto ambientale e all'elevata innovazione tecnologica che la contraddistingue; infatti i consumi di energia per riscaldamento, raffrescamento, illuminazione e ventilazione sono pari al 25% circa degli edifici simili. Al suo interno sono presenti la facoltà di Scienze Sociali e la facoltà di Scienze della Formazione dell'Università di Kolding. Dall'atrio centrale è possibile raggiungere i diversi locali, come caffetteria, biblioteca, centro sportivo, punti informativi ed auditorium, separati da pareti vetrate scorrevoli. Su ogni piano sono collocati spazi comuni per favorire l'interazione tra docenti, ricercatori e studenti, mentre nelle aree laterali, più distanti dalla hall, si trovano aule e uffici. Grandi lucernai in vetro caratterizzano la copertura

Figura 54 (pagina successiva):
Vista esterna del Campus di
Kolding



del volume favorendo l'illuminazione naturale degli ambienti interni e, di conseguenza, una riduzione del consumo di energia della struttura.¹⁰³

L'innovazione più importante riguarda il sistema di schermatura solare dinamica, realizzato in modo da adattarsi alle condizioni climatiche specifiche e fornire la giusta quantità di luce diurna all'interno dell'edificio e una temperatura confortevole. Questo tipo di facciata è caratterizzata da circa 1600 pannelli di acciaio a forma triangolare che, per mezzo di sensori che ne innescano il movimento, ruotano su telai mobili per garantire il corretto apporto di luce e calore. Anche quando la schermatura è chiusa una certa quantità di radiazione luminosa penetra ugualmente, anche se in modo controllato grazie a fori rotondi, che conferiscono alla facciata un effetto dinamico dall'esterno e un particolare gioco di luce dall'interno.¹⁰⁴

La rotazione dei pannelli lungo il prospetto conferiscono all'edificio un aspetto caratteristico: quando le lamelle sono chiuse sono adese alla facciata, mentre quando sono aperte o semiaperte sporgono dal filo della facciata. Il meccanismo di apertura e chiusura della schermatura è gestito da sensori che monitorano costantemente i valori di calore e luce, regolando in automatico il comportamento dei pannelli.¹⁰⁵

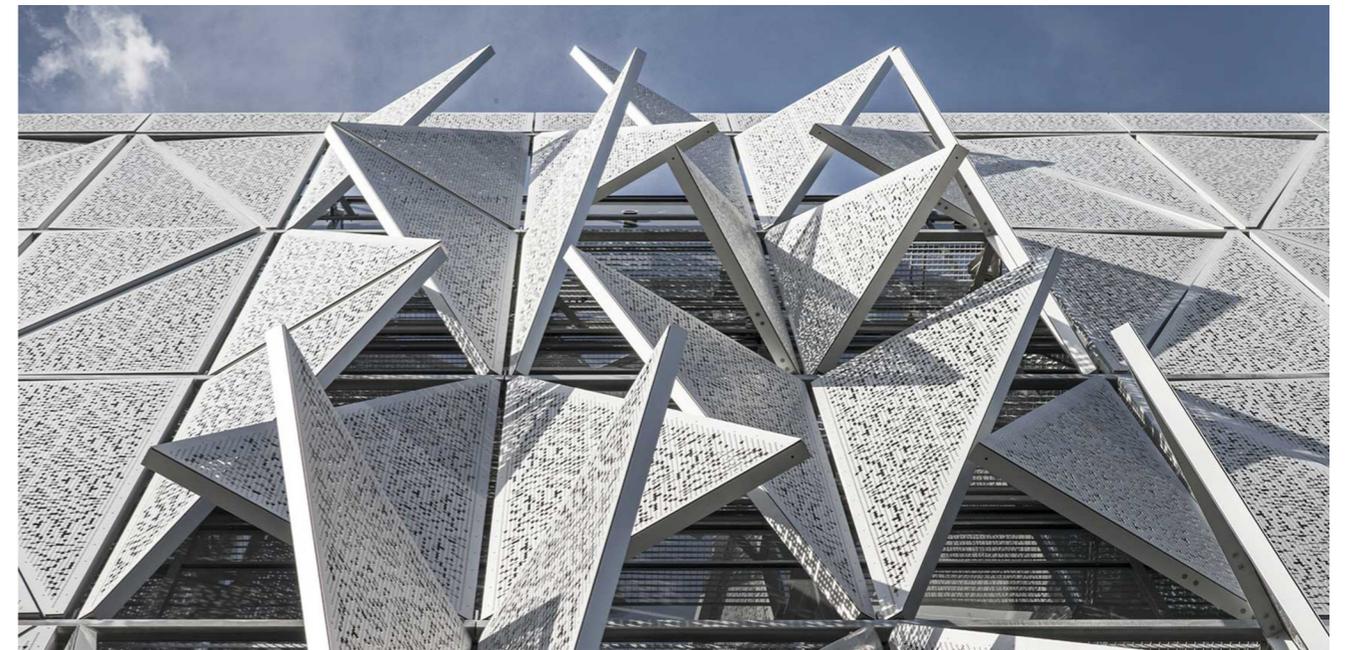
Figura 55 (pagina successiva, in alto): Vista aerea del Campus di Kolding

Figura 56 (pagina successiva, in basso): Particolare dei pannelli che caratterizzano la facciata del Campus di Kolding

103: CALABRESE R., *Henning Larsen per il campus di Kolding: una struttura flessibile e funzionale*, 2 marzo 2009, in https://www.archiportale.com/news/2009/03/risultati/henning-larsen-per-il-campus-di-kolding_14195_37.html/

104: <https://henninglarsen.com/>

105: LARSEN H., *SDU Campus Kolding / Henning Larsen*, 30 gennaio 2015, in <https://www.archdaily.com/590576/sdu-campus-kolding-henning-larsen-architects/>



KIEFER TECHNIC SHOWROOM

LUOGO: Bad Gleichenberg, Austria

PERIODO DI REALIZZAZIONE: 2005 - 2007

PROGETTISTA: Ernst Giselbrecht + Partner

TIPOLOGIA: Uffici

FUNZIONAMENTO: Elementi dinamici pieghevoli

L'edificio prende il nome dal marchio Kiefer Technic, produttore di elettrodomestici, mobili e porte di metallo, e ospita al suo interno i loro uffici e un salone d'esposizione. Si eleva su due piani e ricopre una superficie di più di 400 metri quadrati. L'intento dei progettisti è volto alla modifica dell'approccio alla progettazione di un edificio a terziario, realizzando uno dei primi esempi di facciata totalmente vetrata; in modo da garantire l'ingresso della luce solare, mantenere un adeguato di comfort interno e non ostruire la vista sul panorama circostante.

Per garantire elevati risultati di efficienza energetica, senza rinunciare alla facciata trasparente, Giselbrecht & Partner hanno realizzato una schermatura dinamica in grado di modificare la propria configurazione in base alle condizioni ambientali esterne, ottimizzando la temperatura

Figura 57 (pagina successiva):
Vista esterna del Kiefer Technic
Showroom



all'interno e consentendo agli fruitori di personalizzare i propri spazi di lavoro grazie a comandi interattivi.¹⁰⁶

La facciata è costituita da 56 elementi rettangolari pieghevoli di alluminio forato, azionati grazie a motori elettrici, e si modifica ininterrottamente in ogni momento della giornata mostrando un nuovo "volto" e trasformando il prospetto in una scultura dinamica. I pannelli, in grado di chiudersi su se stessi con un tecnica derivata dalla piegatura degli origami, scorrono verticalmente su binari in acciaio ancorati all'edificio. La possibilità di regolare ogni elemento della facciata permette all'edificio di assumere un numero praticamente infinito di configurazioni formali. Tuttavia la grande personalizzazione dei pannelli regolabili individualmente, consentendo agli occupanti di modificarne l'apertura a piacimento, è resa possibile grazie all'impiego di un considerevole numero di motori elettrici, gravando abbondantemente sui costi di realizzazione e manutenzione.¹⁰⁷

Figura 58 (pagina successiva):
Vista esterna delle diverse configurazioni del Kiefer Technic Showroom in base al movimento dei pannelli dinamici che caratterizzano la facciata

106: <https://www.architonic.com/>

107: VINNITSKAYA I., *Kiefer Technic Showroom* / Ernst Giselbrecht + Partner, 17 novembre 2010, in <https://www.archdaily.com/89270/kiefer-technic-showroom-ernst-giselbrecht-partner/>



AEGIS HYPOSURFACE

LUOGO: Birmingham, Regno Unito

PERIODO DI REALIZZAZIONE: 1999 - 2001

PROGETTISTA: Mark Goulthorpe (dECOi Architects)

TIPOLOGIA: Installazione

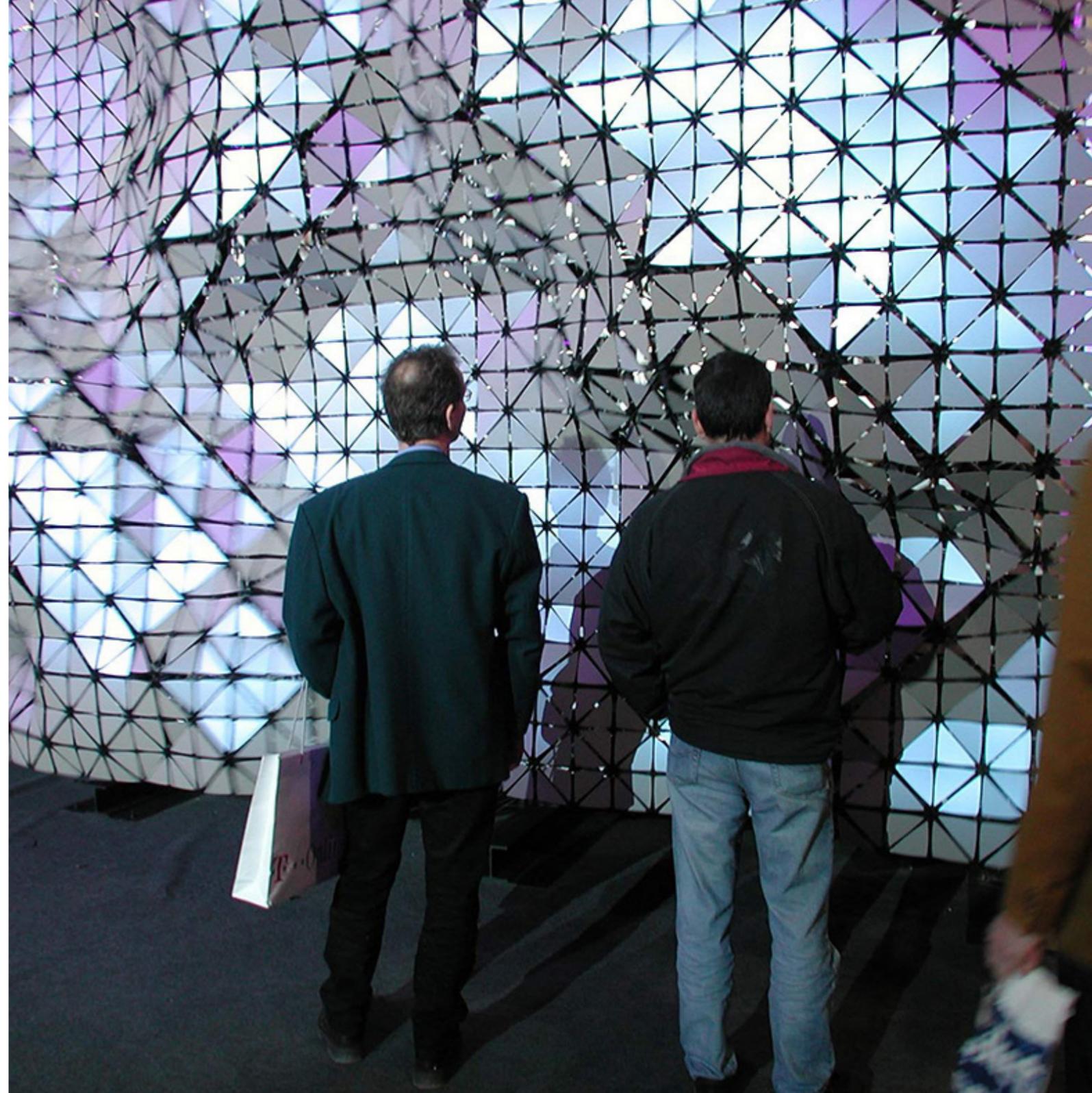
FUNZIONAMENTO: Superficie meccanica interattiva

Il progetto di Aegis Hyposurface è stato sviluppato da Mark Goulthorpe del team dECOi insieme ad un ampio gruppo multidisciplinare composto da matematici, architetti, ingegneri e programmatori informatici. È stato realizzato in occasione di un concorso per la realizzazione di un'opera d'arte da collocare nel foyer del Birmingham Hippodrome Theatre. L'installazione consiste in una superficie meccanica interattiva che ha la capacità di deformarsi in tempo reale in base ai diversi stimoli ambientali che riceve, come i movimenti delle persone, i suoni e la luce. Inizialmente la prima versione era in grado di riprodurre solamente delle forme elaborate al computer, ma successivamente è stata migliorata sempre di più fino ad essere dipendente e in sintonia con l'esterno.¹⁰⁸

La facciata metallica, alta 3 metri e larga 10, è costituita da una

Figura 59 (pagina successiva):
Vista esterna della Aegis
Hyposurface in azione

108: <https://mcburphy.net/>



matrice di attuatori che ricevono informazioni in tempo reale tramite un sistema di sensori elettronici impiegati per movimentare un sistema di 896 pistoni pneumatici, che controllano il movimento delle singole celle triangolari di metallo. Ogni elemento può raggiungere una velocità di movimento di 60 chilometri orari e ha una capacità di movimento di circa 50 centimetri. Aegis Hyposurface sfrutta adeguatamente un sistema meccanico pneumatico dotato di un'elevata reattività e lo unisce ad un controllo digitale fluido e altamente performante.¹⁰⁹

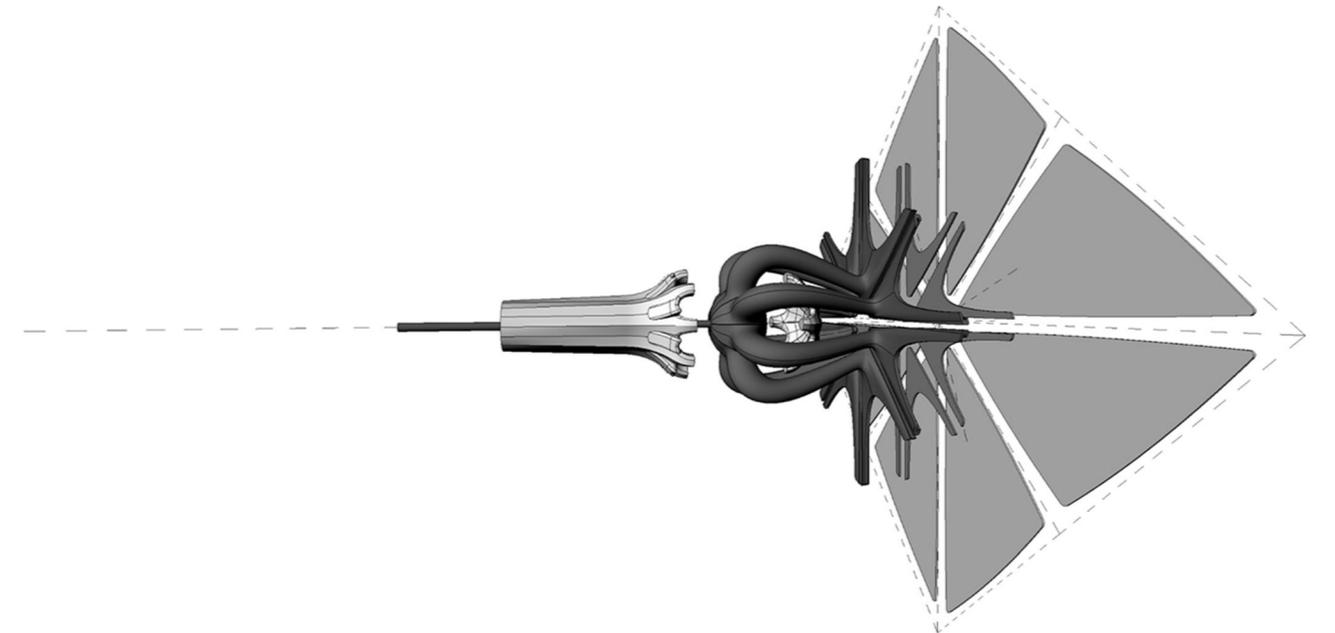
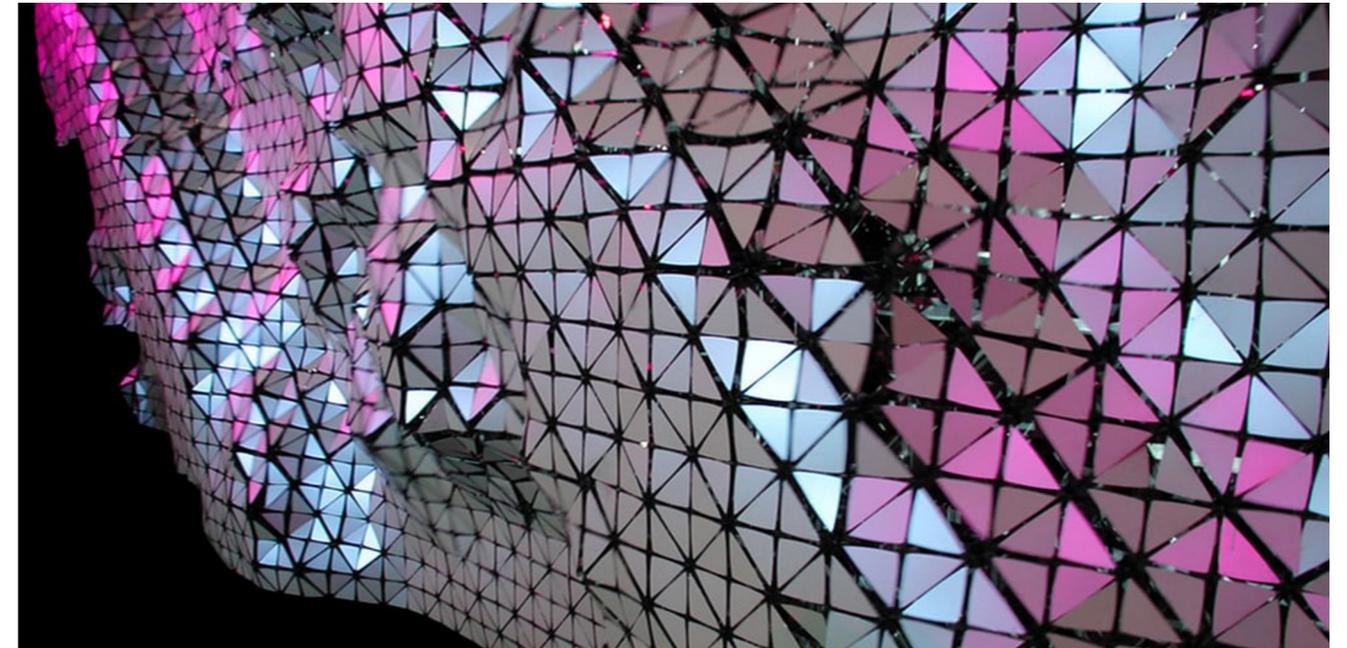
Questa superficie responsiva segna un passaggio dalla concezione formale, statica e determinata, a interattiva, dinamica e indeterminata, dando vita ad un nuovo concetto all'interno del mondo dell'architettura: la reciprocità, tra utente e struttura. HypoSurface può essere considerato un supporto di visualizzazione dinamico adattabile a qualsiasi contesto e modulabile in base agli impulsi richiesti. È fisicamente interattivo ai suoni e ai movimenti e li restituisce sotto forma di immagine o proiezione della luce. Questo esperimento, considerando anche il periodo in cui è stato realizzato, può essere considerato precursore di un nuovo modo di intendere la progettazione, caratterizzata da un'architettura dinamica immersiva dotata di una fluidità radicale.¹¹⁰

Figura 60 (pagina successiva, in alto): Vista esterna della Aegis Hyposurface in grado di assumere diverse configurazioni in base alla luce colorata incidente su di essa

Figura 61 (pagina successiva, in basso): Particolare del pistone che regola il movimento dei pannelli che compongono la Aegis Hyposurface

109: <https://parametrichouse.com/>

110: <http://transmaterial.net/>



03 RESPONSIVE W A V E



3.1 LA PISCINA MONUMENTALE

«E' la forma architettonica non più statica, pronta ad accettare il cambiamento. Il suo stato temporaneo è determinato dalle circostanze del momento, sulle basi di un processo attivato, un'intelligenza incorporata e potenzialità per il cambiamento. Viene creata un'architettura basata su un processo, la cui forma è definita da un comportamento dinamico dei suoi utenti e dalle mutevoli esigenze e condizioni ambientali; un'architettura che ha le caratteristiche di un sistema ecologico, che emula la natura e, pertanto, si impegna in una fusione di natura e cultura»

Branko Kolarevic

Le tematiche approfondite nei capitoli precedenti verranno applicate nel mio progetto di tesi per la realizzazione di una superficie responsiva, collocata sul fronte sud di un edificio esistente, in grado di adattarsi alle condizioni climatiche esterne per garantire adeguati livelli di comfort interni; in particolare avrà il compito di regolare la quantità di luce naturale entrante in ambiente in modo da evitare il fenomeno dell'abbagliamento e garantire in minor utilizzo possibile di luce artificiale.

L'edificio scelto per l'intervento è la Piscina Monumentale di Torino, situata in Corso Galileo Ferraris 294 all'angolo con via Filadelfia. La piscina è stata progettata da Contardo Bonicelli, autore a Torino anche del Teatro Astra e del Circolo Canottieri Esperia, insieme all'ing. Villana e inaugurata nel 1933 in occasione dei giochi littorali di quell'anno. La piscina faceva parte del complesso sportivo che comprende lo Stadio

Figura 62 (pagine precedenti): Immagine esterna della Piscina Monumentale

Figura 63 (pagina successiva): Vista area dell'area che comprende lo Stadio Olimpico Grande Torino, il Pala Alpitour, la piscina Aquatica e la Piscina Monumentale (al centro dell'immagine)



Comunale adiacente, oggi rinominato Stadio Olimpico Grande Torino, oltre alla pista di atletica e il trampolino per le gare di tuffi, oggi non più esistenti. Tuttavia, per confermare la vocazione sportiva dell'area, oggi sono presenti due piscine e un palasport, realizzato in occasione dei Giochi Olimpici Invernali del 2006. La Piscina Monumentale è un notevole esempio di architettura razionalista, in cui l'architetto Bonicelli ha voluto mescolare elementi espressionisti e *art decò*. Tuttavia l'edificio mantiene la monumentalità e la semplicità tipici del Movimento Razionalista, come nello scalone d'ingresso e nelle finestre ad arco sulla facciata principale, e una forma rigida e austera.¹¹¹

La struttura portante è costituita da sette portali di calcestruzzo armato, che coprono una luce di 38 metri, e da un tamponamento in muratura. La copertura piana, rivestita con una guaina bituminosa, è caratterizzata da un lucernario che garantisce un'elevata illuminazione dall'alto dei locali interni, oltre serramenti inclinati collocati al di sopra della zona delle tribune a sud. Le finestre quadrangolari sui lati lunghi dell'edificio sono molto ampie e caratterizzate da inferriate con motivi geometrici ma sprovviste di sistemi di schermatura interni o esterni. La simmetria dell'edificio è ricorrente, non solo nella forma e nelle proporzioni, ma anche negli elementi decorativi come le due fontane in facciata, attualmente fuori uso, disposte simmetricamente in corrispondenza dei due avancorpi laterali. La Piscina Monumentale è considerato un edificio di notevole rilevanza storica e di conseguenza risulta vincolato dalla Soprintendenza, che ha il compito di mantenere inalterato il suo aspetto originale. L'unico intervento di restauro considerevole risale ai primi anni Duemila, con lo scopo di rendere l'edificio adatto a ospitare la manifestazione olimpica del 2006. Pur lasciando inalterata la conformazione esterna della piscina sono state apportate numerose modifiche, come la sostituzione dei serramenti della facciata principale, il miglioramento delle sedute degli spalti, l'aggiunta di una palestra per i tuffi a secco e il recupero degli intonaci del periodo originale.

Figura 64 (pagina successiva, in alto): Vista esterna della Piscina Monumentale tra Corso Galileo Ferraris e via Filadelfia

Figura 65 (pagina successiva, in basso): Vista interna della Piscina Monumentale

111: *Piscina Monumentale*, in <https://www.museotorino.it/view/s/d52a0097f4e047b9ac8d59-d5f2455553/>

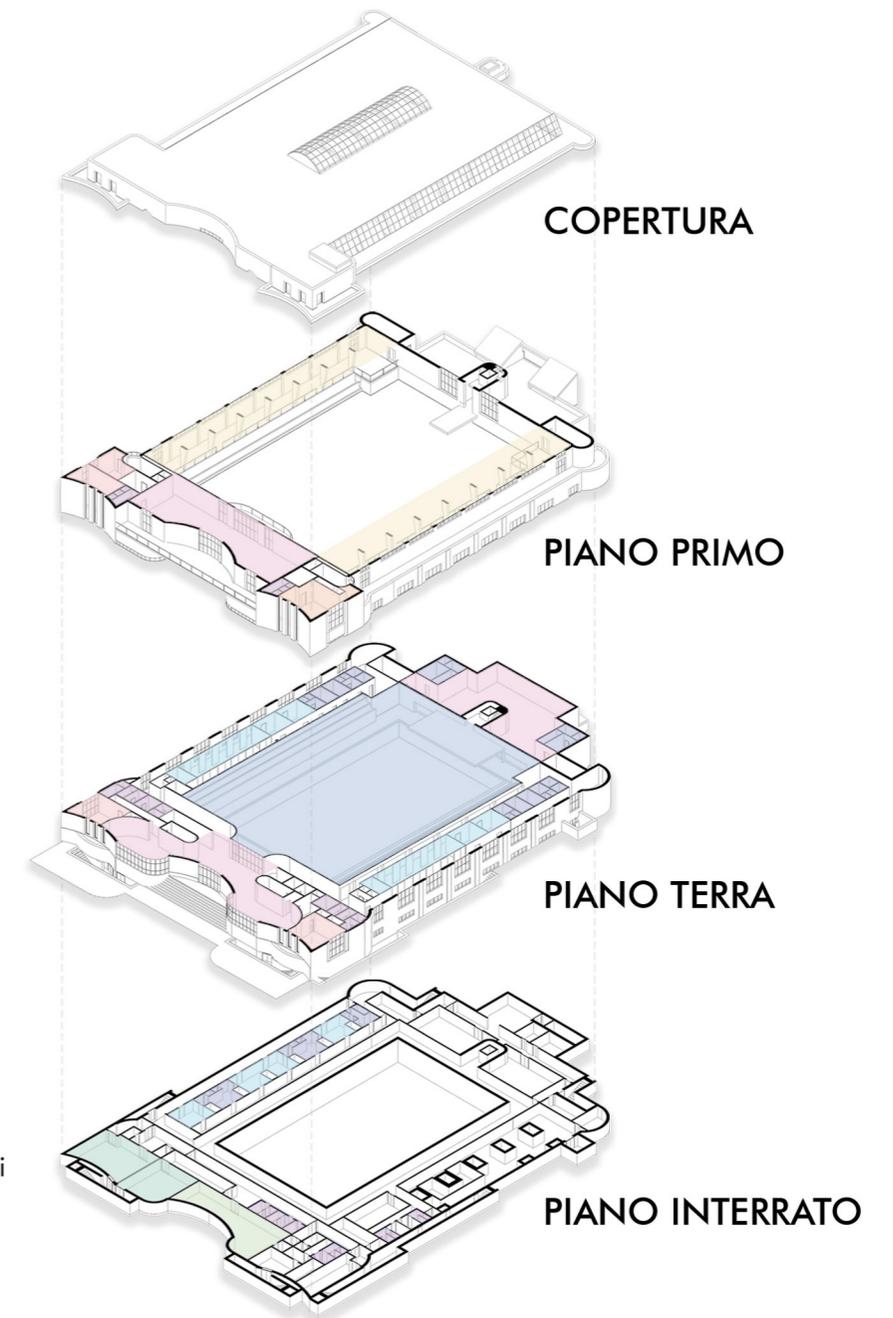


Oggi la piscina è sede di importanti gare internazionali di tuffi grazie ai numerosi trampolini di cui è dotata, che arrivano ad un'altezza di 10 metri. Inoltre viene utilizzata per il nuoto libero, il nuoto sincronizzato, la pesca sportiva, il salvamento subacqueo ed è sede abituale del campionato nazionale di A2 di pallanuoto. La vasca, di dimensioni 33mx20m con 8 corsie, ha una profondità che va da 2 a 5 metri e può contenere fino a 330 bagnanti; mentre le tribune sono dotate di 590 posti a sedere per il pubblico. Al piano interrato, oltre ai vani tecnici e ai locali riservati al personale della piscina, sono presenti gli spogliatoi degli atleti utilizzati in occasione delle competizioni agonistiche; mentre al piano terra si trovano quelli aperti al pubblico, oltre agli uffici e agli spazi dello staff. L'ingresso principale, situato lungo corso Galileo Ferraris, si trova al piano terra e conduce al foyer dal quale è possibile raggiungere gli uffici, gli spogliatoi, la vasca oppure il piano superiore attraverso il monumentale scalone progettato da Contardo Bonicelli. Al piano primo vi sono la restante parte degli uffici, la sala stampa e le tribune, che ospitano il pubblico durante le manifestazioni sportive.

Figura 66 (pagina successiva): Esploso assonometrico in cui sono evidenziate le funzioni interne della Piscina Monumentale

LEGENDA

- Tribune
- Sala stampa
- Uffici
- Atrio/Foyer
- Servizi igienici comuni
- Servizi igienici spogliatoi
- Vasca
- Spogliatoi
- Sala formazione
- Sala riunioni



3.2 COMFORT ILLUMINOTECNICO

Il Sole rappresenta la maggiore fonte di energia disponibile sul pianeta e la sua potenza, se sfruttata in modo adeguato, può ridurre notevolmente il fabbisogno di energia per il riscaldamento e l'illuminazione artificiale di un edificio. L'involucro architettonico trasparente assume un ruolo fondamentale in questa operazione poiché, se correttamente esposto, diventa un efficace collettore di calore. Purtroppo il periodo di massima resa, durante le calde giornate estive, non coincide con quello in cui è necessario un maggior fabbisogno energetico, ovvero la stagione invernale. Per sfruttare al meglio gli apporti energetici gratuiti, senza creare delle situazioni di *discomfort* in ambiente, diventa necessario progettare in modo accurato l'involucro e le eventuali schermature, cercando di lasciar entrare la maggior quantità di radiazione solare in inverno, limitando il più possibile l'ingresso in estate. La progettazione di ampie superfici vetrate a sud consentirà l'ingresso di un'elevata quantità di luce diurna in ambiente, favorendo l'incremento di illuminazione e riscaldamento in inverno, ma contemporaneamente in estate può provocare surriscaldamento e rischio di abbagliamento.¹¹²

Le sorgenti di luce naturale si possono dividere due categorie: luce diurna diretta e indiretta. Con luce diurna diretta si fa riferimento alla radiazione emessa direttamente dal sole, mentre per luce diurna indiretta si intende la radiazione incidente su una superficie e riemessa dalla stessa in ambiente. Sfruttando al meglio la luce naturale è possibile ridurre la quantità di illuminazione artificiale impiegata, tuttavia è necessario modulare correttamente la quantità di radiazione luminosa entrante in ambiente al fine evitare eccessivi guadagni di calore e un disagio

visivo causato dall'abbagliamento. L'obiettivo degli architetti dunque è quello di bilanciare il comfort visivo e sfruttare al meglio la luce naturale in funzione dei bisogni degli occupanti. Un'adeguata progettazione architettonica rapportata alla sua interazione con l'ambiente circostante influisce sulla quantità di luce diurna utile all'interno dell'edificio.¹¹³

Una corretta illuminazione naturale, fondamentale nel garantire un adeguato comfort degli occupanti e un'elevata qualità degli ambienti, può portare a diversi tipologie di benefici: ambientale, sociale ed economico.

Dal punto di vista ambientale diventa fondamentale ridurre la quantità di luce artificiale impiegata per illuminare un edificio in favore di quella diurna, in modo da abbassare il consumo della corrente elettrica e degli apparecchi di illuminazione. Limitare l'impiego di lampadine o altri dispositivi elettrici porta ad una diminuzione di rifiuti materiali, dei consumi energetici e anche dell'inquinamento luminoso. Inoltre il calore eccessivo prodotto dall'illuminazione artificiale può portare all'aumento dei carichi di raffrescamento di un edificio, dovuti ad un surriscaldamento dell'ambiente interno. Dunque sfruttare la luce naturale, a discapito di quella artificiale, consente di ridurre il consumo energetico di un edificio e di conseguenza limitare le emissioni di anidride carbonica.

Sotto l'aspetto sociale potersi interfacciare direttamente con la luce diurna permette agli occupanti di percepire un corretto senso dell'orientamento e monitorare costantemente lo scorrere del tempo, rispetto ad una condizione di alienazione provata in un edificio con poche aperture e completamente illuminato con dispositivi artificiali, in cui la visibilità è costante per tutta la giornata. La luce naturale ha un effetto positivo sulla salute delle persone e sul loro orologio biologico, in grado di regolare il ciclo sonno-veglia, basato sulla produzione di melatonina. Inoltre è stato dimostrato un aumento della produttività dei lavoratori che si trovano in ambienti illuminati dalla luce naturale o con la vista verso l'esterno attraverso una finestra.

112: HEGGER M., *Atlante della Sostenibilità*, Utet, Torino, 2008

113: GUERRA-SANTIN O., HOSSEINI S., MOHAMMADI M., *Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes*, Building and Environment, volume 165, novembre 2019, in <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.biblio.polito.it/science/article/pii/S0360132319306067>

L'aspetto economico si basa prevalentemente su un risparmio nella bolletta dell'energia elettrica, anche se installando un minor numero di sistemi di illuminazione artificiale si abbassa notevolmente la quantità di materiali impiegati, oltre al il costo della manutenzione. Oltre a ridurre l'elettricità impiegata per raggiungere un livello di illuminazione confortevole, un minor impiego di fonti di illuminazione artificiale comporta una diminuzione del calore eccessivo prodotto da esse e di conseguenza, come detto in precedenza, un minor carico di raffrescamento dell'edificio. Dunque una corretta strategia di illuminazione naturale può diventare un elemento fondamentale della progettazione sostenibile, poiché garantisce un risparmio economico e riduce le emissioni inquinanti in ambiente. Tuttavia questo sistema può portare a dei vantaggi concreti solo se correttamente implementata da sorgenti artificiali quando è necessario, come al mattino presto o nelle ore serali; altrimenti si rischia di avere l'effetto contrario, una scarsa illuminazione, che può avere effetti negativi sugli occupanti.

Il controllo della radiazione negli ambienti interni viene regolato dal punto di vista normativo per garantire il corretto svolgimento delle attività previste, la sicurezza degli occupanti e il raggiungimento di adeguati standard prestazionali. Per quanto riguarda la luce naturale attraverso la norma UNI EN 12665 del 2018 ha l'obiettivo di identificare i requisiti illuminotecnici degli ambienti in base alle differenti destinazioni d'uso; mentre la luce artificiale si fa riferimento alla norma UNI EN 12464 del 2011, in particolare per i valori minimi di illuminazione nei luoghi lavorativi.

Trovare il modo di bilanciare la luce diurna e il comfort visivo diventa una sfida fondamentale per ridurre la quantità di energia consumata per la climatizzazione dell'edificio e prevenire il surriscaldamento all'interno. L'utilizzo di una schermatura responsiva permette di raggiungere la soluzione di compromesso tra comfort termico e visivo, grazie alla sua caratteristica più importante: l'adattabilità.

Infatti, attraverso questo sistema di involucro innovativo, è possibile generare componenti "intelligenti" in grado di adattarsi alle variazioni climatiche per garantire un adeguato *comfort* agli occupanti. L'edificio, che solitamente è statico, ha il compito di reagire in modo adeguato ed efficace alle condizioni climatiche esterne che, invece, sono mutevoli e possono variare in base ai diversi periodi dell'anno o nell'arco di una giornata. Mantenere un corretto equilibrio tra la massimizzazione della raccolta della luce diurna e l'eliminazione dell'abbagliamento diventa una delle sfide più ambiziose per i progettisti.

L'obiettivo della tesi è garantire all'interno dell'edificio preso in esame, ovvero la Piscina Stadio Monumentale di Torino, un adeguato *comfort* illuminotecnico. Questo è reso possibile dalla superficie responsiva collocata all'esterno dell'edificio, in grado di modulare la radiazione solare incidente e consentire il passaggio esclusivamente della quota necessaria. Attraverso questo sistema diventa possibile limitare notevolmente il fenomeno dell'abbagliamento e garantire un impiego minimo di luce artificiale. Però, prima di ricorrere all'utilizzo di una schermatura aggiuntiva, è necessario comprendere la situazione legata al *comfort* illuminotecnico che caratterizza l'edificio; così, dopo aver svolto alcune analisi sullo stato di fatto, diventa possibile valutarne l'impiego. Le simulazioni sono state eseguite con Ladybug e Honeybee, entrambi *plugin* di Grasshopper che permettono di svolgere verifiche fisico-tecniche, con condizioni di cielo sereno. L'edificio è stato collocato a Torino tramite il file climatico EPW, grazie ai dati raccolti all'aeroporto di Torino Caselle e reperibili al sito www.ladybug.tools/epwmap. Le analisi scelte per la verifica del *comfort* illuminotecnico sono la *Daylight Analysis* per l'interno dell'edificio e la *UTCI Analysis* per l'esterno.

Daylight Analysis

Attraverso questo tipo di analisi è possibile quantificare l'illuminamento, ovvero il flusso luminoso incidente su una superficie per unità di area, in un determinato periodo. Il valore ottenuto, che ha come unità di misura il lux (equivalente di lumen per metro quadro), viene chiamato UDI, ovvero *useful daylight illuminance*. Questo indicatore quantifica l'illuminazione diurna utile in uno spazio specifico, integrando la valutazione della qualità della luce naturale e dell'abbagliamento in un solo schema. I valori di UDI possono essere divisi in tre categorie in base alle quantità di radiazione solare:

- UDI <100: viene definito *fell-short* e corrisponde ad una quantità di luce diurna insufficiente per raggiungere il comfort visivo
- UDI 100-3000: viene definito *archieved* e corrisponde ad un livello di illuminamento ammissibile per una corretta visibilità. La quantità di luce presente in questo intervallo può essere definita "utile" e all'interno dei requisiti di comfort visivo; è l'unione di due sottocategorie: *supplementary* (UDI 100-300), in cui potrebbe essere necessaria un'integrazione con la luce artificiale, e *autonomous* (UDI 300-3000).
- UDI >3000: viene definito *exceeded* e corrisponde a un eccesso di disponibilità di luce diurna, che potrebbe causare malessere visivo e termico negli occupanti, causando problemi di abbagliamento e surriscaldamento.

La superficie della Piscina Monumentale scelta per la *Daylight Analysis* corrisponde all'intero piano vasca, al bordo-vasca con un offset di 1,5 metri dal limite dell'acqua e a tre livelli significativi (il più alto, il più basso e quello intermedio) degli spalti. Mentre l'area di analisi della vasca è stata posizionata alla quota reale (immaginando le persone che nuotano, dunque quasi a filo dell'acqua), quella del bordo-vasca

è posta ad un'altezza di 1 metro, immaginando gli istruttori piegati a dare indicazione agli atleti, così come quella in prossimità degli spalti, considerando il pubblico seduto a guardare le gare.

Le simulazioni sono state eseguite a orari significativi, considerando anche il periodo di apertura della piscina, in giorni dell'anno particolarmente critici, come il solstizio d'inverno (21 dicembre), del solstizio d'estate (21 giugno) e degli equinozi di primavera e autunno (rispettivamente 21 marzo e settembre). La scelta di queste date ha l'obiettivo di valutare gli effetti della radiazione al variare dell'altitudine del sole; infatti il sole è al massimo della sua altezza durante il solstizio d'estate, nel punto più basso in occasione del solstizio d'inverno e a metà tra i due durante gli equinozi. Sono stati scelti quattro orari critici in cui è possibile notare la variazione di intensità e il differente orientamento della radiazione solare sulla superficie scelta per l'analisi: 09:00, 12:00, 15:00 e 18:00. Dalla *Daylight Analysis* effettuata durante il solstizio d'inverno emerge un elevato livello di illuminamento corretto, con valori di *comfort* (UDI 100 - 3000) oltre il 90% nelle ore più significative della giornata, a eccezione delle 12:00, in cui vi è un'elevata area soggetta ad abbagliamento. La superficie in questione, corrispondente a quasi il 20% del totale, corrisponde alla luce entrante dalle finestre collocate a sud lungo via Filadelfia, delle quali è possibile osservare la forma delle stesse proiettata sul piano vasca.

Invece nella *Daylight Analysis* effettuata durante il solstizio d'estate i valori di *comfort* durante i quattro orari presi in considerazione non arrivano mai a 90%, in favore di una maggiore percentuale di *exceeded*. Anche in questo caso l'abbagliamento è causato dalle finestre collocate sul fronte sud dell'edificio e, dal momento che il sole raggiunge la sua massima altezza, del lucernario quadrangolare posto in copertura e riscontrabile nelle simulazioni realizzate alle ore 12:00 e 15:00.

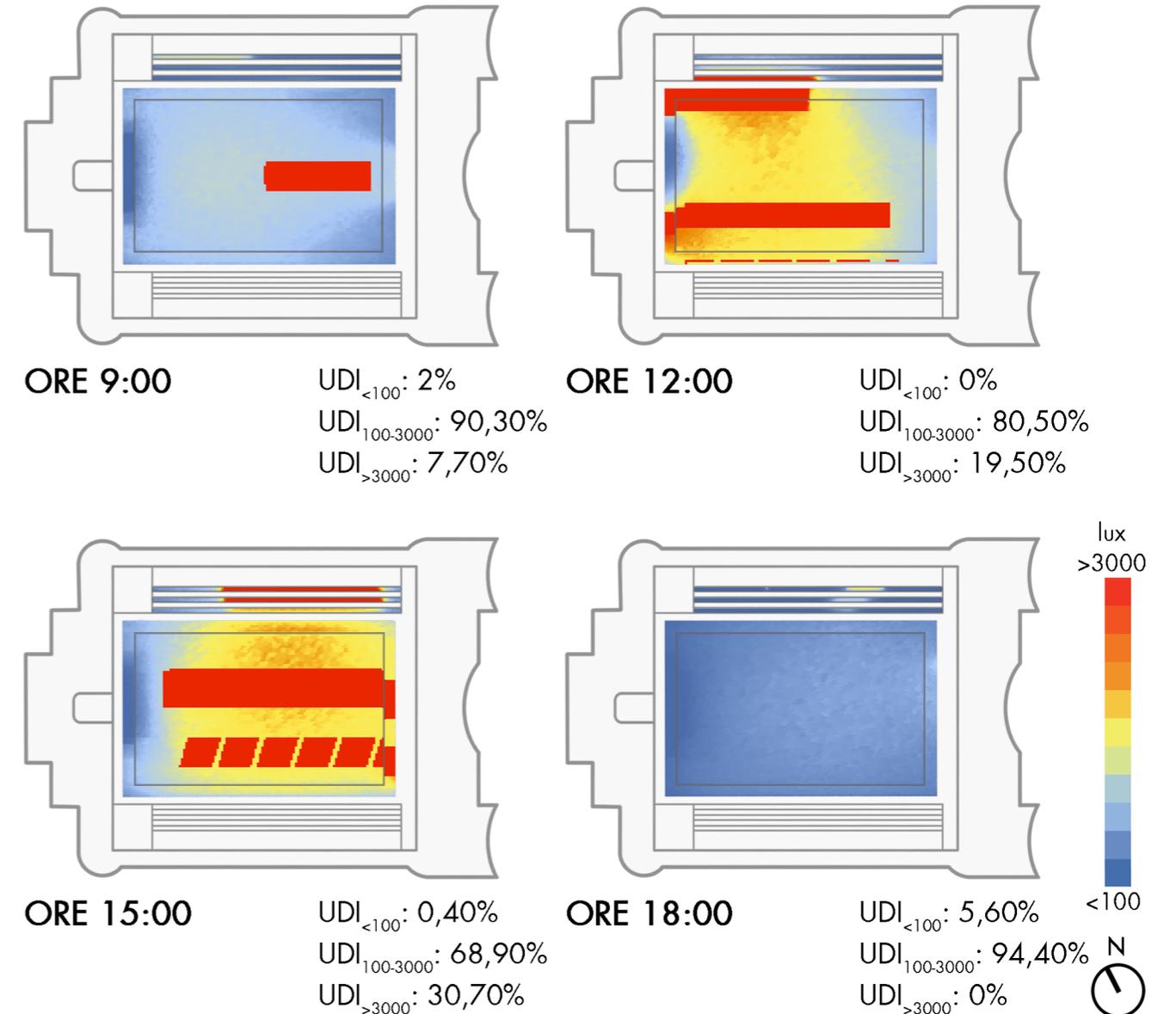
Mentre nella *Daylight Analysis* effettuata durante gli equinozi, quando il sole è metà della sua altezza massima, l'abbagliamento deriva da un

maggior numero di superfici vetrate esposte a sud: il lucernario, le finestre rettangolari e la finestra continua obliqua che percorre la quasi totalità della facciata. In questo frangente l'abbagliamento risulta maggiore del 30% alle ore 15:00 e intorno al 20% alle ore 12:00.

Dunque, come si evince dalle diverse *Daylight Analysis* svolte la maggiore causa di *discomfort* proviene dalle superfici finestrate collocate a sud, sprovviste di un sistema di schermatura. Di conseguenza la nuova "pelle" responsiva progettata sarà applicata lungo questo lato della facciata e avrà il compito di modulare la luce entrante in ambiente cercando non solo di evitare i fenomeni di abbagliamento, ma garantendo un livello di comfort illuminotecnico adeguato nei diversi periodi dell'anno.

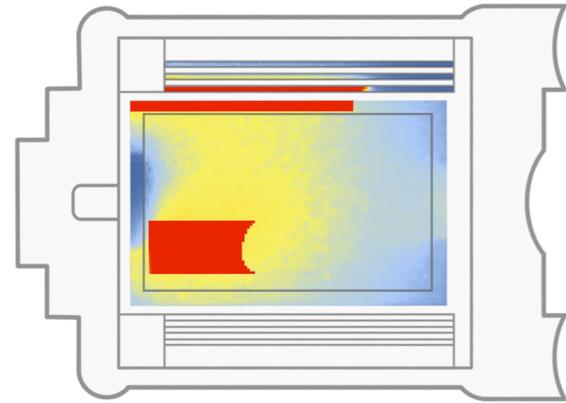
DAYLIGHT ANALYSIS

Equinozio di primavera e d'autunno: 21 marzo e 21 settembre



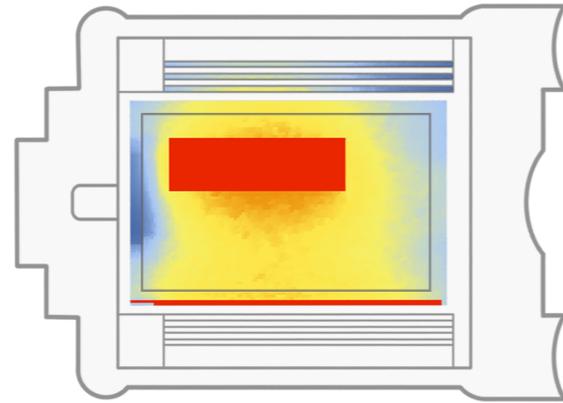
DAYLIGHT ANALYSIS

Solstizio d'estate: 21 giugno



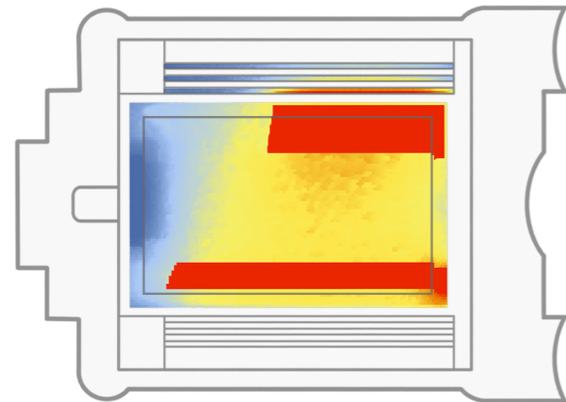
ORE 9:00

UDI_{<100}: 0%
 UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 86,80%
 UDI_{>3000}: 13,20%



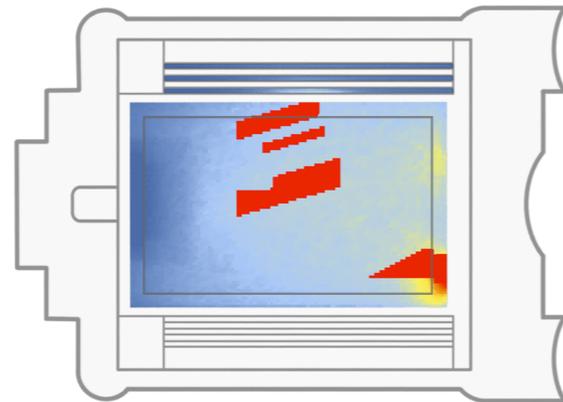
ORE 12:00

UDI_{<100}: 0%
 UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 84,50%
 UDI_{>3000}: 15,50%



ORE 15:00

UDI_{<100}: 1,70%
 UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 74,90%
 UDI_{>3000}: 23,40%



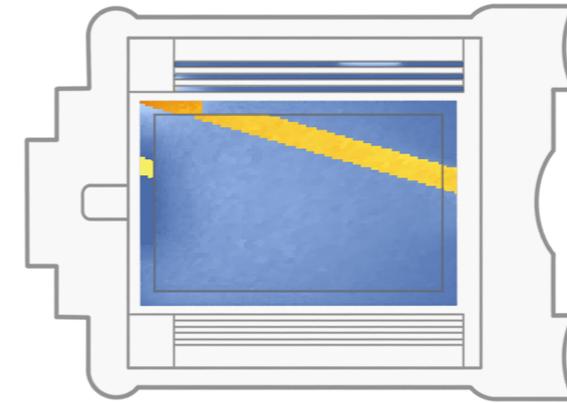
ORE 18:00

UDI_{<100}: 2,30%
 UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 88,30%
 UDI_{>3000}: 9,40%



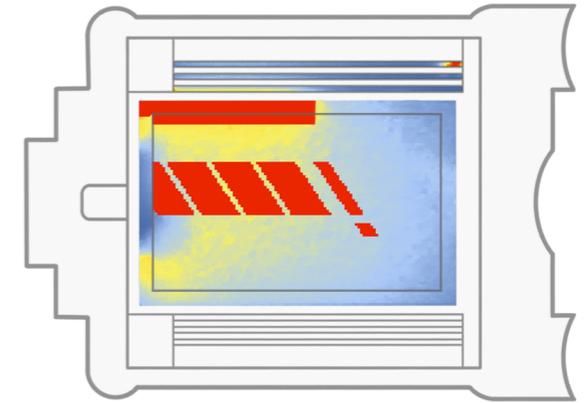
DAYLIGHT ANALYSIS

Solstizio d'inverno: 21 dicembre



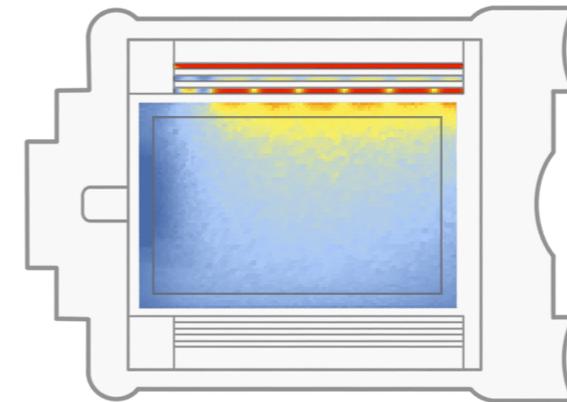
ORE 9:00

UDI_{<100}: 3,20%
 UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 96,80%
 UDI_{>3000}: 0%



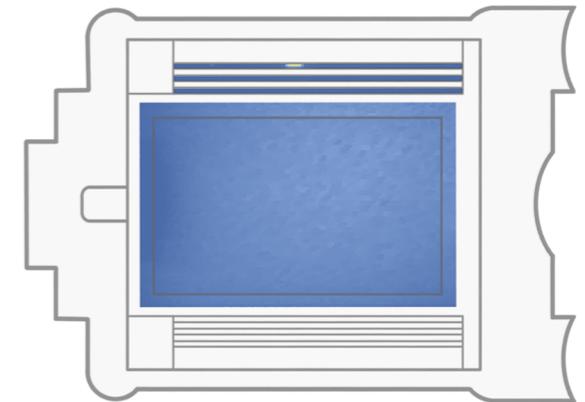
ORE 12:00

UDI_{<100}: 0%
 UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 81,50%
 UDI_{>3000}: 18,50%



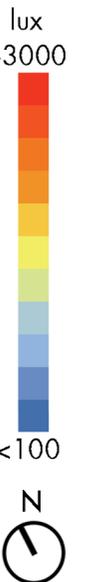
ORE 15:00

UDI_{<100}: 1,80%
 UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 95,20%
 UDI_{>3000}: 3%



ORE 18:00

UDI_{<100}: 8,70%
 UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 91,30%
 UDI_{>3000}: 0%



UTCI Analysis

Per valutare l'effetto del sole in ambiente esterno si è scelto di svolgere una *UTCI Analysis*, ovvero il calcolo dell'indice di clima termico universale. Lo *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) è un parametro utilizzato per misurare lo stress termico provato dalle persone all'aperto e dipende dalla radiazione solare, dalla temperatura dell'aria, dall'umidità relativa e dalla velocità del vento. Il valore risultante, espresso in gradi centigradi, può essere inteso come la temperatura ambientale di riferimento, che può causare *discomfort*, dato dal variare delle grandezze riportate in precedenza. Lo UTCI può essere diviso in intervalli numerici ai quali corrispondono diverse categorie di stress:

- $UTCI > 32 \text{ }^\circ\text{C}$: Forte stress da calore
- $32 \text{ }^\circ\text{C} \geq UTCI > 28 \text{ }^\circ\text{C}$: Moderato stress da calore
- $28 \text{ }^\circ\text{C} \geq UTCI > 26 \text{ }^\circ\text{C}$: Leggero stress da calore
- $26 \text{ }^\circ\text{C} \geq UTCI > 9 \text{ }^\circ\text{C}$: Nessuno stress termico (condizione di comfort)
- $9 \text{ }^\circ\text{C} \geq UTCI > 0 \text{ }^\circ\text{C}$: Leggero stress da freddo
- $0 \text{ }^\circ\text{C} \geq UTCI > -13 \text{ }^\circ\text{C}$: Moderato stress da freddo
- $UTCI \leq -13 \text{ }^\circ\text{C}$: Forte stress da freddo

L'analisi è stata eseguita su tutte le superfici orizzontali esterne della Piscina Monumentale, come terrazzi e balconi, ad eccezione della copertura e nell'area rettangolare che circonda l'edificio con una distanza massima di due metri dal filo esterno. Sono stati scelti dei periodi caratteristici per valutare come si modifica l'UTCI al variare delle stagioni; infatti le simulazioni fanno riferimento ad una settimana tipica primaverile, una settimana tipica estiva, una settimana tipica autunnale e una settimana tipica invernale, oltre a quella più calda e più fredda dell'anno. Questi sei periodi sono stati confrontati tra loro negli stessi orari in cui erano stati confrontati i valori di *Daylight Analysis*, ovvero alle ore 09:00, 12:00,

15:00 e 18:00. Di ogni intervallo è stata riportata la *mesh* colorata in base al valore di UTCI corrispondente in quel punto e la percentuale di area che si trova in condizione di *comfort*. Dal momento che l'analisi è riferita ad un ambiente esterno è possibile considerare senza stress termico un intervallo più ampio rispetto ai valori riportati in precedenza, inglobando anche lo stress leggero da caldo e da freddo. Dunque il range che viene considerato accettabile diventa quello che va da $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $28 \text{ }^\circ\text{C}$, non più quello che va da $9 \text{ }^\circ\text{C}$ a $26 \text{ }^\circ\text{C}$.

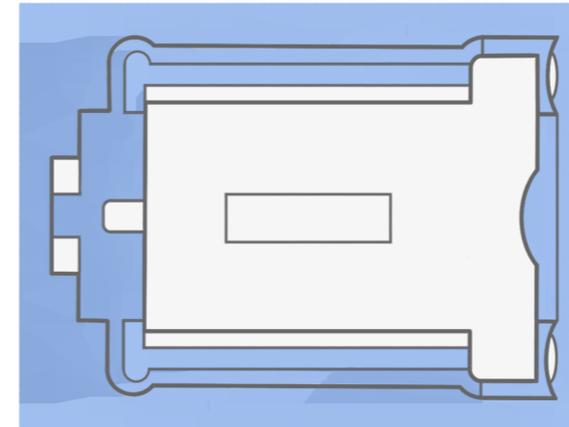
Inoltre è stata svolta un'analisi di UTCI di tipo puntuale dove si concentrava maggiormente la radiazione solare incidente sull'edificio. I tre punti scelti, sulla base di verifiche svolte in precedenza, si trovano sulla facciata sud dell'edificio e per ciascuno viene riportata la percentuale di valori compresi dell'intervallo di comfort da $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $28 \text{ }^\circ\text{C}$ e quelli che non rientrano in esso. Tuttavia i valori utilizzati non fanno riferimento ad un periodo e un orario definiti ma sono la somma di tutte le ore dell'anno (chiamata HOY, ovvero *Hour of the Year*) che corrisponde a 8760; dunque la percentuale di comfort è stata calcolata sulla base dei valori delle ore presenti in un anno tipo. Inoltre è stato riportato il grafico con l'andamento dei valori di UTCI durante tutto l'anno e un secondo grafico in cui sono stati isolati i valori di stress per caldo e per freddo, ovvero quelli esclusi dall'intervallo $0 - 28 \text{ }^\circ\text{C}$. Infine per ogni punto è stata riportata la somma della distanza dal *threshold* dei valori di *Heat Stress* e di *Cold Stress*, in modo da valutare il *discomfort* anche in modo qualitativo e non solo quantitativo.

Dalla *UTCI Analysis* effettuata all'esterno della Piscina Monumentale nei diversi periodi dell'anno si evince come nella maggior parte delle ore analizzate vi sia una situazione di comfort, con i valori compresi tra $0 \text{ }^\circ\text{C}$ e $28 \text{ }^\circ\text{C}$; questo si verifica durante la settimana tipica primaverile, la settimana tipica autunnale, la settimana tipica invernale e la settimana più fredda dell'anno. Mentre nei periodi più caldi presi in esame, come la settimana tipica estiva e la settimana più calda dell'anno, vi

è un'elevata percentuale di *discomfort* (che raggiunge anche il 100%) dovuta all'ingente radiazione solare incidente sulle superfici. Inserendo la superficie responsiva sul lato sud si avrà dunque un abbassamento di queste temperature, attualmente sopra i 28 °C, aumentando i valori all'interno della percentuale di comfort (0 - 28 °C). Questa collocazione permette di intervenire su un'area particolarmente esposta alla radiazione solare, come si evince dalla analisi, e di ridurre i valori di UTCI impedendo al sole di colpire direttamente le aree esterne dell'edificio. Per quanto riguarda le tre *UTCI Analysis* puntuali la percentuale di comfort equivale a circa il 75% dei valori totali e la restante parte è divisa quasi equamente tra *Cold Stress* e *Heat Stress*. La schermatura responsiva sul lato sud consente di abbassare ulteriormente la quantità di ore all'anno in cui vi è un eccesso di calore (UTCI > 28 °C) e dunque estendere il periodo di comfort durante l'anno.

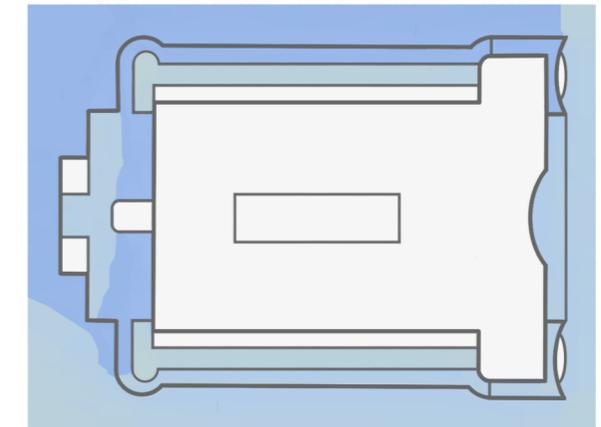
UTCI ANALYSIS

Typical Spring Week (29/03 - 4/04)



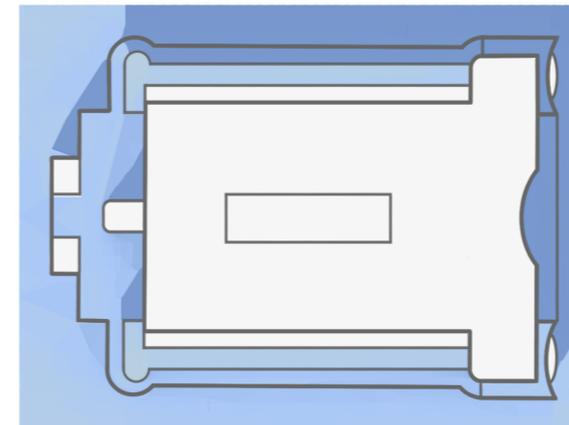
ORE 9:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



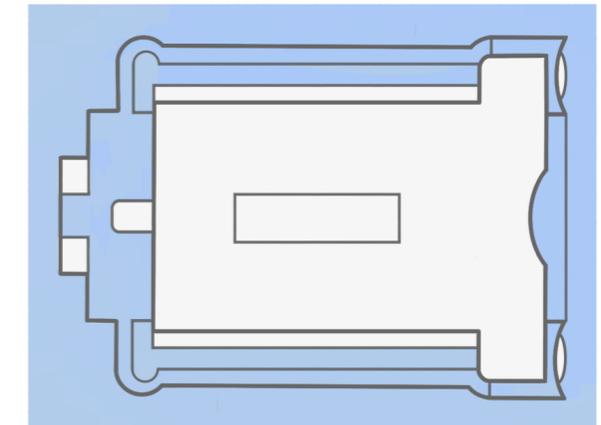
ORE 12:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



ORE 15:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



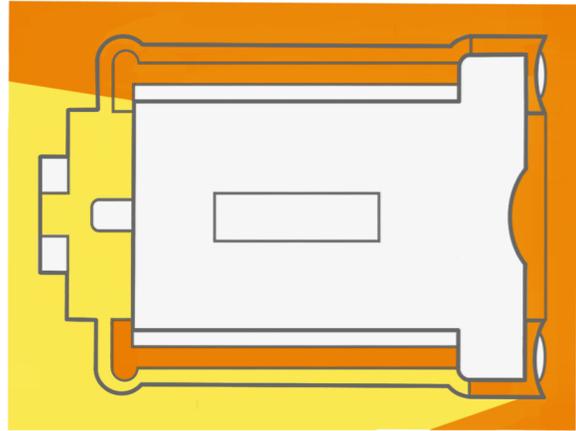
ORE 18:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



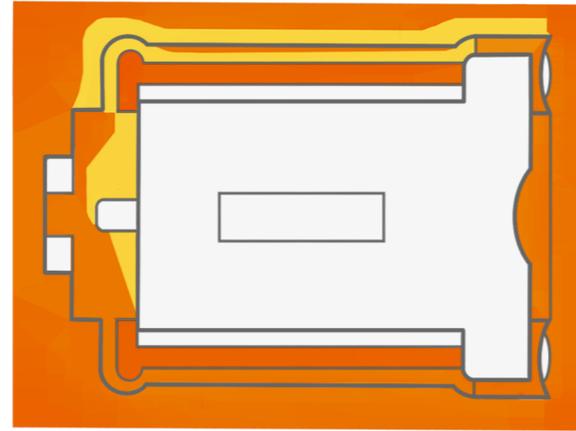
UTCI ANALYSIS

Typical Summer Week (22/06 - 28/06)



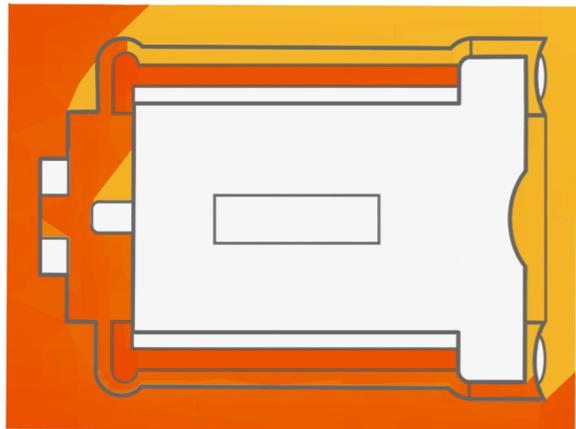
ORE 9:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 55,80%
 UTCI_{>28}: 44,20%



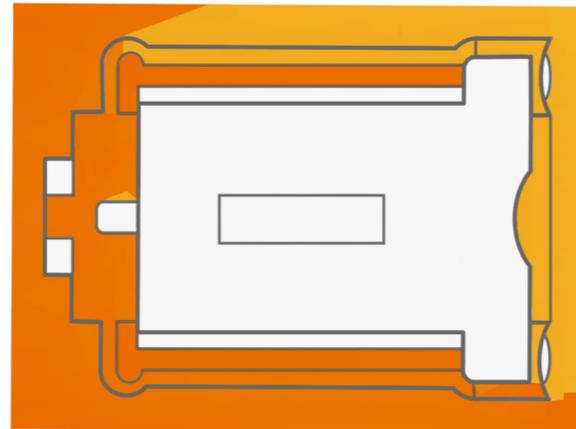
ORE 12:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 31,60%
 UTCI_{>28}: 68,40%



ORE 15:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 34,30%
 UTCI_{>28}: 65,70%



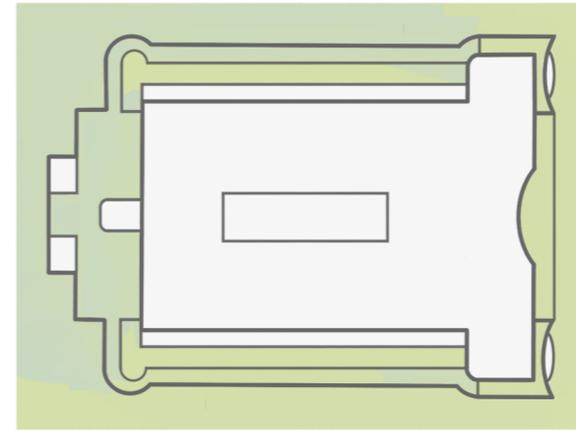
ORE 18:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 35%
 UTCI_{>28}: 65%



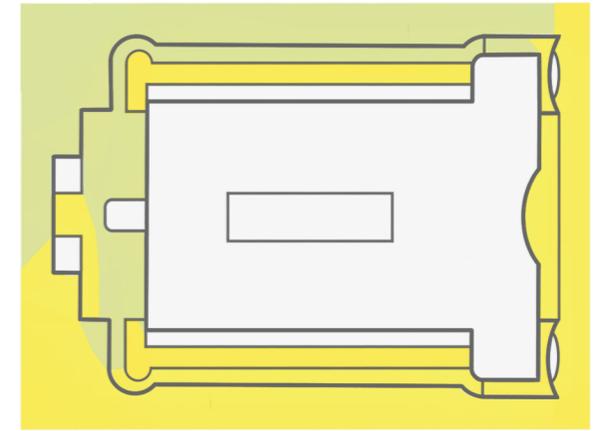
UTCI ANALYSIS

Typical Autumn Week (20/10 - 26/10)



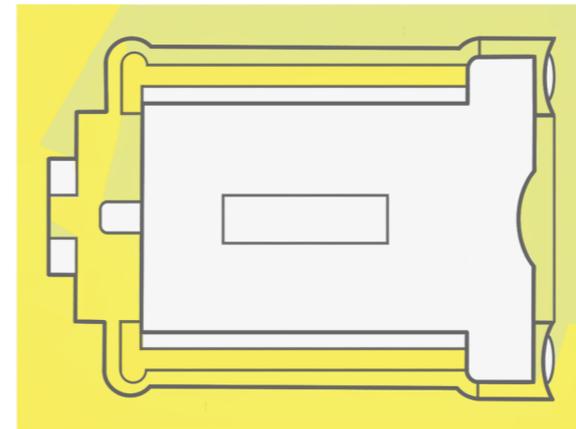
ORE 9:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



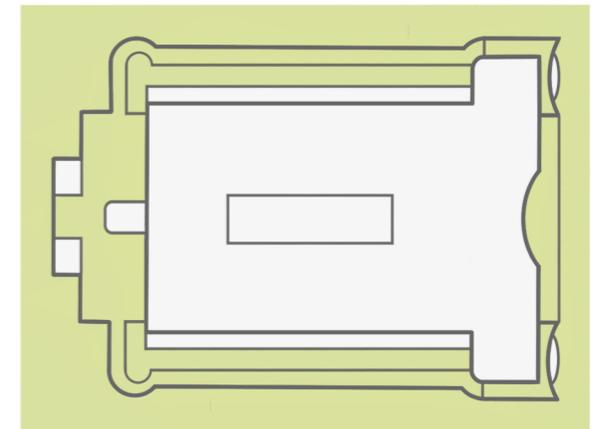
ORE 12:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



ORE 15:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



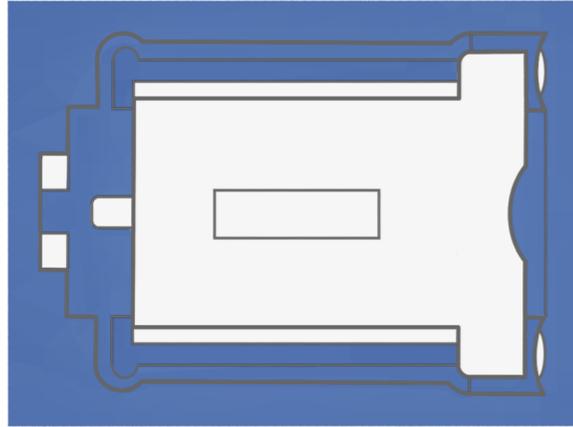
ORE 18:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



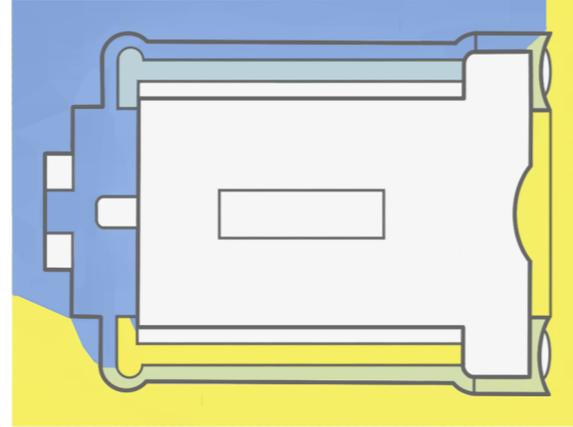
UTCI ANALYSIS

Typical Winter Week (22/12 - 28/12)



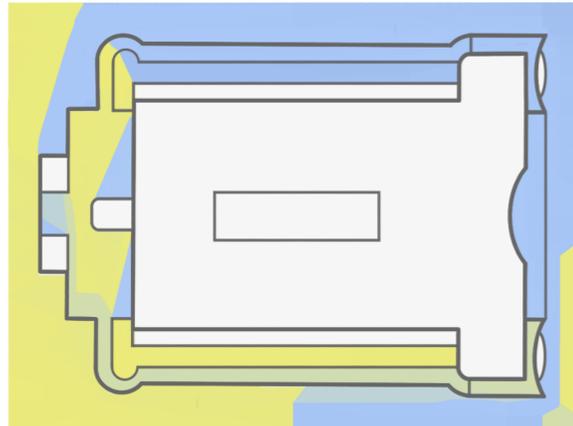
ORE 9:00

UTCI_{<0}: 0%
UTCI₀₋₂₈: 100%
UTCI_{>28}: 0%



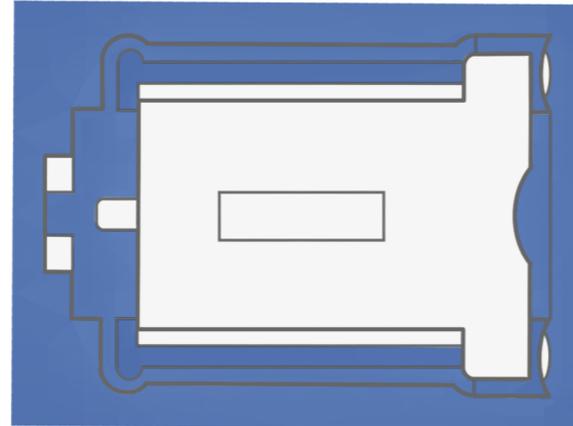
ORE 12:00

UTCI_{<0}: 0%
UTCI₀₋₂₈: 100%
UTCI_{>28}: 0%



ORE 15:00

UTCI_{<0}: 0%
UTCI₀₋₂₈: 100%
UTCI_{>28}: 0%



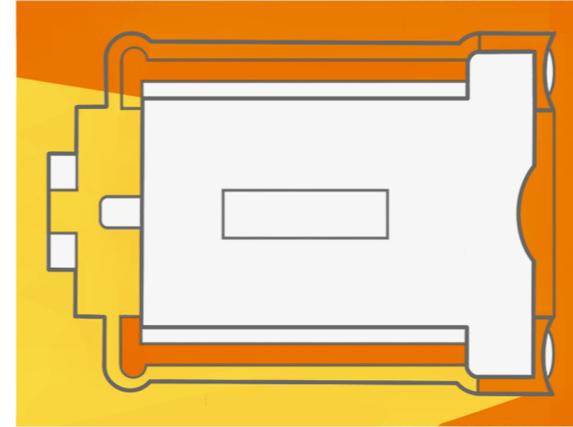
ORE 18:00

UTCI_{<0}: 0%
UTCI₀₋₂₈: 100%
UTCI_{>28}: 0%



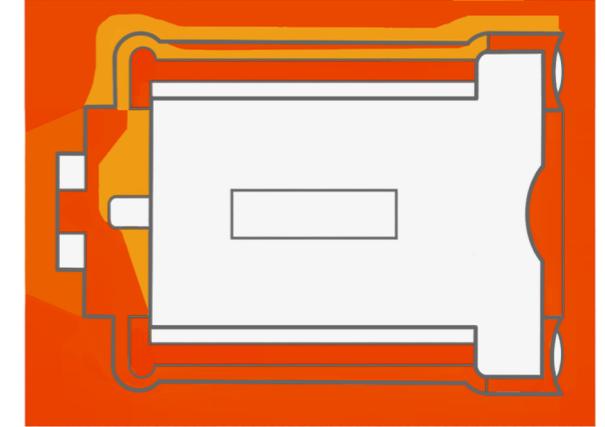
UTCI ANALYSIS

Extreme Hot Week (20/07 - 26/07)



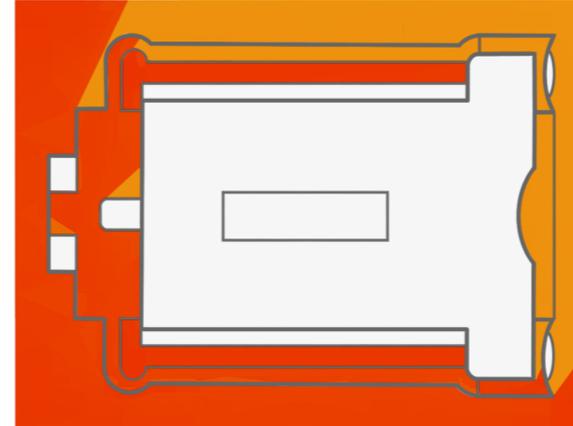
ORE 9:00

UTCI_{<0}: 0%
UTCI₀₋₂₈: 52,80%
UTCI_{>28}: 47,20%



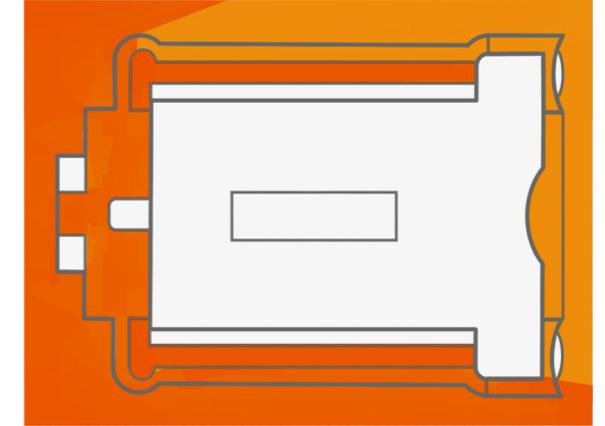
ORE 12:00

UTCI_{<0}: 0%
UTCI₀₋₂₈: 33,50%
UTCI_{>28}: 66,50%



ORE 15:00

UTCI_{<0}: 0%
UTCI₀₋₂₈: 2%
UTCI_{>28}: 98%



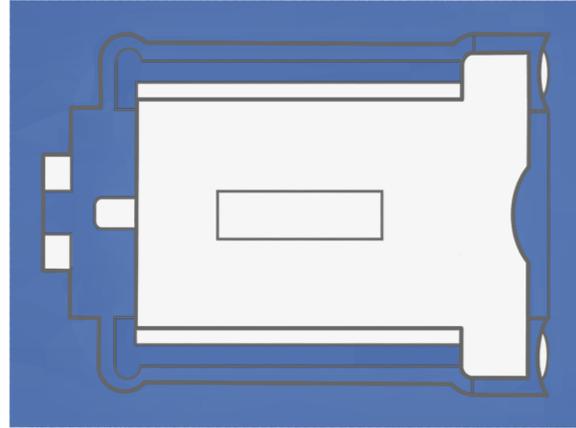
ORE 18:00

UTCI_{<0}: 0%
UTCI₀₋₂₈: 0%
UTCI_{>28}: 100%



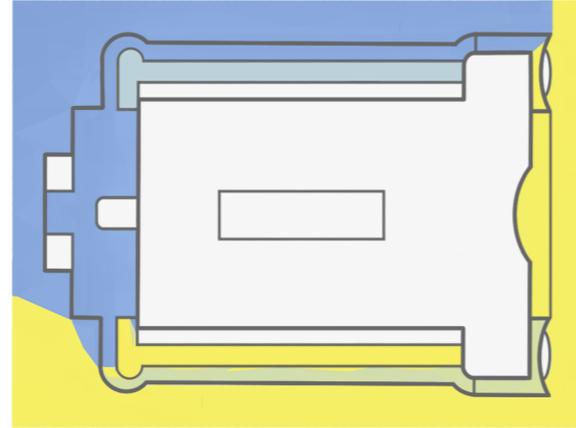
UTCI ANALYSIS

Extreme Cold Week (30/12 - 5/01)



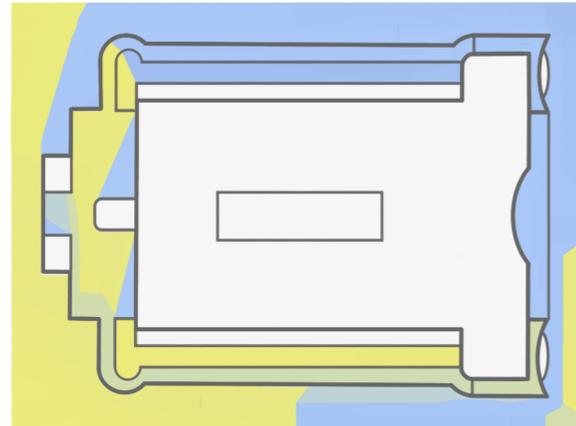
ORE 9:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



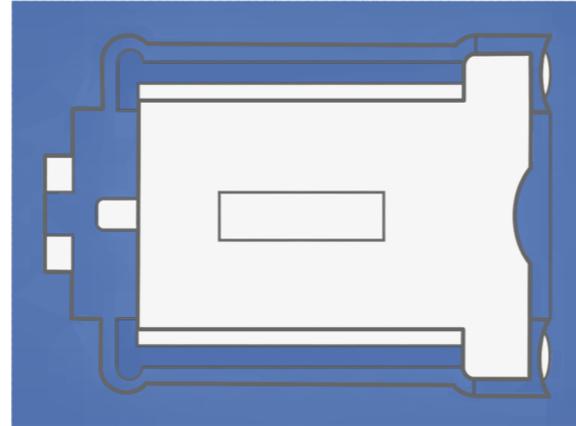
ORE 12:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



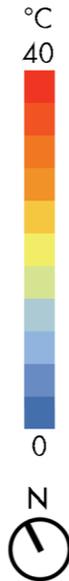
ORE 15:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



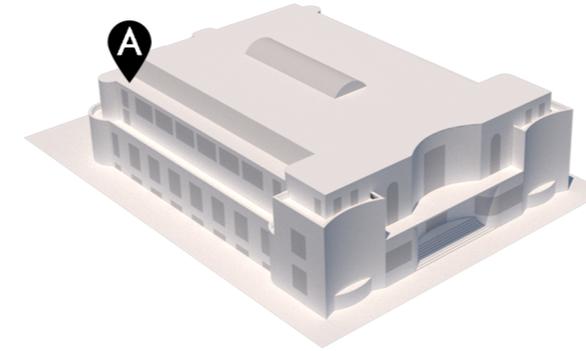
ORE 18:00

UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



UTCI ANALYSIS

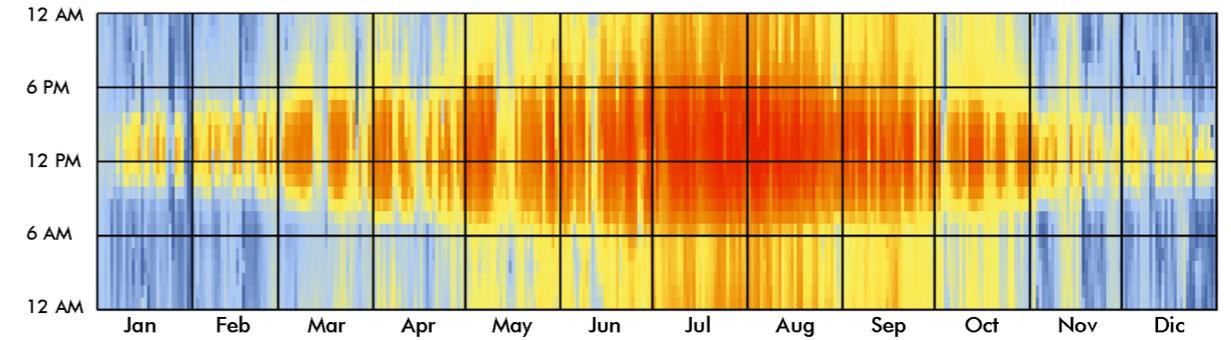
Punto preciso



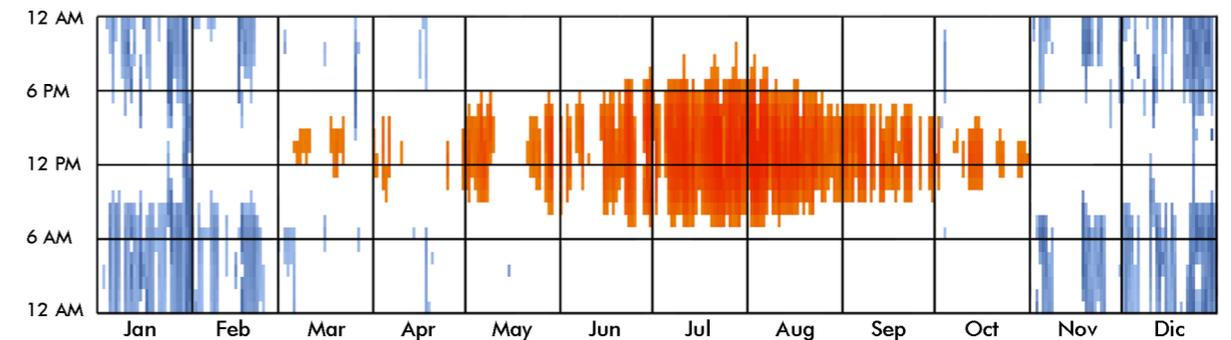
Cold Stress (UTCI_{<0}): 12,45%
 Comfortable (UTCI₀₋₂₈): 73,75%
 Heat Stress (UTCI_{>28}): 13,80%

Distanza dal treshold (Cold Stress): 4,10 °C
 Distanza dal treshold (Heat Stress): 5,10 °C

Overall Universal Thermal Climate Index

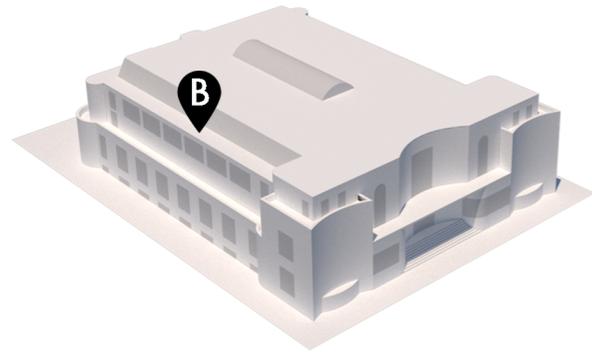


Discomfort Universal Thermal Climate Index



UTCI ANALYSIS

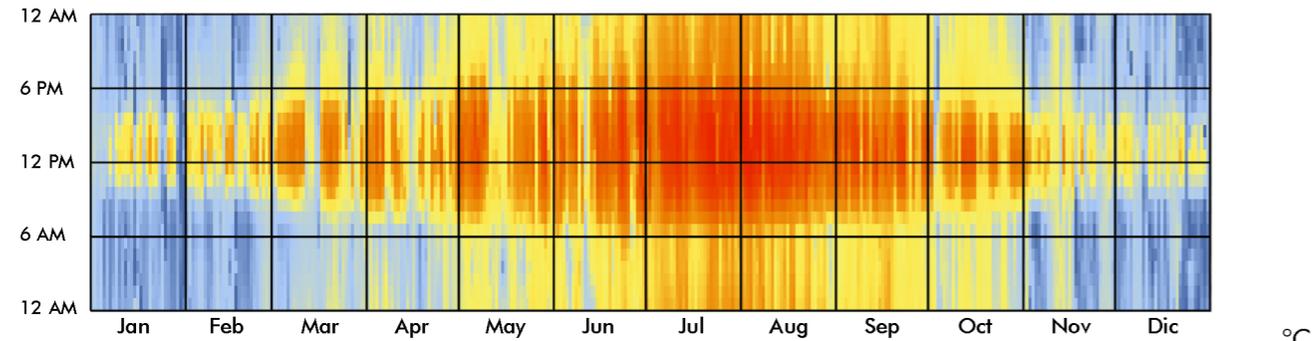
Punto preciso



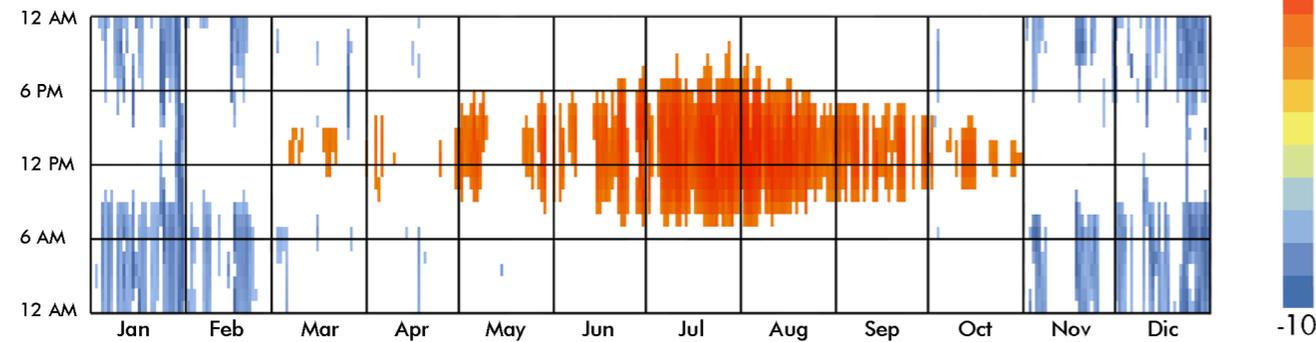
Cold Stress (UTCI_{<0}): 11,95%
 Comfortable (UTCI₀₋₂₈): 74,90%
 Heat Stress (UTCI_{>28}): 13,15%

Distanza dal treshold (Cold Stress): 4 °C
 Distanza dal treshold (Heat Stress): 4,70 °C

Overall Universal Thermal Climate Index

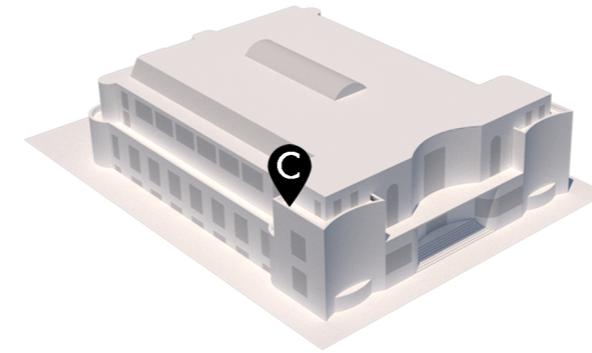


Discomfort Universal Thermal Climate Index



UTCI ANALYSIS

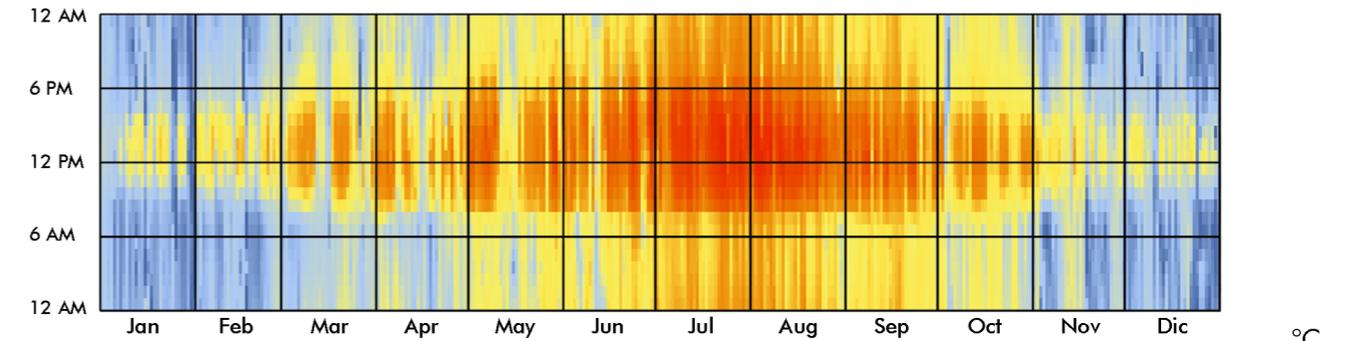
Punto preciso



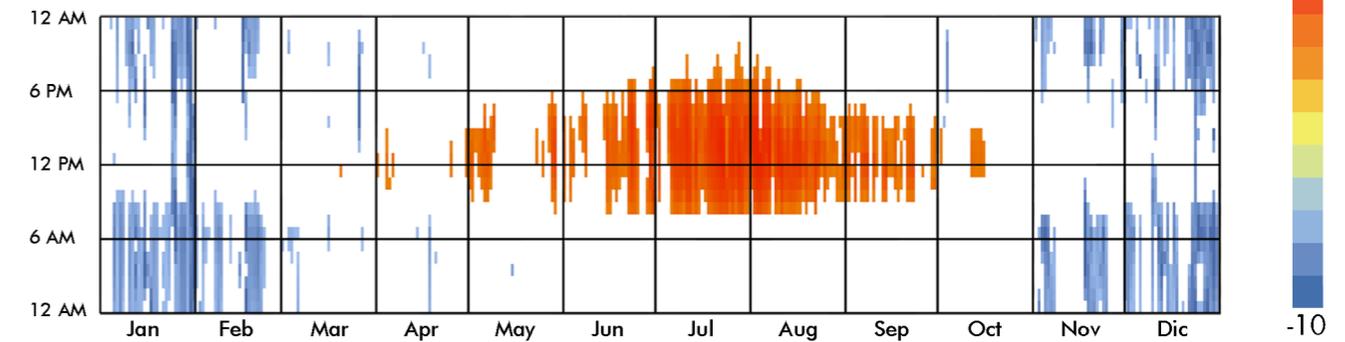
Cold Stress (UTCI_{<0}): 11,65%
 Comfortable (UTCI₀₋₂₈): 77,15%
 Heat Stress (UTCI_{>28}): 11,20%

Distanza dal treshold (Cold Stress): 3,90 °C
 Distanza dal treshold (Heat Stress): 4,40 °C

Overall Universal Thermal Climate Index



Discomfort Universal Thermal Climate Index



3.3 CREAZIONE DELLA RESPONSIVE WAVE

Processo utilizzato per la realizzazione della nuova schermatura

Le tematiche trattate nei capitoli precedenti, unite alle analisi fisico-tecniche, si concretizzano nella realizzazione di una superficie responsiva in grado di modificare la propria conformazione in base agli stimoli ambientali ricevuti. Questa nuova "pelle" dinamica può adattarsi alle variabili condizioni climatiche esterne sfruttando al meglio gli apporti energetici gratuiti al fine di ridurre i consumi energetici legati al riscaldamento e al raffrescamento dell'edificio. Così, come un organismo vivente, la nuova superficie è in grado di interagire con l'ambiente circostante e trasformarsi in funzione degli input ricevuti. È stata scelta la Piscina Monumentale come edificio su cui applicare la doppia "pelle" poiché risulta provvista di un'ampia facciata rivolta a sud senza ostruzioni esterne che potessero fare da barriera tra il sole e l'ambiente interno. Essendo un manufatto architettonico di rilevanza storica si è deciso di realizzare la schermatura in modo che interferisse nel minor modo possibile con l'esistente; infatti è rimasto inalterato il prospetto principale su Corso Galileo Ferraris, considerato di particolare importanza e valore.

Dalle analisi illuminotecniche svolte in precedenza sono emersi alcuni valori critici per il comfort degli occupanti dell'edificio. Dalla *Daylight Analysis* si evince come le vetrate lungo via Filadelfia, dunque sul lato sud della Piscina Monumentale, siano responsabili di un'eccessiva quota di radiazione luminosa in ambiente che provoca localizzati fenomeni di abbagliamento. Anche in base ai risultati della *UTCI Analysis* il fronte sud risulta quello più colpito dai raggi solari, essendo quello più esposto e privo di ostruzioni. Di conseguenza diventa necessario schermare, almeno in alcuni periodi significativi, le superfici trasparenti lungo via

Filadelfia e il lucernaio collocato sulla copertura. La nuova superficie, per cercare di preservare quanto più possibile l'aspetto originale dell'edificio, è stata collocata ad una distanza di 7 metri dalla Piscina Monumentale, in corrispondenza della fine della pista ciclabile adiacente. Questa nuova "pelle" avrà il compito di modificare la sua conformazione in funzione del periodo dell'anno e della radiazione solare incidente su di essa, modulando la quantità di luce entrante in ambiente. Per un corretto funzionamento la nuova superficie dovrà necessariamente essere posta in prossimità delle aperture responsabili del *discomfort*.

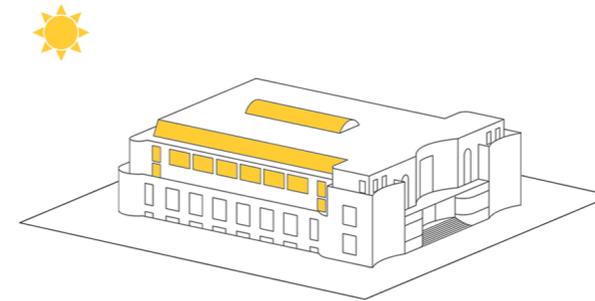
La ricerca della forma migliore per l'obiettivo desiderato è stata ottenuta in seguito a numerosi esperimenti legati alla regolazione della radiazione solare combinata con la fattibilità architettonica e strutturale. In un primo momento è stata concepita una superficie parallela al lato sud dell'edificio, dunque in grado di frapporsi tra la luce diretta del sole e le finestre della Piscina Monumentale. Questa soluzione però non permetteva di schermare la radiazione incidente sul lucernario e dunque non in grado di assolvere a pieno il compito per cui era stata studiata. Così, quasi per sfida, è stata allungata per fare in modo che ostruisse anche i raggi diretti verso la copertura. Dal momento che questa scelta risultava infattibile, a causa dell'eccessiva altezza richiesta, è stata concepita una nuova schermatura ad angolo retto. Questa soluzione, meno prominente e impattante della precedente, era in grado di rivestire l'edificio ostruendo le aperture che causano *discomfort* ma necessitava di una struttura molto pesante e complessa. Così la scelta finale è ricaduta su una superficie simile alla precedente; avente le stesse caratteristiche prestazionali ma caratterizzata da una forma curva e sinuosa. Grazie a questa, infatti, diventa possibile ostruire le aperture che provocavano abbagliamento all'interno dell'edificio e schermare le aree eccessivamente esposte alla radiazione diretta. Inoltre, rispetto all'alternativa ad angolo retto, viene impiegata una minor quantità di materiale sia per la struttura che per il rivestimento; infatti è stata fatta una prova di "panelizzazione" delle due

superfici e per ricoprire interamente di pannelli la schermatura curva ne vengono impiegati il 30% in meno rispetto alla versione precedente. La nuova "pelle" progettata, oltre a schermare la radiazione solare, protegge l'edificio dagli agenti atmosferici e ne rinnova l'immagine esteriore, pur preservando l'aspetto originario della facciata principale lungo Corso Galileo Ferraris.

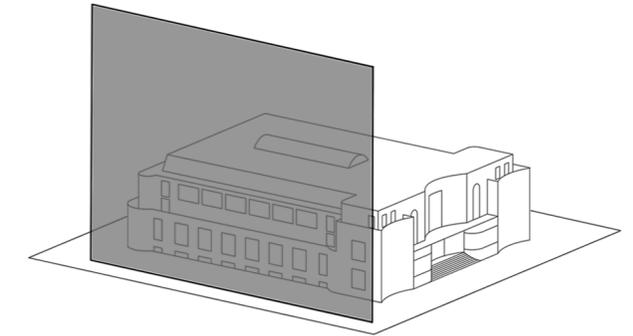
La forma dei pannelli è stata scelta in funzione di alcune precise regole geometriche e del loro posizionamento sulla "pelle" responsiva. In un primo momento si è optato per un pattern triangolare, così che ogni sagoma potesse essere "planarizzata" (tutti i punti giacciono su un unico piano) con facilità, avendo il triangolo tutti e tre i punti sullo stesso piano. Successivamente, al fine di ottenere un meccanismo più semplice e con un minor numero di pannelli, si è optato per una forma romboidale ottenuta dall'unione di due triangoli. Dopo aver scelto la fisionomia e la posizione della superficie responsiva è stato applicato parametricamente, attraverso il software Grasshopper, il pattern geometrico che la caratterizza. Con questa operazione di "panelizzazione" è possibile ricoprire la "pelle" con un motivo geometrico definito e la modifica di quest'ultimo porterà automaticamente alla variazione dell'intero sistema, consentendo al progettista di operare direttamente su ogni elemento. L'utilizzo di Grasshopper, oltre a far interagire la forma generata con i parametri ambientali, la rende adattiva a qualsiasi configurazione: se viene modificata la fisionomia di base il pattern geometrico si riconfigura automaticamente sulla nuova forma generata.

Dalle prime analisi è emerso come i pannelli collocati nella parte bassa della facciata sud dell'edificio non contribuivano in alcun modo all'aumento del comfort. Questo accadeva per due motivi: la radiazione solare incidente era inferiore rispetto a quella che colpiva la parte alta della superficie e in quella posizione non vi erano finestre responsabili di abbagliamento all'interno dell'edificio. Così si è optato per la rimozione dei pannelli nella parte bassa della "pelle", anche in ottica di un risparmio

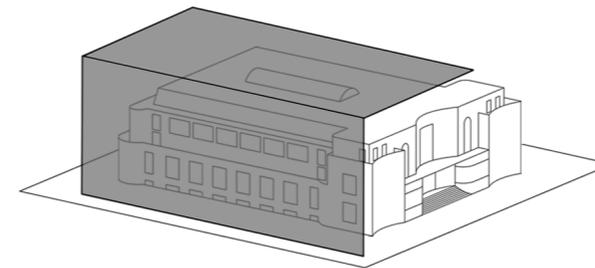
Figura 67 (pagina successiva):
Processo di generazione della
schermatura



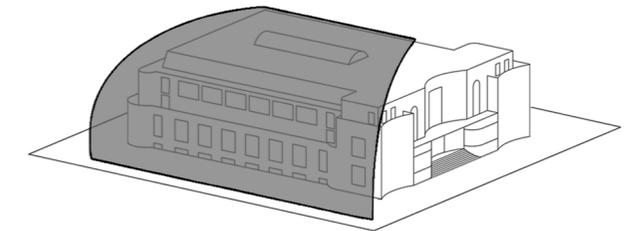
01. DEFINIZIONE DELLE SUPERFICI VETRATE DA SCHERMARE



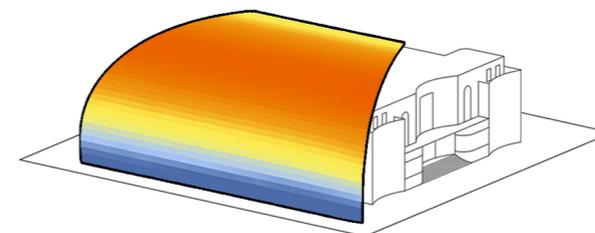
02. TENTATIVO DI OSTACOLARE LA RADIAZIONE SOLARE TRAMITE UNA SCHERMATURA VERTICALE



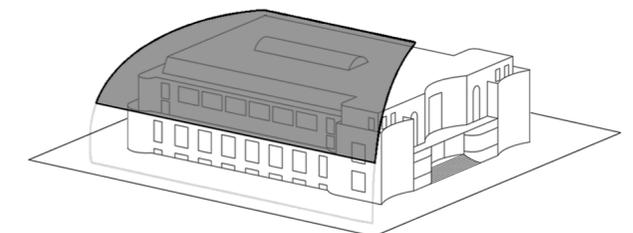
03. GENERAZIONE DI UNA SCHERMATURA AD ANGOLO RETTO PER OSTRUIRE TUTTE LE APERTURE



04. CURVATURA DELLA SCHERMATURA GENERATA PER RISPARMIARE MATERIALE



05. QUANTITA' DI RADIAZIONE SOLARE CHE COLPISCE LA SCHERMATURA



06. RIDUZIONE DELLA SCHERMATURA IN BASE ALLA RADIAZIONE E ALLE SUPERFICI VETRATE

di materiale per ridurre l'impatto ambientale dell'intervento. Si è cercato di semplificare il più possibile il sistema che regola il movimento delle geometrie che caratterizzano la facciata, così da limitare i problemi legati alla complessità e futura manutenzione del manufatto. La scelta è ricaduta sulla rotazione del pannello romboidale attorno ad un asse, studiato in funzione del percorso del sole. Il movimento, attraverso cui rispondere alle sollecitazioni esterne, viene regolato dalla quantità di radiazione in quella porzione di superficie che ne determina l'apertura e la chiusura: quando è aperto permette alla luce di entrare, mentre quando è chiuso la ostacola.

Così la nuova "pelle" responsiva sarà caratterizzata da pannelli romboidali collocati all'interno dell'area descritta in precedenza; tuttavia la forma necessaria per schermare le aperture ha una conformazione molto complessa che ne impedirebbe la corretta progettazione e realizzazione. Infatti la forma curva che riveste l'edificio, partendo lungo via Filadelfia e arrivando al lucernario, potrebbe portare a una struttura eccessivamente imponente o a problemi strutturali causati dalla presenza di un unico appoggio a terra; ad esempio gli agenti atmosferici, come vento e neve, potrebbero danneggiarla. Per evitare questi problemi si è deciso di far appoggiare la superficie anche sul lato nord della Piscina Monumentale, in modo da poter scaricare il peso proprio su un altro supporto. Nonostante ciò la "panelizzazione" è stata utilizzata solamente nelle aree in cui era necessario, escludendo dunque la porzione di schermatura a nord oltre il lucernario e, come detto in precedenza, quella a sud nella parte bassa dell'edificio.

La struttura della superficie che "avvolge" la Piscina Monumentale è una reticolare spaziale, che si differenzia dalla comune carpenteria tubolare per via della sua conformazione tridimensionale. Questo tipo di intelaiatura metallica è costituita da due livelli di griglie disposti su piani paralleli tra loro, anche se inclinati o curvi, e connessi da elementi tubolari diagonali che ne collegano i nodi. La struttura reticolare spaziale

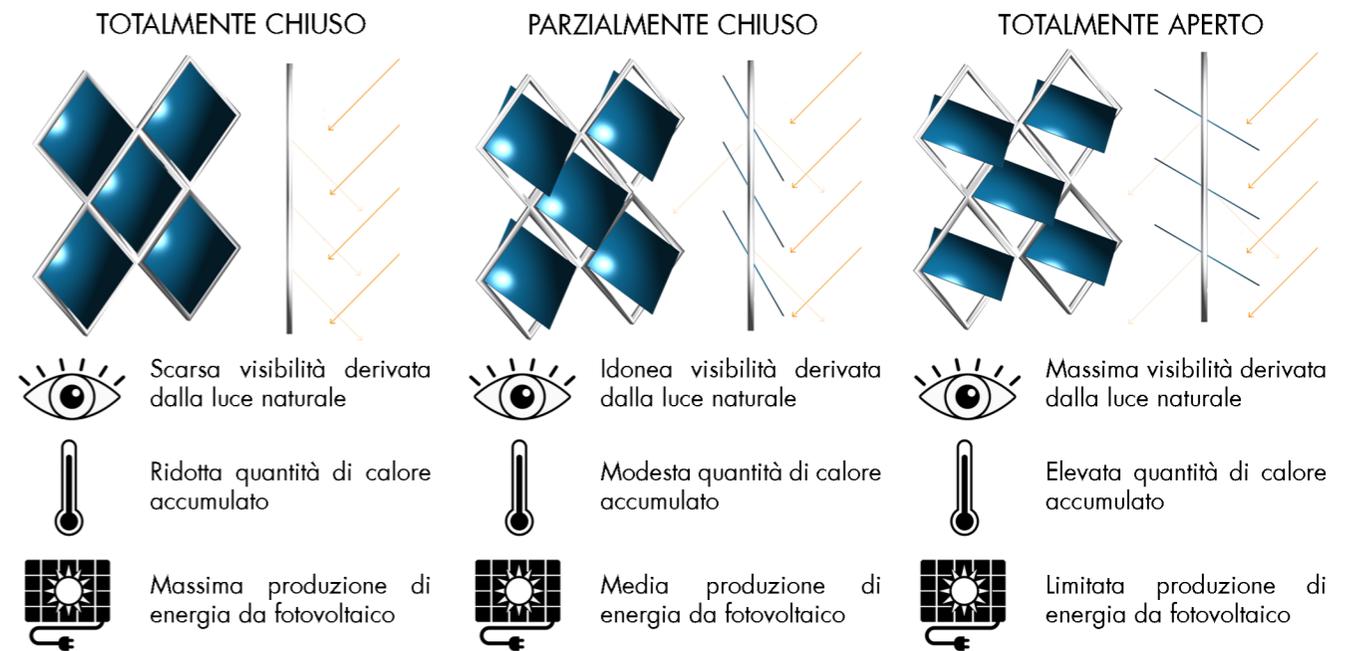
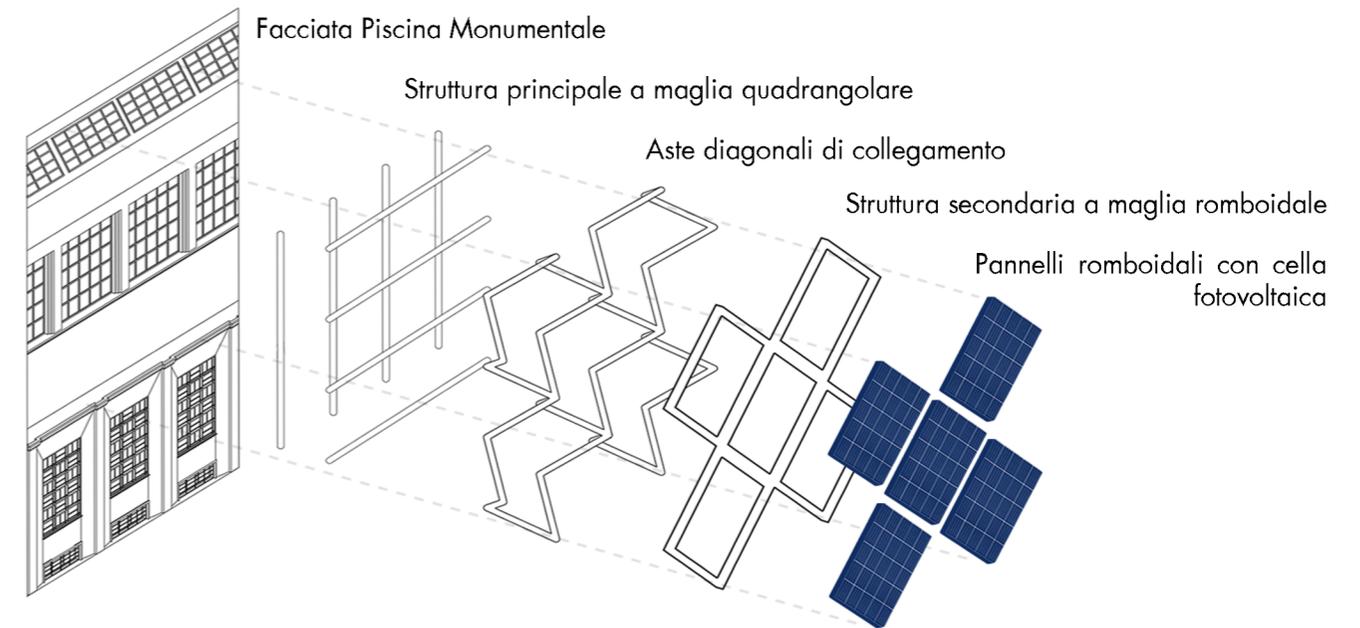


Figura 68 (pagina successiva, in alto): Esploso assonometrico in cui vengono evidenziati i diversi componenti che costituiscono la schermatura

Figura 69 (pagina successiva, in basso): Variazione del rapporto tra i pannelli e la radiazione solare in funzione della loro inclinazione

permette di rispondere in modo ottimale alle sollecitazioni esterne, che vengono ripartite e distribuite uniformemente a tutti gli elementi che compongono. Inoltre, rispetto alle strutture metalliche convenzionali, sono adatte a coprire luci di notevole ampiezza attraverso un minor peso, numero di supporti, costo e tempo di costruzione (grazie ad un elevato impiego di elementi prefabbricati).

I pannelli possono ruotare grazie ad un sistema di sensori in grado di recepire gli stimoli esterni. In questo caso come parametro per il movimento viene utilizzata la radiazione luminosa, però è possibile adattare questo impianto ad altri fattori e rendere la superficie responsiva al variare della temperatura, dell'umidità, del suono o del movimento.

I pannelli mobili sono in alluminio e hanno al loro interno una cella fotovoltaica in grado di convertire l'energia solare in energia elettrica. Così, attraverso l'utilizzo di fonti rinnovabili, è possibile ridurre la quantità di elettricità impiegata per il fabbisogno dell'edificio. Il posizionamento del fotovoltaico sul lato del pannello esposto alla radiazione segue il funzionamento della schermatura stessa: nel periodo estivo la "pelle" è prevalentemente chiusa e dunque il massimo della radiazione colpirà la cella e, di conseguenza, aumenterà la produzione di energia elettrica. Il movimento dei diversi elementi che compongono la facciata è regolato da un perno collocato lungo l'asse di rotazione e collegato con delle staffe alla griglia metallica in acciaio. Un tirante posto agli altri due angoli consente al pannello di muoversi nella direzione stabilita senza subire deviazioni.

Figura 70 (pagina successiva):
Vista renderizzata in cui si
evidenzia il rapporto tra
la schermatura e la Piscina
Monumentale



3.4 VANTAGGI E RISULTATI OTTENUTI

L'applicazione della schermatura per il controllo della radiazione solare incidente ha avuto una ricaduta importante sul *comfort* degli occupanti della Piscina Monumentale. La possibilità di regolare ciascun pannello indipendentemente consente di gestire nel modo più preciso possibile la quantità di luce da lasciar entrare in ambiente e quella da bloccare. Contemporaneamente alla regolazione della radiazione solare permette ai fruitori di godere della vista verso l'esterno favorendo una piacevole percezione degli spazi. Inoltre l'aspetto esteriore dei pannelli che compongono la schermatura caratterizza l'edificio pur mantenendo inalterate alcune parti significative. L'aggiunta della "*Responsive Wave*" rispecchia le caratteristiche intrinseche presenti all'interno del nome stesso: un'onda che investe la Piscina Monumentale e le conferisce maggiori capacità prestazionali, adattandosi alle variazioni climatiche esterne per garantire elevati requisiti di *comfort*.

Il movimento dei pannelli, dettato appunto dal cambiamento delle condizioni ambientali, dovrebbe teoricamente seguire l'andamento delle stagioni: in inverno, caratterizzato da basse temperature, la schermatura si apre durante il giorno, favorendo l'ingresso di apporti solari gratuiti, e si chiude nelle ore pomeridiane, quando la radiazione diminuisce, in modo da trattenere il calore accumulato. Invece in estate, dunque con temperature elevate, la superficie responsiva si chiude quando la luminosità è più alta, evitando fenomeni di *discomfort* causato dall'eccessiva radiazione, e si apre quando si abbassa, favorendo l'ingresso della luce e garantendo un raffrescamento notturno.

Nonostante la metodologia sopra descritta sia la più utilizzata talvolta

può risultare inefficace dal punto di vista prestazionale, perché non tiene in considerazione le variazioni precise del sole in una giornata o in una stagione, oltre alla quantità di radiazione luminosa in ambiente, che dipende dalla morfologia dell'edificio, dalla presenza di ostruzioni e dalla disposizione delle aperture.

Per sfruttare al meglio gli apporti gratuiti diventa necessario ricorrere ad un involucro adattivo: in grado di adattarsi con precisione e continuità alle variazioni climatiche per garantire il benessere degli occupanti. Per raggiungere questo risultato, caratterizzato da variazioni in tempo reale basate sui parametri ambientali, è necessario servirsi di un metodo di progettazione parametrico per l'ottimizzazione della schermatura. Attraverso questa metodologia diventa possibile esaminare un'ampia gamma di alternative, basate sulle condizioni climatiche e sulla morfologia del sito, in un unico modello. L'approccio che lega algoritmi e strumenti di analisi energetica per l'ottimizzazione della forma sta diventando un metodo sempre più diffuso per l'analisi delle prestazioni variabili degli edifici in relazione ad una specifica configurazione progettuale. Così, attraverso la progettazione algoritmica, è possibile combinare differenti varianti di design per raggiungere la forma architettonica ottimale in funzione delle condizioni ambientali.

Per il raggiungimento di questo obiettivo è stato necessario ricorrere a software di progettazione parametrica, in cui la forma dipende dai parametri scelti dal progettista; infatti per la realizzazione della superficie responsiva è stato utilizzato il *software* Grasshopper. Questo ha permesso di avere un modello geometrico basato su variabili numeriche e la loro modifica comporta un cambiamento nella sua visualizzazione finale. All'interno di questa interfaccia parametrica è stato possibile inserire direttamente gli strumenti in grado di svolgere le analisi ambientali, come *Ladybug* e *Honeybee*, e utilizzare i loro risultati come *input*.

Invece per la modellazione della Piscina Monumentale e del contesto è stato utilizzato *Rhinoceros*, dal momento che queste geometrie non

sarebbero dovute cambiare parametricamente in funzione degli stimoli ricevuti. Rispetto ad un tradizionale approccio alla progettazione l'utilizzo di algoritmi permette di impostare dei parametri in grado di far variare la geometria e gestirne il dinamismo in tempo reale. In questo modo variabili come la luce naturale, il comfort degli occupanti e la forma della schermatura diventano degli *input* in grado di conferire identità al progetto finale. Per la ricerca della soluzione ottimale sono state analizzate due diverse metodologie di intervento: orientare i pannelli che compongono la schermatura perpendicolari al vettore solare, in modo da schermare la radiazione solare diretta, e l'ottimizzazione multi-obiettivo, attraverso lo strumento Galapagos incluso nel *software* Grasshopper, per il perfezionamento del risultato finale sotto ogni aspetto.

Applicazione della schermatura perpendicolare al vettore solare

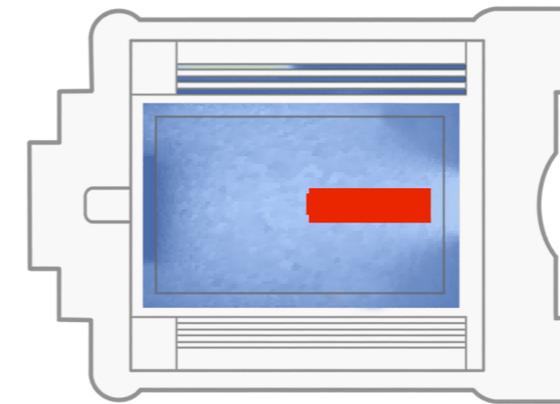
La schermatura in un primo momento è stata applicata con una configurazione statica dei pannelli, in funzione dell'ora del giorno in cui si svolgeva l'analisi. Nello specifico è stata fatta una simulazione, sempre alle ore 9:00, 12:00, 15:00 e 18:00 dei periodi tipici, con i diversi moduli che compongono la nuova "pelle" perpendicolari al vettore solare incidente su di essi, in modo da schermare il più possibile la radiazione solare e allo stesso tempo garantire la maggior produzione di energia da fotovoltaico. L'applicazione della schermatura con questo orientamento dei pannelli ha ridotto notevolmente la percentuale di UDI > 3000 e di conseguenza il *discomfort* da abbagliamento all'interno della Piscina Monumentale. Tuttavia la chiusura totale dei componenti che caratterizzano la seconda "pelle" provoca un aumento dell'UDI *fell-short* (UDI < 100) in cui è necessario ricorrere all'illuminazione artificiale a causa di una scarsa quantità di luce diurna.

Dalla *Daylight Analysis* effettuata durante gli equinozi si evince come l'applicazione della schermatura abbia eliminato la percentuale di UDI *exceeded* che provocava abbagliamento, ad eccezione delle ore 9:00 in cui è presente in corrispondenza della finestra collocata sulla facciata principale su Corso Galileo Ferraris, dove la schermatura non è presente. Nelle altre fasce orarie non vi è *discomfort* per eccesso di radiazione luminosa ma si verifica per il mancato raggiungimento della soglia di *comfort* fissata a 300 lux. Questi risultati potrebbero essere migliorati caratterizzando in maniera diversa l'apertura dei pannelli in modo da sfruttare al meglio la quantità di luce naturale che entra in ambiente. Nonostante ciò l'analisi effettuata dimostra come la schermatura in quella posizione elimina completamente l'abbagliamento provocato dalla radiazione luminosa attraverso le superfici vetrate a sud, garantendo una percentuale di UDI *achieved* che va da 87,30% a 95,70% a seconda

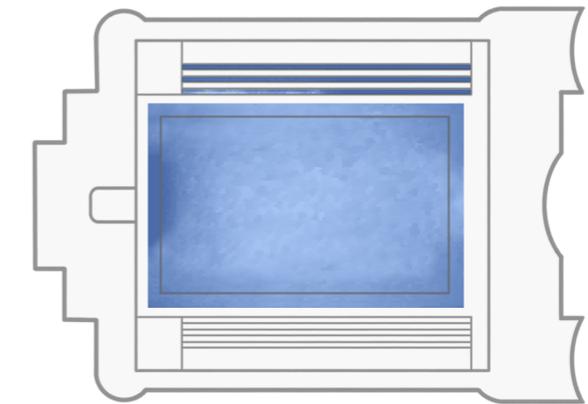
dell'ora. L'aumento del *comfort*, unito alla quasi totale assenza di abbagliamento ma ad un aumento della percentuale di UDI *fell-short* (UDI <100), caratterizza anche gli altri periodi in cui è stata fatta la *Daylight Analysis*. Ad esempio durante il solstizio d'estate, con la schermatura applicata, l'UDI *exceeded* è presente solamente alle ore 9:00 e alle ore 18:00; questo si verifica perché il sole entra dalle superfici vetrate in cui non vi è la nuova "pelle": rispettivamente est e ovest. Nonostante ciò la percentuale di *comfort* è aumentata notevolmente fino a superare il 95% in alcune fasce orarie, mentre nelle analisi dello stato di fatto non arrivava a 90%. Tuttavia, anche se in modo esiguo, c'è stato un aumento dell'UDI *fell-short* (UDI <100) in cui la luce naturale non è sufficiente e diventa necessario ricorrere all'illuminazione artificiale. Mentre nella *Daylight Analysis* del solstizio d'inverno la percentuale di UDI *exceeded* è dello 0% (tranne alle ore 12:00 in cui è 0,20%), dunque non si verifica mai abbagliamento. Tuttavia la percentuale di *comfort* è simile alle analisi svolte senza "pelle" aggiuntiva, dal momento che è aumentata la quota di UDI *fell-short* (UDI <100). L'utilizzo della schermatura con i pannelli perpendicolari al vettore solare si è rivelata, in questo caso, utile per aumentare il comfort e ridurre l'abbagliamento, ma inefficace per limitare l'utilizzo di illuminazione artificiale. Per garantire il raggiungimento di tutti gli obiettivi diventa necessario regolare il movimento di ogni elemento per raggiungere il risultato migliore: ottimizzando la configurazione della superficie responsiva.

DAYLIGHT ANALYSIS

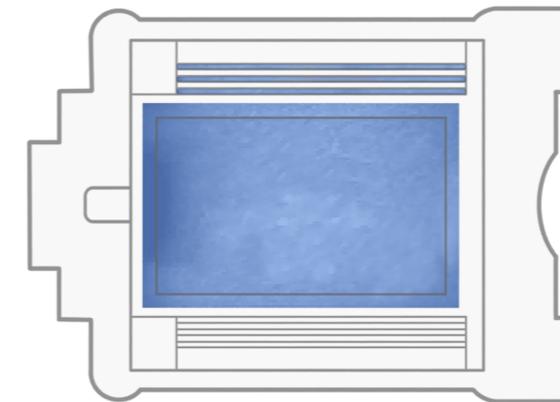
Equinozio di primavera e d'autunno: 21 marzo e 21 settembre



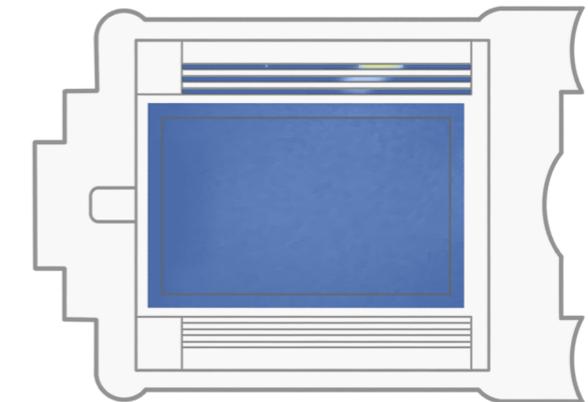
ORE 9:00
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 55 kWh
 UDI_{<100}: 3,50%
 UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 88,80%
 UDI_{>3000}: 7,70%



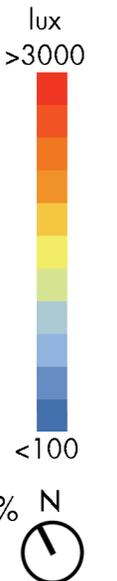
ORE 12:00
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 92 kWh
 UDI_{<100}: 4,30%
 UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 95,70%
 UDI_{>3000}: 0%



ORE 15:00
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 63 kWh
 UDI_{<100}: 5,40%
 UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 94,60%
 UDI_{>3000}: 0%

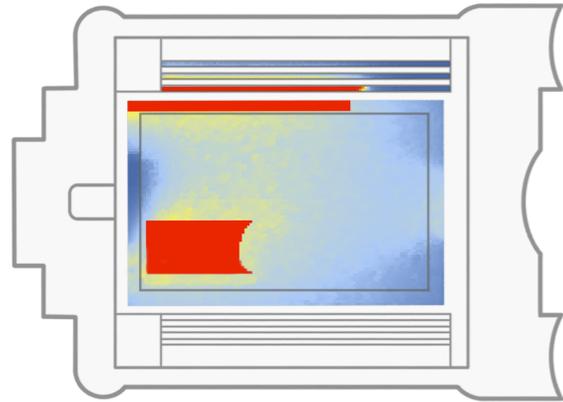


ORE 18:00
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 11 kWh
 UDI_{<100}: 12,70%
 UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 87,30%
 UDI_{>3000}: 0%



DAYLIGHT ANALYSIS

Solstizio d'estate: 21 giugno

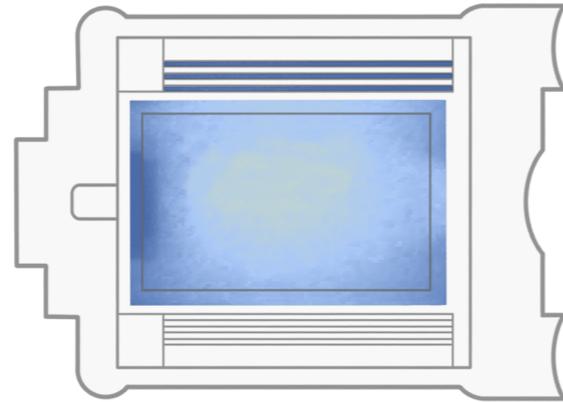


ORE 9:00

UDI_{<100}: 1%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 102 kWh

UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 86,50%
UDI_{>3000}: 12,50%

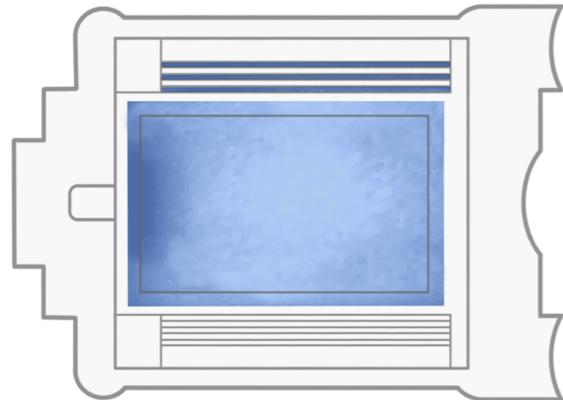


ORE 12:00

UDI_{<100}: 2,30%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 138 kWh

UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 97,70%
UDI_{>3000}: 0%

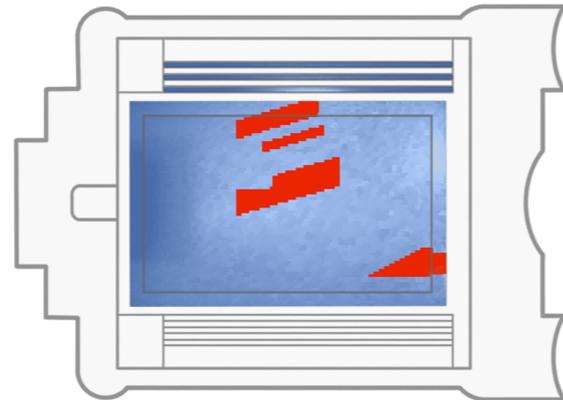


ORE 15:00

UDI_{<100}: 3,80%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 115 kWh

UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 96,20%
UDI_{>3000}: 0%

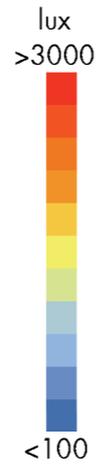


ORE 18:00

UDI_{<100}: 4,20%

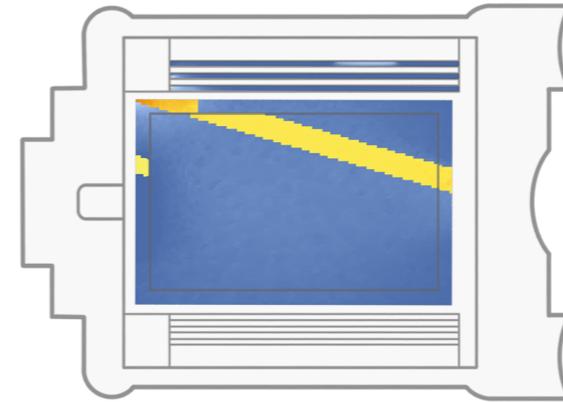
PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 28 kWh

UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 86,70%
UDI_{>3000}: 9,10%



DAYLIGHT ANALYSIS

Solstizio d'inverno: 21 dicembre

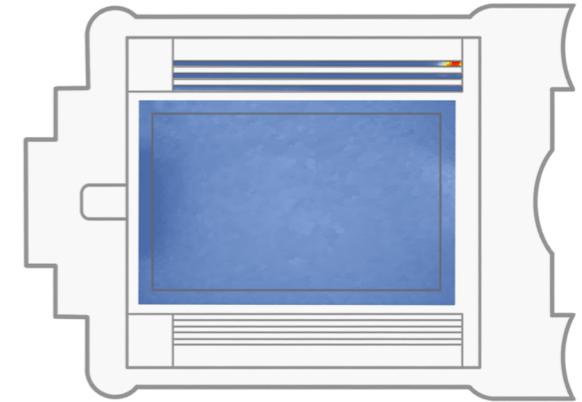


ORE 9:00

UDI_{<100}: 7,10%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 5 kWh

UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 92,90%
UDI_{>3000}: 0%

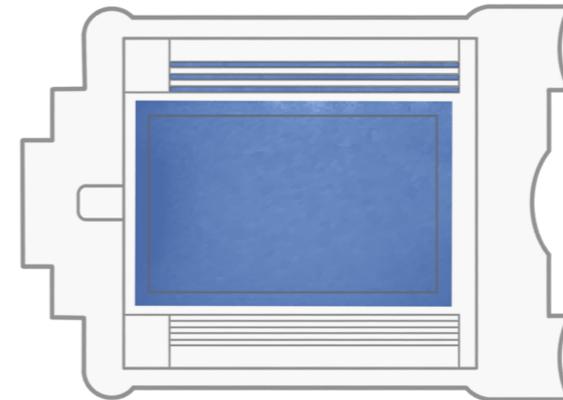


ORE 12:00

UDI_{<100}: 6,40%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 45 kWh

UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 93,40%
UDI_{>3000}: 0,20%

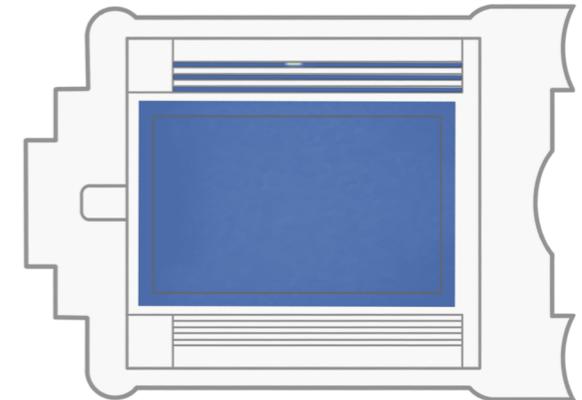


ORE 15:00

UDI_{<100}: 4,50%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 9 kWh

UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 95,50%
UDI_{>3000}: 0%

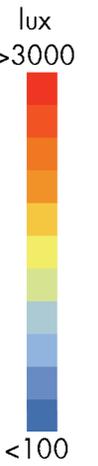


ORE 18:00

UDI_{<100}: 16,50%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 0 kWh

UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 83,50%
UDI_{>3000}: 0%

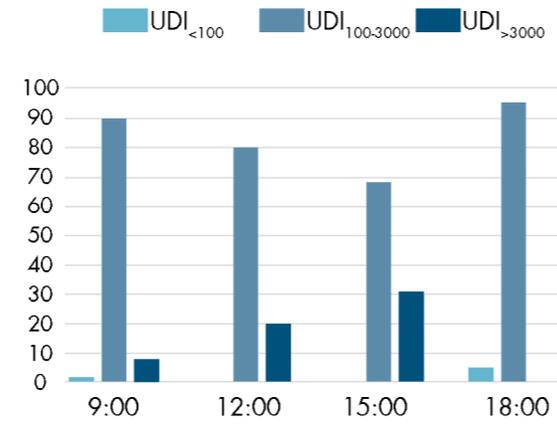


DAYLIGHT ANALYSIS

Stato di fatto

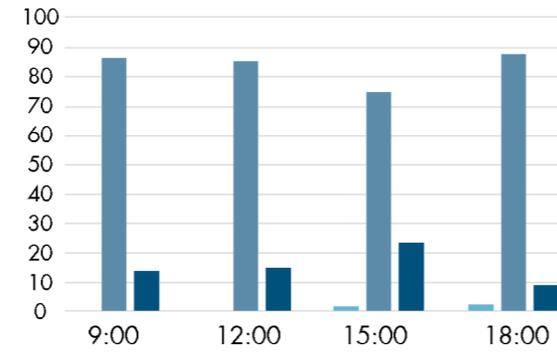
Equinozio primavera/autunno: 21 marzo/settembre

	kWh	UDI _{<100}	UDI ₁₀₀₋₃₀₀₀	UDI _{>3000}
9:00	-	2%	90,30%	7,70%
12:00	-	0%	80,50%	19,50%
15:00	-	0,40%	68,90%	30,70%
18:00	-	5,60%	94,40%	0%



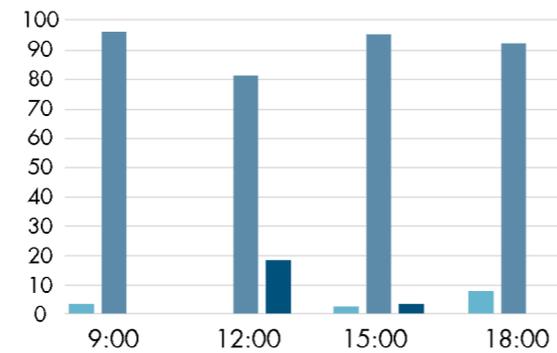
Solstizio d'estate: 21 giugno

	kWh	UDI _{<100}	UDI ₁₀₀₋₃₀₀₀	UDI _{>3000}
9:00	-	0%	86,80%	13,20%
12:00	-	0%	84,50%	15,50%
15:00	-	1,70%	74,90%	23,40%
18:00	-	2,30%	88,30%	9,40%



Solstizio d'inverno: 21 dicembre

	kWh	UDI _{<100}	UDI ₁₀₀₋₃₀₀₀	UDI _{>3000}
9:00	-	3,20%	96,80%	0%
12:00	-	0%	81,50%	18,50%
15:00	-	1,80%	95,20%	3%
18:00	-	8,70%	91,30%	0%

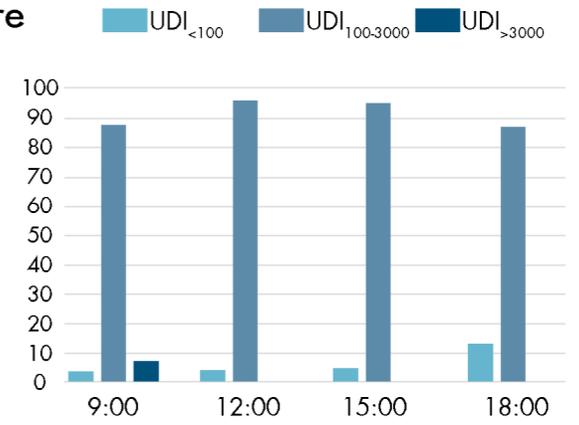


DAYLIGHT ANALYSIS

Schermatura perpendicolare al vettore solare

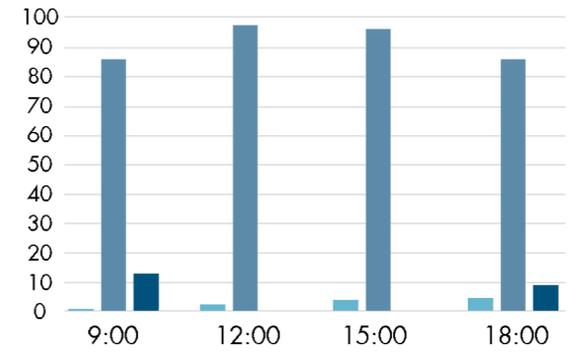
Equinozio primavera/autunno: 21 marzo/settembre

	kWh	UDI _{<100}	UDI ₁₀₀₋₃₀₀₀	UDI _{>3000}
9:00	55	3,50%	88,80%	7,70%
12:00	92	4,30%	95,70%	0%
15:00	63	5,40%	94,60%	0%
18:00	11	12,70%	87,30%	0%



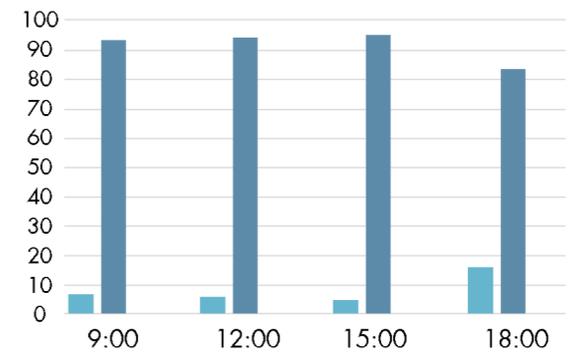
Solstizio d'estate: 21 giugno

	kWh	UDI _{<100}	UDI ₁₀₀₋₃₀₀₀	UDI _{>3000}
9:00	102	1%	86,50%	12,50%
12:00	138	2,30%	97,70%	0%
15:00	115	3,80%	96,20%	0%
18:00	28	4,20%	86,70%	9,10%



Solstizio d'inverno: 21 dicembre

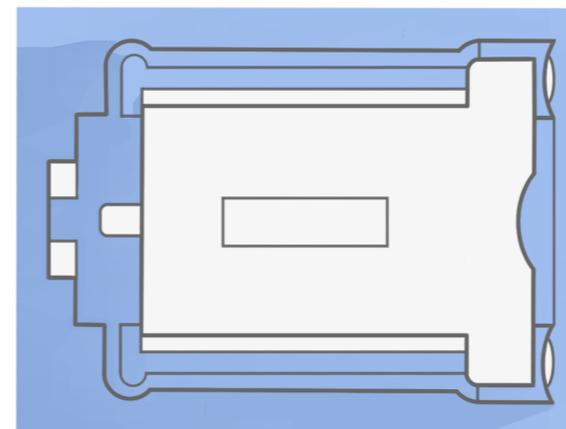
	kWh	UDI _{<100}	UDI ₁₀₀₋₃₀₀₀	UDI _{>3000}
9:00	5	7,10%	92,90%	0%
12:00	45	6,40%	93,40%	0,20%
15:00	9	4,50%	95,50%	0%
18:00	0	16,50%	83,50%	0%



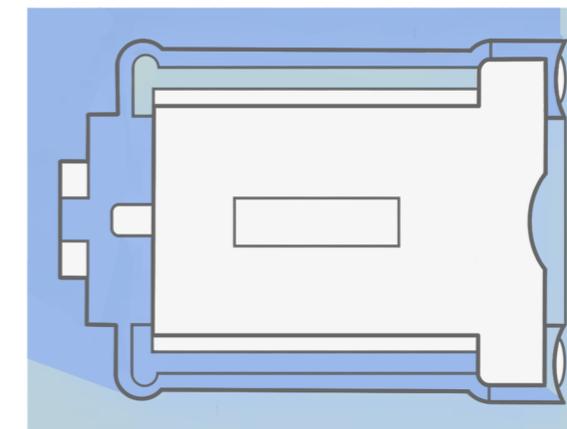
La schermatura, costituita da pannelli perpendicolari al vettore solare, è stata applicata anche nella *UTCI Analysis* al fine di aumentare le condizioni di *comfort* esterne. L'orientamento degli elementi che costituiscono la nuova "pelle" garantisce la massima quantità di energia prodotta dal fotovoltaico e il numero che viene riportato fa riferimento alla media dei giorni che compongono la settimana presa in analisi nell'orario indicato. Anche con la nuova schermatura la maggior parte dei periodi dell'anno in cui è stata svolta la simulazione sono caratterizzati da una situazione di *comfort*, con i valori di UTCI compresi tra 0 °C e 28 °C; questo accade, come per lo stato di fatto, durante la settimana tipica primaverile, la settimana tipica autunnale, la settimana tipica invernale e la settimana più fredda dell'anno. Mentre nei periodi più caldi analizzati, come la settimana tipica estiva e la settimana più calda dell'anno, grazie alla nuova "pelle" è stato possibile ridurre il *discomfort* legato al surriscaldamento ($UTCI > 28$ °C) grazie al contenimento della radiazione solare incidente sulla superficie esterna presa in considerazione. Questo ha portato ad un incremento della percentuale di *comfort* (0 - 28 °C) nelle ore stabilite, mentre continua ad essere assente la percentuale di $UTCI < 28$ °C. Nella settimana tipica estiva la quota di $UTCI$ 0 - 28 °C non raggiungeva il 35% (ad eccezione delle ore 9:00 in cui arriva a 55,80%), mentre con la schermatura supera, fatto salvo per le 18:00, il 65%. Invece nella settimana più calda dell'anno la nuova "pelle" ha un effetto significativo soltanto in alcuni momenti della giornata; alle ore 9:00 la percentuale di *comfort* (0 - 28 °C) passa da 52,80% a 64,20%, alle ore 12:00 da 33,50% a 72,40%, mentre rimane pressoché invariata alle 15:00 e alle 18:00.

UTCI ANALYSIS

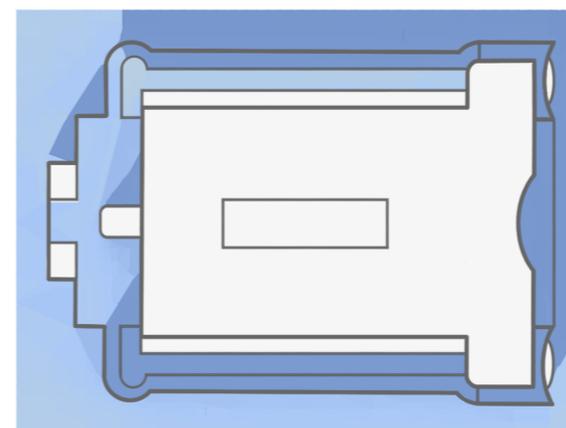
Typical Spring Week (29/03 - 4/04)



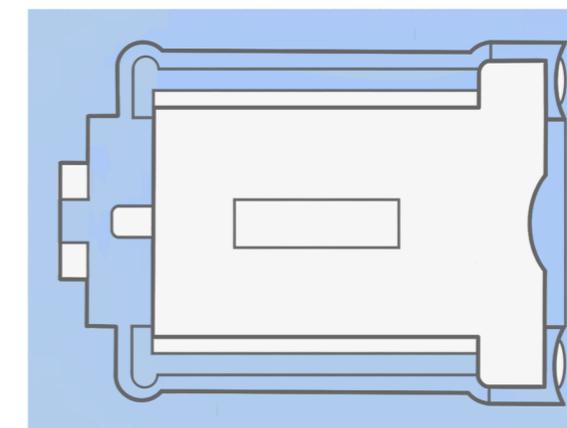
ORE 9:00
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 58 kWh
 $UTCI_{<0}$: 0%
 $UTCI_{0-28}$: 100%
 $UTCI_{>28}$: 0%



ORE 12:00
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 96 kWh
 $UTCI_{<0}$: 0%
 $UTCI_{0-28}$: 100%
 $UTCI_{>28}$: 0%



ORE 15:00
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 66 kWh
 $UTCI_{<0}$: 0%
 $UTCI_{0-28}$: 100%
 $UTCI_{>28}$: 0%

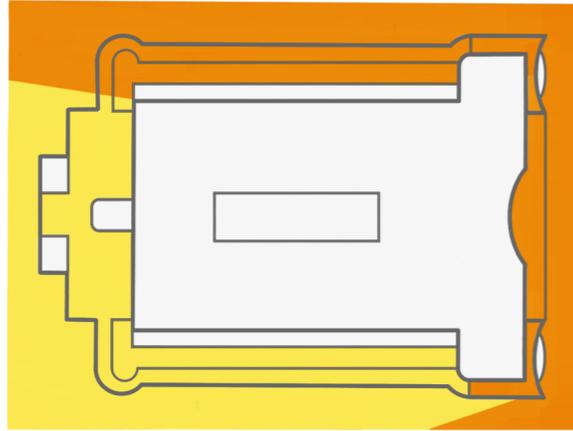


ORE 18:00
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 13 kWh
 $UTCI_{<0}$: 0%
 $UTCI_{0-28}$: 100%
 $UTCI_{>28}$: 0%

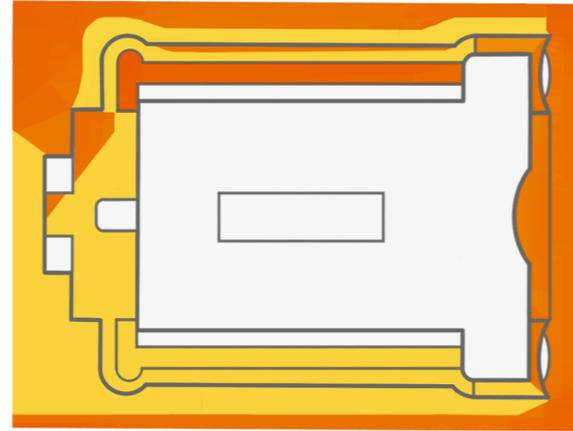


UTCI ANALYSIS

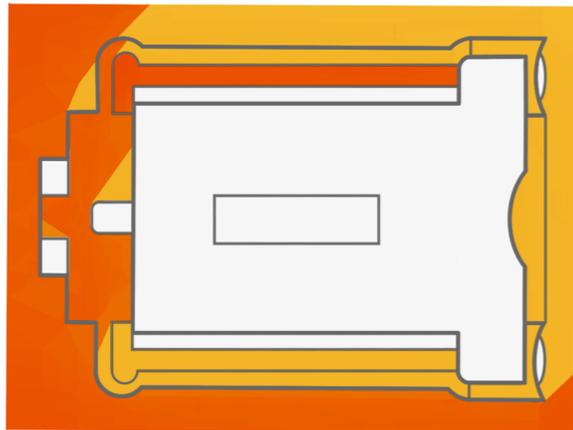
Typical Summer Week (22/06 - 28/06)



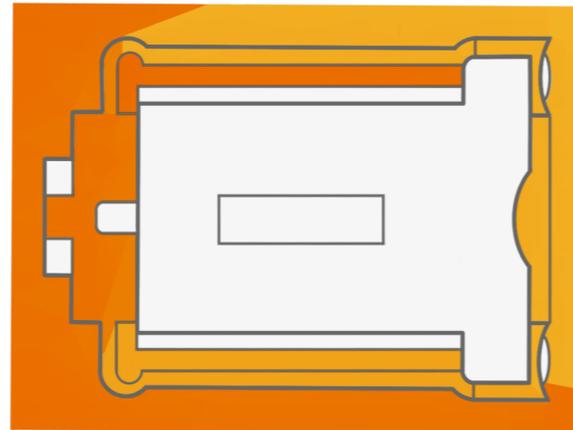
ORE 9:00 UTCI_{<0}: 0%
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 102 kWh
 UTCI₀₋₂₈: 67,50%
 UTCI_{>28}: 32,50%



ORE 12:00 UTCI_{<0}: 0%
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 138 kWh
 UTCI₀₋₂₈: 69,80%
 UTCI_{>28}: 30,20%



ORE 15:00 UTCI_{<0}: 0%
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 115 kWh
 UTCI₀₋₂₈: 69,30%
 UTCI_{>28}: 30,70%

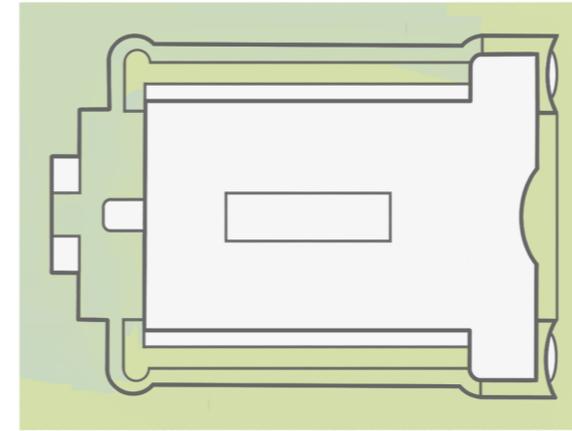


ORE 18:00 UTCI_{<0}: 0%
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 28 kWh
 UTCI₀₋₂₈: 51,70%
 UTCI_{>28}: 48,30%

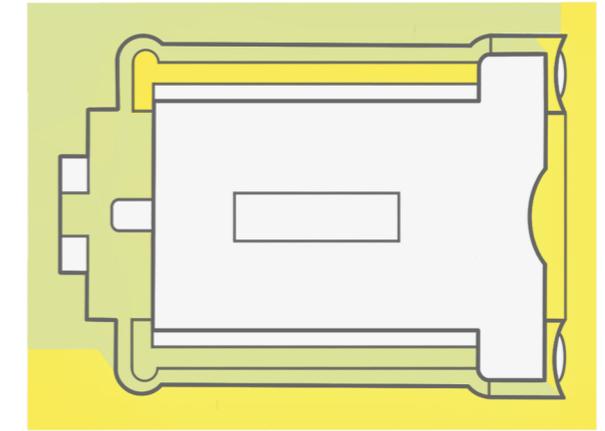


UTCI ANALYSIS

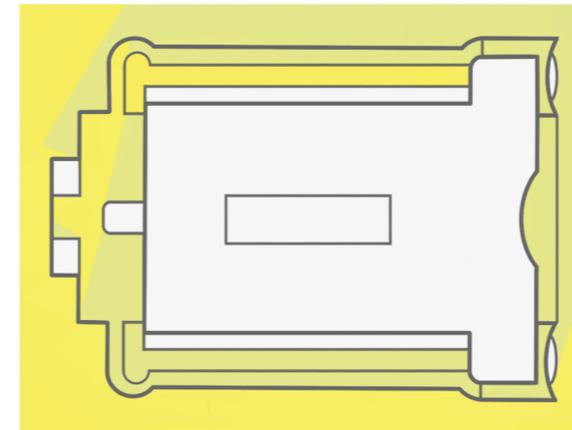
Typical Autumn Week (20/10 - 26/10)



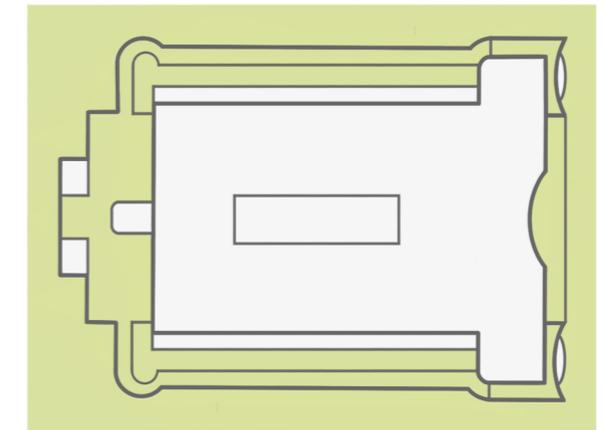
ORE 9:00 UTCI_{<0}: 0%
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 45 kWh
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



ORE 12:00 UTCI_{<0}: 0%
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 85 kWh
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



ORE 15:00 UTCI_{<0}: 0%
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 52 kWh
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%

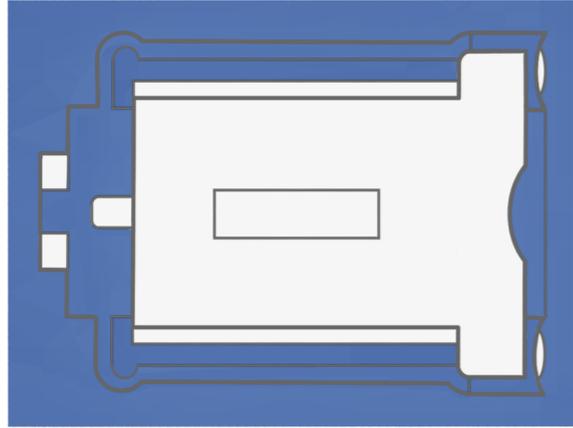


ORE 18:00 UTCI_{<0}: 0%
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 4 kWh
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



UTCI ANALYSIS

Typical Winter Week (22/12 - 28/12)

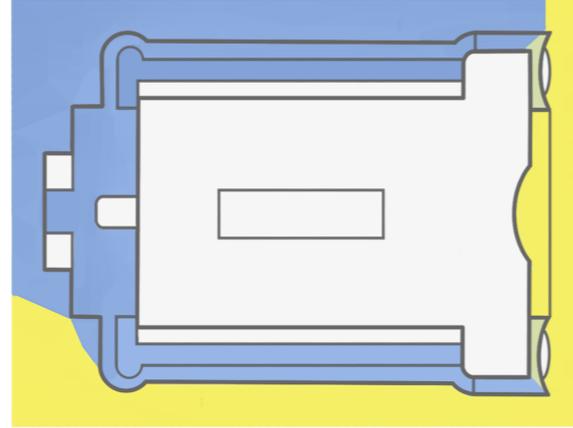


ORE 9:00

UTCI_{<0}: 0%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 5 kWh

UTCI₀₋₂₈: 100%
UTCI_{>28}: 0%

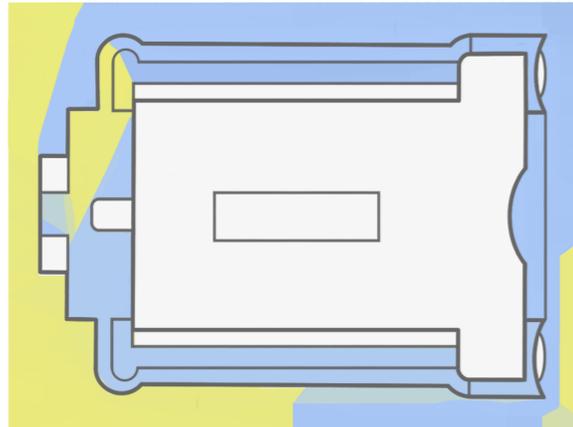


ORE 12:00

UTCI_{<0}: 0%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 45 kWh

UTCI₀₋₂₈: 100%
UTCI_{>28}: 0%

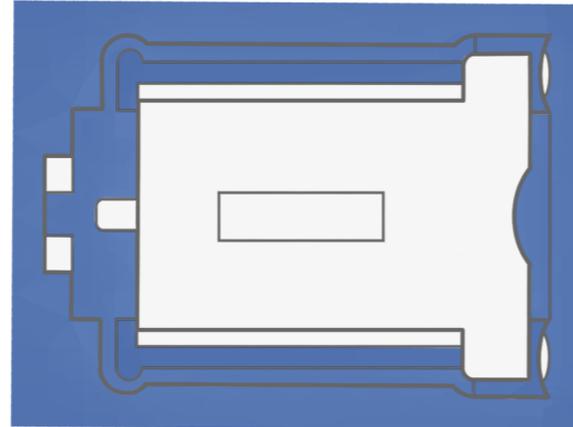


ORE 15:00

UTCI_{<0}: 0%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 9 kWh

UTCI₀₋₂₈: 100%
UTCI_{>28}: 0%



ORE 18:00

UTCI_{<0}: 0%

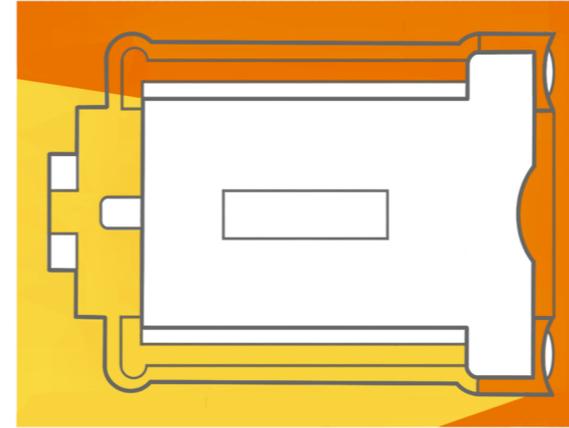
PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 0 kWh

UTCI₀₋₂₈: 100%
UTCI_{>28}: 0%



UTCI ANALYSIS

Extreme Hot Week (20/07 - 26/07)

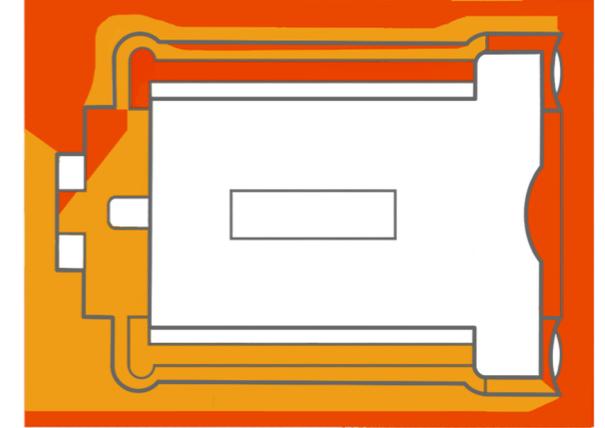


ORE 9:00

UTCI_{<0}: 0%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 112 kWh

UTCI₀₋₂₈: 54,20%
UTCI_{>28}: 45,80%

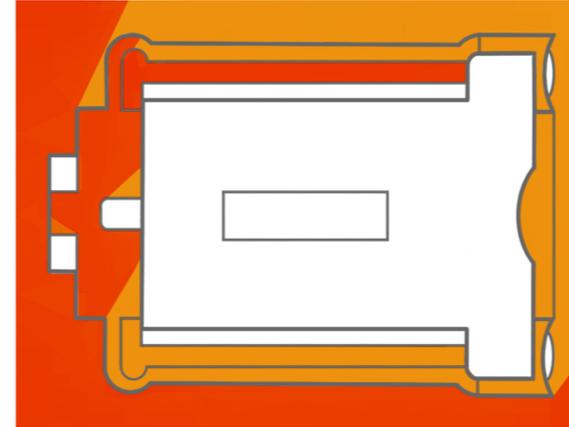


ORE 12:00

UTCI_{<0}: 0%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 146 kWh

UTCI₀₋₂₈: 72,40%
UTCI_{>28}: 27,60%

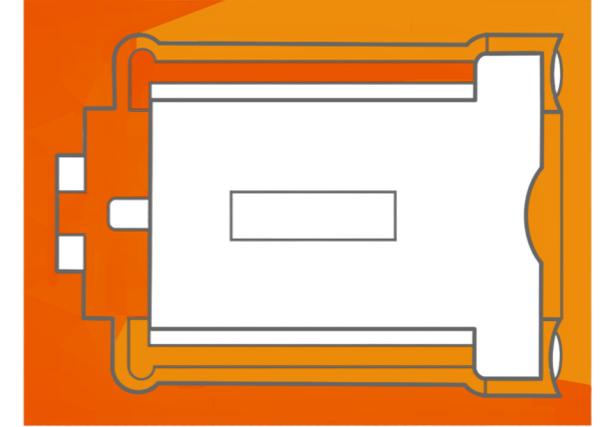


ORE 15:00

UTCI_{<0}: 0%

PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 127 kWh

UTCI₀₋₂₈: 4%
UTCI_{>28}: 96%

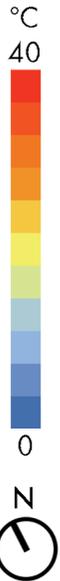


ORE 18:00

UTCI_{<0}: 0%

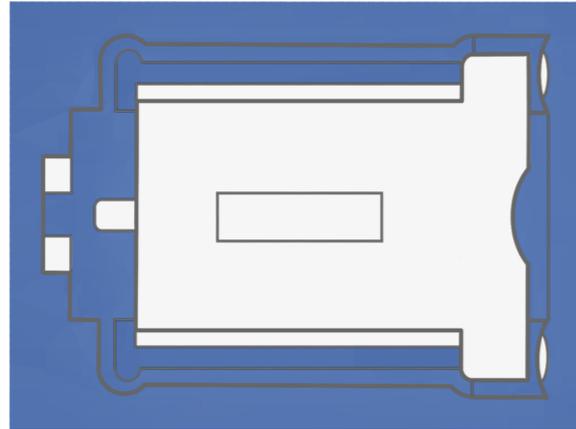
PRODUZIONE ENERGIA DA
FOTOVOLTAICO: 31 kWh

UTCI₀₋₂₈: 0%
UTCI_{>28}: 100%

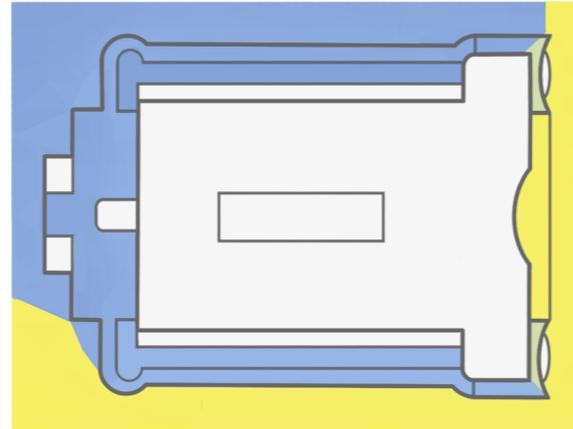


UTCI ANALYSIS

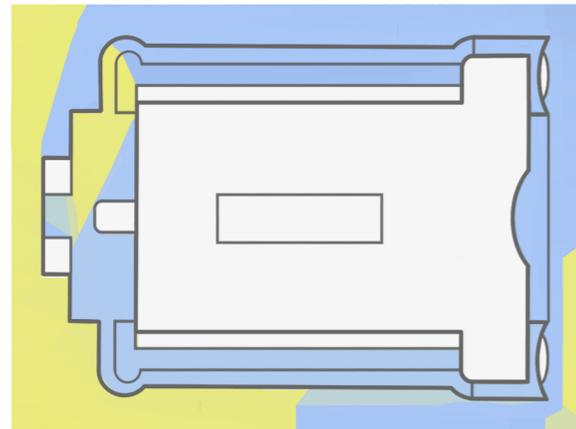
Extreme Cold Week (30/12 - 5/01)



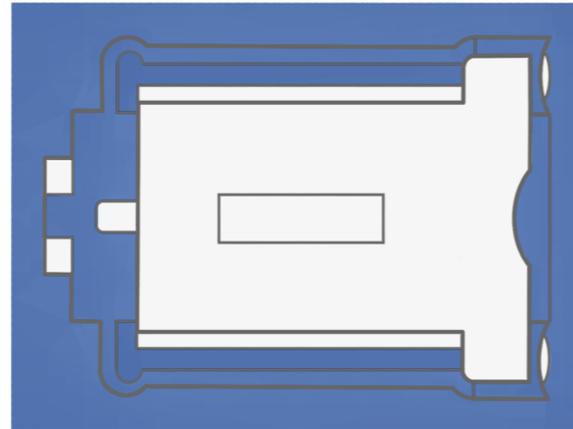
ORE 9:00
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 2 kWh
 UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



ORE 12:00
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 29 kWh
 UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



ORE 15:00
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 6 kWh
 UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%



ORE 18:00
 PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 0 kWh
 UTCI_{<0}: 0%
 UTCI₀₋₂₈: 100%
 UTCI_{>28}: 0%

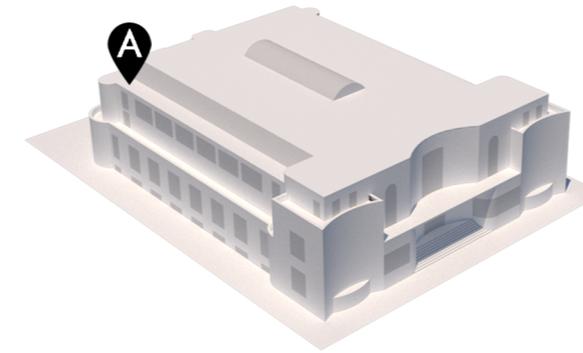


Per quanto riguarda la *UTCI Analysis* in un punto preciso durante l'intero anno la schermatura è stata orientata prendendo in considerazione il vettore solare del periodo, in base alle analisi sullo stato di fatto, più critico dell'anno: il mese di luglio a mezzogiorno. In questo modo è stato possibile ostacolare la radiazione luminosa quando causava *discomfort* e ottenere un'elevata produzione di energia da fotovoltaico (quantificata su base annua). L'andamento delle percentuali, legate ai valori di UTCI con la schermatura applicata, è simile in tutti e tre i punti presi in considerazione; infatti la quota di *comfort* dal 75% circa dello stato di fatto arriva a superare l'85%, l'*Heat Stress* è ridotto del 10% circa e anche il *Cold Stress* diminuisce, fino a raggiungere valori compresi tra il 10% e l'11%. Una minor percentuale di stress da riscaldamento deriva dalla parziale quantità di radiazione solare incidente sulla superficie esterna, mentre una ridotta quota di stress da raffrescamento si ha poiché la schermatura blocca parte delle correnti fredde che contribuiscono alla diminuzione del *comfort*. Oltre al minor numero di ore dell'anno in cui si ha una situazione di *discomfort*, sia per *Cold Stress* che per *Heat Stress*, è possibile quantificare la distanza dal *threshold* dei valori, ovvero di quanto si discostano dal valore soglia (rispettivamente 0 °C e 28 °C). Grazie a questo dato è possibile stabilire la qualità delle ore di stress rapportando la somma dei gradi di *discomfort* e la totalità delle ore in cui questo si manifesta, sia per il riscaldamento che per il raffrescamento. Anche in base a questi dati la schermatura si dimostra efficace, dal momento che nei giorni di *Cold Stress* in media la soglia di *comfort* veniva superata di circa 4 °C, con la nuova "pelle" questa distanza si riduce di qualche decimale. Tuttavia il miglioramento più importante si ha nei giorni di *Heat Stress*, in cui la distanza dal *threshold* da un valore di 4,5 °C (fino a 5,10 °C) raggiunge un intervallo compreso tra 1,60 °C e 2,20 °C. Questa metodologia, rispetto a quella utilizzata per la *Daylight Analysis* e la *UTCI Analysis* su una superficie, sfrutta l'ombreggiamento che deriva dai pannelli della schermatura senza valutarne il movimento. La

configurazione fissa orientata nell'ora del giorno più critica permette di ridurre notevolmente il *discomfort* all'esterno attraverso un sistema più semplice e meno articolato. Questa soluzione, seppur statica, diventa inoltre riparo dalle intemperie e dalla correnti fredde, migliorando le condizioni climatiche durante la stagione invernale. L'apertura e la chiusura dei pannelli ad ogni ora, utilizzata negli altri scenari, può offrire una soluzione più precisa e che consente di sfruttare al meglio gli apporti energetici gratuiti e garantisce la massima produzione di energia da fotovoltaico; tuttavia può risultare più dispendiosa dal punto di vista della gestione del sistema e della manutenzione dei suoi componenti.

UTCI ANALYSIS

Punto preciso

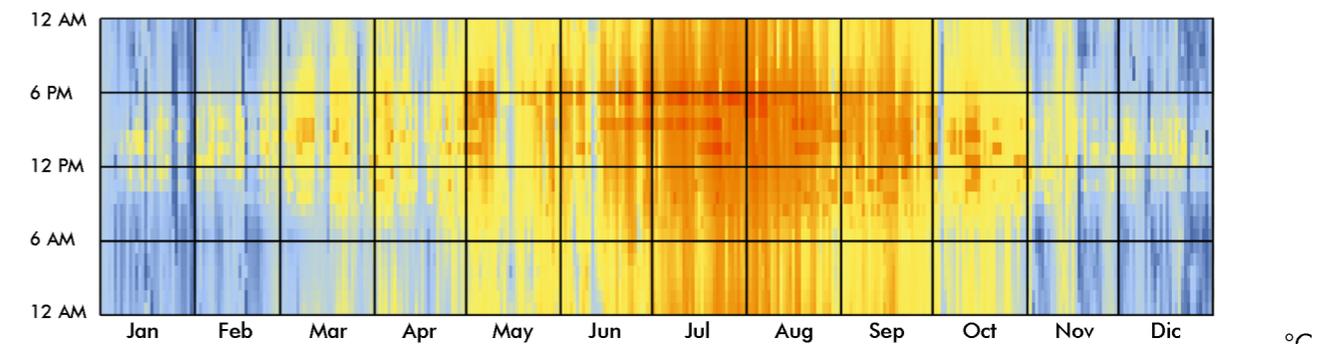


Cold Stress (UTCI_{<0}): 11%
 Comfortable (UTCI₀₋₂₈): 85,70%
 Heat Stress (UTCI_{>28}): 3,30%

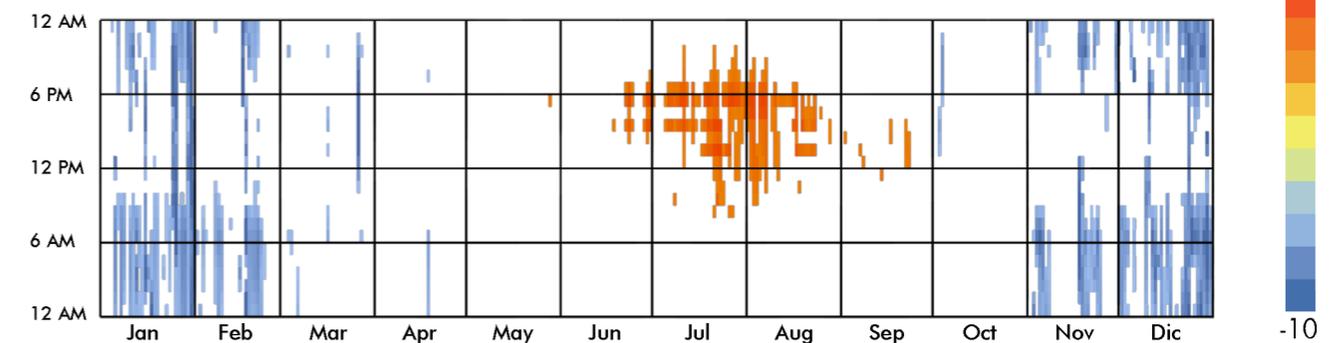
Distanza dal treshold (Cold Stress): 3,80 °C
 Distanza dal treshold (Heat Stress): 2,20 °C

PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 248.865 kWh

Overall Universal Thermal Climate Index

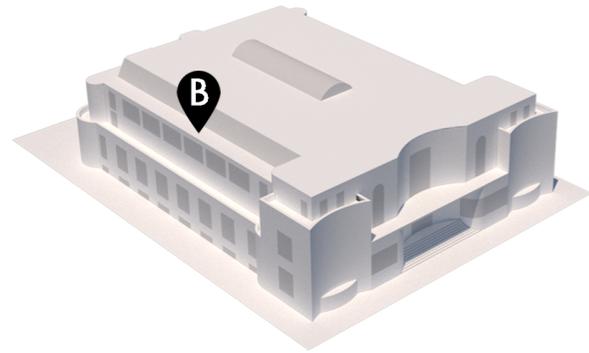


Discomfort Universal Thermal Climate Index



UTCI ANALYSIS

Punto preciso

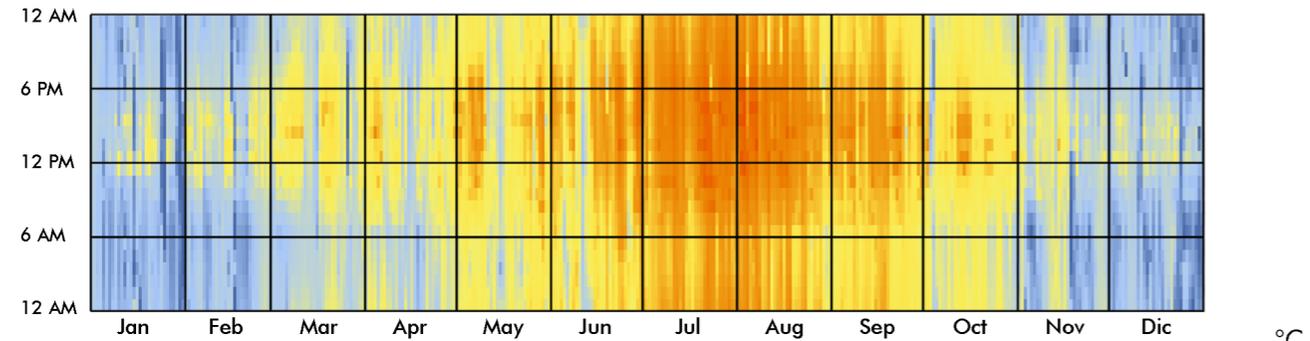


Cold Stress (UTCI_{<0}): 10%
Comfortable (UTCI₀₋₂₈): 87,20%
Heat Stress (UTCI_{>28}): 2,80%

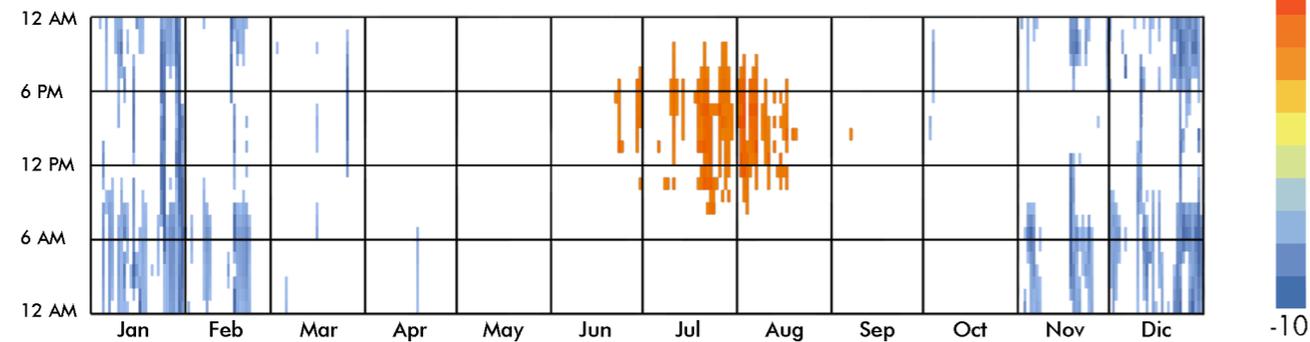
Distanza dal treshold (Cold Stress): 3,70 °C
Distanza dal treshold (Heat Stress): 1,60 °C

PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 248.865 kWh

Overall Universal Thermal Climate Index

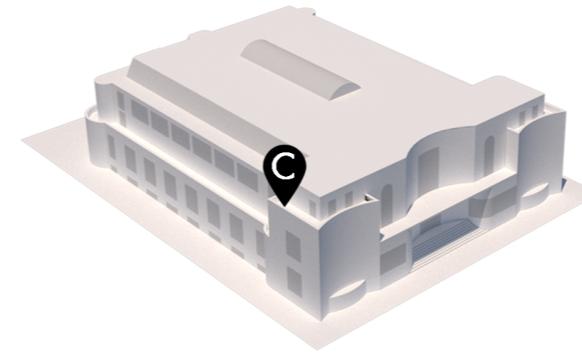


Discomfort Universal Thermal Climate Index



UTCI ANALYSIS

Punto preciso

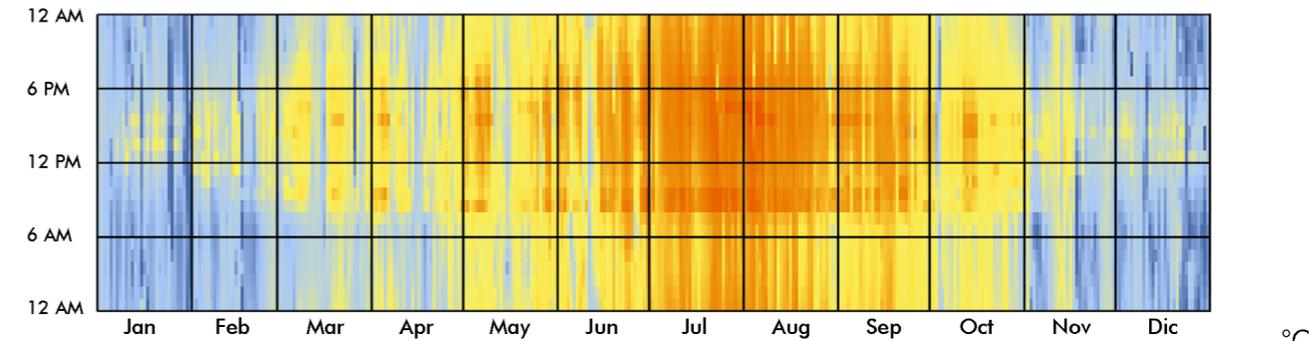


Cold Stress (UTCI_{<0}): 10,20%
Comfortable (UTCI₀₋₂₈): 86,85%
Heat Stress (UTCI_{>28}): 2,95%

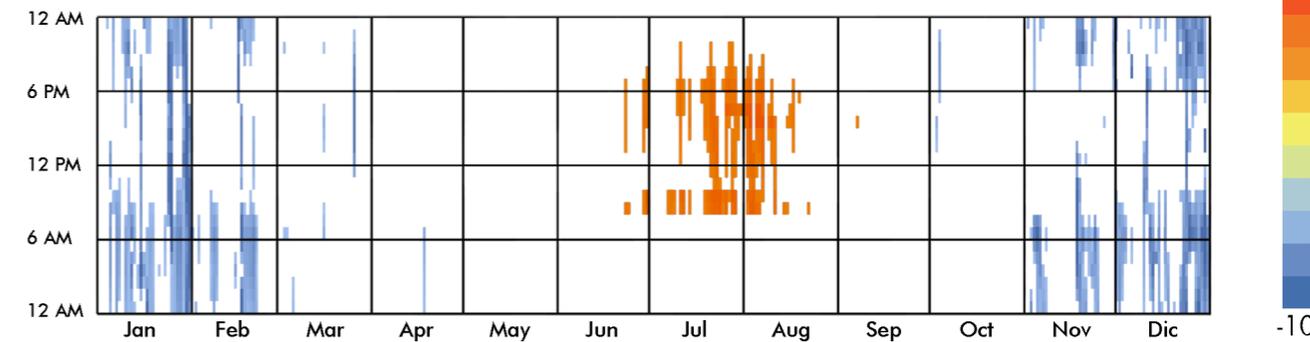
Distanza dal treshold (Cold Stress): 3,80 °C
Distanza dal treshold (Heat Stress): 1,70 °C

PRODUZIONE ENERGIA DA FOTOVOLTAICO: 248.865 kWh

Overall Universal Thermal Climate Index



Discomfort Universal Thermal Climate Index

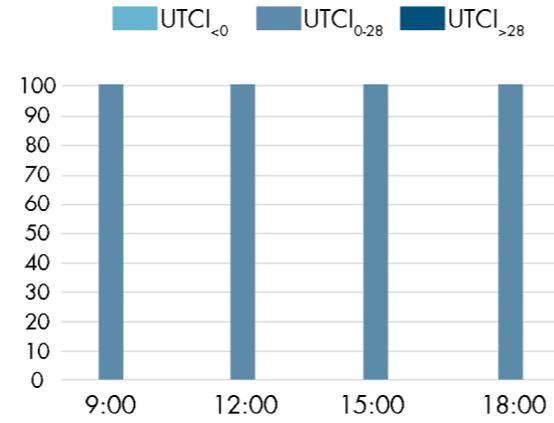


UTCI ANALYSIS

Stato di fatto

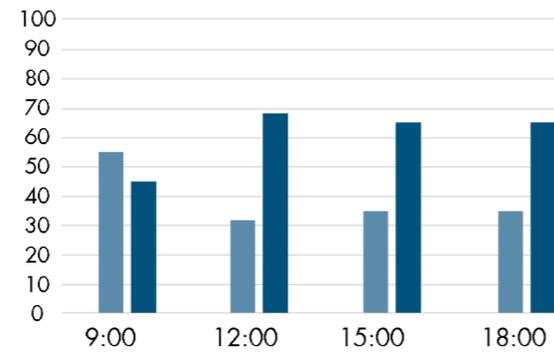
Typical Spring Week

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	-	0%	100%	0%
12:00	-	0%	100%	0%
15:00	-	0%	100%	0%
18:00	-	0%	100%	0%



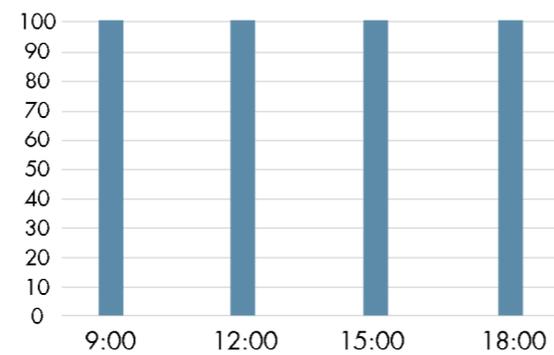
Typical Summer Week

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	-	0%	55,80%	44,20%
12:00	-	0%	31,60%	68,40%
15:00	-	0%	34,30%	65,70%
18:00	-	0%	35%	65%



Typical Autumn Week

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	-	0%	100%	0%
12:00	-	0%	100%	0%
15:00	-	0%	100%	0%
18:00	-	0%	100%	0%

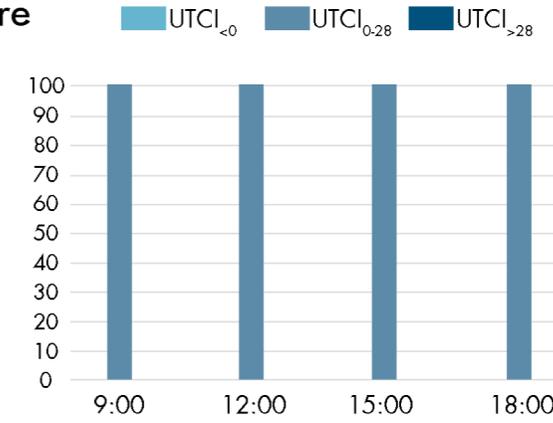


UTCI ANALYSIS

Schermatura perpendicolare al vettore solare

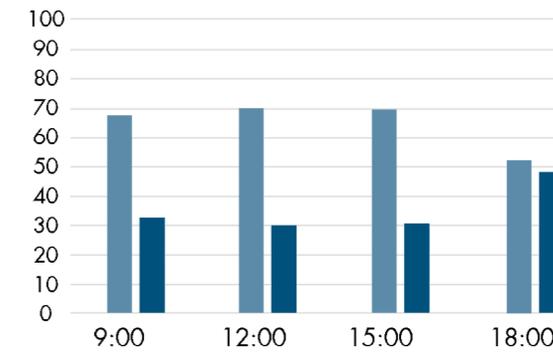
Typical Spring Week

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	58	0%	100%	0%
12:00	96	0%	100%	0%
15:00	66	0%	100%	0%
18:00	13	0%	100%	0%



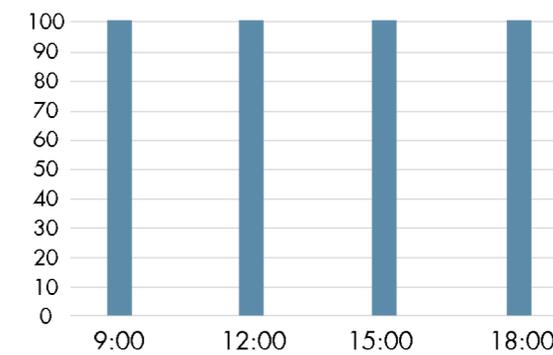
Typical Summer Week

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	102	0%	67,50%	32,50%
12:00	138	0%	69,80%	30,20%
15:00	115	0%	69,30%	30,70%
18:00	28	0%	51,70%	48,30%



Typical Autumn Week

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	45	0%	100%	0%
12:00	85	0%	100%	0%
15:00	52	0%	100%	0%
18:00	4	0%	100%	0%

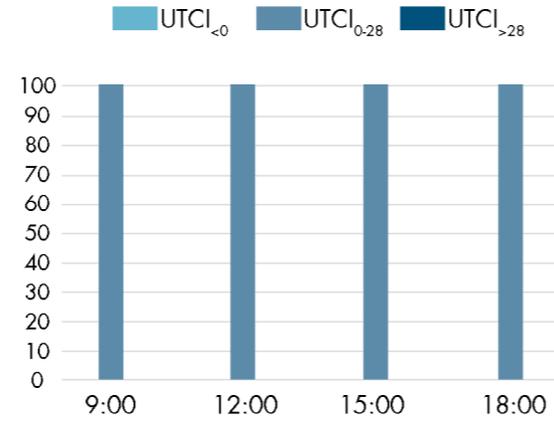


DAYLIGHT ANALYSIS

Stato di fatto

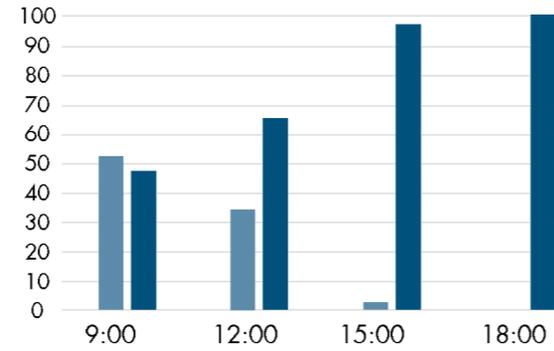
Typical Winter Week

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	-	0%	100%	0%
12:00	-	0%	100%	0%
15:00	-	0%	100%	0%
18:00	-	0%	100%	0%



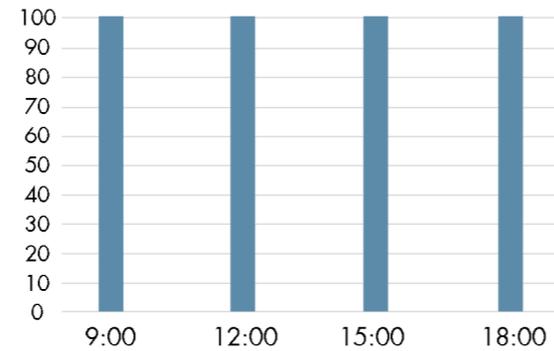
Extreme Hot Week

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	-	0%	52,20%	47,20%
12:00	-	0%	33,50%	66,50%
15:00	-	0%	2%	98%
18:00	-	0%	0%	100%



Extreme Cold Week

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	-	0%	100%	0%
12:00	-	0%	100%	0%
15:00	-	0%	100%	0%
18:00	-	0%	100%	0%

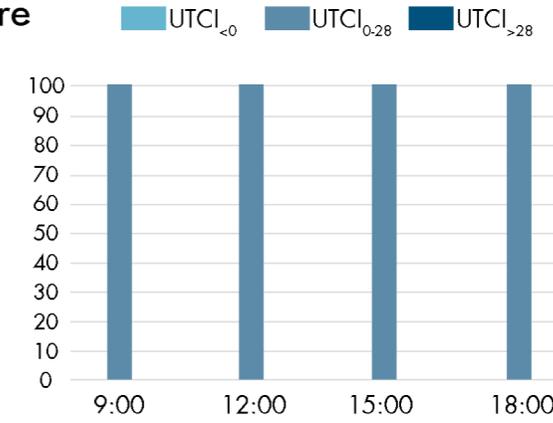


DAYLIGHT ANALYSIS

Schermatura perpendicolare al vettore solare

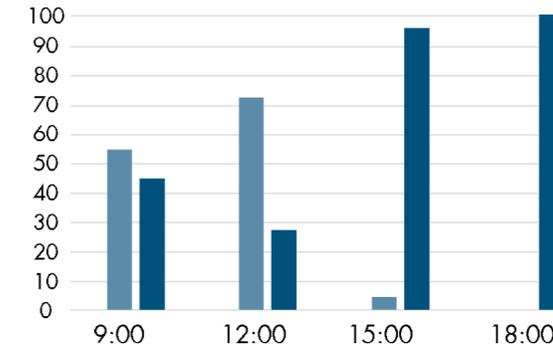
Typical Winter Week

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	5	0%	100%	0%
12:00	45	0%	100%	0%
15:00	9	0%	100%	0%
18:00	0	0%	100%	0%



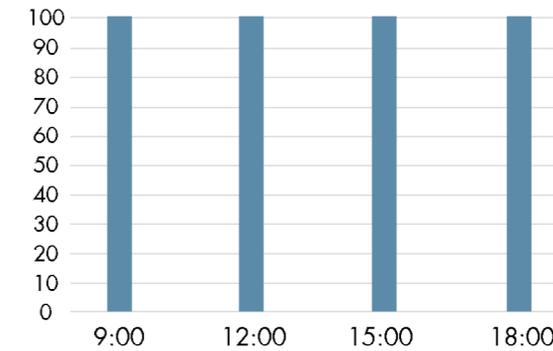
Extreme Hot Week

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	112	0%	54,20%	45,80%
12:00	146	0%	72,40%	27,60%
15:00	127	0%	4%	96%
18:00	31	0%	0%	100%



Extreme Cold Week

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	2	0%	100%	0%
12:00	29	0%	100%	0%
15:00	6	0%	100%	0%
18:00	0	0%	100%	0%

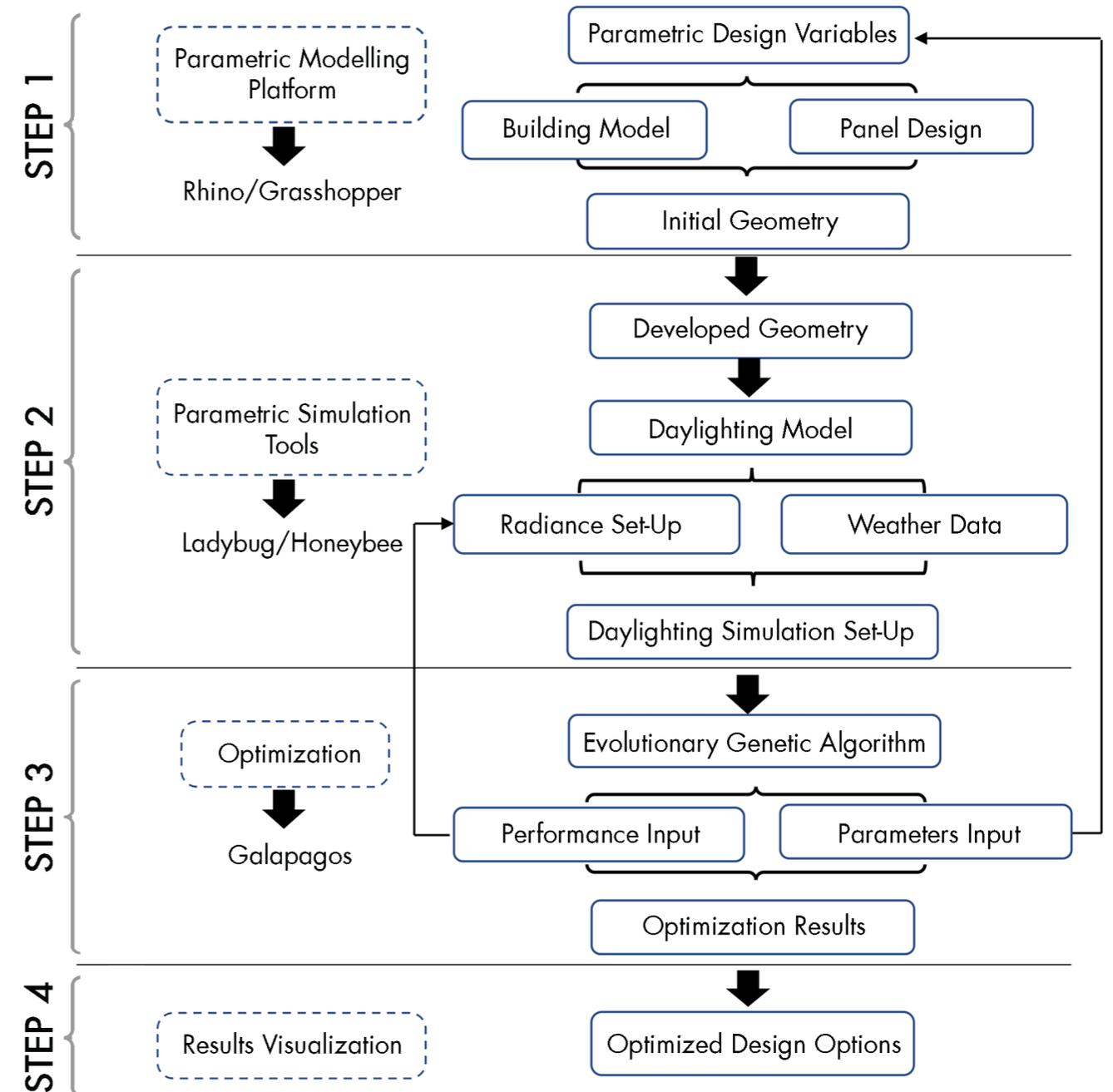


Applicazione della schermatura ottimizzata

Come si evince dalle analisi precedenti la schermatura applicata sulla facciata sud della Piscina Monumentale ha contribuito ad aumentare le condizioni di comfort legate alla radiazione solare, oltre a garantire la produzione di energia rinnovabile attraverso moduli fotovoltaici. Tuttavia i pannelli orientati perpendicolarmente rispetto al vettore solare non corrispondono alla migliore soluzione sotto tutti i punti di vista; ad esempio la quantità di luce entrante in ambiente è limitata, con conseguente aumento dell'illuminazione artificiale, in favore di un elevato guadagno di energia rinnovabile e dell'eliminazione del *discomfort* dovuto all'abbagliamento. Per cercare di soddisfare tutti i requisiti si dovrebbe utilizzare una configurazione della schermatura ottimizzata in funzione dei parametri scelti. Per raggiungere questo risultato diventa necessario utilizzare Galapagos: è un risolutore evolutivo, presente all'interno di Grasshopper, in grado di analizzare tutte le differenti soluzioni per cercare la migliore. E' lo strumento di ottimizzazione più comune utilizzato nella progettazione parametrica attraverso cui è possibile regolare i parametri geometrici che caratterizzano la schermatura in funzione dei risultati delle analisi ambientali effettuate.

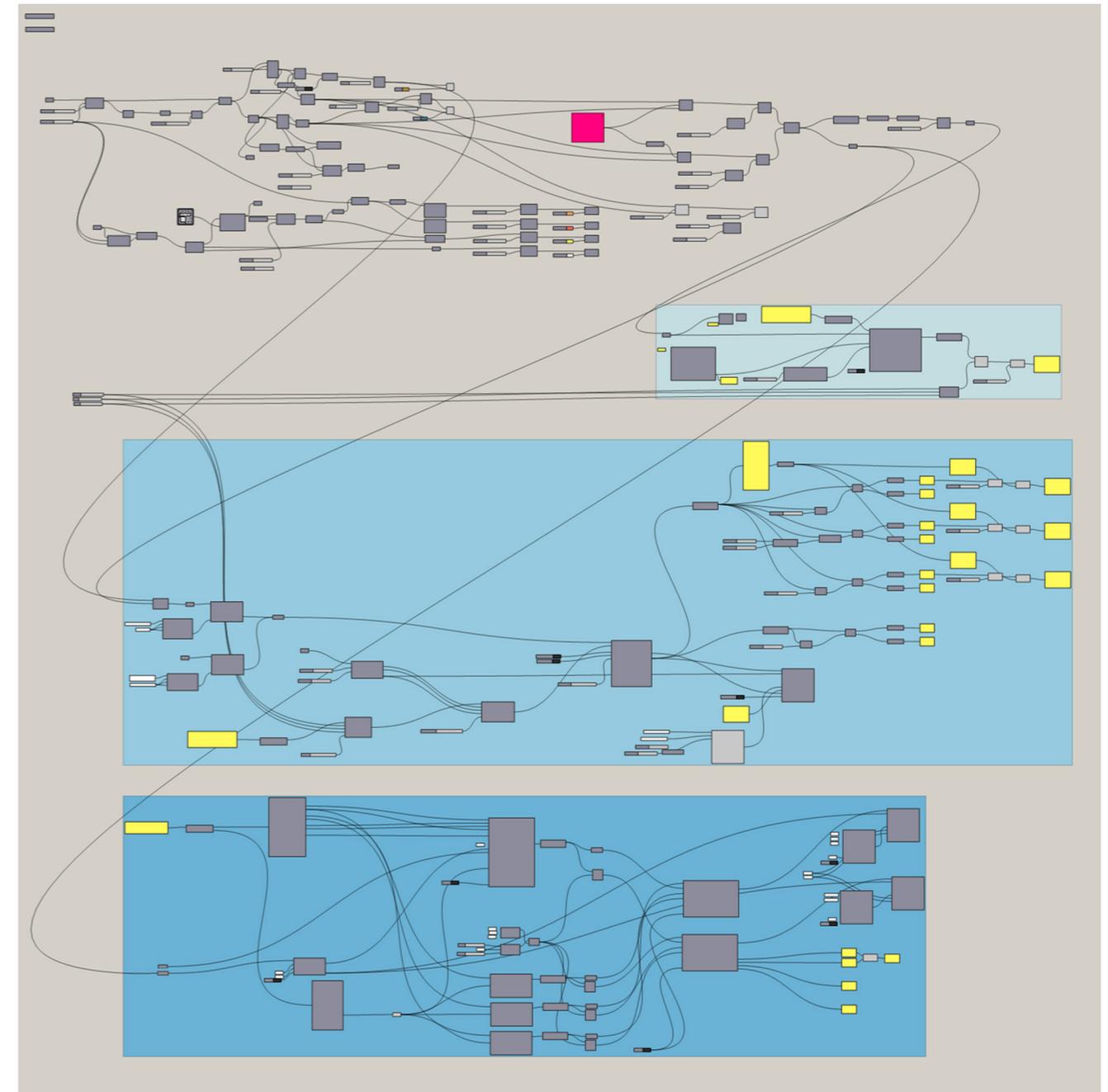
L'algoritmo viene definito evolutivo proprio perché si evolve con ogni nuovo passaggio nella ricerca di una nuova soluzione, fino al raggiungimento del risultato finale guidato dalle prestazioni. Tramite Galapagos i dati climatici interagiscono con i parametri scelti dal progettista al fine di generare geometrie ottimizzate attraverso criteri di ricerca multi-obiettivo; così l'architettura può essere realizzata digitalmente in base ai vincoli ambientali per mezzo di relazioni parametriche, al fine di ottimizzare gli obiettivi prefissati. Per quanto riguarda la schermatura "Responsive Wave" è stato utilizzato Galapagos per trovare la migliore configurazione della nuova "pelle" in funzione delle condizioni ambientali esterne. La

Figura 71 (pagina successiva):
Spiegazione del processo di
ottimizzazione



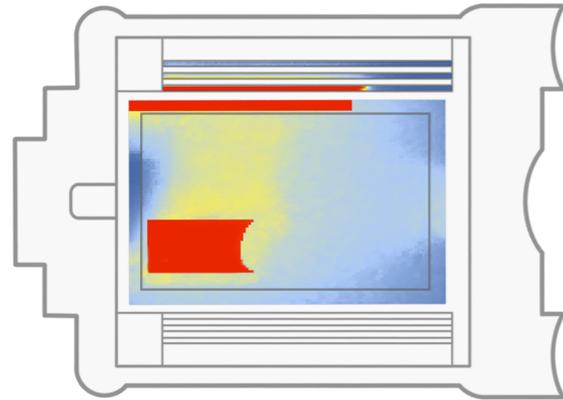
variabile dinamica scelta per l'ottimizzazione è la rotazione dei pannelli, che permette di regolare la quantità di radiazione luminosa da bloccare, attraverso uno *slider* all'interno dell'algoritmo. La geometria di partenza deve essere definita dal progettista, mentre la mobilità degli elementi dipende direttamente dai risultati delle analisi di Ladybug e Honeybee. Ogni conformazione definita da Galapagos viene nuovamente sottoposta alle analisi fatte in precedenza in modo da valutarne l'effettivo funzionamento; questo processo, a volte parecchio dispendioso, permette di aggiornare e migliorare i risultati della simulazione modificando la soluzione in funzione dei risultati prestazionali desiderati. Questo metodo causa-effetto permette di raggiungere una configurazione geometrica basata su risultati prestazionali, secondo la logica per cui è la forma a seguire l'ambiente e non viceversa. Nel presente progetto di tesi dunque è stato utilizzato Galapagos come risolutore genetico per trovare la conformazione della schermatura in grado di massimizzare la percentuale di $UDI_{300-3000}$ nella *Daylight Analysis*, la quota di $UTCI_{0-28}$ nella *UTCI Analysis* e la produzione di energia dell'impianto fotovoltaico, al variare della rotazione dei pannelli. L'ottimizzazione è stata effettuata il 21 giugno, giorno ritenuto più critico sia nelle analisi svolte sullo stato di fatto che in quelle con i pannelli della schermatura perpendicolari al vettore solare. I nuovi risultati delle analisi effettuate con la geometria ottimizzata non garantiscono il raggiungimento del valore più alto in ogni simulazione, ma porteranno ad una soluzione di compromesso in cui si cerca di ottenere il massimo da ogni variabile.

Figura 72 (pagina successiva): Algoritmo che permette di fare interagire la schermatura con le analisi fisico-tecniche, realizzato attraverso il software Grasshopper. Nei rettangoli in blu sono contenuti: la quantità di energia prodotta dall'impianto fotovoltaico, la *Daylight Analysis* e la *UTCI Analysis*



DAYLIGHT ANALYSIS

Solstizio d'estate: 21 giugno

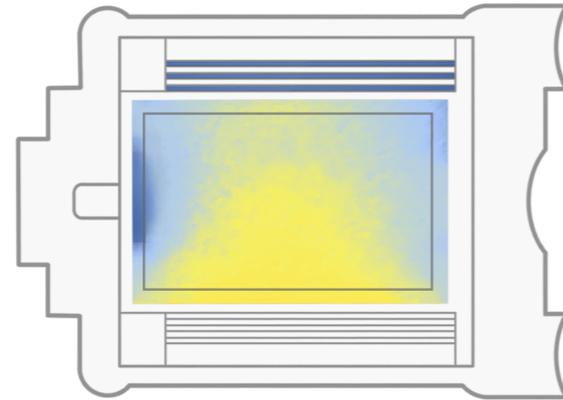


ORE 9:00

PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 88 kWh

UDI_{<100}: 0%

UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 87,50%
UDI_{>3000}: 12,50%

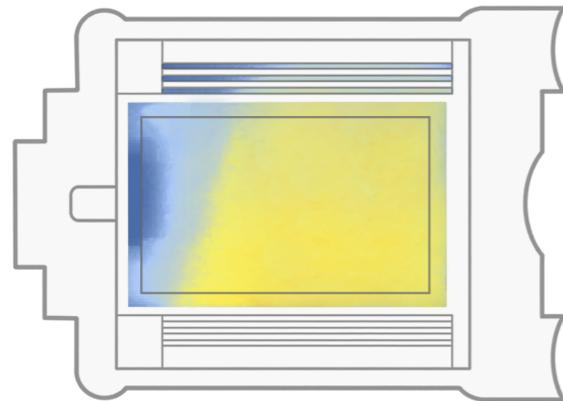


ORE 12:00

PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 108 kWh

UDI_{<100}: 0%

UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 100%
UDI_{>3000}: 0%

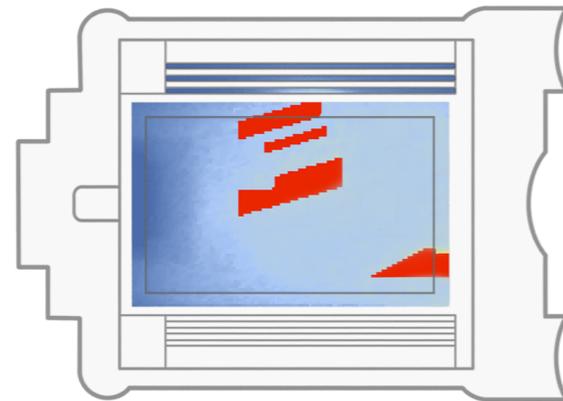


ORE 15:00

PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 96 kWh

UDI_{<100}: 1,70%

UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 98,30%
UDI_{>3000}: 0%

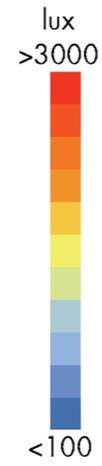


ORE 18:00

PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 22 kWh

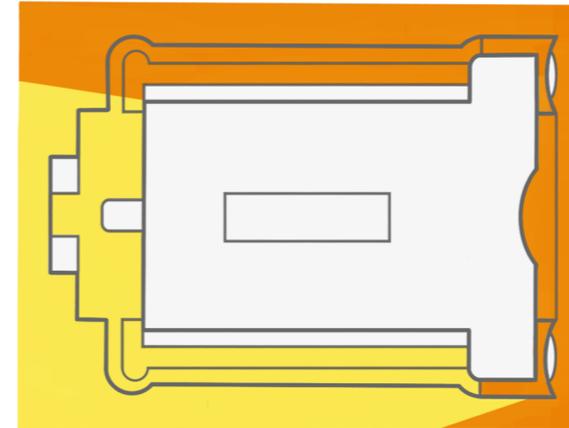
UDI_{<100}: 2,30%

UDI₁₀₀₋₃₀₀₀: 88,60%
UDI_{>3000}: 9,10%



UTCI ANALYSIS

Solstizio d'estate: 21 giugno

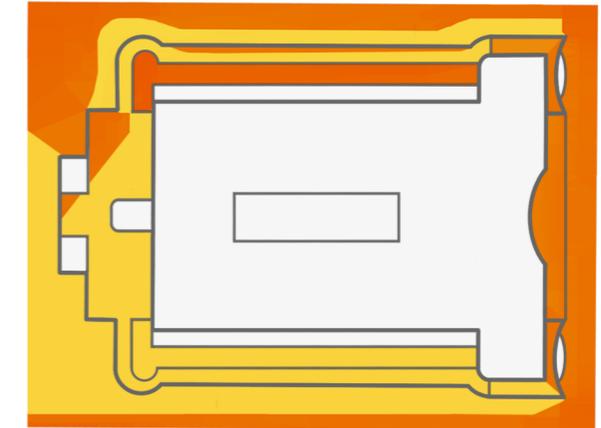


ORE 9:00

PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 88 kWh

UTCI_{<0}: 0%

UTCI₀₋₂₈: 63,30%
UTCI_{>28}: 36,70%

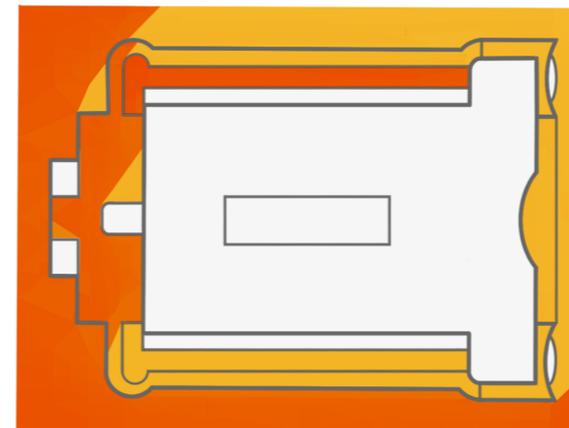


ORE 12:00

PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 108 kWh

UTCI_{<0}: 0%

UTCI₀₋₂₈: 61,20%
UTCI_{>28}: 38,80%

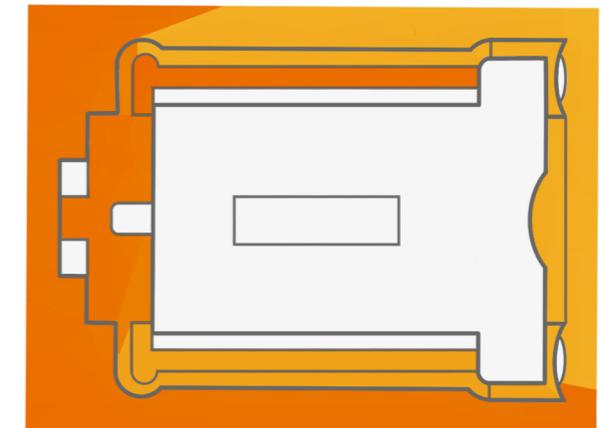


ORE 15:00

PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 96 kWh

UTCI_{<0}: 0%

UTCI₀₋₂₈: 58,90%
UTCI_{>28}: 41,10%



ORE 18:00

PRODUZIONE ENERGIA DA FOTVOLTAICO: 22 kWh

UTCI_{<0}: 0%

UTCI₀₋₂₈: 48,40%
UTCI_{>28}: 51,60%

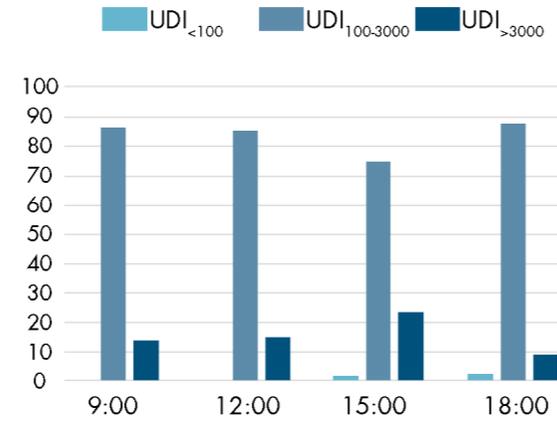


DAYLIGHT ANALYSIS

Solstizio d'estate: 21 giugno

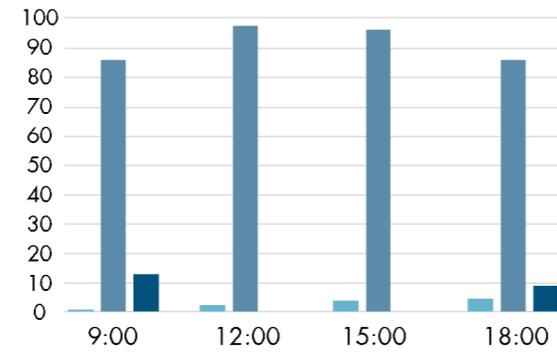
Stato di fatto

	kWh	UDI _{<100}	UDI ₁₀₀₋₃₀₀₀	UDI _{>3000}
9:00	-	0%	86,80%	13,20%
12:00	-	0%	84,50%	15,50%
15:00	-	1,70%	74,90%	23,40%
18:00	-	2,30%	88,30%	9,40%



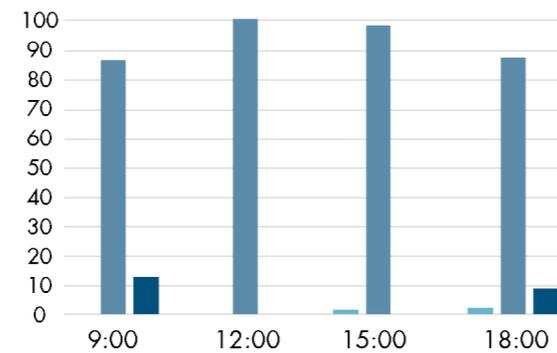
Schermatura perpendicolare al vettore solare

	kWh	UDI _{<100}	UDI ₁₀₀₋₃₀₀₀	UDI _{>3000}
9:00	102	1%	86,50%	12,50%
12:00	138	2,30%	97,70%	0%
15:00	115	3,80%	96,20%	0%
18:00	28	4,20%	86,70%	9,10%



Schermatura ottimizzata

	kWh	UDI _{<100}	UDI ₁₀₀₋₃₀₀₀	UDI _{>3000}
9:00	88	0%	87,50%	12,50%
12:00	108	0%	100%	0%
15:00	96	1,70%	98,30%	0%
18:00	22	2,30%	88,60%	9,10%

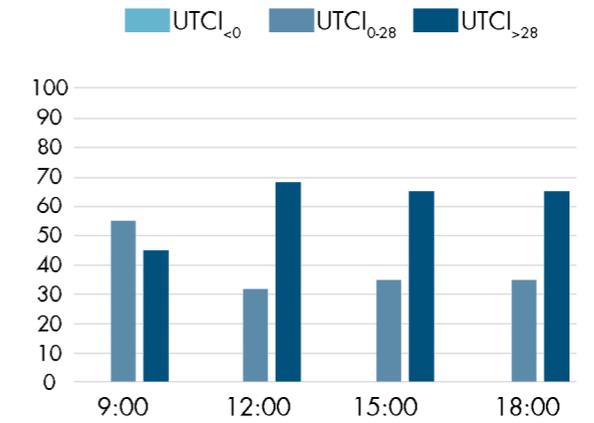


UTCI ANALYSIS

Solstizio d'estate: 21 giugno

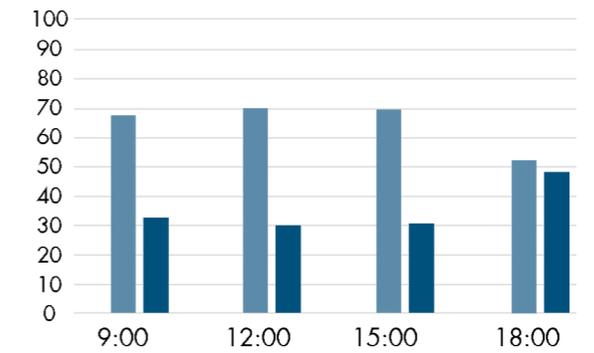
Stato di fatto

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	-	0%	55,80%	44,20%
12:00	-	0%	31,60%	68,40%
15:00	-	0%	34,30%	65,70%
18:00	-	0%	35%	65%



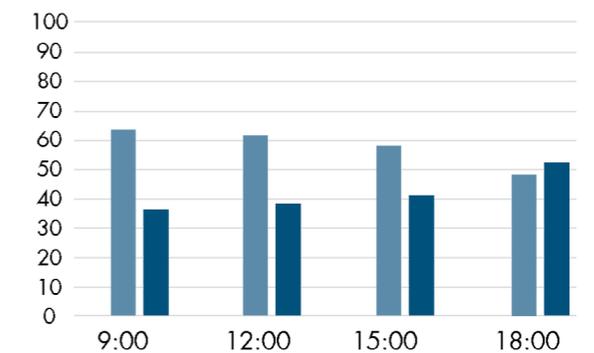
Schermatura perpendicolare al vettore solare

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	102	0%	67,50%	32,50%
12:00	138	0%	69,80%	30,20%
15:00	115	0%	69,30%	30,70%
18:00	28	0%	51,70%	48,30%



Schermatura ottimizzata

	kWh	UTCI _{<0}	UTCI ₀₋₂₈	UTCI _{>28}
9:00	88	0%	63,30%	36,70%
12:00	108	0%	61,20%	38,30%
15:00	96	0%	58,50%	41,10%
18:00	22	0%	48,40%	51,60%



Il processo di ottimizzazione relativo all'apertura dei pannelli che costituiscono la facciata ha portato ad una variazione dei risultati rispetto alle simulazioni precedenti. Nella *Daylight Analysis* il risolutore genetico ha cercato di massimizzare la percentuale di $UDI_{300-3000}$ e l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico, oltre a garantire il più alto livello di illuminazione possibile all'interno dell'edificio. Il differente orientamento dei pannelli ha permesso di gestire al meglio la luce naturale, eliminando quasi del tutto l'*UDI fell-short* ($UDI < 100$) e l'*UDI exceeded* ($UDI > 3000$), tranne nei punti in cui la schermatura non è presente; mentre, come si evince dai risultati, la percentuale di *comfort* raggiunge valori più alti di $UTCI_{0,28}$ rispetto alle configurazioni precedenti: lo stato di fatto (senza schermatura) e la schermatura con i pannelli orientati perpendicolarmente al vettore solare. Tuttavia la minor esposizione dei moduli alla radiazione solare diretta ha portato ad una diminuzione della quantità di kWh accumulati dall'impianto fotovoltaico. La schermatura ottimizzata, nonostante una minor produzione di energia rinnovabile, ha raggiunto gli obiettivi prefissati riducendo l' $UDI < 100$ e l' $UDI > 3000$ e garantendo contemporaneamente la maggior quantità di luce naturale all'interno dell'edificio. Nel processo generativo è stata inserita anche la *UTCI Analysis*, con l'intento di aumentare il più possibile le condizioni di *comfort* esterne durante il solstizio d'estate nelle ore indicate. Tuttavia l'ottimizzazione multi-parametro ha portato ad una soluzione di compromesso in cui l'apertura dei pannelli, per garantire un adeguato livello di illuminazione naturale all'interno, corrisponde inevitabilmente ad una maggior radiazione incidente sulle aree esterne dell'edificio, dunque un aumento dello $UTCI > 28$ °C. Nella *UTCI Analysis* con la schermatura ottimizzata, rispetto a quella in cui la facciata è perpendicolare al vettore solare, vi è una diminuzione dei valori all'interno del range 0 - 28 °C, a discapito di una maggiore quantità di *discomfort* legato al surriscaldamento. L'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico in ogni ora presa in esame, come nel caso della *Daylight*

Analysis, diminuisce a causa di una minor radiazione diretta sul pannello. La quota di *discomfort* legato al surriscaldamento ($UTCI > 28$ °C) non può essere eliminata totalmente poiché la conformazione della schermatura non ricopre l'intera area esposta alla radiazione solare.

Il risultato finale nelle diverse ore del giorno non rispecchia dunque i massimi valori di *comfort* raggiungibili ma garantisce il miglior compromesso dei diversi parametri presi in analisi. L'ottimizzazione dei pannelli che caratterizzano la schermatura genera una facciata eterogenea, in cui ogni componente viene orientato singolarmente al fine di garantire la miglior interazione con la radiazione solare.

Figura 73 (pagine successive):
Vista renderizzata del lato sud della Piscina Monumentale con la schermatura applicata



CONCLUSIONI

Il progetto di tesi deriva da un lungo percorso di studio e approfondimento e, nonostante la maturità raggiunta, potrebbe continuare nel tempo per migliorare tutti gli aspetti che lo riguardano. Gli obiettivi legati al comfort degli occupanti in relazione alla radiazione solare sono stati raggiunti, altri invece sono stati trattati in modo sommario o totalmente tralasciati; ad esempio le tematiche legate ai costi di realizzazione, gestione e manutenzione. La superficie responsiva è stata studiata, attraverso l'analisi dello stato dell'arte, con l'obiettivo di intraprendere un percorso innovativo nel campo dell'architettura, coniugandola con le tematiche ambientali e i concetti di sostenibilità. Ogni modulo che costituisce il sistema ombreggiante può assumere una configurazione indipendente in base alla posizione del sole, secondo il principio per cui "la forma segue l'ambiente" mantenendo elevati livelli di *comfort* interno al variare delle mutevoli condizioni climatiche esterne.

L'applicazione della schermatura ha portato a significativi miglioramenti: è stato ridotto il *discomfort* causato dalla radiazione solare all'esterno della Piscina Monumentale, è stata inserita la produzione di energia rinnovabile attraverso moduli fotovoltaici ed è stata massimizzata la quantità di luce naturale all'interno dell'edificio, limitando notevolmente il fenomeno dell'abbagliamento e garantendo un minor consumo di energia elettrica. La "Responsive Wave" collocata lungo la facciata sud della Piscina Monumentale di Torino può essere trasferita, modificando il file climatico e le caratteristiche morfologiche del manufatto, in qualsiasi area geografica, grazie alla versatilità e adattabilità dell'approccio algoritmico. Questo sistema ha permesso di creare elementi in grado di

relazionarsi tra loro con un rapporto causa-effetto e conciliare direttamente i risultati delle analisi fisico-tecniche con la progettazione. Il grande ostacolo riscontrato durante la redazione del presente elaborato è stato il tempo: la progettazione attraverso algoritmi richiede un'elevata quantità di passaggi per poter controllare ogni particolare. Questa metodologia, se correttamente applicata, può portare a numerosi vantaggi una volta terminata la dispendiosa fase di elaborazione. Tuttavia l'approccio parametrico si è rivelato indispensabile per coniugare in tempo reale, all'interno di un solo software, la progettazione e le analisi fisico-tecniche. La schermatura realizzata può diventare un punto di partenza per futuri approfondimenti incentrati sull'affinamento del progetto architettonico e sull'integrazione con l'edificio storico, combinandoli con i requisiti prestazionali raggiunti. L'utilizzo dei sistemi responsivi, se volti a risparmio energetico e miglioramento del *comfort* dell'utente e non a puro esercizio formale e superficiale, possono contribuire significativamente allo sviluppo sostenibile.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Bibliografia

ALTOMONTE S., *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile*, Editrice Alinea, Firenze, 2004

BRUNO S., *Manuale di bioarchitettura*, Flaccovio Editore, Palermo, 2010

CARPO M., *The Alphabet and the Algorithm*, MIT Pr, Cambridge, 2011

CARPO M., *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*, MIT Press Ltd, Cambridge, 2017

CONATO F., CINTI S., *Architettura e involucro*, BE-MA Editrice, Milano, 2012

CONVERSO A., *Il progetto digitale per la costruzione. Cronache di un mutamento professionale*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2010

DE PASCALIS S., *Progettazione bioclimatica*, Flaccovio Editore, Palermo, 2001

FOX K., KEMP M., *Interactive Architecture*, Princeton Architectural Press, New York, 2009

GASPARI J., *Il progetto dell'involucro efficiente*, Edicom, Gorizia, 2010

GIACCHETTA A., MAGLIOCCO A., *Progettazione sostenibile*, Carrocci, Roma, 2007

HEGGER M., *Atlante della Sostenibilità*, Utet, Torino, 2008

HERZOG T., KRIPPNER R., LANG W., *Atlante delle Facciate*, Utet, Torino, 2005

HINDRINCHS D., HEUSLER W., *Facades: Building envelopes for the 21st Century*, Birkhauser, Basilea, 2006

JODIDIO P., *Architecture Now! Vol. 10*, Taschen, Colonia, 2015

JODIDIO P., *Zaha Hadid*, Taschen, Colonia, 2016

JONES L., *Atlante della Bioarchitettura*, Utet, Torino, 2002

KAMAL-CHAOUI L., ROBERT A., *Competitive cities and climate change*, OECD Publishing, Parigi, 2009

KOLAREVIC B., *Architecture in the digital age*, Taylor & Francis, New York, 2005

KOLAREVIC B., PARLAC V., *Building Dynamics: Exploring Architecture of Change*, Routledge, Londra, 2015

MUSACCHIO A., *Architetture cinetiche*, Maggioli Editore, Milano, 2009

NERVI P.L., *Struttura e forma in architettura*, in *Domus 374*, Milano, gennaio 1961

PERINO M., *Responsive building elements, in Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, Università di Aalborg (Danimarca), 2008

PERINO M., *State of the art review, in Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, Università di Aalborg (Danimarca), 2008

SAGGIO A., *Introduzione alla rivoluzione informatica in architettura*, Carocci, Roma, 2007

SAGGIO A., *Architettura e modernità. Dal Bauhaus alla rivoluzione informatica*, Carocci, Roma, 2010

SCHUMACHER P., *The Autopoiesis of Architecture: A New Framework for Architecture*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, 2011

SCHUMACHER P., *La città parametrica*, in Being Zaha Hadid, Abitare 511, Milano, aprile 2011

TEDESCHI A., *AAD Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*, Le Penseur, Brienza, 2014

TEDESCHI A., *Architettura parametrica: introduzione a Grasshopper*, Le Penseur, Brienza, 2010

TERZIDIS K., *Algorithms for Visual Design: Using the Processing Languages*, Wiley Publishing, Indianapolis, 2009

WOODBURY R., *Elements of Parametric Design*, Routledge, Londra, 2010

Sitografia

<http://www.archdaily.com/>

<https://www.architonic.com/>

<https://www.arup.com/>

<https://www.bfi.org/>

<http://www.co-de-it.com/wordpress/>

<https://www.food4rhino.com/>

<https://www.grasshopper3d.com/>

<https://henninglarsen.com/>

<http://www.jeannouvel.com/>

<https://mcburrry.net/>

<https://parametrichouse.com/>

<https://www.patrickschumacher.com/>

<https://www.teknoring.com/>

<https://www.thedhaus.com/>

<http://transmaterial.net/>

<http://www.treccani.it/>

<https://www.zaha-hadid.com/>

Architettura parametrica, la diffusione dei software di progettazione digitale è la condizione necessaria, ma non sufficiente, per l'affermazione di una corrente architettonica che vuole materializzare la complessità del mondo contemporaneo, in

<https://www.domusweb.it/it/movimenti/architettura-parametrica.html>

AZZINI G., *Matematica e Architettura: dall'antichità fino ad oggi*, 23 marzo 2015, in

<https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/criteri-progettuali/matematica-architettura-281>

BOZZOLA E., *Edifici che ruotano per seguire il sole: tre esempi storici*, 6 febbraio 2013, in

<https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/edifici-ruotano-sole-esempi-175/>

BUI D., GHAZLAN A., NGO N., NGO T., NGUYEN T., *Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach*, *Applied Energy*, volume 265, 1 maggio 2020, in

<https://www.sciencedirect.com.ezproxy.biblio.polito.it/science/article/pii/S0306261920303093>

BURRY M., *Antoni Gaudí and Frei Otto: Essential Precursors to the Parametricism Manifesto*, 11 marzo 2016, in

https://www.researchgate.net/publication/301224573_Antoni_

Gaud_and_Frei_Otto_Essential_Precursors_to_the_Parametricism_Manifesto

CALABRESE R., *Henning Larsen per il campus di Kolding: una struttura flessibile e funzionale*, 2 marzo 2009, in

https://www.archiportale.com/news/2009/03/risultati/henning-larsen-per-il-campus-di-kolding_14195_37.html/

CILENTO K., *Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas*, 5 settembre 2012, in

<https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas/>

Computational design e algoritmi generativi per progettare meglio, 4 maggio 2017, in

<https://www.01building.it/strumenti/computational-design-algoritmi-generativi/>

Computational design, algoritmi generativi e modellazione parametrica: come sta cambiando il mondo dell'Architettura, 2 settembre 2016, in

<https://www.dama.academy/computational-design-algoritmi-generativi-e-progettazione-parametrica/>

COSTOLA D., HENSEN J.L., LOONEN R., TRCKA M., *Climate adaptive building shells: State of the art and future challenges*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 25, settembre 2013, in

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002670/>

CROXFORD B., LOPEZ M., MARTIN S., RUBIO R., *How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the deve-*

lopment of adaptive architectural envelopes, Renewable and Sustainable Energy Reviews, volume 67, gennaio 2017, in <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.biblio.polito.it/science/article/pii/S136403211630510X>

DISTEFANO D., RODONO' G., SAPIENZA V., *Cinematismi e superfici pieghevoli in architettura*, 27 ottobre 2016, in <https://www.ilprogettostenibile.it/2016/10/27/cinematismi-e-superfici-pieghevoli-in-architettura/>

DRAGONE R., *Barcellona: la "Digital Pedrera" firmata Ruiz Geli*, 22 giugno 2007, in <https://www.archiportale.com/news/2007/06/architettura/barcellona-la-digital-pedrera-firmata-ruiz-geli/>

Expo '67, in Domus 446, Milano, gennaio 1967
<https://www.domusweb.it/it/dall-archivio/2011/07/14/expo-67.html>

FILIPPETTI J., *RVTR: pannelli acustici architettonici origami a camera di risonanza*, 3 maggio 2012, in <https://www.designboom.com/technology/rvtr-resonant-chamber-origami-architectural-acoustic-panels/>

FORUTO A., *Resonant Chamber / RVTR*, 19 aprile 2012, in <https://www.archdaily.com/227233/resonant-chamber-rvtr/>

GERFEN K., *Quartiere ThyssenKrupp*, 6 ottobre 2010, in <https://www.architectmagazine.com/design/buildings/thyssenkrupp-quarter/>

GUERRA A., *I modelli energetici di Banham: conservativo, selettivo, rige-*

nerativo e bioclimatico, 12 dicembre 2009, in <https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/criteri-progettuali/modelli-energetici-banham-conservativo-selettivo-rigenerativo-bioclimatico>

GUERRA-SANTIN O., HOSSEINI S., MOHAMMADI M., *Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes*, Building and Environment, volume 165, novembre 2019, in <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.biblio.polito.it/science/article/pii/S0360132319306067>

HOLLOWAY J., *Modernizing the mashrabiya: Smart-skinned Al Bahar Towers near completion*, 7 febbraio 2013, in <https://newatlas.com/al-bahar-towers/26139/>

JACOB S., *Parametricism? How quaint*, 27 novembre 2008, in <https://www.architectsjournal.co.uk/parametricism-how-quaint/1935874.article>

JSWD ARCHITEKTEN + CHAIX & MOREL, *Q1, ThyssenKrupp Quarter Essen / JSWD Architekten + Chaix & Morel et Associés*, 4 febbraio 2013, in <https://www.archdaily.com/326747/q1-thyssenkrupp-quarter-essen-jswd-architekten-chaix-morel-et-associés>

LANGDON D., *Classici AD: Montreal Biosphere / Buckminster Fuller*, 25 novembre 2014, in <https://www.archdaily.com/572135/ad-classics-montreal-biosphere-buckminster-fuller>

LARSEN H., *SDU Campus Kolding / Henning Larsen*, 30 gennaio 2015, in
<https://www.archdaily.com/590576/sdu-campus-kolding-henning-larsen-architects/>

LATINI F., *Facciate dinamiche: l'architettura diventa viva*, 29 gennaio 2015, in
<https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/innovativi/facciate-dinamiche-215/>

MAIER F., *One Ocean - Padiglione tematico per EXPO 2012*, 11 maggio 2012, in
<https://www.detail-online.com/article/one-ocean-thematic-pavilion-for-expo-2012-16339/>

Mario Coppola conversa con Patrik Schumacher, pubblicato in BLOOM 15, Facoltà di Architettura Università di Napoli, gennaio 2013, in
https://www.patrikschumacher.com/Texts/Dogmi_Stili_Progresso_Storia%20ed%20Ecologia.html

MENCAGLI P., *Le mutazioni dell'involucro architettonico*, 24 agosto 2015, in
<https://www.ingenio-web.it/4259-le-mutazioni-dellinvolucro-architettonico>

MENGES A., KRIEG O., REICHERT S., *HygroSkin-Meteorosensitive Pavilion*, 9 settembre 2013, in
<https://www.archdaily.com/424911/hygroskin-meteorosensitive-pavilion-achim-menges-architect-in-collaboration-with-oliver-david-krieg-and-steffen-reichert/>

PARNELL S., *The style war continues*, 17 febbraio 2011, in
<https://www.architectsjournal.co.uk/home/the-style-war-continues/8611435.article?search=https%3a%2f%2fwww.architectsjournal.co.uk%2fsearcharticles%3fparametrics%3d%26keywords%3dparametricism%26PageSize%3d10%26cmd%3dGoToPage%26val%3d3%26SortOrder%3d1>

Piscina Monumentale, in
<https://www.museotorino.it/view/s/d52a0097f4e047b9ac8d59d5f245553/>

RAMCHURN R., *Schumacher: 'Parametricism the only movement for the digital age'*, 24 ottobre 2013, in
<https://www.architectsjournal.co.uk/news/schumacher-parametricism-the-only-movement-for-the-digital-age/8654696.article>

ROMANO R., *L'involucro edilizio attivo per il controllo energetico dell'edificio*, in
<https://www.teknoring.com/news/progettazione/linvolucro-edilizio-attivo-per-il-controllo-energetico-delledificio/>

ROMANO R., *L'involucro edilizio come "pelle" e "membrana"*, in
<https://www.teknoring.com/guide/guide-edilizia-e-urbanistica/linvolucro-edilizio-come-pelle-e-membrana/>

SCHUMACHER P., *Parametricism as Style - Parametricist Manifesto*, Londra 2008, presentato e discusso al Dark Side Club , 11 Biennale di Architettura, Venezia 2008, in
<http://patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>

SCHUMACHER P., *Parametricism - A New Global Style for Architecture*

and Urban Design, Londra 2008, pubblicato in: *AD Architectural Design - Digital Cities*, Vol. 79, Num. 4, luglio/agosto 2009, in
<https://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20-%20A%20New%20Global%20Style%20for%20Architecture%20and%20Urban%20Design.html>

SCHUMACHER P., *Patrik Schumacher on parametricism - "Let the style wars begin"*, 6 maggio 2010, in
<https://www.architectsjournal.co.uk/news/culture/patrik-schumacher-on-parametricism-let-the-style-wars-begin/5217211.article>

SCHUMACHER P., *The Parametric City*, 2010, pubblicato in: *Zaha Hadid – Recent Projects*, A.D.A. Editore, Tokyo, 2010, in
<https://www.patrikschumacher.com/Texts/The%20Parametric%20City.html>

SOMA, *One Ocean, Thematic Pavilion EXPO 2012*, 22 maggio 2012, in
<https://www.archdaily.com/236979/one-ocean-thematic-pavilion-expo-2012-soma/>

TEDESCHI A., *Il processo è più importante del risultato*, in
http://www.arturotedeschi.com/wordpress/?page_id=1475

VINNITSKAYA I., *Kiefer Technic Showroom / Ernst Giselsbrecht + Partner*, 17 novembre 2010, in
<https://www.archdaily.com/89270/kiefer-technic-showroom-ernst-giselsbrecht-partner/>

WINSTANLEY T., *Institut du Monde Arabe / Enrique Jan + Jean Nouvel + Architecture-Studio*, 2 ottobre 2011, in

<https://www.archdaily.com/162101/ad-classics-institut-du-monde-arabe-jean-nouvel/>

ZUNINO M. G., *Barcelona Media-tic*, 4 febbraio 2010, in
<https://www.abitare.it/it/architettura/2010/02/04/barcelona/>

RIFERIMENTI FOTOGRAFICI

- FIGURA 1: <https://www.inexhibit.com/it/mymuseum/centro-heydar-ali-yevev-baku-azerbaigian-zaha-hadid/>
- FIGURA 2: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00004-019-00469-w>
- FIGURA 3: <https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>
- FIGURA 4: http://architectura.cesr.univ-tours.fr/Traite/Notice/B250566101_11604.asp
- FIGURA 5: FRAZER J., *An Evolutionary Architecture*, Architectural Association Publications, Londra, 2009, pag. 62
- FIGURA 6: Elaborazione personale, fonte: CASALINO E., *Biomimetica: insegnamenti dalla natura per strutture ottimizzate del futuro*, Tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino, 2019, pag.35
- FIGURA 7: Elaborazione personale, fonte: TEDESCHI A., *AAD Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*, Le Penseur, Brienza, 2014, pag. 28
- FIGURA 8: Elaborazione personale, fonte: TEDESCHI A., *AAD Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*, Le Penseur,

Brienza, 2014, pag. 30

- FIGURA 9: Elaborazione personale, fonte: TEDESCHI A., *AAD Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*, Le Penseur, Brienza, 2014, pag. 30
- FIGURA 10: <https://www.theguardian.com/artanddesign/gallery/2009/nov/16/rome-zaha-hadid-museum-art>
- FIGURA 11: <https://digital.hbs.edu/platform-rctom/submission/from-paper-to-parametric-vectors-gehrys-transformation-of-architectural-modeling/>
- FIGURA 12: <https://blog.sagradafamilia.org/es/divulgacion/sagrada-familia-receptaculo-otros-proyectos-gaudi/>
- FIGURA 13: <https://www.lapedrera.com/en/la-pedrera/architecture>
- FIGURA 14: <https://www.architectmagazine.com/design/buckminster-fullers-biosphere-celebrates-50>
- FIGURA 15: <https://worldarchitecture.org/architecture-news/ccngp/alvar-aalto-academy-lecture-frei-otto>
- FIGURA 16: <https://www.sbp.de/en/project/roof-for-munich-olympic-stadium-1972/>
- FIGURA 17: <https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>
- FIGURA 18: <https://formfindinglab.wordpress.com/2016/01/29/form-finding-flashback-basento-viaduct/>

- FIGURA 19: <https://www.ingenio-web.it/7224-lopera-di-sergio-musme-ci-e-la-sua-attualita-per-i-progettisti-italiani>

- FIGURA 20: Elaborazione personale, fonte: PONTELLO E., *Approccio Parametrico alla Progettazione Architettonica*, Tesi di Laurea Triennale in Scienze dell'Architettura, Università degli Studi di Udine, 2015, pag. 37

- FIGURA 21: <https://structurecraft.com/blog/computational-design-with-timber>

- FIGURA 22: <https://www.zaha-hadid.com/masterplans/kartal-pendik-masterplan/>

- FIGURA 23: <https://www.zaha-hadid.com/masterplans/kartal-pendik-masterplan/>

- FIGURA 24: <https://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20-%20A%20New%20Global%20Style%20for%20Architecture%20and%20Urban%20Design.html>

- FIGURA 25: <https://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20-%20A%20New%20Global%20Style%20for%20Architecture%20and%20Urban%20Design.html>

- FIGURA 26: Elaborazione personale

- FIGURA 27: Elaborazione personale

- FIGURA 28: <https://www.archdaily.com/236979/one-ocean-thematic-pavilion-expo-2012-soma>

- FIGURA 29: <https://hiddenarchitecture.net/villa-girasole/>

- FIGURA 30: <https://www.thedhaus.com/portfolio/the-dynamic-dhaus/>

- FIGURA 31: <https://www.montrealguidecondo.ca/news/architecture-cinetique/>

- FIGURA 32: <https://archinect.com/news/article/147271957/taking-your-pad-for-a-spin-dubai-s-rotating-tower-proposal-is-back>

- FIGURA 33: <https://archello.com/project/abu-dhabi-investment-council-new-headquarters-al-bahr-towers>

- FIGURA 34: <https://www.theplan.it/architettura/al-bahr-towers-it>

- FIGURA 35: <https://newatlas.com/al-bahar-towers/26139/>

- FIGURA 36: <https://www.archdaily.com/208700/in-progress-one-ocean-soma>

- FIGURA 37: <https://www.detail-online.com/article/one-ocean-thematic-pavilion-for-expo-2012-16339/>

- FIGURA 38: <https://www.detail-online.com/article/one-ocean-thematic-pavilion-for-expo-2012-16339/>

- FIGURA 39: <https://modulo.net/it/realizzazioni/istituto-del-mondo-arabo>

- FIGURA 40: <http://untitledmag.fr/des-jardins-dorient-a-linstitut-du-mond>

e-arabe/

- FIGURA 41: <https://www.artwave.it/architettura/buildings/larchitettura-che-cambia-faccia/>

- FIGURA 42: <https://www.ruiz-geli.com/projects/built/media-tic>

- FIGURA 43: <https://divisare.com/projects/194744-cloud-9-enric-ruiz-geli-media-ict>

- FIGURA 44: <https://divisare.com/projects/194744-cloud-9-enric-ruiz-geli-media-ict>

- FIGURA 45: <https://www.archdaily.com/424911/hygro-skin-meteorosensitive-pavilion-achim-menges-architect-in-collaboration-with-oliver-david-krieg-and-steffen-reichert>

- FIGURA 46: <https://www.archdaily.com/424911/hygro-skin-meteorosensitive-pavilion-achim-menges-architect-in-collaboration-with-oliver-david-krieg-and-steffen-reichert>

- FIGURA 47: <https://www.detail.de/artikel/hygro-skin-meteorosensitive-pavilion-11029/>

- FIGURA 48: <https://www.archdaily.com/227233/resonant-chamber-r-vtr>

- FIGURA 49: <https://architizer.com/projects/resonant-chamber/>

- FIGURA 50: <https://architizer.com/projects/resonant-chamber/>

- FIGURA 51: <https://www.archdaily.com/326747/q1-thyssenkrupp-quarter-essen-jswd-architekten-chaix-morel-et-associes>

- FIGURA 52: <http://facadesconfidential.blogspot.com/2010/12/thyssenkrupp-quarter-facades-giants.html>

- FIGURA 53: <http://facadesconfidential.blogspot.com/2010/12/thyssenkrupp-quarter-facades-giants.html>

- FIGURA 54: <https://www.e-architect.com/denmark/kolding-campus-university-southern-denmark>

- FIGURA 55: <https://www.archdaily.com/590576/sdu-campus-kolding-henning-larsen-architects>

- FIGURA 56: <https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/facciata-dinamica-universita-469>

- FIGURA 57: <https://www.architonic.com/it/project/ernst-giselbrecht-partner-dynamic-facade-kiefer-technic-showroom/5100449>

- FIGURA 58: <https://www.architonic.com/it/project/ernst-giselbrecht-partner-dynamic-facade-kiefer-technic-showroom/5100449>

- FIGURA 59: <http://transmaterial.net/aegis-hyposurface/>

- FIGURA 60: <https://www.jessong.com/hypo-surface.html>

- FIGURA 61: <http://www.rafaelcrespin.com/Projects/hyposurface/>

- FIGURA 62: Foto scattata da Alberto Pons il 10 febbraio 2021

- FIGURA 63: <https://www.google.it/maps/place/Piscina+Stadio+Monumentale/>

- FIGURA 64: Foto scattata da Alberto Pons il 28 novembre 2019

- FIGURA 65: Foto scattata da Alberto Pons il 28 novembre 2019

- FIGURA 66: Elaborazione personale

- FIGURA 67: Elaborazione personale

- FIGURA 68: Elaborazione personale

- FIGURA 69: Elaborazione personale

- FIGURA 70: Elaborazione personale

- FIGURA 71: Elaborazione personale

- FIGURA 72: Elaborazione personale

- FIGURA 73: Elaborazione personale