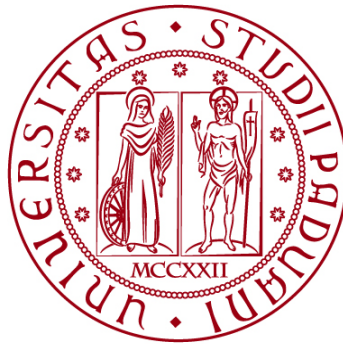


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE  
*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



**TESI DI LAUREA**

**Tecnologie sostenibili per l'involucro edilizio:  
Analisi di soluzioni innovative con integrazione  
fotovoltaica**

**Relatore: Chiar.mo PH.D.ARCH. LIVIO PETRICCIONE**

**Laureando: ULIANA ELENA**

**ANNO ACCADEMICO 2022-2023**



## ABSTRACT

In virtù degli obiettivi europei prefissati per la riduzione delle emissioni di anidride carbonica e per la costruzione di edifici nZEB vengono introdotti sistemi innovativi per migliorare l'efficienza edilizia.

In particolare, i sistemi di schermatura adattivi, rappresentano un ambito di sperimentazione promettente per quanto concerne il raggiungimento di elevate prestazioni energetiche data la loro capacità di modificare il proprio comportamento in base alle condizioni climatiche esterne.

Vista però l'attuale crescente richiesta energetica risulta necessaria la possibile integrazione di impianti fotovoltaici nell'involucro, in questo modo la facciata non risulta più solo un elemento passivo, ma diventa una superficie attiva in grado di produrre energia rinnovabile.

La tesi ha l'obiettivo di presentare i diversi sistemi di facciata adattivi tramite un'analisi storica e tecnologica, per poi focalizzare l'attenzione sull'integrazione di pannelli fotovoltaici in tali sistemi valutando diversi casi studio.

Infine il lavoro propone i diversi sviluppi innovativi illustrando un sistema brevettato di facciata ad alta efficienza automatizzata e un ulteriore sistema capace di sfruttare esclusivamente la risposta adattiva del materiale alle fonti naturali.

**INDICE**

INTRODUZIONE	2
CAPITOLO 1	
<b>PRESTAZIONI DELL'INVOLUCRO ARCHITETTONICO</b>	
1.1 Analisi sistema esigenziale-prestazionale	6
1.2 Benessere	9
1.3 Sostenibilità ambientale	14
CAPITOLO 2	
<b>INVOLUCRO VETRATO</b>	
2.1 Facciate continue	
2.1.1 Cenni storici	22
2.1.2 Stato dell'arte	28
• Facciate montanti e trasversi	30
• Facciate a cellule	32
• Facciate a fissaggio puntuale	35
• Facciate a doppia pelle	39
2.2 Sistemi di schermatura adattivi	
2.2.1 Cenni storici	43
2.2.2 Stato dell'arte	48
CAPITOLO 3	
<b>INVOLUCRO ARCHITETTONICO COME SISTEMA ATTIVO</b>	
3.1 Integrazione di sistemi fotovoltaici	
3.1.1 Tecnologia fotovoltaica	63
3.2 Casi di studio	
• NEST HiLo unità di ricerca e innovazione	69
• SBL OFFICES	73
3.3 Innovazioni e possibili sviluppi	
• Sistema brevettato automatizzato di schermatura fotovoltaica	75
• Pho'liage	78
CONCLUSIONI	83
BIBLIOGRAFIA	88

# INTRODUZIONE

L'involucro vetrato rappresenta la barriera che mette in comunicazione l'ambiente esterno con quello interno e proprio per questo ha un ruolo essenziale nella ricerca del benessere dell'utente.

Nel primo capitolo della tesi viene approfondito tale concetto dal punto di vista termico e visivo, ovvero gli ambiti più interessanti da studiare per il comfort legato allo studio delle schermature solari. La ricerca però non si ferma solo allo studio di questi sistemi che consentono di limitare l'utilizzo di apparati artificiali per consentire adeguate condizioni di comfort. Infatti, valutando l'importanza del tema della sostenibilità ambientale, trattato sempre all'interno del primo capitolo, si scopre la necessità di associare ai sistemi di schermatura la possibilità di produrre energia pulita da fonti rinnovabili che consentano di soddisfare la richiesta energetica, riducendo l'emissione di gas serra.

Per un'analisi approfondita è necessario però studiare l'evoluzione sia delle facciate che delle schermature dal punto di vista storico, in modo da capire come si è giunti alle tecnologie ad oggi presenti e quali sono le relative problematiche. Ed è proprio una di queste, ovvero la possibilità di avere un miglioramento dell'efficienza energetica, che porta al bisogno di progettare delle schermature dinamiche che consentano di adattarsi all'ambiente esterno, continuando però sempre a soddisfare le richieste di benessere dell'utente.

Nel capitolo finale della tesi viene analizzata la tecnologia fotovoltaica e il suo funzionamento, introducendo le diverse tipologie di materiali utilizzati e focalizzando anche l'attenzione sull'aspetto dello smaltimento e del recupero degli stessi.

Tramite poi lo studio di due casi di fotovoltaico integrato ai sistemi di schermatura solari dinamici, si vanno ad approfondire le tecnologie e le possibilità ad oggi presenti e sperimentate che consentono, tramite attuazione sia motorizzata che automatizzata, di garantire un ombreggiamento dell'edificio e allo stesso momento la produzione massimizzata di energia.

Nell'ultima parte invece vengono presentate possibili tecnologie da svilupparsi in futuro, tra cui un sistema brevettato, ancora in fase di attuazione, e un prototipo che mostra la svolta verso l'applicazione di principi biomimetici.





CAPITOLO 1

**PRESTAZIONI DELL'INVOLUCRO ARCHITETTONICO**

1.1 Analisi sistema esigenziale-prestazionale

1.2 Benessere

1.3 Sostenibilità ambientale



## 1.1 ANALISI SISTEMA ESIGENZIALE-PRESTAZIONALE

Al fine di garantire la qualità di un'opera architettonica è necessario andare ad ampliare il concetto di edificio, questo infatti non viene considerato solo come semplice insieme di spazi, ma come un sistema complesso in cui gli elementi si relazionano in modo da soddisfare le esigenze dell'utenza.

Durante la progettazione è quindi necessario valutare diversi aspetti tra i quali la destinazione d'uso dell'organismo edilizio, il tipo di utenza, le attività svolte, il contesto ambientale e i fenomeni che interessano edificio e utenti.

L'analisi di coloro che fruiscono degli spazi è di fondamentale importanza per la definizione delle esigenze, le quali vengono definite come "ciò che di necessità si richiede per il normale svolgimento di un'attività o di una funzione dell'utente"<sup>1</sup>. La UNI 8289 ne definisce sette classi tra cui: sicurezza, fruibilità, aspetto, gestione, integrabilità, salvaguardia dell'ambiente e benessere; le ultime trattate nei paragrafi successivi.

La traduzione di tali esigenze in termini normativi è affidata ai requisiti, i quali "rappresentano la quantificazione delle esigenze in modo tale da renderle misurabili e relazionabili a norme o regolamenti"<sup>2</sup>. Essi tengono però in considerazione anche il contesto ambientale in cui l'edificio è collocato e i fenomeni, interni o esterni, che producono allo stesso delle sollecitazioni.

Una volta definite esigenze e requisiti, come necessità dell'utente, diventa importante focalizzare l'attenzione sulle funzioni che vengono affidate all'edificio in risposta a tali bisogni. La qualità di queste è espressa dalle prestazioni, ovvero il "comportamento di un prodotto in servizio di materiali e tecniche che possano soddisfare le esigenze"<sup>3</sup>. Al fine di stimare e misurare le prestazioni vengono introdotte le specifiche di prestazione che rappresentano quindi le caratteristiche degli elementi che consentono di soddisfare i requisiti.

L'unione di questi elementi, come mostrato in Figura 1, porta dunque al concetto di qualità edilizia, ovvero "il grado di rispondenza delle prestazioni degli oggetti realizzati ai requisiti e costituisce l'insieme delle proprietà e delle caratteristiche dell'organismo

---

<sup>1</sup> Norma UNI 10838, Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia, 1999

<sup>2</sup> Slide del corso di Architettura tecnica, Livio Petriccione, 2021

<sup>3</sup> Ibidem

edilizio che conferisce ad esso la capacità di soddisfare, attraverso le prestazioni, esigenze espresse o implicite”<sup>4</sup>.

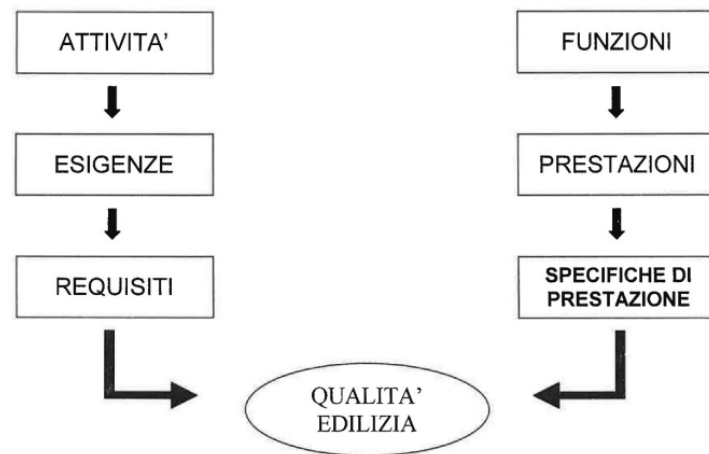


Figura 1: Rappresentazione schematica della relazione tra sistema edilizio e utente

La definizione ci permette quindi di ricavare due importanti caratteristiche della qualità edilizia, ovvero l'essere relativa e globale. Il primo aspetto ci porta alla necessità di scindere gli elementi dal loro valore proprio, in quanto vengono considerati solo tramite un rapporto. Il secondo invece si riferisce alla complessità della qualità edilizia, in quanto essa non è dipendente da un solo fattore, ma da diverse componenti culturali, economiche e ambientali, e può essere raggiunta variando in diversi modi le scelte architettoniche, tecnologiche e dei materiali. Le varie fasi del processo edilizio devono quindi tenere conto della necessità di mantenimento nel tempo della qualità di un bene. I metodi di verifica di rispondenza delle prestazioni e dei requisiti dell'organismo edilizio sono presentati, come vedremo in seguito, da diverse normative che stabiliscono ad ogni parametro dei valori di riferimento.

Inoltre il controllo della qualità dell'edificio riguarda il processo edilizio nel suo complesso, dalla fase di idealizzazione, alla fase di realizzazione, fino al momento in cui dovrà essere dimessa. Ed è proprio in questo ambito che, ai fini del tema della salvaguardia ambientale trattato nell'ultima parte del capitolo, si inserisce una particolare normativa, la UNI 11277, che "definisce esigenze e requisiti relativi all'ecocompatibilità dei progetti edilizi riferiti al ciclo di vita dell'edificio"<sup>5</sup>. Tale norma

---

<sup>4</sup> Ibidem

<sup>5</sup> Slide del corso di Architettura tecnica, Livio Petriccione, 2021

consente quindi di fissare dei requisiti per il soddisfacimento della salvaguardia ambientale sia nella fase di costruzione che in quella di utilizzo dell'opera. L'obiettivo è quindi quello di incentivare l'utilizzo di materiali riciclabili, di tecniche costruttive che consentano di facilitare la separabilità degli elementi per il recupero e la riduzione delle emissioni di gas serra.

## 1.2 BENESSERE

La ricerca del comfort abitativo assume sempre più una connotazione fondamentale nella progettazione di un edificio e nella necessità di riuscire a fondere tale concetto con quello di risparmio energetico.

Il benessere viene definito come “atteggiamento mentale di completa soddisfazione per l’ambiente entro il quale si opera”<sup>6</sup> e il suo raggiungimento è legato quindi a condizioni della qualità dell’aria, della temperatura, dell’illuminazione e dei rumori. Si concentrerà in particolar modo l’attenzione sulle due macroaree che più hanno influenza sul tema della salvaguardia ambientale, ovvero sul benessere termo-igrometrico e luminoso.

In particolare il settore delle superfici trasparenti ha grande impatto sulle condizioni interne di un edificio in quanto rappresenta la barriera con l’ambiente circostante, ed ha quindi la funzione di regolazione dei flussi luminosi e termici. Lo scopo finale della progettazione è quindi quello di riuscire a soddisfare richieste di benessere, limitando il più possibile l’utilizzo di apparati artificiali.

La valutazione del comfort termo-igrometrico si basa sullo studio del professor Fanger<sup>7</sup> (1970) secondo cui i parametri da prendere in considerazione sono sei, due legati al comportamento dell’individuo e quattro legati all’ambiente circostante. Tra i primi due troviamo l’attività svolta dal soggetto e la resistenza termica del vestiario indossato, i quali incidono sui processi metabolici e sull’emissione di calore per convezione, irradiazione e evaporazione.

I criteri legati all’ambiente invece riguardano la velocità dell’aria, l’umidità relativa, la temperatura media radiante delle superfici che delimitano l’ambiente e la temperatura dell’aria.

Per correlare le due sfere vengono poi introdotti dallo stesso Fanger due indici, il PMV (Predicted Mean Vote) e il PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), i quali sono analizzati congiuntamente, ai fini della valutazione del benessere, in modo da ottenere una previsione del voto di comfort, tramite il PMV, e della percentuale di insoddisfatti,

---

<sup>6</sup> Il nuovo edificio green. Soluzioni per il benessere abitativo e l'efficienza energetica, pag 77, di Luca Rubini, Silvia Sangiorgio, Claudia Le Noci, Hoepli, 2016.

<sup>7</sup> Povl Ole Fanger (1934-2006) è stato un professore presso il Centro internazionale per l’ambiente interno e l’energia presso l’università della Danimarca. Le sue ricerche si incentrano sulla ricerca dei parametri che influenzano il comfort termico.

valutata dal PPD, la quale deve essere minimizzata in fase di progettazione. I valori del voto PMV vengono definiti dalla norma ASHRAE (Thermal Environmental Condition for

+ 3	Hot
+ 2	Warm
+ 1	Slightly warm
0	Neutral
- 1	Slightly cool
-2	Cool
- 3	Cold

Figura 2:Scala ASHRAE di sensazione termica, tratto da norma UNI EN 7730:2005

Human Occupancy) tramite la scala di sensazione termica riportata in Figura 2.

I due indici vengono adottati dalla ISO 7730 “Moderate thermal environments – Dermination of PMV e PPD indices and specification of the thermal comfort”, la quale definisce le condizioni ambientali accettabili di comfort, rappresentate dalla situazione, verificabili dalla Figura 3, in cui il valore PMV è compreso tra -0.5 e 0.5, con corrispondente valore di PPD pari al 10%, mentre per PMV=0 è ipotizzato un 5% di persone insoddisfatte. Tale condizione si può osservare anche mettendo in relazione a livello grafico i due indici come mostrato in Figura 4.

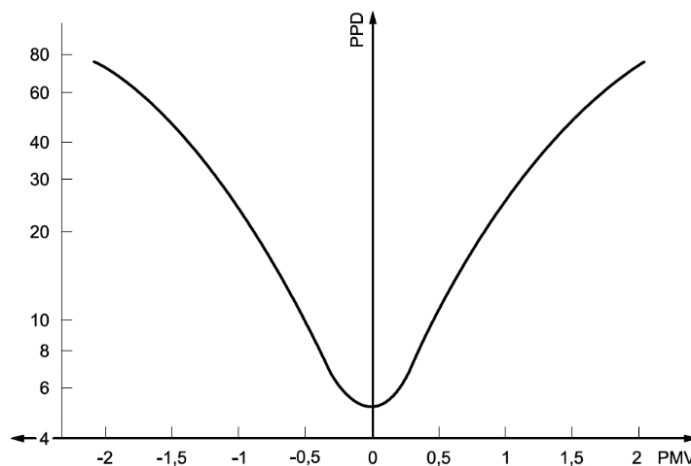


Figura 3:Distribuzione prevista dei voti delle persone termicamente insoddisfatte, tratta da norma UNI EN 7730:2005

PMV	PPD	Persons predicted to vote <sup>a</sup>		
		%		
		0	-1, 0 or +1	-2, -1, 0, +1 or +2
+2	75	5	25	70
+1	25	30	75	95
+0,5	10	55	90	98
0	5	60	95	100
-0,5	10	55	90	98
-1	25	30	75	95
-2	75	5	25	70

<sup>a</sup> Based on experiments involving 1 300 subjects.

Figura 4: Percentuale prevista PPD in funzione del valore medio PMV, tratta da norma UNI EN 7730:2005

Questi valori vengono determinati per il corpo nel suo complesso, il grado di insoddisfazione termica può però essere causato anche dal raffreddamento o riscaldamento di una particolare parte del corpo. La situazione di discomfort locale, avvertita maggiormente quando si svolge un'attività sedentaria, può essere provocata da una corrente d'aria, da una differenza di temperatura verticale tra testa e caviglie, dalla temperatura del pavimento oppure da un'asimmetria di temperatura radiante.

Le principali raccomandazioni per evitare situazioni di disagio, riportate in figura 5, sono quindi quelle di mantenere una differenza tra capo e arti di 3°C, una temperatura del pavimento tra 19° e 29° in base al materiale utilizzato, un'asimmetria radiante di 5° sotto un soffitto riscaldato e di 10° presso una parete fredda, e infine fissare un limite di velocità della corrente d'aria di 0.15m/s in inverno e 0.25m/s in estate.

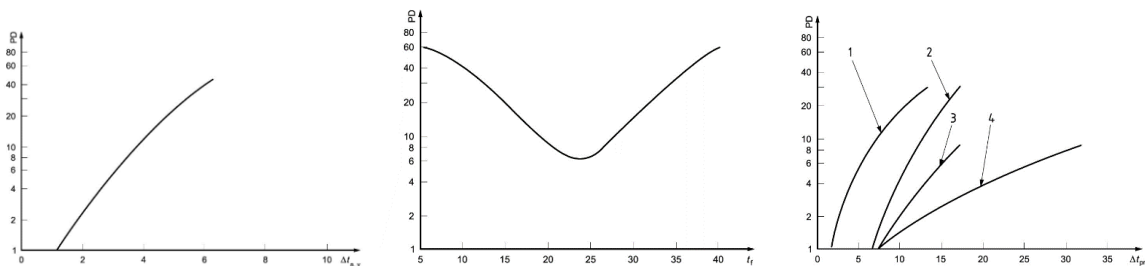


Figura 5: a- Rappresentazione relazione tra PPD e differenza temperatura tra arti e capo; b- Rappresentazione relazione tra PPD e temperatura pavimento; c- Rappresentazione relazione tra PPD e asimmetria radiante

Un'altra norma di riferimento per il comfort termico è la UNI EN 15251 la quale utilizza un ulteriore approccio basato sul metodo adattivo. A differenza del modello Fanger, il quale non fa riferimento al contesto culturale e sociale, il criterio ora trattato tiene conto della capacità degli occupanti di adattarsi al clima esterno. Esso propone quindi una correzione al primo metodo proprio tenendo conto dell'adattamento umano che porta i



soggetti a considerare temperature interne confortevoli diverse a seconda della stagione e della località.

Il secondo aspetto da valutare, come anticipato, è il benessere visivo, il quale viene definito come “lo stato in cui l’individuo può svolgere nel modo migliore le attività che gli competono all’interno dell’ambiente in cui si trova”<sup>8</sup>. Il requisito fondamentale per il suo raggiungimento è quindi un controllo dell’apporto luminoso, considerando l’importanza che la luce ricopre nell’influenzare lo stato fisiologico e psicologico delle persone.

In particolare lo scopo è quello di minimizzare il più possibile l’utilizzo di luce artificiale a favore del daylighting in modo da ridurre i consumi energetici, ma anche permettendo di garantire una buona resa cromatica, normalmente falsata da dispositivi artificiali.

Viene per questo introdotto il fattore di luce diurna, definito come “rapporto tra l’illuminamento medio misurato in un punto dell’ambiente e l’illuminamento medio misurato all’esterno, su una superficie orizzontale che vede l’intera volta celeste senza ostruzioni”<sup>9</sup>, il quale quindi va a valutare l’effettiva illuminazione naturale di un ambiente.

Alcuni dei parametri che rientrano nell’espressione di questa grandezza sono per esempio l’area della superficie vetrata, la quale viene calcolata considerando il rapporto illuminante, il “fattore finestra”, dato dalla posizione e presenza di ostruzioni, il coefficiente di trasmissione del vetro e la superficie interna dell’ambiente.

All’interno della norma ora analizzata, la UNI EN 17037 “Daylight in buildings”, viene considerata come aspetto importante per il comfort visivo anche la connessione visiva con l’ambiente circostante. A tal fine devono essere garantiti fattori come l’angolo di apertura visiva, che deve risultare maggiore di un valore fissato come limite, una visuale non falsata dell’esterno e un corretto grado di percezione dei colori.

---

<sup>8</sup> Il nuovo edificio green. Soluzioni per il benessere abitativo e l'efficienza energetica, pag 93, di Luca Rubini, Silvia Sangiorgio, Claudia Le Noci, Hoepli, 2016

<sup>9</sup> Il nuovo edificio green. Soluzioni per il benessere abitativo e l'efficienza energetica, pag 93, di Luca Rubini, Silvia Sangiorgio, Claudia Le Noci, Hoepli, 2016

Un altro parametro fondamentale è l'esposizione alla luce solare che costituisce un distintivo della qualità della stanza, permettendo un elevato grado di benessere se garantita per un numero minimo di ore, come rappresentato in Figura 6.

<b>Level of recommendation for exposure to sunlight</b>	<b>Sunlight exposure</b>
<b>Minimum</b>	<b>1,5 h</b>
<b>Medium</b>	<b>3,0 h</b>
<b>High</b>	<b>4,0 h</b>

Figura 6: Tabella raccomandazione per l'esposizione solare, tratta da norma UNI EN 17037:2018

La presenza di abbagliamento, infine, rappresenta un motivo di disagio per l'occupante in quanto si verifica in presenza di una "luminanza maggiore rispetto a quella a cui gli occhi si sono adattati"<sup>10</sup>. La protezione da tale effetto può essere assicurata, come previsto dalla norma UNI EN 12216, dalla presenza di dispositivi solari regolabili interni o esterni e da vetrate con trasmissione della luce bassa.

Per stabilire dei valori limite viene introdotto l'indice DGP, "Daylight glare probability", definito da una formula empirica che misura la probabilità di provare la sensazione di fastidio dovuto all'abbagliamento da luce naturale. Tale parametro viene ricavato sperimentalmente e diviso in quattro classi di comfort, come riportato in Figura 7, nelle quali quindi si valuta la percezione dell'abbagliamento e il grado di tolleranza da parte dell'utente.

<b>Criterion</b>	<b>DGP</b>
<b>Glare is mostly not-perceived</b>	<b><math>DGP \leq 0,35</math></b>
<b>Glare is perceived but mostly not disturbing</b>	<b><math>0,35 &lt; DGP \leq 0,40</math></b>
<b>Glare is perceived and often disturbing</b>	<b><math>0,4 &lt; DGP \leq 0,45</math></b>
<b>Glare is perceived and mostly intolerable</b>	<b><math>DGP \geq 0,45</math></b>

Figura 7: Intervalli di classificazione del DGP, tratto da norma UNI EN 17037:2018

<sup>10</sup> Norma UNI EN 17037:2018

### 1.3 SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

L'evoluzione dei principi ambientali ha inizio negli anni Settanta con i primi studi riguardanti le emissioni di gas a effetto serra, i cui risultati hanno portato all'esigenza di rendere prioritari interventi e politiche a favore della salvaguardia dell'ambiente.

Questi interventi si affermano politicamente a partire dagli anni Ottanta con l'istituzione della Commissione Mondiale per l'Ambiente e lo Sviluppo che nel 1987 elaborò un testo introducendo per la prima volta il concetto di sviluppo sostenibile, definito come "sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni"<sup>11</sup>. Gli esiti di tale commissione, vennero riportati nel Rapporto Brundtland il quale mirava ad evidenziare le problematiche ambientali e a sottolineare la responsabilità etica nei confronti delle generazioni future. In seguito a questa pubblicazione si sono evolute diverse definizioni del tema, che comincia ad affermarsi sempre di più a livello globale, una di queste deriva dalla Conferenza di Rio del 1992 nella quale si raggiunge una legittimazione del concetto di sviluppo sostenibile che porta alla stesura di programmi e agende per l'attuazione concreta di interventi.

Sono state adottate in questa occasione tre convenzioni, una delle quali è la "convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici" (UNFCCC), di cui l'Unione Europea è parte, che costituisce il principale accordo internazionale sull'azione per il clima.

A metà degli anni Novanta, più precisamente nel 1997, i componenti dell'UNFCCC adottarono il Protocollo di Kyoto, il quale prevede obblighi vincolanti nel contenimento di emissioni di gas serra. In particolare gli stati contraenti si impegnano alla riduzione di almeno il 5% nel periodo 2008-2012 di questi rispetto ai livelli del 1990, le percentuali vengono ripartite e specificate per ogni paese, all'interno dello stesso protocollo, in base al grado di sviluppo industriale.

Inoltre il protocollo prevede dei meccanismi flessibili, tra cui l'Emission Trading, attraverso il quale vengono introdotti dei crediti di emissione che vengono ceduti a paesi che non siano stati in grado di rispettare i propri impegni, da parte di altri che al contrario hanno superato la percentuale di riduzione prefissata.

---

<sup>11</sup> Riflessioni sullo sviluppo sostenibile in architettura. A trent'anni dal rapporto Brundtland, di Maria Canepa, Mimesis, 2018

Gli stessi paesi facenti parte dell'UNFCCC, allo scadere del Protocollo di Kyoto nel 2020, si sono impegnati a fissare nuovi obiettivi per la limitazione del riscaldamento globale tramite la ratifica dell'Accordo di Parigi entrato in vigore il 4 novembre 2016 con l'adempimento di almeno 55 paesi che rappresentano il 55% delle emissioni globali.

L'accordo mira a rafforzare la risposta all'evoluzione climatica fissando come obiettivo il mantenimento dell'aumento della temperatura media mondiale al di sotto di 2 °C, soglia che si cerca di portare a 1.5 °C in quanto, secondo il "Gruppo intergovernativo delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici", il superamento "rischia di scatenare impatti molto più gravi tra cui siccità più frequenti e gravi, ondate di calore e precipitazioni"<sup>12</sup>.

In particolare l'UE, in quanto firmataria del trattato, presenta la sua strategia di azione tramite l'aggiornamento di piani racchiusi nel Green Deal, garantendo la riduzione delle emissioni di almeno il 55% avviando così un processo verso una società a impatto climatico zero entro il 2050. In special modo viene concentrata l'attenzione sul settore edilizio, in quanto settore in continua espansione e responsabile di circa il 40% del consumo di energia e del 36% delle emissioni di CO<sub>2</sub>, del 50% del consumo in peso dei materiali utilizzati in UE e del 30% dei rifiuti che generiamo.

Nel corso dell'ultimo decennio si sono quindi susseguite molteplici iniziative mirate al raggiungimento di alte prestazioni energetiche negli edifici in conformità con il Protocollo di Kyoto e in risposta all'impegno prefissato nell'Accordo di Parigi. In questo contesto può essere menzionata la direttiva 2010/31/EU (EPBD recast) nella quale si introduce il concetto di "edifici ad energia quasi zero" e si rende obbligatorio il perseguimento di standard energetici per tutti gli edifici di nuova costruzione a partire dal 31 dicembre 2020.

Gli nZEB vengono definiti come "edifici che presentano una prestazione energetica molto elevata, la cui quantità di energia richiesta quasi nulla o molto bassa dovrebbe essere coperta in misura molto significativa dall'energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia quella prodotta in loco o nelle vicinanze"<sup>13</sup>; ciò include quindi che vengano valutati il corretto orientamento dell'edificio, l'isolamento della struttura, l'uso di schermature solari per evitare il surriscaldamento e l'installazione di impianti fotovoltaici.

---

<sup>12</sup> The Paris Agreement, UNFCCC

<sup>13</sup> Direttiva 2010/31/EU, energy performance of buildings (EPBD recast)

Nel giugno 2022 è stata pubblicata una nota di aggiornamento, come mostrato in Figura 8, che evidenzia che dal 2017 il settore edile, seppur con velocità minori di quelle previste, si sta muovendo nella giusta direzione per la neutralità climatica.

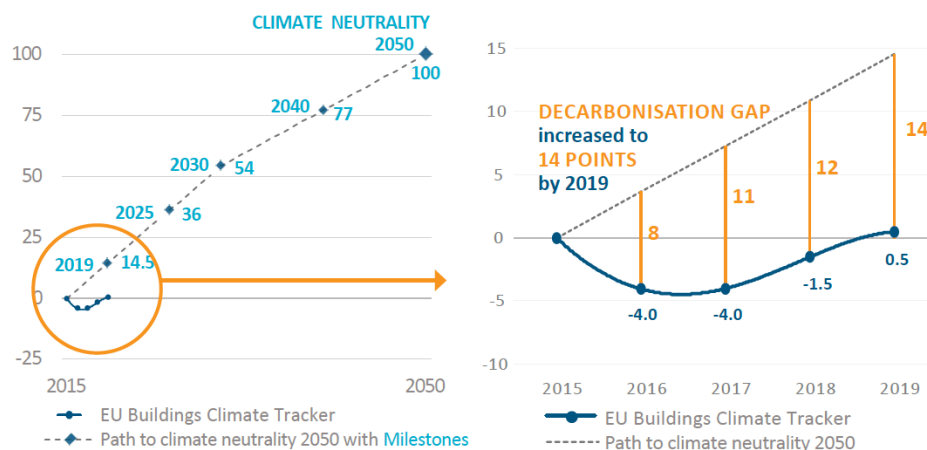


Figura 8: Confronto andamento progressi verso la neutralità climatica a confronto con gli obiettivi per il 2050, tratto da "EU Buildings Climate Tracker: Methodology and introduction of building decarbonisation indicators and their results"

L'attenzione delle misure politiche deve però ampliarsi, infatti nell'attuazione degli interventi non deve mancare una visione d'insieme sul ciclo di vita dell'edificio che vada a considerare la scelta dei materiali di costruzione, la loro durata, le loro prestazioni in sito e la possibilità di riutilizzo.

È in questo contesto che si inserisce il concetto di "economia circolare" intesa come "modello di produzione volto all'uso efficiente delle risorse e al mantenimento circolare del loro flusso nel Paese"<sup>14</sup>, il cui fine viene perseguito grazie al contributo del Green Public Procurement. L'obiettivo è quello di superare completamente l'economia lineare in cui invece, come si vede in Figura 9, non si valuta nessuna relazione tra le materie prime e i rifiuti.

<sup>14</sup> Strategia nazionale per l'economia circolare, Ministero della transizione ecologica, pag 8.

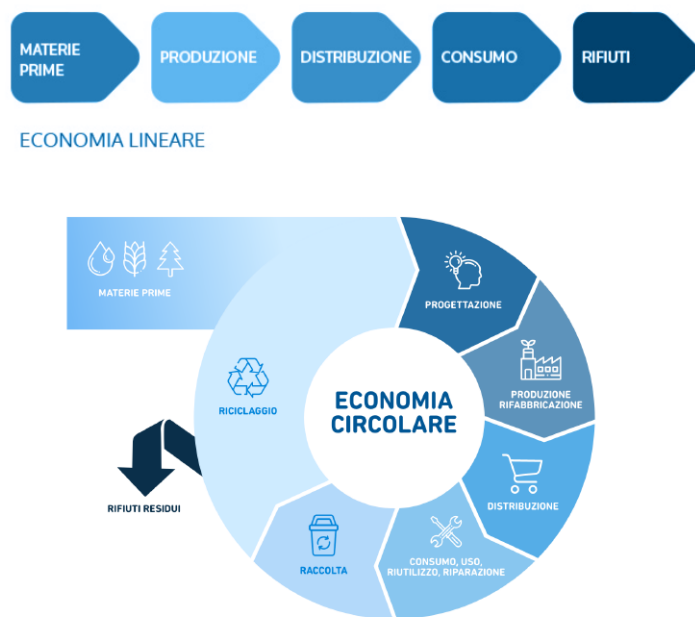


Figura 9: Confronto tra il concetto di economia circolare e economia lineare, tratto da "Strategia nazionale per l'economia circolare", ministero della transizione ecologica.

Sono proprio gli "Acquisti Verdi" lo strumento di politica ambientale in base al quale la Pubblica Amministrazione introduce dei criteri ambientali minimi in ogni fase del processo d'acquisto che "promuovono lo sviluppo e la diffusione di tutte quelle soluzioni innovative nei materiali, nella progettazione dei prodotti e dei servizi che consentono la massima estensione della vita utile dei beni, il loro reinserimento nei cicli produttivi nella maniera più efficiente possibile, con minori sprechi e le minori esternalità, anche in relazione alla presenza e alle emissioni di sostanze pericolose e all'uso di energia"<sup>15</sup>.

L'innovazione dei CAM, criteri ambientali minimi, quindi riguarda la valutazione del ciclo di vita degli edifici a monte della progettazione, il loro utilizzo diventa obbligatorio a seguito dell'entrata in vigore del nuovo "Codice Appalti" nel 2016 il quale invita a mantenerli sempre in continuo aggiornamento (Art. 3) in base all'evoluzione del mercato e alle indicazioni della Commissione Europea.

Ad oggi sono stati emanati 18 decreti CAM per ogni settore merceologico, tra i quali troviamo anche il settore dell'edilizia, verde pubblico, illuminazione pubblica, veicoli e arredi per interni.

I CAM vengono divisi in criteri ambientali di base e premianti, i primi sono obbligatori da rispettare per poter considerare un appalto pubblico sostenibile, i secondi invece

<sup>15</sup> Strategia nazionale per l'economia circolare, Ministero della transizione ecologica, pag 56.

consentono di fornire un maggior punteggio in fase di aggiudicazione della gara in base al criterio di offerta economicamente più vantaggiosa. Nel caso dell'edilizia per esempio i criteri base comprendono le specifiche tecniche dell'edificio che regolano le prestazioni energetiche, risparmio idrico, illuminazione naturale, aerazione, dispositivi di protezione solare, le emissioni dei materiali, comfort termo-igrometrico (basato sul modello di Fanger) le specifiche tecniche dei componenti edilizi che valutano invece il riciclaggio, la sostenibilità dei materiali, e le specifiche tecniche del cantiere che analizzano le demolizioni, le prestazioni ambientali e il personale di cantiere.

L'obbligatorietà di questi criteri porta quindi a sviluppare in modo concreto le pratiche sostenibili in modo tale da raggiungere gli obiettivi prefissati.





CAPITOLO 2

**INVOLUCRO VETRATO**

2.1 Facciate continue

2.1.1 Cenni storici

2.1.2 Stato dell'arte

Facciate montanti e traversi

Facciate a cellule

Facciate a fissaggio puntuale

Facciate a doppia pelle

2.2 Sistemi di schermatura adattivi

2.2.1 Cenni storici

2.2.2 Stato dell'arte



## 2.1 FACCIATE CONTINUE

### 2.1.1 Cenni storici

Le origini delle facciate continue risalgono al XIX secolo quando negli Stati Uniti ha avuto una graduale sostituzione delle murature portanti con strutture a telaio in cemento armato e acciaio. Lo sviluppo di questo processo deriva da una necessità di perfezionare le tecniche costruttive per la crescente costruzione di edifici sviluppati in altezza, i quali richiedevano quindi un giusto equilibrio tra leggerezza e stabilità. L'introduzione di queste strutture a telaio inoltre consente di poter aumentare le dimensioni delle finestre ottenendo tutti i benefici che ne derivano, tra cui maggiore apporto di luce, vista e possibilità di ventilazione.

I primi risultati furono frutto del lavoro di un gruppo di diversi architetti, attivi negli ultimi anni del 1800, conosciuto poi come "Scuola di Chicago", il quale ha dato vita a diversi edifici tra cui, il più degno di nota, il Reliance Building costruito nel 1895 (Figura 10). La struttura per uffici di quindici piani rappresentava una grande innovazione per le facciate, mostrando un nuovo dialogo tra struttura e pelle dell'edificio. Essa era costituita da una grande lastra di vetro centrale, affiancata da piccole finestre apribili e da rivestimenti in terracotta smaltata bianca con ornamenti in stile gotico.

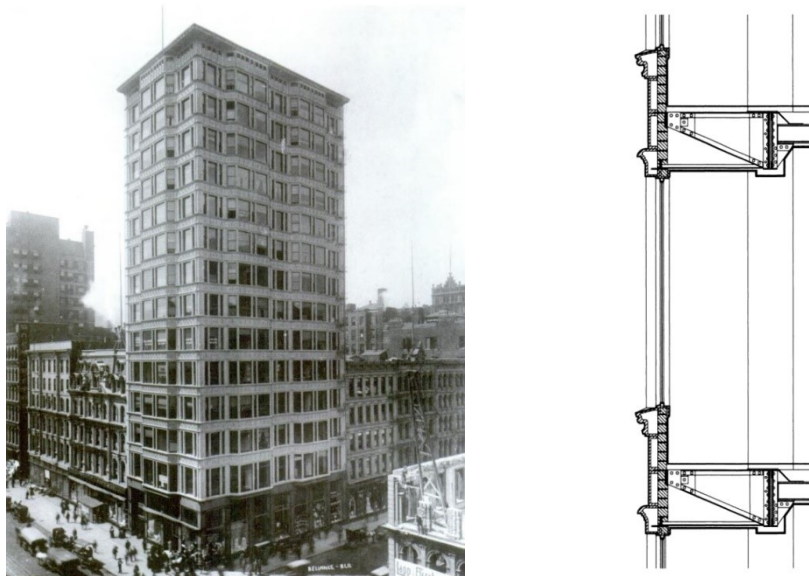


Figura 10: a-Facciata del Reliance Building, Chicago, 1895, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019; b-Sezione esterna muro del Reliance Building, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019

Negli edifici costruiti in questi anni si vede che la struttura a scheletro viene comunque mantenuta nella posizione del muro, in corrispondenza della parte più esterna dell'edificio. Nei primi due decenni del Novecento la sperimentazione, estesa ormai a livello internazionale, si concentra sulla separazione del telaio strutturale dall'elemento vetrato. Viene quindi fatto arretrare il sistema di pilastri in modo da poter aprire la facciata consentendo una maggiore libertà architettonica nella progettazione.

Fagus Shoe-Last Factory è l'esemplificazione di questo approccio, infatti la disposizione delle colonne di cemento a vista, rivestite in mattoni dietro la facciata, mette in evidenza la perdita della funzione strutturale. All'angolo inoltre si ha la completa eliminazione delle colonne consentendo una continuità della superficie vetrata sui due lati. La progettazione dell'edificio, ad opera di Walter Gropius e Adolf Meyer, risale al 1911 (Figura 11).

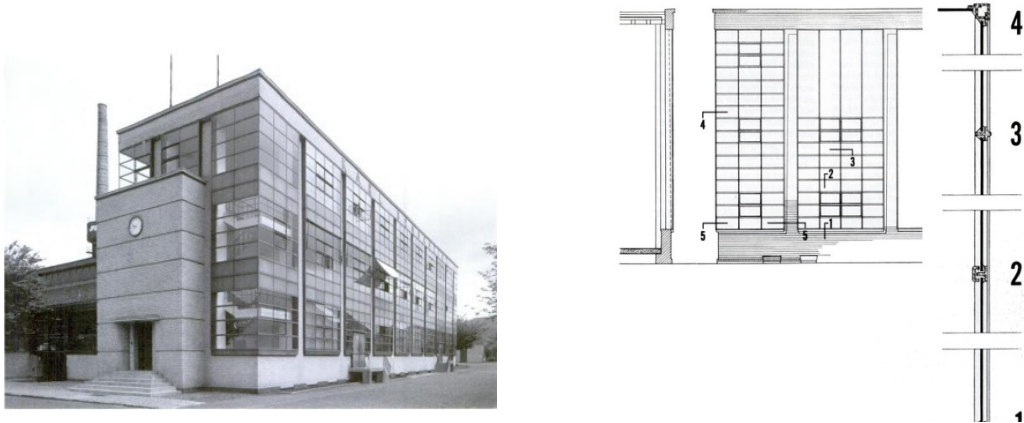


Figura 11: a- Fagus Shoe-Last Factory, 1911, tratta da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019; b- Fagus Shoe-Last Factory sezione parete, tratta da "<https://www.archdaily.com/612249/classics-fagus-factory-walter-gropius-adolf-meyer>"

Il primo edificio costituito da una facciata interamente in vetro fu realizzato però in America a San Francisco nel 1918, l'opera, Hallidie Building (Figura 12), è composta da una vetrata continua di sette piani fissata con montanti in acciaio, disposti a 0.9 metri dalle colonne, e con finestre ruotanti che consentono la normale ventilazione.

La cortina muraria viene sostenuta da un solaio a sbalzo, supportato da una trave perimetrale in cemento armato che funge anche da tagliafuoco tra i piani.

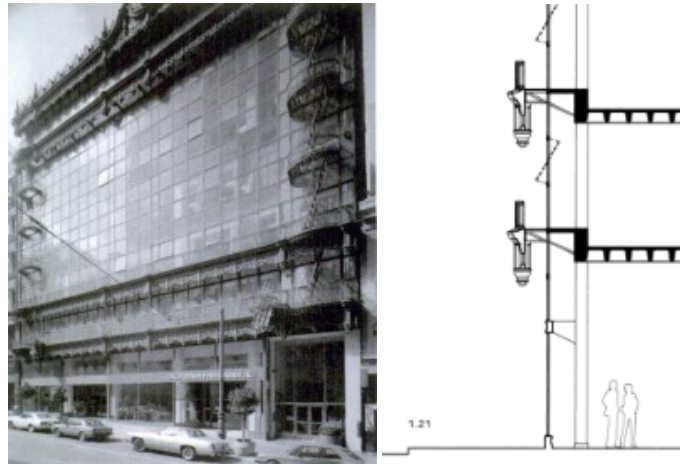


Figura 12: a- Halladie Building, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019; b- Halladie Building dettaglio facciata, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019

Risulta quindi evidente come i concetti di trasparenza e luminosità assumano sempre di più rilevanza, ed è proprio su questi ideali che si fonda il Movimento Moderno, di cui architetti come Gropius, Mies van der Rohe e Le Corbusier furono promotori. La ricerca di una maggiore centralità del vetro, obiettivo principale di questo movimento, viene ripresa anche da Paul Scheerbart, poeta e romanziere residente a Berlino, che affermò come l'uso in architettura di esso potesse avere grande impatto sulla società in quanto "se vogliamo che la nostra cultura si elevi ad un livello superiore siamo obbligati a introdurre l'architettura del vetro, che lascia entrare la luce del sole non solo attraverso le finestre, ma attraverso ogni possibile parete, che sarà fatta interamente in vetro"<sup>16</sup>. Le facciate, già proposte da Gropius e Meyer nel 1911, vennero ripresentate nel Bauhaus Building (Figura 14) nel 1926 a Dessau, in Germania, il quale vede un completo arretramento della struttura.

<sup>16</sup> "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019, pag 25



Figura 14: Bauhaus Building, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019

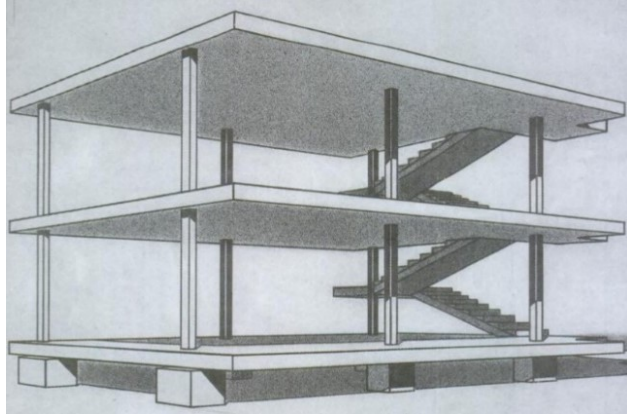


Figura 13: Maison Domino, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019

Nonostante la presenza del vetro monostrato causasse problematiche come condensa e insufficiente isolamento acustico, la facciata dell'edificio rappresenta un'icona del movimento moderno.

Negli stessi anni poi si fecero avanti anche le nuove proposte dell'architetto Charles Edouard Jeanneret, conosciuto con lo pseudonimo di Le Corbusier, il quale nel 1914 sviluppò la Maison Domino (Figura 13) che confermò ancora una volta una definitiva liberazione sia della pianta e del prospetto. Le sue proposte vennero esplicitate poi nei "Cinque punti di una nuova architettura", i quali includevano "pilotis per sollevare la massa dell'edificio da terra, il giardino pensile, la pianta libera, la facciata libera e la finestra a nastro orizzontale"<sup>17</sup>.

L'utilizzo sempre più comune delle facciate vetrate però fece sorgere anche diverse problematiche legate all'applicabilità di queste nei diversi contesti ambientali. Si iniziò dunque a porre l'attenzione a nuove soluzioni per prevenire l'abbagliamento e l'eccessivo guadagno di calore solare, ed è proprio su questo che Le Corbusier concentrò il suo studio, diventando il precursore dei sistemi di schermature solari trattati nella seconda parte del capitolo.

Altro direttore della Bauhaus è Mies van der Rohe, il quale progettò due grattacieli (Figura 15), uno nel 1921 e l'altro l'anno seguente, notevoli per la loro struttura a telaio e per l'utilizzo di un involucro trasparente per tutta l'altezza. Tali strutture erano coerenti con il noto motto dell'architetto "less is more", che rappresentava lo sviluppo di un'architettura essenziale e fluida basata sull'evoluzione del concetto di "scatola di

---

<sup>17</sup> Ivi, pag 33

vetro”, la quale descrive una struttura di base costituita da un telaio e coperta da facciate continue in vetro.

Un esempio di questo concetto è il Seagram Building a Park Avenue (Figura 16), costruito da Mies van der Rohe nel 1958. L’edificio di 39 piani è costituito da un telaio in acciaio, vetri color bronzo con struttura a montanti esterni a forma di I che si estendono da pavimento a pavimento.

Dagli anni 60 poi, spinti dall’avvento della crisi energetica, le scelte progettuali sono state sempre più dettate da una ricerca di riduzione di impatti ambientali e energetici. Questo porta quindi alla necessità di pensare alle prestazioni dell’involucro e al controllo della luce solare per ottimizzare l’efficienza energetica e ridurre il fabbisogno di luce artificiale.



*Figura 15:a- Progetto grattaciolo, Mies van der Rohe,1921, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019; b- Progetto grattaciolo, Mies van der Rohe,1922, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019*

*Figura 16:Dettaglio facciata Seagram Building, Mies van der Rohe, 1958, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019*





## 2.1.2 Stato dell'arte

La facciata continua viene definita come “una pelle continua a chiusura dello spazio costruito, generalmente costituita da membrature portanti orizzontali e verticali, connesse tra di loro e vincolate alla struttura portante dell'edificio, la quale svolge le normali funzioni di una parete esterna”. L'involucro vetrato rappresenta quindi un filtro con l'esterno e in quanto tale deve poter conciliare le esigenze interne di benessere con le sollecitazioni esterne. Proprio data la presenza di queste è necessario che la struttura sia capace di rispondere a requisiti di durabilità, di comfort termico e acustico, di resistenza al vento e accessibilità alle superfici esterne per periodiche operazioni di pulizia.

Le definizioni delle componenti di una facciata sono fornite da normativa europea, alcune delle quali mostrate in tabella.

<b>Pannello di tamponamento</b>	Materiale di riempimento traslucido o opaco, realizzato in pezzo unico o in più elementi
<b>Guarnizione interna della vetrata</b>	Strato rettilineo di materiale di tenuta resiliente preformato inserito tra la faccia esterna di una lastra di vetro, vetrata isolante o pannello di tamponamento e il telaio perimetrale, il listello fermavetro o il pressore
<b>Montante laterale</b>	Elemento strutturale verticale dell'intelaiatura posto lungo il bordo verticale della facciata continua
<b>Traverso inferiore</b>	Elemento orizzontale dell'intelaiatura posto alla base di una vetrata, di finestre, pannelli o porte.
<b>Giunto di dilatazione</b>	Giunto che compensa i movimenti termici o di altro tipo causati dalla facciata continua o dalla struttura di sostegno
<b>Listello pressore</b>	Profilo a pressione applicato lungo il perimetro di una lastra di vetro, vetrata isolante o pannello di tamponamento per vincolare e comprimere la guarnizione della vetrata.
<b>Staffa di fissaggio</b>	Assemblaggio di componenti strutturali progettate per trasmettere alla struttura dell'edificio tutte le azioni agenti sulla facciata continua, consentendo allo stesso tempo tutti i necessari movimenti

Tabella 1: Elementi di una facciata continua, tratta da capitolato UNCSAAL

Dal punto di vista strutturale, le facciate continue possono essere suddivise in quattro categorie, tra le quali:

1. Montanti e traversi
2. Cellule prefabbricate
3. Fissaggio puntuale
4. Doppia pelle

## 1. SISTEMA A MONTANTI E TRAVERSI

La facciata a montanti e traversi, o “stick system”, è il sistema più antico utilizzato ed è composto da elementi verticali e orizzontali di acciaio o alluminio. I montanti vengono fissati alla struttura portante dell’edificio tramite l’utilizzo di staffe, mentre i traversi sono agganciati ai montanti in modo da consentire il sostegno della facciata e la resistenza all’azione dei carichi agenti esterni. Questa struttura va a formare quindi un reticolo all’interno del quale vengono collocati i diversi tamponamenti, che possono essere trasparenti, definiti pannelli vision, o opachi, conosciuti anche come pannelli spandrel, i quali invece consentono di nascondere le parti meccaniche o strutturali dell’edificio. I pannelli possono essere fissati alla struttura in diversi modi, tramite incollaggio strutturale, oppure tramite un profilo detto pressore (pressure-plate) sul quale viene fissata una copertina a scatto per un miglioramento dell’aspetto estetico.

Tra i vantaggi di questi sistemi troviamo il fatto che sono standard e pronti all’uso, e per questo a prezzo ridotto. Gli aspetti negativi sono invece i lenti tempi di installazione, i potenziali problemi di qualità e di precisione che si possono verificare, dato che il montaggio avviene in modo completo in cantiere, e la limitazione dell’utilizzo a edifici di altezza medio-bassa a causa delle problematiche relative alle oscillazioni degli elementi. Questi sistemi infatti solitamente non vengono utilizzati nei grandi grattacieli, se non nella parte più bassa dell’edificio, dove è ancora possibile l’applicazione dei ponteggi.

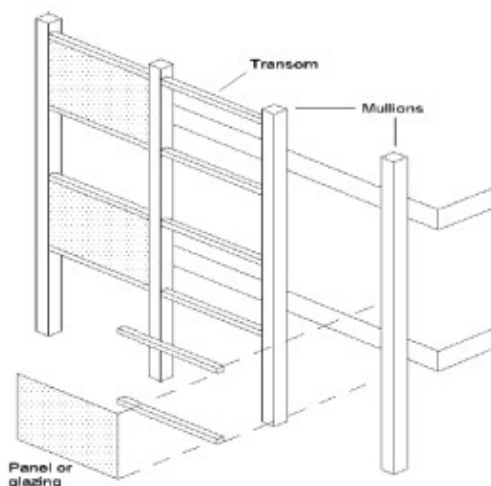


Figura 17: rappresentazione schematica sistema a montanti e traversi, tratto da Guida alla posa in opera delle Facciate Continue, UNCSAAL

## 101 FRANKLIN STREET

L'edificio rappresenta una riqualificazione di una vecchia struttura del 1948 collocata nel quartiere di TriBeCa, Lower Manhattan, a New York. La ristrutturazione integrale offre spazi per uffici mantenendo la vecchia struttura esistente e andando invece a sostituire la facciata con soluzioni più performanti e attuali.



Figura 18:Foto 101 Franklin Street

In quanto edificio di 16 piani può essere considerata ottimale l'applicazione di un sistema a montanti e traversi in quanto, data la contenuta altezza, riesce ad apprezzare i vantaggi di questa tecnologia.

L'involucro esterno è pensato per un miglioramento della qualità ambientale, per una maggiore connessione visiva con l'esterno e per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche.

La struttura è formata da un sistema customizzato, con vetri camera stratificati e la parte vetrata è incorniciata da colonne e travi di rivestimento di colore bianco.

31



Figura 18.2: Dettaglio ponteggi in fase di montaggio

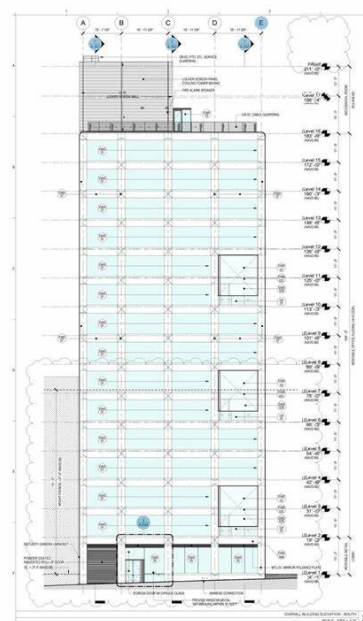


Figura 18.3: Progetto rifacimento facciata

## 2. SISTEMA A CELLULE PREFABBRICATE

La facciata a cellule, anche nota come unitised system o panel system, rappresenta il sistema più evoluto in quanto consente di essere utilizzato anche in edifici di elevate altezze, dove non è possibile la realizzazione di ponteggi.

Il sistema è composto da cellule prefabbricate, o unit, realizzate interamente in officina e composte dal profilo in acciaio o alluminio e il pannello di tamponamento. I singoli elementi poi una volta pronti vengono assemblati in cantiere tramite l'utilizzo di mezzi di sollevamento.

Il montaggio avviene grazie a delle staffe di fissaggio che consentono la massima precisione nella collocazione della facciata.

In base poi a come viene effettuato il fissaggio del vetro alla struttura si vanno a classificare le facciate a incollaggio strutturale o ritegno meccanico (bead profile). La prima tecnologia si basa sul fissaggio dei vetri al telaio tramite sigillante siliconico strutturale ad alta resistenza, esso consente la trasmissione dei carichi esterni, come il vento, al telaio di supporto. Questa soluzione consente di ridurre al minimo le fughe tra pannelli mantenendo all'esterno una facciata completamente trasparente che conferisce un'estetica elegante. La seconda tecnologia invece è costituita da un profilo in alluminio che consente di sostenere il vetro tramite fissaggio meccanico, permettendo una compressione del vetro su apposite guarnizioni nel telaio garantendo quindi, oltre all'appoggio stabile, anche una tenuta all'acqua.

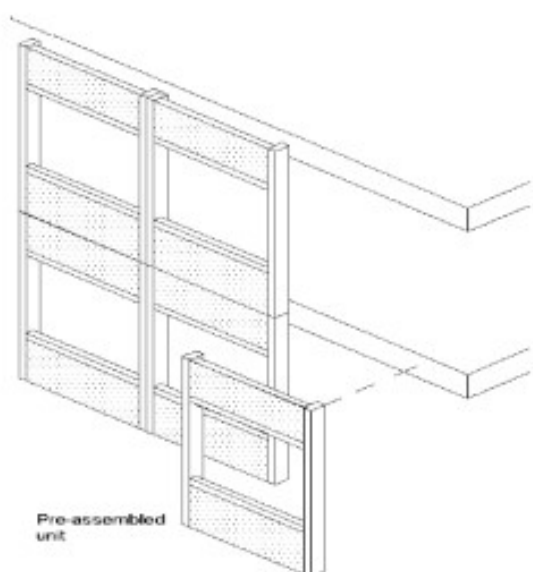


Figura 19: rappresentazione schematica sistema a cellule prefabbricate, Guida alla posa in opera delle Facciate Continue, UNCSAAL

Il sistema POLIEDRA SKY FAST qui riportato è progettato dalla METRA.

Il sistema a cellule, come si vede nelle figure riportate, differisce da quello a montanti e traversi, costituito da un unico montante, per la presenza di due montanti separati, fissati con apposite staffe alla struttura e uniti tramite guarnizioni che operano per un'ottimale tenuta all'aria e all'acqua.

In particolare poi i due sistemi di seguito mostrati rappresentano le due soluzioni di fissaggio possibili. La prima, riportata in Figura 21, mostra il caso di fissaggio con silicone strutturale, mentre la seconda, Figura 22, raffigura il caso di fissaggio con fermavetro.

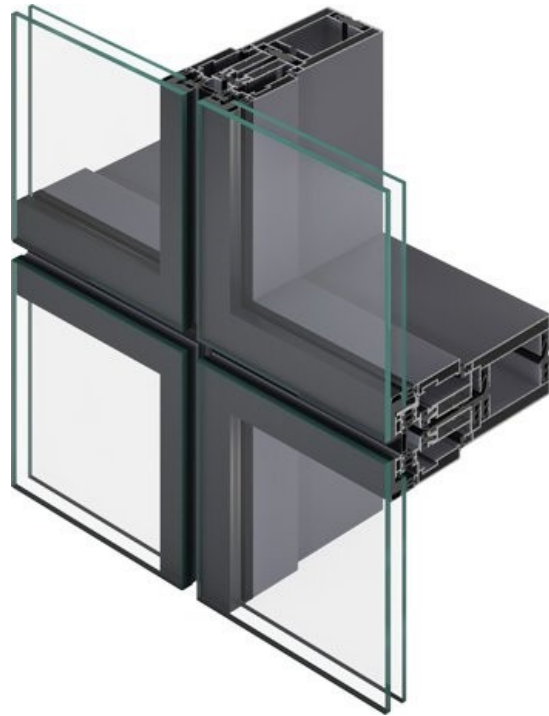


Figura 20: Rappresentazione sistema a cellula

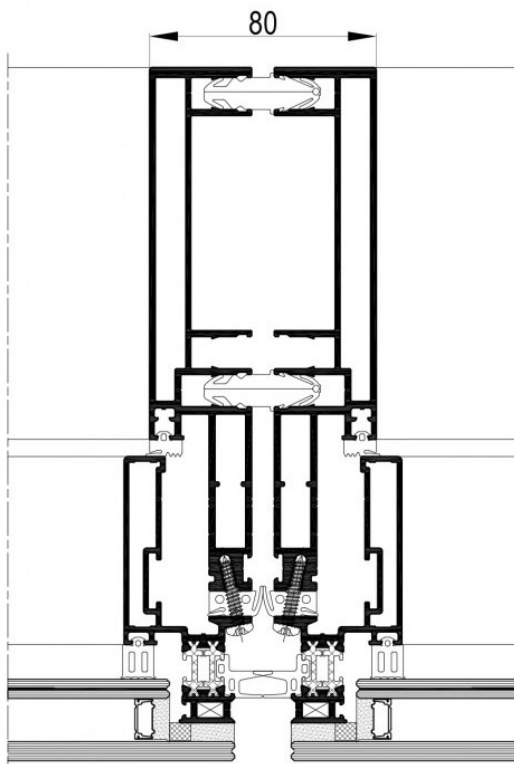


Figura 21: Sezione profilo con fissaggio strutturale

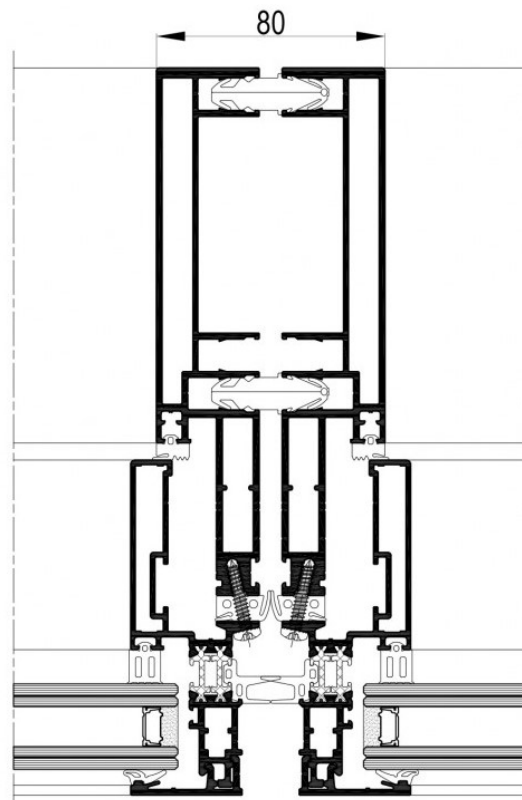


Figura 22: Sezione profilo con fermavetro

## DEANSGATE SQUARE

Le torri di Deansgate Square, costruite a Manchester nel 2021, sono un complesso residenziale composto da quattro torri, di cui la più alta conta 67 piani e 200 metri di altezza.

L'involucro vetrato è realizzato con la tecnologia a cellule prefabbricate vetrate a silicone strutturale e cellule con pannello spandrel, definiti nell'analisi del sistema monanti e traversi, per un totale di 17 mila elementi. Per minimizzare l'effetto delle radiazioni solari vengono utilizzati vetri camera basso emissivi (di dimensioni 1500 millimetri di larghezza e 2850 millimetri di altezza).

L'areazione interna delle stanze degli edifici è consentita dalla presenza di ante apribili internamente e protette da una balaustra forata, con un motivo studiato dall'architetto al fine di avere un gioco di ombre, composta da una lastra di alluminio di 4 millimetri di spessore.

Inoltre l'attenzione posta sulle colorazioni dei profili e delle balaustre, variabile su una scala di grigi, dona all'insieme di edifici un'estetica suggestiva.



Figura 23:Foto complesso residenziale

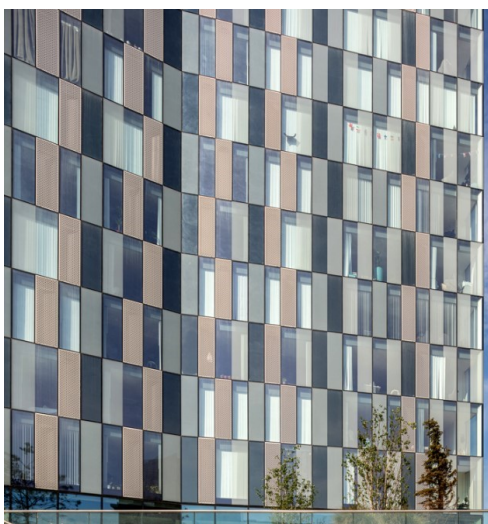


Figura 23.2: Dettaglio facciata

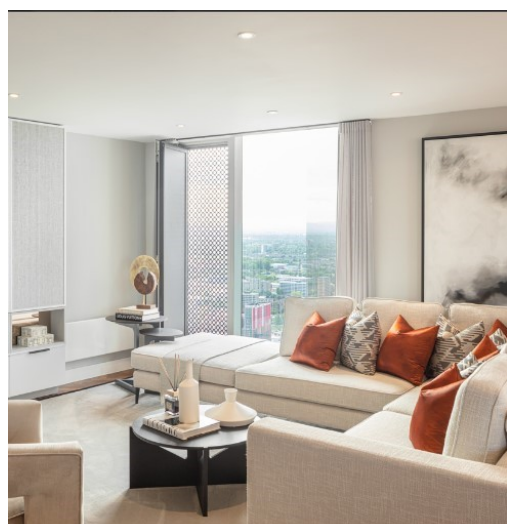


Figura 23.3: Dettaglio anta apribile interna

## SISTEMA A FISSAGGIO PUNTUALE

Il sistema a fissaggio puntuale differisce dai due casi precedenti in quanto vediamo l'assenza della struttura reticolare, infatti la facciata è costituita da pannelli vetrati fissati in modo puntuale alla struttura anche tramite l'utilizzo di cavi tensionati o tubolari in acciaio che sostituiscono il telaio di alluminio.

Il fissaggio avviene tramite l'utilizzo di perni e bulloni, normalmente chiamati "rotules", che consentono di creare una cerniera tra vetro e elemento metallico in modo da evitare una eccessiva rigidità che non consentirebbe al vetro di muoversi per le dilatazioni termiche. Le tensioni che si sviluppano nell'area dove vengono praticati i fori portano a prediligere tipologie di vetro temperato, il quale consente di ottenere una maggiore resistenza.

In alternativa, per evitare la foratura del vetro, è possibile utilizzare anche dei piatti o dischi che consentono di trattenere il pannello ai quattro angoli. Questo inoltre consente di evitare i costi di trattamento del vetro.

I bulloni poi sono ancorati alla struttura portante grazie a sistemi, noti come "ragni", ovvero staffe speciali a una o più vie, in base ai vetri che vanno ad essere collegati.

La tecnologia a fissaggio puntuale viene quindi utilizzata per massimizzare la continuità della facciata, garantendo un effetto "total glass".

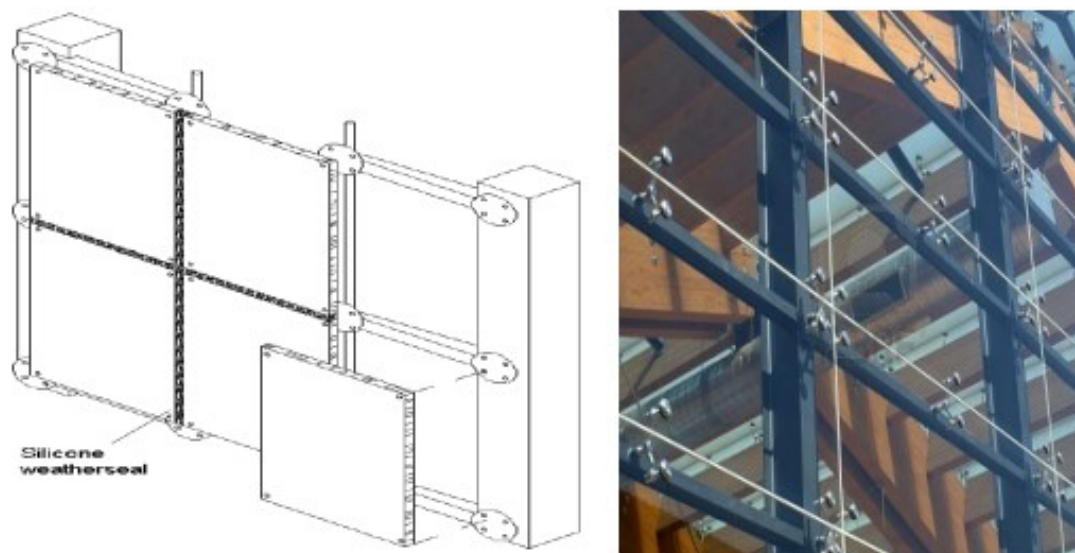


Figura 24: rappresentazione schematica sistema a fissaggio puntuale, Guida alla posa in opera delle Facciate Continue, UNCSAAL



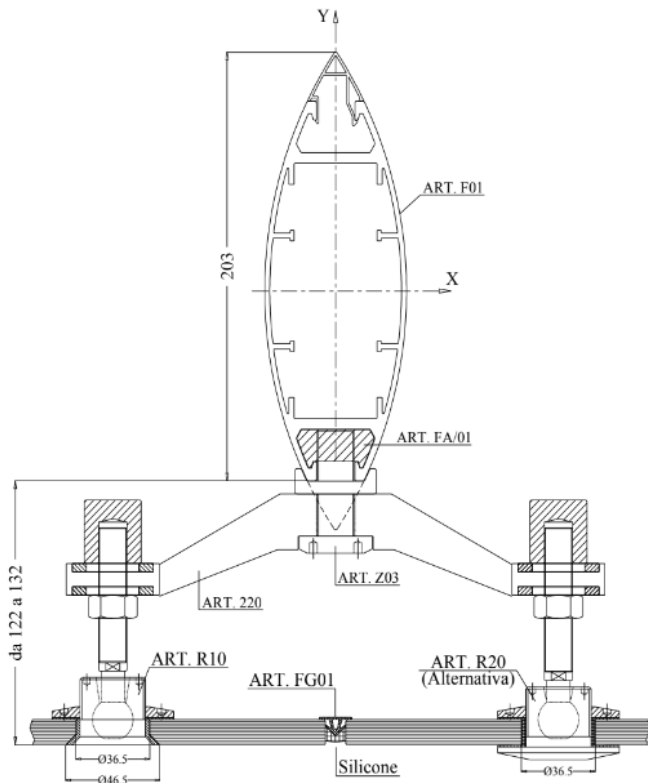


Figura 25: Sezione trasversale Air System

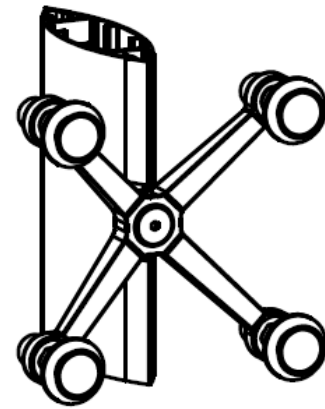


Figura 26: Rappresentazione ragno a quattro punti

Di seguito viene presentato il sistema Air System fornito da catalogo della Faraone. Si tratta di un sistema di fissaggio con ragno a quattro braccia che consente l'ancoraggio del vetro.

Alternativamente, sempre da catalogo della Faraone, è possibile esaminare un caso senza foratura del vetro, che non necessita di trattamenti termici. Viene quindi fruttato un sistema che consente di fermare il vetro per attrito, con sistema fissato nell'intercapedine.

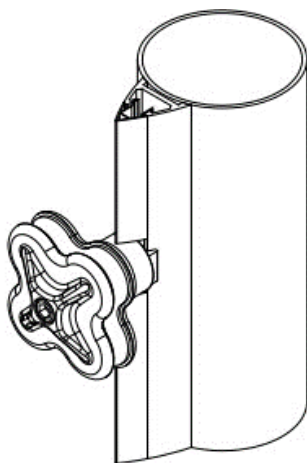


Figura 28: Rappresentazione sistema senza foratura

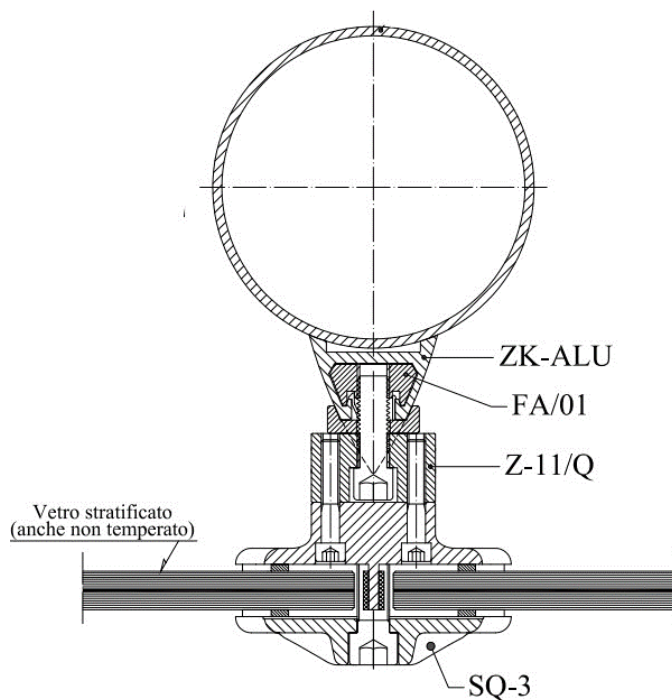


Figura 27: Sezione trasversale sistema senza foratura

Un importante aspetto da valutare nella progettazione di sistemi a facciate puntuali è la possibilità di utilizzo di sistemi vetrocamera, ovvero sistemi costituiti da un accoppiamento di due o tre vetri separati da un'intercapedine con funzione isolante. Ciò consente, anche in ottica di un risparmio energetico, un maggiore isolamento termico, minimizzando così le perdite energetiche.

Tali vantaggi portano a preferire queste tecnologie rispetto ai vetri monolitici, quindi a unico strato.

Nel caso di facciate a fissaggio puntuale però è importante fare una valutazione dal punto di vista applicativo, infatti la problematica legata all'utilizzo del vetrocamera è data dalla difficoltà, in particolare nel caso di necessità di foratura del vetro, di mantenere una tenuta del vetro stesso. Questo comporterebbe un ingresso di umidità nell'intercapedine andando a compromettere l'efficacia della tecnologia e la durata del vetro. Per questo solitamente viene fatta una scelta di vetro monolitico, il quale comunque per le problematiche sopra elencate deve essere temprato.

Nel caso di sistema senza foratura invece la soluzione da adottare è diversa, infatti dato l'utilizzo di dischi o piatti che fanno tenuta è possibile andare a utilizzare anche un tipo di vetro stratificato. Ne segue quindi che i vantaggi siano notevoli sotto diversi punti di vista, non è necessario trattare il vetro termicamente e si hanno guadagni in termini di isolamento.

## PIRELLI HEADQUARTERS

L'edificio, collocato a Milano nel cuore del quartiere Bicocca, rappresenta il nuovo quartiere del gruppo Pirelli e si sviluppa attorno a una vecchia torre di raffreddamento, la quale viene incapsulata da una grande vetrata progettata dall'architetto Vittorio Gregotti.

Il lato nord e sud, interamente vetrati, ospitano uffici, mentre il lato est è dedicato agli impianti. Il lato ovest invece è composto da una vetrata che rende visibile la torre dall'esterno e che affaccia sulla villa della



Figura 29: Vista facciata Pirelli Headquarters

Bicocca degli Arcimboldi, storica residenza Quattrocentesca che dà il nome al quartiere. Le facciate continue interne che affacciano sulla torre sono costituite da sistemi a montanti e traversi con un sistema di fissaggio senza profili di ritegno a vista.

La facciata ovest è la più prestigiosa dell'edificio ed è invece costruita con il metodo a fissaggio puntuale. Una trave reticolare in acciaio ad unica campata di 40 metri sostiene tutto il sistema, ad essa infatti vengono appese mediante tubi le undici travi reticolari orizzontali che costituiscono la struttura.

Viene adottato un vetro di una tipologia indurita in quanto ad esso vengono applicati i fori per la fissaggio alla struttura mediante sei apposite rotules in acciaio inox. Per garantire la massima trasparenza viene adottato un vetro a basso contenuto di ossido di ferro.



Figura 29.2: Dettaglio facciata a fissaggio puntuale



Figura 29.3: Dettaglio interno facciata a fissaggio puntuale

## SISTEMA A DOPPIA PELLE

Dato l'interesse di miglioramento di efficienza energetica, da parte dell'utente per un maggior comfort con minor dispendio economico, vengono introdotti sistemi di facciata a doppia pelle, definite come "un sistema ibrido costituito da una pelle vetrata esterna e dalla facciata dell'edificio vero e proprio, che costituisce la pelle interna. I due strati sono separati da una cavità d'aria che ha ingressi e uscite fissi o controllabili e può incorporare o meno dispositivi di ombreggiamento fissi o controllabili"<sup>18</sup>. Questi sistemi consentono significative riduzioni della domanda energetica di un edificio.

Nelle zone fredde l'aria contenuta all'interno dell'intercapedine per effetto serra va a chiudere le bocchette di aerazione minimizzando la perdita di calore. È comunque necessario mantenere anche durante il periodo invernale un minimo di ricambio d'aria per evitare problematiche legate alla formazione di condensa.

Nelle zone calde invece l'aria riscaldata dalla radiazione solare per differenza di densità viene eliminata dalla parte superiore della cavità. Questo sistema consente di sfruttare il moto convettivo dell'aria all'interno per effetto camino.

La larghezza dell'intercapedine inoltre può influire sulla ventilazione in quanto diminuendola si potrebbe rischiare di avere temperature eccessive della facciata, si può infatti affermare che ad un aumento delle dimensioni della cavità si ha una diminuzione della temperatura. Il limite numerico di riferimento è 40 centimetri, fissato anche per consentire l'accesso per scopi di manutenzione (Figura 30).

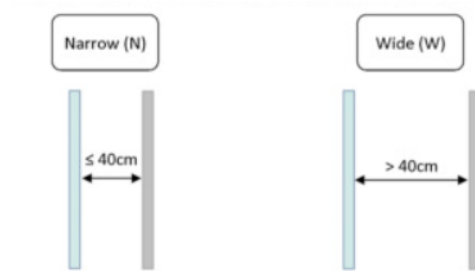


Figura 30: Rappresentazione larghezza cavità

Le facciate a doppia pelle possono inoltre essere classificate secondo due sistemi:

- Il tipo di movimento dell'aria nell'intercapedine
- La configurazione spaziale
- Il tipo di ventilazione

---

<sup>18</sup> Energy performance of DSF in temperate climates: a systematic review and meta-analysis, Francesco Pomponi, Poorang A.E. Piroozfar, Ryan Southall, Philip Ashton, Eric. R.P. Farr

Per quanto riguarda il primo caso possiamo analizzare quattro modalità, rappresentate in Figura 31.

Per *Air Buffer* si intende un sistema in cui la radiazione solare, passante attraverso il vetro, viene convertita in calore, il quale, intrappolato nella cavità, riscalda l'aria creando un moto convettivo. Nel caso di buona qualità dell'aria è possibile avere un accesso agli spazi interni come si può vedere nel caso di *Internal Air Curtain*.

Il caso invece *Exhaust Air* consente l'estrazione del calore dagli spazi occupati attraverso l'effetto camino. Nel caso di assenza di ventilazione sulla cavità di questi ultimi è possibile l'applicazione di un sistema *External Air Curtain*, grazie al quale è possibile avere una ventilazione naturale per il raffreddamento della cortina interna.

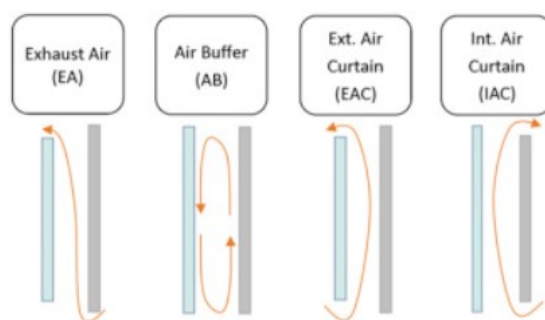


Figura 31: Movimento dell'aria all'interno dell'intercapedine

La configurazione spaziale invece viene definita in base all'altezza della cavità, come mostrato in Figura 32. Si vanno quindi a individuare altre quattro tipologie ovvero *Box Window*, *Corridor*, *Shaft Box* e *Multi-Storey*.

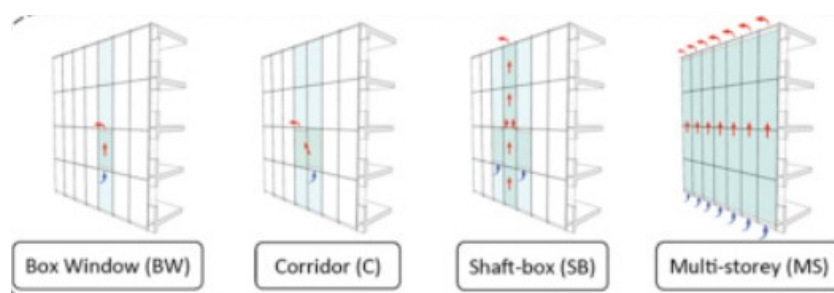


Figura 32: Rappresentazione configurazione spaziale

La ventilazione può avvenire in modo naturale o meccanico, come riportato in Figura 33. Il primo caso è dovuto a due diversi fattori, ovvero le differenze di pressione dovute all'azione del vento e il moto che si instaura per la risalita dell'aria calda. Nel secondo

caso invece devono essere predisposti dei ventilatori all'interno dell'intercapedine, in modo da generare in modo meccanico gli stessi flussi d'aria.

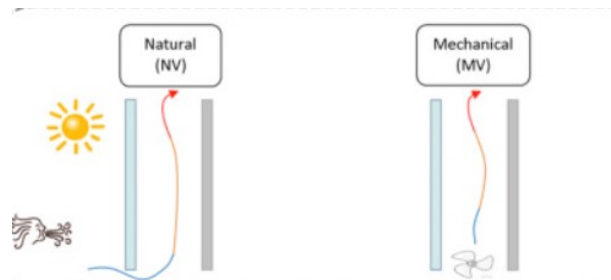


Figura 33: Rappresentazione dei metodi di ventilazione

Dal punto di vista costruttivo si può affermare che le facciate a doppia pelle possono essere utilizzati in tutti i casi di sistemi introdotti in precedenza, quindi montanti e traversi, cellule e fissaggio puntuale, però con diverse differenze di costi, tempi di posa. L'obiettivo comune dei costruttori è quello di progettare facciate con elevata velocità di posa e bassi costi, quindi facendo un'analisi dei sistemi si può giungere al miglior sistema adatto a facciate a doppia pelle. Il sistema a montanti e traversi nel caso di doppia pelle prevede oneri elevati per questioni di gestione di molte componenti in cantiere, così come già si poteva osservare nel sistema a singola pelle, dove si vede la necessità dell'utilizzo di ponteggi e lunghi tempi di posa. Proprio per questi motivi è sconsigliabile l'applicazione di questi sistemi.

I sistemi invece a cellule e a fissaggio puntuale sono preferibili nel caso di doppia pelle, visti i motivi prima esposti. I manufatti vengono infatti assemblati in officina e garantiscono una maggiore facilità di posa e un maggiore qualità.

## THE SHARD

La *London Bridge Tower* di Renzo Piano Building Workshop, o anche più comunemente chiamata *The Shard*, con i suoi 310 metri è l'edificio più alto in tutta Europa. Collocato a Londra e completato nel 2012 l'edificio è adibito a diversi utilizzi, comprende uffici ai piani inferiori, un hotel e alloggi privati.

La particolare geometria della struttura multifaccettata e affusolata è data dalla presenza di otto schegge, da cui deriva il nome, ovvero superfici con diverse inclinazioni che convergono verso l'alto.

La progettazione dell'involucro, a causa di questa particolare peculiarità e delle esigenze di efficienza energetica, risulta quindi molto complessa. La scelta è ricaduta su un sistema

altamente tecnologico a doppia pelle ventilata naturalmente tramite la presenza di "fratture" tra le schegge, nella quale vengono inserite delle sequenze di frangisole con orientamento automatizzato in base alla quantità di luce ricevuta. L'esigenza di trasparenza ha portato alla necessità di sfruttare un sistema passivo, preferendolo ad uno attivo con ventilazione meccanica, in quanto la presenza di condotte non avrebbe consentito di rispondere alla richiesta.



Figura 34: *The Shard* vista completa



Figura 34.2: *The Shard*, vista facciata

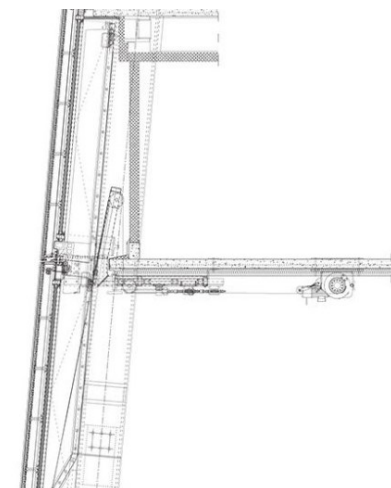


Figura 34.3: *The Shard*, dettaglio doppia pelle

## 2.2 SCHERMATURE SOLARI

### 2.2.1 Cenni storici

Le origini dei sistemi di schermatura solare risalgono ai tempi dell'antichità, quando si inizia a porre l'attenzione verso una progettazione bioclimatica e verso la creazione di ambienti protetti dalla radiazione diretta.

I primi tentativi di questi approcci si possono evidenziare nella costruzione di portici e colonnati con lo scopo di ombreggiare le strutture, ad essi erano associate coperture di colore bianco per una minimizzazione dell'assorbimento della radiazione solare.

Uno dei primi sistemi utilizzati propriamente per la funzione di protezione è composto da delle strisce di tessuto sostenuti da elementi in legno, chiamati "velaria", che venivano utilizzati nei teatri. Questo sistema, seppur antico, viene sfruttato attualmente anche nelle città spagnole come tende urbane.

Anche le tende alla veneziana sono un'ulteriore soluzione di oscuramento che consente grazie alla struttura a lamelle strette, 4-5 centimetri, con rotazione variabile, di proteggere gli spazi interni dalla luce solare.

Il diaframma grigliato (Figura 35), facciata traforata realizzata in pietre e mattoni, è ottimale anche in termini di ventilazione e viene impiegato anche più di recente da Renzo Piano come rivestimento nella sede Ircam di Parigi.

Di influenza araba sono invece le *mashrabiyya*, considerate l'archetipo dei moderni *brise-soleil*, le quali sono delle schermature lignee applicate alle finestre con diversi schemi (Figura 36), che, in base alla densità dei pezzi di legno, possono determinare diversi gradi di trasparenza.

Figura 35: Esempio diaframma grigliato, tratto da Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche

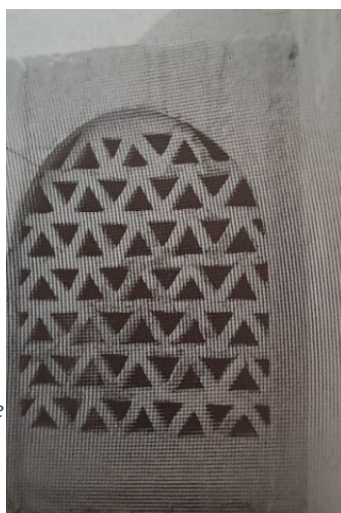


Figura 36: Esempio mashrabiyya, tratto da Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche



Dallo sviluppo però delle facciate continue risulta necessario trovare soluzioni applicabili ad ampia scala e integrabili facilmente con i tamponamenti vetrati.

I primi esempi risalgono a Le Corbusier il quale, nel 1929, viene coinvolto nella progettazione di una villa di un industriale tunisino, Lucien Baizeau. Il progetto prevedeva due versioni della villa, di cui solo la seconda era caratterizzata dalla presenza di grandi vetrate che fecero suscitare all'architetto i primi ragionamenti sulle problematiche riguardanti le radiazioni solari. La villa era caratterizzata dalla presenza di vetrate a doppia altezza e di un sistema di terrazze con funzionalità aggiuntiva di protezione solare. L'idea del *parasol*, ovvero "copertura piana che proietta ombre sulle camere"<sup>19</sup> tornerà in altri due edifici costruiti dallo stesso Le Corbusier in due versioni diverse in calcestruzzo, nella *Maison Curutchet* a Buenos Aires (1949-1955), e in metallo, nella *Maison de l'Homme* a Zurigo (1963).

I primi esempi di frangisole così come li intendiamo oggi vengono progettati per l'edificio del Ministero dell'Educazione e della Sanità a Rio de Janeiro, progettato da Oscar Niemeyer e Le Corbusier. Nella facciata a nord dell'edificio, come viene mostrato in Figura 37, troviamo dei frangisole che "formano una sovrastruttura continua su tutta la facciata esposta a nord e sono costituiti da una cornice permanente fissa a forma di alveolare e da imposte regolabili, la cui inclinazione può essere variata a piacere da leve poste all'interno degli uffici"<sup>20</sup>. Questo sistema si compone da lamelle disposte orizzontalmente in cemento regolabili che consente la mitigazione degli effetti delle radiazioni solari.



Figura 37:Foto Ministero dell'Educazione e della Sanità, 1939, Le Corbusier e Niemeyer, tratto da *Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche*

<sup>19</sup> *Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche*, Maggioli Editore, 2012, pag 42

<sup>20</sup> *Ibidem*

Un altro di esempio di applicazione del *brise-soleil* si osserva nell'*Unité d'Habitation* di Margiglia costruito nel 1946, il quale disponeva, nelle facciate a est e ovest, di sistema a parapetto in calcestruzzo forato. Tale tecnica riprese i diaframmi grigliati introdotti in precedenza.

A seguito di un viaggio in India nel 1951, Le Corbusier viene coinvolto nel progetto di un edificio ad Ahmedabad per l'associazione dei filatori. Nella facciata a ovest, come è rappresentato in Figura 38, gli elementi sono inclinati di 45°, mentre sono perpendicolari in quella est e assenti nelle restanti due. Queste schermature vengono costruite in calcestruzzo tramite l'utilizzo di casseforme in legno e sono arricchiti a livello estetico con la collocazione di grandi fioriere.

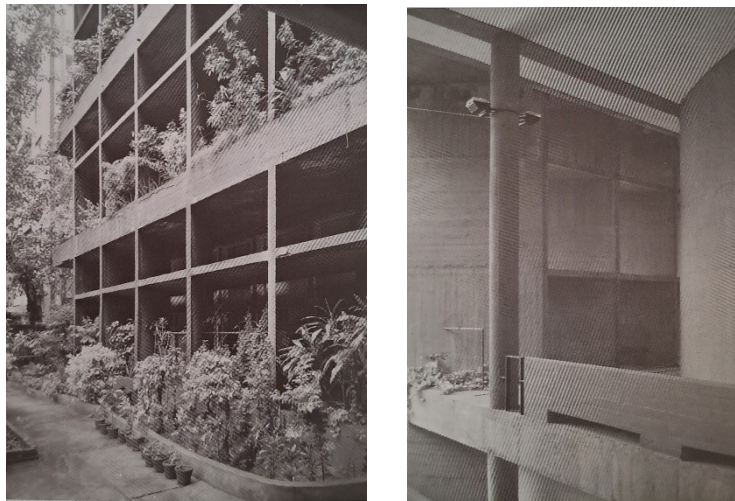


Figura 38:a- Palazzo dei filatori vista esterna, tratto da *Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche*; b-Palazzo dei filatori vista interna, tratto da *Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche*

Villa Shodhan, costruita sempre ad Ahmedabad, unisce alcuni aspetti di due edifici precedentemente analizzati, ovvero la facciata a doppia altezza riporta alle ideologie presentate in Villa Baizeau e il sistema di schermatura a griglia in calcestruzzo è analogo all'edificio per l'associazione dei filatori.

La spinta di Le Corbusier verso la ricerca di una soluzione ai problemi presentati porta allo sviluppo di sistemi *brise-soleil* in tutto il mondo. Parallelamente al lavoro di Le Corbusier ci furono infatti altre esperienze da parte di numerosi altri architetti.

Uno di questi, Jean Prouvè, progettò un edificio per abitazioni in *square Mozart* a Parigi nel 1954 in cui la facciata, composta da pannelli in alluminio, è articolata nella parte più esterna da un elemento di oscuramento e da *brise-soleil*. È proprio lo stesso architetto ad essere il precursore dell'architettura high tech, sviluppatasi in modo concreto a partire

dagli anni 70, la quale va a rivoluzionare la progettazione degli spazi, portando tutti gli elementi impiantistici e strutturali a vista sulle facciate, con una conseguente liberazione completa della pianta. Questo movimento consente un ingresso definitivo degli elementi frangisole nell'architettura moderna.

Un altro architetto italiano promotore del movimento high-tech è Renzo Piano il quale ha grande rilievo nel campo di applicazione di elementi schermanti. Nel Times Building (Figura 39), edificio di 52 piani collocato a New York, l'architetto progetta un sistema a doppia pelle, con una interna vetrata e una esterna collocate a 60 centimetri di distanza, costituita da 250 mila elementi in ceramica porcellanata estrusa schermanti. Questi sono di sezione tubolare di circa 4 centimetri e vengono fissati a una struttura di montanti.



Figura 39: a- Times Building, New York, tratte da [www.fondazionerenzopiano.org](http://www.fondazionerenzopiano.org); b-Times building, New York, vista dall'interno, tratta da [www.fondazionerenzopiano.org](http://www.fondazionerenzopiano.org)

L'attenzione verso il tema della luce viene posta anche da altri architetti come Frank Lloyd Wright e Louis Kahn i quali cercano nei loro progetti un ottimale bilanciamento tra la protezione dall'irraggiamento e un passaggio di luce che risponde alle esigenze dell'utente.

A pari passo con lo sviluppo delle facciate continue nascono quindi sempre più sistemi innovativi di schermatura che sono in grado di mutare la conformazione in modo automatico in base alle condizioni esterne.

In tale contesto si può collocare l'edificio che ospita l'Istituto del Mondo Arabo a Parigi, progettato nel 1987 da Jean Nouvel, riportato in Figura 40. La facciata a sud è composta da 240 moduli vetrati con all'interno dischi di metallo di svariate forme e grandezze che ricorda le rappresentazioni delle *mashrabiyya*. Il sistema è controllato dalla presenza di cellule foto-sensibili che consentono un rilevamento delle condizioni interne e una conseguente modifica delle forme. Questo consente per la prima volta di rendere la facciata un elemento dinamico e in continuo movimento.

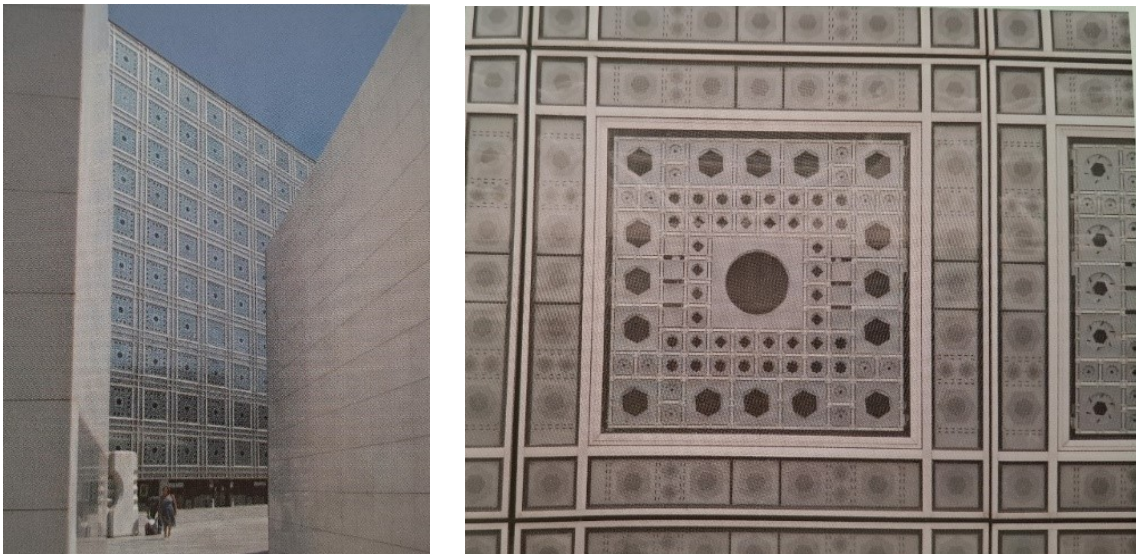


Figura 40:a- Istituto Mondo Arabo, Parigi, tratto da *Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche*; b- Istituto Mondo Arabo, Parigi, particolare modulo vetrato, tratto da *Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche*

## 2.2.2 Stato dell'arte

Si è visto nel paragrafo precedente come nel tempo si sono evoluti i sistemi di schermatura, tali sistemi però hanno alcune limitazioni causate dall'impossibilità di rispondere alle variazioni ambientali interne o esterne. Per questo motivo ad oggi gli studi si concentrano sull'evoluzione delle facciate adattive che sono state definite come “un disegno evolutivo morfogenetico con adattamento in tempo reale con condizioni al contorno, o una facciata che può cambiare le sue proprietà passivamente o attivamente nel tempo per ridurre il consumo energetico dell'edificio”<sup>21</sup>.

La spinta verso per la ricerca di nuovi sistemi adattivi, volta al miglioramento delle prestazioni energetiche, viene fornita dall'azione europea COST Action TU1403 “Adaptive Facade Network”, la quale cerca di unificare le conoscenze relative alle facciate adattive. Una classificazione delle facciate adattive definisce tre fasi che vengono rappresentate in Figura 41.

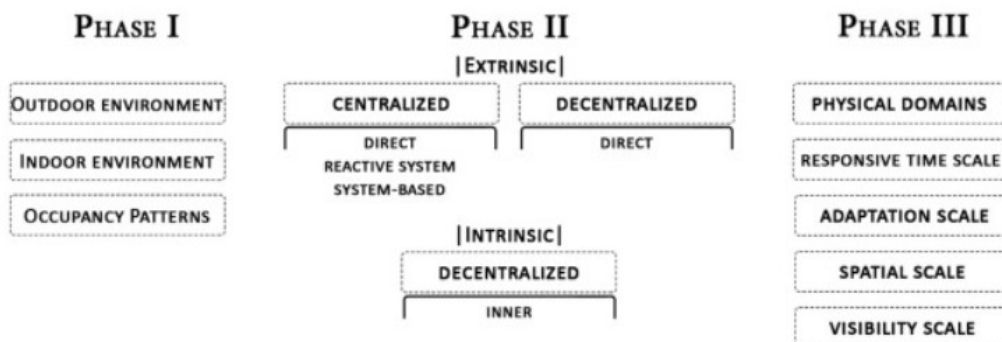


Figura 41: Rappresentazione schematica classificazione facciate adattive, tratto da *Design approaches and typologies of adaptive facades: A review*

La prima fase riguarda la valutazione dell'ambiente interno e esterno e degli occupanti per considerare tutte le possibili variabili che possono influire sul comfort e sulle prestazioni.

La fase due invece consente l'elaborazione dei dati tramite due tipi di strategie di controllo: estrinseco, il quale riceve feedback e si attiva tramite l'utilizzo di sensori, processori e attuatori i quali possono essere centralizzati o locali; intrinseco, il quale invece sfrutta le proprietà di “materiali intelligenti” che consentono una autoregolazione

<sup>21</sup> Design approaches and typologies of adaptive façade: A review, Amir Tabadkani, Automation in construction, 2021

in base agli stimoli ambientali. Quest'ultimo sistema è ottimale in quanto permette il massimo risparmio di energia e minimi costi operativi.

L'ultima fase invece valuta la reazione della facciata agli stimoli tenendo conto di diversi parametri. Primo aspetto di fondamentale importanza per la progettazione di una pelle che garantisca soddisfacimento delle esigenze è l'analisi del dominio fisico. Le prestazioni di quest'ultimo sono influenzate dall'involucro adattivo perchè, in quanto elemento che mette in comunicazione ambiente interno e esterno, ha la capacità di influenzare le proprietà termiche, la qualità della luce diurna, la qualità dell'aria e l'energia. Tali domini sono complessi da analizzare in quanto le diverse caratteristiche si influenzano tra di loro. Ad esempio per il raggiungimento del benessere degli occupanti le facciate devono "controllare la penetrazione della luce solare per fornire luce diurna all'interno, evitando aree di buio e abbagliamento, e il guadagno solare per regolare comfort termico e ridurre al minimo il costo dell'energia"<sup>22</sup>.

Un aspetto invece che influisce in modo diretto sul comfort è la scala temporale di risposta della facciata agli stimoli, la quale può essere valutata secondo diversi intervalli, a partire da secondi fino ad arrivare a fluttuazioni temporali più ampie, giornaliere o stagionali.

In base al tipo di movimento si possono poi distinguere diverse scale di adattamento a livello macro o a livello micro. Nel primo caso si hanno movimenti osservabili degli elementi che hanno la possibilità di piegarsi, gonfiarsi o allungarsi. A livello micro si vedono variazioni a livello molecolare e cambiamenti delle proprietà termofisiche, in particolare quelle ottiche che consentono di modificare le trasmissioni della luce dei materiali.

Tali sistemi sono anche legati alla scala spaziale considerando che il cinematismo può comprendere il singolo elemento integrato, l'intera facciata o anche l'edificio nel suo complesso.

L'ultimo parametro, la scala di visibilità, considera invece l'impatto estetico della facciata a livello globale.

L'articolo *Design approaches and typologies of adaptive facades* definisce diverse tipologie di facciate adattive. Queste tuttavia, nonostante abbiano delle caratteristiche

---

<sup>22</sup> Adaptive Facades: Review of Designs, Performance Evaluation, and Control Systems, Xi Zhang, Hao Zahang, Yuyan Wang, Xuepeng Shi, 2022

che le contraddistinguono, molto spesso non sono ben distinte negli edifici in quanto le diverse tipologie possono essere integrate nella fase di progettazione.

Attualmente si possono dividere come segue:

1. Attive
2. Passive
3. Cinetiche
4. Intelligenti
5. Mobili
6. Biomimetiche

## 1. Facciate attive

Questo tipo di facciata consente all'involucro di autoregolarsi tramite l'analisi di parametri forniti dall'esterno o dall'interno al fine di ottenere un miglioramento del risparmio energetico. Questo avviene sfruttando tecnologie senza elettronica sofisticata, quindi non necessitano di sistemi da programmare, e senza interazioni con l'utente.

Un esempio è la facciata del museo dei bambini di Pittsburgh, riportata in Figura 42, costituito da elementi in alluminio che, vibrati dal vento, modificano la luce degli spazi interni.

Altro esempio può essere la facciata dell'edificio ICT-Media a Barcellona, Figura 43, che filtra i raggi e il calore attraverso il gonfiaggio o lo sgonfiaggio di cuscini d'aria in etilene tetrafluoroetilene (EFTE). In questo modo quindi in base alla temperatura questi dispositivi variano il loro volume contribuendo così a una regolazione termica che garantisce un risparmio energetico.



Figura 43: Immagine facciata museo dei bambini, Pittsburgh, 2004, tratto da *Design approaches and typologies of adaptive facades: A review*



Figura 42: Immagine facciata ICT-Media, Barcellona, 2007, tratto da *Design approaches and typologies of adaptive facades: A review*



## 2. Facciate passive

Questo tipo di facciata sfrutta invece meccanismi passivi per un miglioramento del comfort interno, la progettazione non coinvolge quindi particolari “componenti intelligenti”, ma semplici sistemi come per esempio le facciate a doppia pelle.

La presenza dell’intercapedine infatti consente di regolare in modo naturale, tramite gli effetti spiegati nella prima parte del capitolo, il flusso d’aria, evitando eccessivo calore.

La parete inoltre può anche presentare delle lamelle frangisole per un corretto ombreggiamento della struttura.

Un esempio di questo sistema è la Moravian Library a Brno, Repubblica Ceca, rappresentata in Figura 44, che ha una doppia pelle composta da elementi di acciaio zincato. È possibile anche la trasformazione ad un sistema a singola pelle, per la stagione di raffreddamento, aprendo le feritoie.

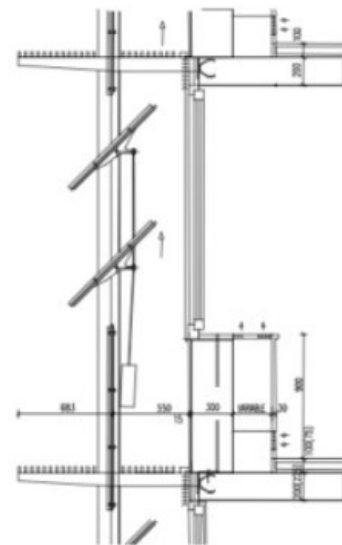


Figura 44:a- The Moravian Library vista facciata, Brno, 2001, tratto da *Design approaches and typologies of adaptive facades: A review*; b- Dettaglio facciata doppia pelle, tratto da *Design approaches and typologies of adaptive facades: A review*

### 3. Facciate cinetiche

Questo tipo di facciata invece richiede meccanismi più complessi in cui sono necessarie forze di azionamento per generare il movimento, consentendo una vasta gamma di movimenti possibili, come scorrimento, espansione, piegatura o trasformazione. Il termine cinetico ci porta a pensare alla risposta di un organismo a variazioni energia sotto forma di luce e calore. I sistemi cinetici però focalizzano maggiormente l'attenzione su un controllo esterno dell'ambiente, per questo per il rispetto del comfort dell'utente viene introdotto un potenziamento che consente di avere un controllo aggiuntivo da parte dell'utente.

L'evoluzione di questi sistemi infatti è rappresentata dall'introduzione di sensori e attuatori che ci portano a considerare tali facciate come "reattive". L'utilizzo di questi associati a dei dispositivi di controllo consentono di modificare la configurazione della facciata in modo programmato.

Un esempio di questi è Kiefer Technic Showroom, Figura 45, il quale ha un sistema di pannelli in alluminio perforati il cui movimento è governato da sensori di luce. La caratteristica che consente di definire i sistemi come reattivi è proprio la possibilità di consentire all'utente di interrompere il controllo automatico in caso di necessità particolari.



*Figura 45:a- Facciata Kiefer Technic Showroom, Austria, 2007, tratto da Design approaches and typologies of adaptive facades: A review; b- Kiefer Technic Showroom dettaglio pannelli, 2007, tratto da Design approaches and typologies of adaptive facades: A review*

#### 4. Facciate intelligenti

Questo tipo di facciata consente invece un adattamento autonomo istintivo degli elementi per garantire con la massima efficienza le condizioni di comfort interno dell'utente, tale processo può avvenire tramite l'utilizzo di materiali intelligenti che non richiedono nessun tipo di alimentazione. Ad esempio nel Bloom Project, Figura 46, viene creato un sistema di ventilazione e schermatura che sfrutta le caratteristiche di materiali termo-bimetallici, come leghe a memoria di forma, il cui movimento di espansione o regolazione è determinato dalle differenze di temperatura esterna.



Figura 46:a- Foto facciata The Bloom, Los Angeles, 2012, tratto da *Design approaches and typologies of adaptive facades: A review*; b- Dettaglio elementi di schermatura, tratto da *Design approaches and typologies of adaptive facades: A review*

#### 5. Facciate mobili

Queste sono facciate altamente tecnologiche che variano la loro conformazione in tempi molto brevi in risposta alle condizioni esterne e tramite sistemi di tracciamento della posizione solare. La caratteristica fondamentale è che consentono anche la produzione di energia rinnovabile grazie all'installazione di pannelli fotovoltaici in facciata. Questo tema verrà poi approfondito nel capitolo finale della tesi.

## 6. Facciate biomimetiche

Il termine biomimetica deriva dalle parole greche “bios”, che significa vita, e “mimesis”, imitare, e viene definita come “imitazione delle basi funzionali di forme, processi e sistemi biologici per produrre soluzioni sostenibili”<sup>23</sup>. Questa disciplina viene sfruttata in campo architettonico e applicata per la ricerca dello sviluppo di nuovi tipi di involucri edilizi adattivi che consentono quindi di poter modificare le condizioni interne adatte ad ogni esigenza.

La ricerca di questi sistemi si basa sullo studio della natura e in particolare sull’aspetto dell’adattamento agli stimoli esterni che è differenziato in tre categorie: fisiologico, quindi legato alla ricerca di un equilibrio a seguito di una modifica dell’ambiente esterno; morfologico, in cui si verificano delle modifiche strutturali di dimensioni o forma; comportamentale che riguarda invece l’insieme di azioni intraprese dall’organismo.

L’approccio alla biomimetica può essere basato sui problemi, top-down, oppure sulla soluzione, bottom-up. Nel primo caso si parte dal problema ingegneristico per poi giungere ad una soluzione senza ricorrere allo studio degli aspetti biologici. Nel secondo caso si analizza un particolare comportamento biologico e si cerca di trasformare questo in soluzioni costruttive. Questo metodo è il più utilizzato in quanto consente, concentrandosi sullo studio della biologia, di poter giungere a nuove soluzioni al di fuori da un campo di ricerca predefinito.

Lo studio di questi approcci può essere effettuato a livelli di imitazione diversi che possono riguardare un organismo, un comportamento oppure l’ecosistema nel suo complesso, inteso per esempio come comfort interno. È proprio questo ultimo aspetto che combinatosi con i primi due può portare a soluzioni sostenibili della facciata adattiva. A questo punto diventa importante la scelta dei materiali, i quali consentono di andare a fare un’ulteriore classificazione tra sistemi statici, che si basano sulla capacità del materiale di modificare grazie alla struttura interna l’assorbimento o riflessione, e dinamici che invece sono caratterizzati da movimenti fisici degli elementi, sempre ispirandosi a organismi biologici.

---

<sup>23</sup> How plants inspire facades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes, Marlen Lopez, Ramon Rubio, Santiago Martin, Ben Croxford, 2017

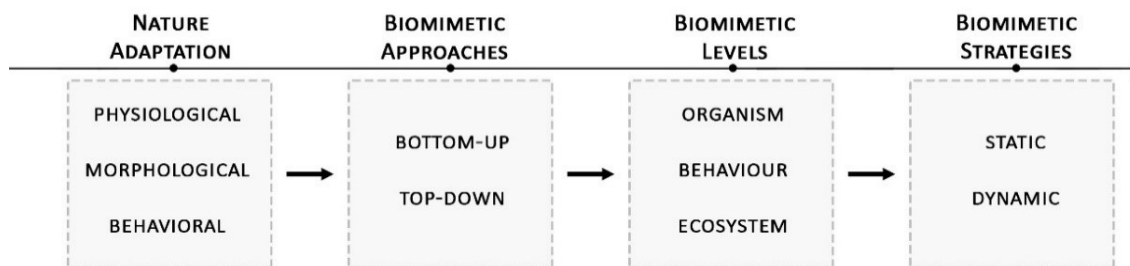


Figura 47: Schematizzazione studio biomimesi

La ricerca attualmente si concentra sullo studio di materiali avanzati e sostenibili che siano capaci di imitare i comportamenti naturali senza averne diretta percezione, in quanto si ha una riduzione della scala nei meccanismi di adattamento.

È in questo contesto che si inseriscono le facciate tessili che sfruttano materiali leggeri, flessibili e adattivi che consentono di garantire controllo della luce solare, donando leggerezza e estetica alla membrana.

Le membrane tessili possono essere applicate come seconda pelle abbinata al sistema di facciata principale assicurando tutti i vantaggi di tali tecnologie e una maggiore facilità di applicazione anche a edifici esistenti, quindi per interventi di riqualificazione e rifacimento delle facciate.

Per quanto riguarda la regolazione termica assumono una rilevante importanza due materiali, PVC e EFTE.

I materiali utilizzati sono tessuti PVC che garantiscono l'effetto di schermatura solare mantenendo però un'adeguata luminosità degli ambienti. I tessuti inoltre consentono una corretta micro-aerazione grazie alla presenza di fori e una regolazione del calore tramite l'assorbimento e la riflessione fino al 97% della radiazione solare.

L'altro materiale da citare, come anticipato, è l'EFTE il quale ha notevoli vantaggi data la leggerezza, la trasparenza e la trasmissione del 95% delle radiazioni e dell'intera gamma dei raggi UV.

Tale materiale viene utilizzato nel progetto della Sustainably Minded Interactive Technology il quale prende ispirazione dall'edera per la creazione di foglie artificiali che assorbono la radiazione solare e la convertono in energia. Gli elementi sono piccoli pannelli fotovoltaici in film sottile composti da un supporto in polietilene, uno strato di inchiostro conduttore e uno di EFTE. L'installazione di dispositivi piezoelettrici consente

inoltre la conversione dell'energia meccanica del vento che soffia sulle foglie in energia elettrica.

Questi materiali inoltre possono essere accoppiati con materiali isolanti che vanno ad aumentare le proprietà termiche. Lo studio nasce da un'analogia con la natura, infatti il meccanismo di immagazzinamento dell'energia che si verifica grazie alla presenza delle due tipologie di strati di pelo dell'orso, viene riflesso nel funzionamento in un isolante della famiglia dei TIM, Thermal Insulation Materials.

Si forma quindi un sistema complesso a doppia pelle in cui il vetro funge da captatore, lo strato esterno da assorbitore e il TIM svolge la funzione di isolante e di amplificatore delle radiazioni captate dall'effetto serra.

I sistemi tessili rappresentano oggi un importante campo di studio in quanto riescono a combinare l'utilizzo di materiali sostenibili con la massima efficienza e con la possibilità di avere maggiore facilità di rimozione e di riutilizzo.

Lo studio che si affianca alla ricerca dei materiali più adatti riguarda lo studio del potenziale adattivo di queste facciate e la produzione di energia utilizzando sistemi fotovoltaici o solari.

## Analisi comparativa

Nella seguente tabella viene riportata un'analisi comparativa tra i diversi sistemi appena descritti. In particolare dal punto di vista dell'applicabilità si analizza la possibilità di integrare i sistemi ad edifici esistenti oppure la limitazione agli edifici ex novo. Il grado di automazione riguarda invece la richiesta di energia per l'attivazione del sistema, la quale può essere anche totalmente assente, nel caso di utilizzo di componenti e materiali particolari. Infine si punta l'attenzione sulle particolari potenzialità che caratterizzano ciascun sistema.

Data la possibilità, come prima anticipato, di integrare di diverse di queste tipologie di facciate adattive nello stesso edificio, risulta complesso andare a definire con precisione quale sia il sistema migliore. Tuttavia è possibile valutare vantaggi e svantaggi di ogni tipologia, tenendone poi in conto in fase di progettazione.

In ottica dell'attenzione posta sulla sostenibilità ambientale e sul risparmio energetico, si può sicuramente affermare che sistemi che non richiedono utilizzo di energia per essere attivati, quindi sistemi automatizzati, siano sicuramente vantaggiosi rispetto invece ai sistemi che necessitano di energia per il funzionamento. Eccezione fatta per i sistemi definiti mobili, ovvero i sistemi che consentono la produzione di energia, in quanto questi, pur richiedendo energia per essere attivati, consentono comunque di avere un bilancio positivo, e comunque utilizzano un tipo di risorsa rinnovabile che non danneggia in alcun modo l'ambiente.

È vero anche che sistemi completamente autonomi non possono essere regolati dall'utente, come le facciate che sfruttano proprietà intrinseche dei materiali per l'adattamento, i quali si regolano in base alle caratteristiche dell'ambiente esterno. Questo in realtà è un aspetto che può passare in secondo piano in quanto l'adattamento di tali sistemi è pensato per definizione a un miglioramento del comfort in termini di regolazione della luminosità e dell'eccessiva radiazione, quindi, seppur senza regolazioni dirette da parte dell'utente, si verificano comunque le migliori condizioni di benessere. In questo modo sicuramente la percentuale di insoddisfatti sarà minima.

Dal punto di vista dell'applicabilità ad edifici esistenti si può dire che in qualsiasi di queste tipologie l'analisi deve partire dalla tipologia e dalla forma dell'edificio. Se la struttura dell'edificio lo consente è più facile l'integrazione di facciate passive a doppia pelle.

Edifici con sistemi di facciata cinetici, attivi e intelligenti necessitano di strutture apposite per la loro installazione quindi può risultare più complessa e costosa l'applicazione in edifici esistenti. In particolare gli edifici cinetici, che coinvolgono la presenza di sistemi tecnologici per la regolazione, molto spesso è preferibile che vengano progettati in fase di costruzione.

Per quanto riguarda le facciate mobili, che verranno approfondite nel capitolo finale della tesi, si può affermare che l'applicazione può avvenire sia in edifici esistenti che ex-novo, in quanto se il sistema fotovoltaico viene applicato in un sistema frangisole con una struttura simile a quella di una doppia pelle, allora si può utilizzare anche in sistemi già esistenti.

Tipo di facciata	Applicabilità	Grado automazione	Potenziale
Attiva	Edifici ex novo	Automatizzata	Autoregolazione della facciata controllata sia dall'interno che dall'esterno
Passiva	Edifici esistenti	Automatizzata	Strato protettivo che migliora condizioni di comfort interno
Cinetica	Edifici ex novo	Richiesta di energia	Dispone di una vasta gamma di movimenti possibili
Intelligente	Edifici ex novo	Automatizzata	Apprende e risponde in tempo reale
Mobile	Edifici ex novo / esistenti	Richiesta di energia	Capacità di produrre energia
Biomimetica	Edifici ex novo	Automatizzata	Utilizza principi biomimetici della natura con minimo coinvolgimento energetico

Tabella 2: Analisi comparativa sistemi adattivi, elaborazione dell'autore







CAPITOLO 3

**INVOLUCRO ARCHITETTONICO COME SISTEMA ATTIVO**

3.1 Integrazione di sistemi fotovoltaici

3.1.1 Tecnologia fotovoltaica

3.2 Casi di studio

NEST HiLo unità di ricerca e innovazione

SBL OFFICES

3.3 Innovazioni e possibili sviluppi

Sistema brevettato automatizzato di schermatura fotovoltaica

Pho'liage



### 3.1 INTEGRAZIONE DI SISTEMI FOTOVOLTAICI

Visto quanto introdotto nel primo capitolo, riguardo le problematiche legate alla sostenibilità ambientale e all'emissione di gas serra, è necessario pensare, per il futuro delle costruzioni, all'applicazione di tecnologie che possano fornire delle soluzioni.

Una di queste è rappresentata dall'utilizzo di fonti rinnovabili derivanti dalle tecnologie fotovoltaiche, le quali consentono di sfruttare l'energia solare convertendola direttamente in energia elettrica. L'energia solare, essendo la fonte più abbondante e interminabile, è la più utilizzata e consente di avere una potenza disponibile nettamente maggiore del consumo di energia.

#### 3.1.1 Tecnologia fotovoltaica

La conversione di energia sfrutta l'effetto fotovoltaico, ovvero la capacità dei materiali di assorbire la luce. Colpendo infatti la cella fotovoltaica, la luce solare, carica gli elettroni i quali, aumentando il loro livello di energia, vengono liberati e fatti circolare all'interno di un circuito elettrico producendo energia.

L'unità elementare è la cella che consente la conversione dell'energia ed è costituita da un materiale semiconduttore. Spesso viene utilizzato come materiale il silicio, in quanto rappresenta, dopo l'ossigeno, l'elemento dominante in termini di quantità. Lo possiamo trovare con diverse strutture cristalline che saranno poi caratterizzate da diverse efficienze nel momento in cui vengono utilizzati per la costruzione delle celle.

La struttura monocristallina consente il massimo del rendimento ed è costituita da atomi legati in modo uniforme che portano alla formazione di un unico cristallo.

La struttura policristallina invece è costituita da atomi che formano tanti piccoli grani, e la sua produzione ha costi inferiori rispetto alla prima tipologia e prestazioni di poco inferiori.

La struttura amorfa invece, considerata la più svantaggiosa in termini di efficienza, non forma un grano regolare a causa dell'orientamento non omogeneo degli atomi.

A livello commerciale i pannelli con maggiore produzione sono caratterizzati da una struttura cristallina, mono o poli cristallina, oppure da tecnologie a film sottile.

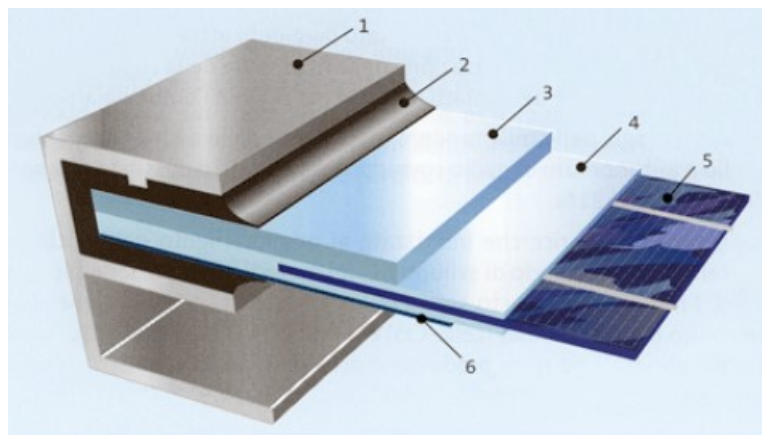
La tipica cellula cristallina è formata da uno strato di silicio cristallino, denominato “wafer”. Le celle poi vengono assemblate una accanto all’altra, su un supporto rigido, per formare il modulo fotovoltaico.

La struttura della cella viene mostrata in Figura 48. Nella parte anteriore inoltre viene posto un vetro temprato di spessore 4 millimetri che offre protezione, rigidità e stabilità alla cella. È importante sottolineare però che la presenza di tale strato non modifica l’efficienza complessiva, in quanto il vetro viene prodotto in modo da avere capacità di attraversamento delle radiazioni maggiori rispetto ai normali in commercio.

Il vetro più utilizzato a questo scopo è il vetro a basso contenuto di ferro, di cui ne esistono diversi tipi con diverse percentuali. Il vetro che è costituito da una minor quantità di ossido di ferro ha una trasmissione solare maggiore e quindi consente di garantire comunque un’elevata efficienza del pannello, permettendo al 91% delle radiazioni, secondo degli studi effettuati, di oltrepassare il vetro.

Un’altra tipologia di vetro da poter utilizzare è il vetro soda-calce, composto da silice, ossido di sodio e di calcio, il quale consente un passaggio dell’85% delle radiazioni. La produzione dei fogli è però molto dispendiosa per l’utilizzo su larga scala, per questo si preferisce la prima modalità.

Un’ulteriore strato di EVA, vinilacetato etilene, viene posto tra il vetro e la cella per evitare il contatto diretto tra i due strati e per isolare termicamente la parte attiva. Il rivestimento finale, pensato con funzioni di protezione all’acqua e all’ossigeno, è realizzato con fogli di fluorurato Tedlar.



**1) Cornice in alluminio, 2) Sigilante, 3) Vetro, 4) Eva, 5) Cella 6) Tedlar**

*Figura 48: Sezione tipica di un modulo fotovoltaico in silicio cristallino*

La tipologia a film sottile invece consente di avere una notevole riduzione dei materiali semiconduttori da utilizzare nella costruzione delle celle, andando quindi a ridurre i costi di produzione.

Questi pannelli sono costituiti da diversi strati, uno semiconduttore, per esempio il silicio amorfo, con spessore di 1 o 2 micron, che viene supportato da una lastra in vetro o in metallo. In questo caso però vediamo l'assenza dello strato di EVA presente invece nella precedente tipologia.

A differenza delle celle in silicio cristallino, queste ultime sono più flessibili e quindi si ha maggiore scelta di utilizzo anche per l'integrazione nell'involucro.

Altri materiali che vengono utilizzati per la tecnologia a film sottile sono il CIGS, ovvero materiale composto da selenio, rame, indio e gallio, e il CdTe, ovvero il tellururo di cadmio.

Queste nuove tecnologie a film sottile vengono ampiamente studiate in quanto rappresentano una possibilità promettente per lo sviluppo dell'utilizzo del fotovoltaico, viste le recenti sperimentazioni che dimostrano un aumento di efficienza.

Il dispositivo che poi consente la trasformazione della corrente è chiamato inverter. Esso ha come funzione la conversione dell'energia prodotta dal fotovoltaico sotto forma di corrente continua, in corrente alternata, necessaria per gli impianti domestici.

Gli impianti possono essere classificati come isolati o connessi alla rete, in base alla destinazione dell'energia prodotta.

Nel primo caso infatti l'energia prodotta viene accumulata tramite specifiche batterie che consentono di garantire il servizio anche in assenza di sole. Questi vengono principalmente usati per zone poco accessibili o con consumi di energia poco rilevanti.

Nel secondo caso invece non c'è necessità di dispositivi di accumulo, in quanto l'energia viene inviata alla rete che poi provvede per l'alimentazione delle utenze nei momenti meno favorevoli.

La produzione di energia elettrica inoltre è condizionata dalla disposizione dei pannelli e dalla loro inclinazione in base all'orientamento.

L'articolo *Photovoltaic integrated shading devices (PVSDs): A review* va ad analizzare i diversi orientamenti e angoli di inclinazione di questi dispositivi, in modo da avere un'ottimizzazione del sistema.

Per quanto riguarda l'orientamento si ha un posizionamento favorevole verso sud nell'emisfero settentrionale e uno a nord nell'emisfero sud. In caso di posizionamento opposto si stima una perdita del 20% di efficienza, questo perché non si avrebbe la massima esposizione solare.

Per quanto riguarda l'angolo di inclinazione si può affermare che una maggiore posizione di ortogonalità rispetto ai raggi solari, porta a una maggiore conversione in elettricità.

In Figura 49 vengono riportati i valori di produzione in base a questi parametri, si nota che le massime prestazioni si ottengono con un'inclinazione del pannello, orientato a sud, di 30°. Le parti evidenziate rappresentano invece condizioni da evitare in quanto si avrebbero livelli troppo bassi di produzione.










INCLINAZIONE \ ORIENTAMENTO		0°	30°	60°	90°
		 —	 /	 /	
EST		0,93	0,90	0,78	0,55
SUD-EST		0,93	0,96	0,88	0,66
SUD		0,93	<b>1,00</b>	0,91	0,68
SUD-OVEST		0,93	0,96	0,88	0,66
OVEST		0,93	0,90	0,78	0,55

Figura 49: Rappresentazione confronto tra inclinazione e orientamento del pannello

Sempre in relazione al problema della disposizione dei pannelli bisogna andare a valutare anche l'aspetto dell'ombreggiamento, il quale può avvenire sia tra diversi pannelli, ma anche per la presenza di oggetti esterni all'edificio che possono oscurare parte dei pannelli.

Le celle vengono assemblate e collegate in serie o in parallelo per formare dei moduli che poi consentono di generare la potenza richiesta, se però si ha ombreggiamento di parte del pannello la corrente generata sarà ridotta in modo proporzionale alla percentuale di pannello ombreggiato. Questo quindi causa una diminuzione di produzione di energia che può portare a un surriscaldamento della cella e a un conseguente danneggiamento. A risoluzione di questo risulta necessario studiare attentamente, tramite diversi sistemi



di simulazione, la corretta distanza tra i pannelli e gli andamenti delle ombre generate tra pannelli o da oggetti vicini al fotovoltaico.

Per garantire inoltre la massima captazione delle radiazioni solari si studiano dei pannelli che possano seguire il moto del sole, in modo da avere sempre perpendicolarità dei raggi, avendo così la massima efficienza.

Gli inseguitori possono essere di due tipi, a uno o due gradi di libertà. La tipologia più sofisticata è la seconda, la quale consente la perfetta ortogonalità in ogni istante.

Quelli a un grado di libertà sono invece i più diffusi e possono essere distinti in tre differenti tipologie in base al movimento del sole che si considera, che sia esso giornaliero o stagionale. Nel primo caso quindi si fa riferimento al percorso del sole da est a ovest ogni giorno, nel secondo invece si tiene conto delle variazioni di elevazione del percorso del sole dovute al cambio delle stagioni.

Lo sviluppo di questi sistemi fotovoltaici porta però alla necessità di pensare allo smaltimento degli stessi, facendo attenzione a garantire il recupero delle componenti e a ridurre il rilascio in atmosfera o nel terreno di sostanze inquinanti. Lo studio dell'impatto ambientale e del ciclo di vita a monte della catena di costruzione è il prerequisito fondamentale per lo sviluppo di un'economia circolare.

La vita utile dei moduli fotovoltaici, a causa del degrado dei materiali, è di circa 25-30 anni, dopo la quale risulta necessaria una sostituzione del pannello. Questo periodo indica il raggiungimento di prestazioni molto basse dovute principalmente a umidità e all'ossidazione dei contatti elettrici.

Ci sono diversi tipi di processi per il recupero dei materiali, uno di questi è il processo della Deutsche, utilizzato in modo specifico per i pannelli con moduli di silicio.

La Deutsche Solar è un'azienda che si occupava inizialmente del recupero dei wafer dai moduli, con l'avvento di pannelli sempre più sottili però l'attenzione si focalizza sul recupero del silicio come materia prima. Il processo è diviso in due parti, una di trattamento termico, per la separazione delle componenti, e un trattamento chimico per rimuovere le impurità e per ottenere il silicio. Nella prima fase i moduli vengono messi in un forno a 550/600° in modo da far bruciare le componenti plastiche, quali il foglio di Tedlar e lo strato di EVA. I gas prodotti durante la decomposizione vengono trattati e purificati per l'abbattimento delle sostanze inquinanti. Al termine del processo il vetro e la cornice sono divisi in modo manuale e vengono in seguito riciclati, mentre le celle di

silicio vengono trattate con il processo chimico. Quest'ultimo consiste in una serie di bagni chimici in diversi composti, come acido nitrico, acetico, acqua distillata e altri, i quali aggrediscono la superficie consentendo l'isolamento del silicio che poi verrà utilizzato per altre celle.

Le ricerche in questo ambito sono comunque in continua evoluzione, data anche la presenza di materiali alternativi al silicio, in particolare per la tecnologia a film sottile.

L'applicazione poi dei sistemi fotovoltaici in architettura può avvenire in diversi modi. La più classica e la più frequente consiste nel posizionamento dei pannelli sulla falda del tetto, la quale ha delle inclinazioni favorevoli, dai 15° ai 60°. Questa applicazione ha diversi vantaggi tra cui i risultati estetici, in quando non risulta di grande impatto, l'utilizzo di superfici marginali e la grande quantità di superfici disponibile allo scopo. Tra gli svantaggi troviamo però l'impossibilità di poter scegliere l'inclinazione e l'orientamento. Un'alternativa a questa metodologia è l'applicazione in facciata, che verrà presentata in questo capitolo, la quale sta negli ultimi anni evolvendosi in modo da cercare di ottenere buoni risultati dal punto di vista della produzione, della stabilità, della manutenibilità e dell'impatto estetico.

Di seguito nel capitolo vengono riportati quattro sistemi di esempi di applicazione di sistemi fotovoltaici su schermature solari dinamiche. I primi due sono sistemi già sperimentati e applicati ad edifici esistenti, gli ultimi invece sono ancora oggi in fase di sviluppo per una possibile integrazione futura.

1. NEST HiLo (Zurigo)
2. SBL offices (Linz)
3. Sistema frangisole fotovoltaico regolabile
4. Prototipo pho'liage

### 3.1 CASI STUDIO

#### 1. NEST HILO

HiLo è un'unità facente parte dell'edificio NEST, collocato nel blocco di ricerca dell'ETH di Zurigo, la cui costruzione è terminata nel 2021. L'unità presenta diverse innovazioni del campo della progettazione sostenibile per il futuro tra cui: un sistema di pavimento funicolare leggero, il quale consente il risparmio



Figura 50: Unità HiLo NEST, 2021, Zurigo, tratto da <https://systems.arch.ethz.ch/demonstrators/nest-hilo>

di calcestruzzo e acciaio di armatura nella costruzione; un tetto in calcestruzzo formato con una cassaforma flessibile costituita da una rete di cavi tesi all'interno di un telaio in legno; una facciata solare adattiva, di cui si entrerà nello specifico in questa parte; e infine un sistema di controllo automatizzato basato sull'intelligenza artificiale per migliorare il comfort dell'occupante.

La tipologia di facciata adattiva integrata in questo sistema, mostrata in Figura 51, può essere definita, rispetto le definizioni fornite nel capitolo precedente, come mobile, in quanto vede una produzione di energia, e reattiva, in quanto presenta diverse possibilità di movimento, il quale viene automatizzato grazie alla presenza di sensori e attuatori.



Figura 51: Vista facciata adattiva, tratto da <https://systems.arch.ethz.ch/demonstrators/nest-hilo>

Le facciate adattive presenti in questa unità sono due, una collocata a sud e una a sud-ovest, in modo da poter avere una valutazione più completa dell'intero sistema. Entrambe però sono collocate davanti alle finestre di due camere da letto in modo da studiare in modo dettagliato l'interazione con gli occupanti.

L'involucro solare adattivo HiLo è composto da sistemi di ombreggiatura che garantiscono privacy e allo stesso tempo trasparenza della facciata con vista dell'esterno. I moduli, controllati da sensori oppure da input dell'occupante, su cui sono integrate celle fotovoltaiche con tecnologia a film sottile, hanno un sistema a inseguimento solare a due assi.

La progettazione della facciata è molto complessa e lo scopo è quello di studiare la forma, la resistenza strutturale, le prestazioni energetiche e le condizioni di illuminamento attraverso l'utilizzo di software specifici. Grazie a questi vengono quindi messi in collegamento le dimensioni del telaio strutturale e il distanziamento dei pannelli in modo da avere la corretta gamma di movimenti. Simultaneamente viene fatta una valutazione energetica, in quanto per raggiungere la massima produzione di energia e minimizzare i consumi, scopi primari su cui basare il progetto, è necessario studiare al massimo la disposizione dei pannelli. Per quanto riguarda quest'ultima, siamo portati a pensare che più sono numerosi, maggiore sarà l'energia prodotta, in realtà "se i pannelli sono troppo vicini tra loro, ci sarebbe un'elevata ombreggiatura automatica del modulo che ridurrebbe le prestazioni complessive dei pannelli"<sup>24</sup>.

Il modulo viene progettato in modo da potersi aprire e chiudere senza urtare contro la struttura su cui è fissato o altri pannelli, come viene mostrato in Figura 53. A tale scopo infatti viene disposto con una distanza di 80 centimetri dalla struttura a telaio, mostrata in Figura 52.

---

<sup>24</sup> "Performative design environment for kinetic photovoltaic architecture", P. Jayathissa, S. Caranovic, J. Hofer, Z. Nagy, A. Schlueter, *Automation in Construction*, 2018,

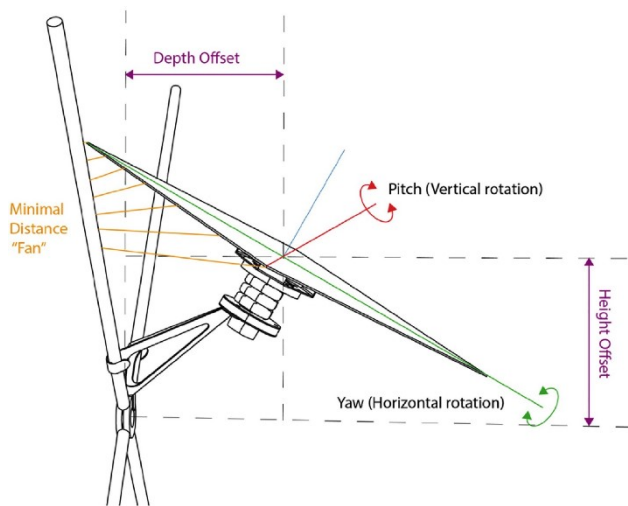


Figura 53: Vincoli di movimento del pannello rispetto alla struttura, tratto da "Performative design environment for kinetic photovoltaic architecture"



Figura 52: Rendering del telaio e della rete metallica, tratto da "The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes"

Il telaio su cui sono fissati i pannelli è di dimensioni 2.50 per 4.02 metri ed è costruito in acciaio e progettato per resistere ai carichi strutturali e del vento e per ridurre al massimo l'ostruzione della visuale dell'utente.

Il pannello, composto da un substrato di alluminio spesso 0.8 millimetri per il modulo fotovoltaico a film sottile in CIGS, viene azionato da un attuatore pneumatico in gomma, mostrato in Figura 55, il quale contiene tre camere d'aria gonfiabili. Queste consentono un movimento del modulo di due gradi di libertà che avviene per pompaggio di aria compressa nella camera. La cinematica dell'attuatore viene mostrata in Figura 54.

Tutto il meccanismo è controllato da una scatola di controllo decentralizzata che consente di valutare il flusso d'aria nell'attuatore.

Grazie a questo quindi si può ottenere una rotazione dei pannelli di 45°, in modo da ottenere la posizione completamente aperta o completamente chiusa.

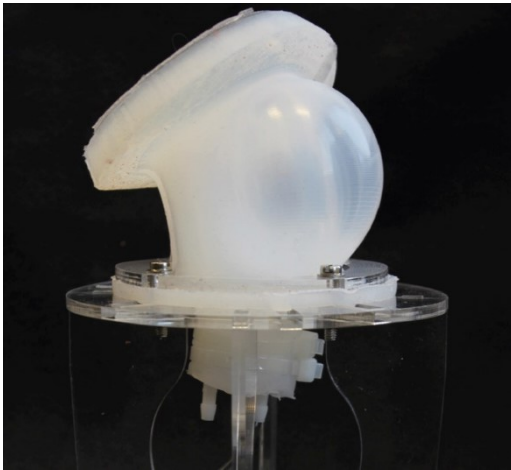


Figura 55: Prototipo dell'attuatore pneumatico, tratto da " NEST HiLo: Investigating lightweight construction and adaptive energy systems"

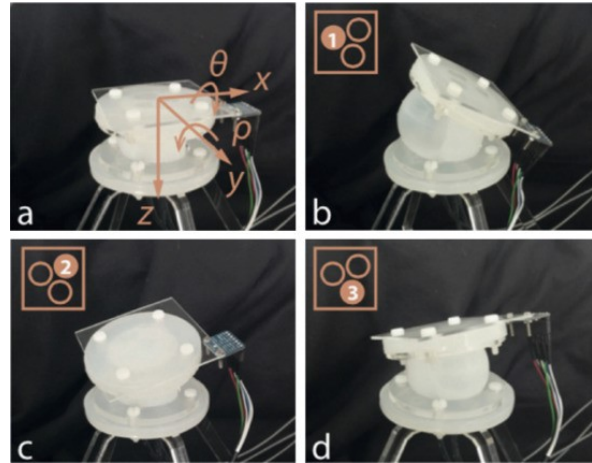


Figura 54: a- Attuatore sgonfio, b,c,d rispettivamente con la 1a,2a,3a camera gonfiata, tratto da "The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes"

Per il controllo viene sfruttato un sistema di domotica che valuta le prestazioni della facciata sia dal punto di vista dell'efficienza energetica che del comfort dell'utente, infatti "l'obiettivo dell'ASF è quello di creare un ambiente termico e visivo confortevole, soddisfacendo i requisiti dell'utente per i livelli di ombreggiamento, temperatura e luce. Allo stesso tempo, l'energia dovrebbe essere generata attraverso le celle fotovoltaiche ogni volta che ciò non è in conflitto con i desideri dell'utente"<sup>25</sup>.

In particolare viene utilizzato un sistema con un misuratore degli angoli azimutali e di altitudine che poi viene collegato al pannello per l'inseguimento solare. Tale sistema è stato sperimentato in un altro edificio a Zurigo, ottenendo ottimi risultati anche in termini di produzione energetica.

Per quanto riguarda i dati energetici, la progettazione dell'edificio viene fatta per avere un surplus di energia prodotta, si parla infatti di edifici NPEB, quindi con "una domanda annuale ponderata di energia di 37.8 kWh/m<sup>2</sup> si ottiene un surplus energetico ponderato del 45%"<sup>26</sup>.

<sup>25</sup> AA.VV, *The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes*, Frontiers of Architectural Research, 2016;

Zhang X., Lau S.K., Lau S.S.Y , Zhao Y., *Photovoltaic integrated shading devices (PVSDs): A review*, Solar Energy, 2018

<sup>26</sup> AA.VV, *NEST HiLo: Investigating lightweight construction and adaptive energy systems*, Journal of Building, P. Block, Engineering, 2017;

## 2. SBL OFFICES

Un'altra applicazione di sistemi frangisole fotovoltaici possiamo trovarla negli uffici SBL a Linz, in Austria. L'edificio utilizza un sistema progettato da un'azienda, Colt Group, produttrice di sistemi di ombreggiamento solare. L'edificio è ricoperto per un'area di 250 m<sup>2</sup> da pannelli fotovoltaici in silicio monocristallino, per un totale di 204 moduli con diversi numeri di celle per ciascuno, le quali possono variare da 40 a 52.

Questo esempio si può classificare, secondo i parametri prima definiti, come un sistema mobile e attivo, in quanto produce energia, ma il meccanismo che consente di mettere in movimento il dispositivo non è complesso e non permette un controllo da parte dell'utente.

Il sistema, come mostrato in Figura 57 e 58, incorpora un tubo centrale in alluminio che consente la rotazione della lamella di vetro (di dimensioni variabili), sulla quale vengono applicati moduli fotovoltaici.



Figura 56:Foto uffici con applicazione frangisole fotovoltaico, Linz, Austria, 1999

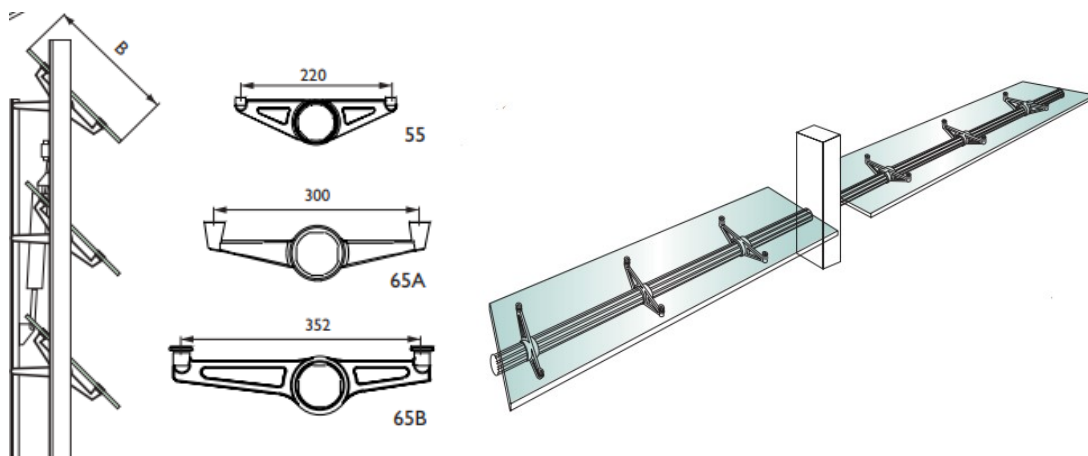


Figura 57:Schematizzazione sistema frangisole, tratto da [www.coltgroup.com](http://www.coltgroup.com)

Figura 58:Schematizzazione sistema frangisole, tratto da [www.coltgroup.com](http://www.coltgroup.com)

La particolarità del sistema è l'auto allineamento con modalità termoidraulica delle lamelle, con inseguimento solare su un unico asse, ovvero quello orizzontale.

Il sistema di controllo THA, ovvero *Thermo-Hydraulic*, è auto alimentato dal sole grazie all'espansione e contrazione di un fluido contenuto all'interno del tubo, come mostrato in Figura 59.

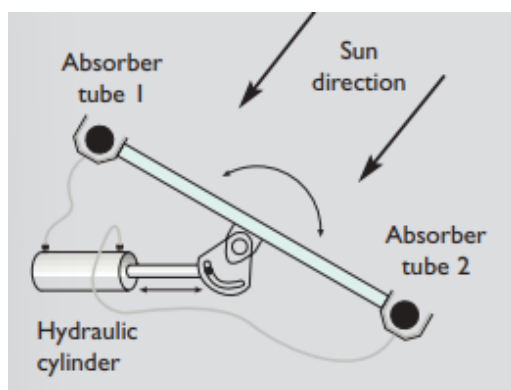


Figura 59: Rappresentazione meccanismo movimento termo-idraulico, tratto da [www.coltgroup.com](http://www.coltgroup.com)

Non vi è quindi la necessità di alimentazione esterna o di sensori e attuatori, in quanto sono i due tubi a rilevare la posizione del sole, andando a chiudere o aprire le alette. Quando infatti il tubo 1 è più caldo del tubo 2, il gas nel tubo centrale si espande e controlla tramite un pistone la geometria della lamella, facendola ruotare attorno alla cerniera in modo da posizionarsi perpendicolarmente ai raggi solari.

Vengono quindi sfruttati in questo caso dei materiali intelligenti che solo tramite le loro proprietà intrinseche portano a variazione del sistema, il quale però, come anticipato in precedenza, non ha possibilità di controllo da parte dell'utente.

Secondo gli studi riportati all'interno della tesi *Studies on light-transmissive photovoltaics (LTPV): patterns of integration into architectural design*<sup>27</sup> la produzione di energia stimata per il numero di pannelli collocati è di 15900 kWh/anno, non viene però specificato come venga effettuato il calcolo e in quali condizioni climatiche venga effettuata la stima.

<sup>27</sup> Baum R., *Studies on light-transmissive photovoltaics (LTPV): patterns of integration into architectural design*, Dipartimento di architettura, Università di Tokyo, 2012



## 3.2 INNOVAZIONI E POSSIBILI SVILUPPI

### 3. SISTEMA FRANGISOLE FOTOVOLTAICO REGOLABILE

La ricerca nell'ambito di nuovi sistemi fotovoltaici integrati in facciata è sempre in costante sviluppo, si possono infatti trovare sempre nuovi sistemi brevettati che potranno essere applicati in futuro.

Uno di questi viene pubblicato nel maggio del 2022<sup>28</sup> e presenta un sistema frangisole fotovoltaico ad angolo regolabile in base alla posizione del sole, in modo tale da massimizzare l'utilizzo dell'energia solare, dando allo stesso tempo un effetto di ombreggiamento per l'interno, garantendo comunque adeguati livelli di comfort.

In Figura 60 viene mostrato il sistema che si compone di un telaio (1), di un sistema di posizionamento solare (2), di un sistema di lame parasole (3), di un sistema di auto-trasmissione (4) e uno di recupero dell'energia (5).

Il telaio ha la funzione principale di sostenere i carichi della facciata e del sistema di frangisole e trasmetterlo all'edificio. All'estremità di questo sistema di sostegno viene installato il sistema di posizionamento solare, il quale ha il compito di controllare l'angolo di rotazione delle lame ad esso fissate.

Lo scopo delle lame è appunto quello di proteggere dalle radiazioni solari e produrre energia grazie all'integrazione del sistema fotovoltaico. Il dispositivo, mostrato in Figura 61, è dotato di un telaio in alluminio (301), una lama frontale fotovoltaica in lega di

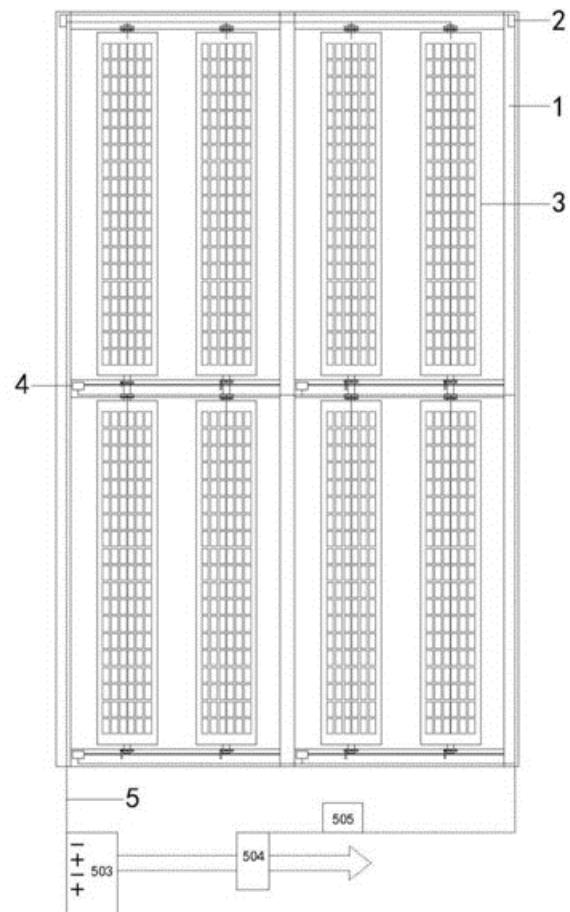


Figura 60: Schema del sistema di facciata con integrazione di frangisole fotovoltaico

<sup>28</sup> Zhang H., Gui Y., Cheng X., Qian C., brevetto CN114562061A, *Angle-adjustable photovoltaic sunshade curtain wall system*, 2022

alluminio (302), una posteriore sempre in alluminio (303), una copertina a scatto, con funzione estetica per coprire le viti (304), e infine un albero rotante (305). Quest'ultimo è fissato ai telai orizzontali superiori e inferiori, in quanto in questo caso il sistema dispone lungo un asse verticale.

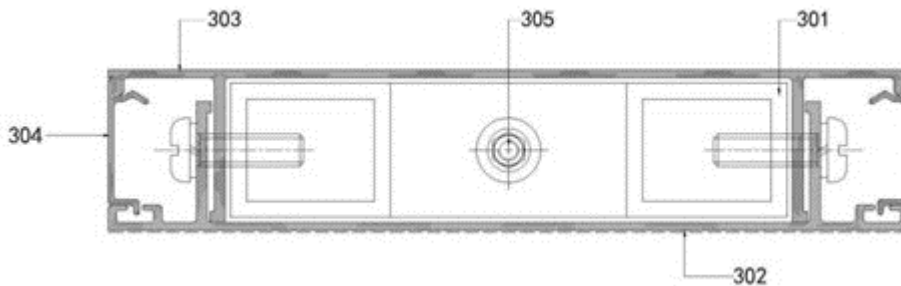


Figura 61: Diagramma della lama parasole

Il sistema di auto-trasmissione, recependo le informazioni dal sistema di posizionamento, attiva i meccanismi di movimento delle lame controllando l'angolo di rotazione. Per questo scopo sono necessari diverse componenti, mostrate nel dettaglio in Figura 62.

Il sistema infatti è comandato da un motore (401) il quale tramite una barra di trasmissione (402) collegata a un servosterzo (403) azionano un set di ingranaggi di trasmissione (404) che controllano la rotazione del frangisole. Il manicotto (405) ha invece la funzione di far oscillare l'albero rotante, mentre l'ultima componente compresa è la clip limite (406) che ha la funzione di sostenere il peso della lama, impedendone la caduta.

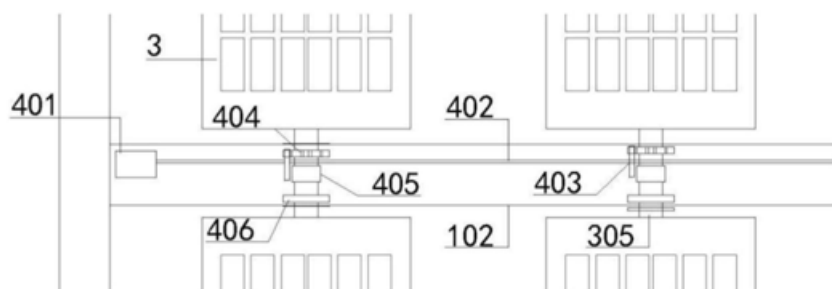


Figura 62: Schema del sistema di autotrasmissione

Per quanto riguarda il sistema energetico, questo è costituito da un sistema di alimentazione per il motore (501) che regola il parasole alimentato da un connettore (503), il quale poi è collegato a un inverter (504), un dispositivo di accumulo di energia (505) e una scatola di giunzione (506). Il tutto viene nascosto all'interno del telaio, non visibile dall'esterno, ma accessibile per la manutenzione.

L'energia generata dal sistema passa attraverso la scatola di giunzione e trasmessa al connettore e convertita dall'inverter.

Come anticipato quindi il sistema del posizionamento solare è alimentato proprio da una parte dell'energia elettrica emessa dalle lame fotovoltaiche tramite un circuito chiuso.

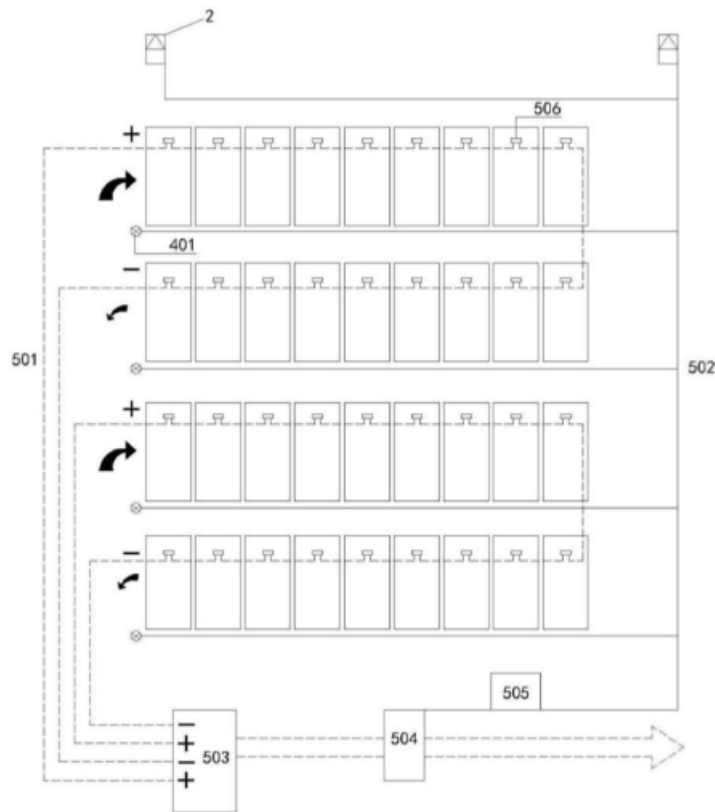


Figura 63: Rappresentazione sistema energetico

Questo sistema consente quindi di produrre energia in modo sostenibile e risparmiare allo stesso tempo sui consumi interni di condizionamento. La struttura è leggera, sicura e con un aspetto estetico piacevole.

Essendo un brevetto è comunque possibile la variazione di alcuni piccoli particolari che non vengono specificati, non si parla infatti del materiale del pannello fotovoltaico oppure della scelta delle lame da utilizzare.

#### 4. PROTOTIPO PHO'LIAGE

Un ulteriore prototipo innovativo, presentato da Art Builds' Lab, viene poi studiato per valutare l'efficacia di altri sistemi di schermature solari che dispongono di celle fotovoltaiche. L'obiettivo principale è quello di progettare una facciata che "dovrebbe essere interattiva e rispondere in modo intelligente e affidabile alle mutevoli condizioni esterne e alle esigenze degli occupanti".<sup>29</sup>

Questo particolare prototipo utilizza un approccio biomimetico di tipo top-down, in quanto imita, per la costruzione del sistema di ombreggiatura, il meccanismo di apertura e chiusura dei petali dei fiori.

La scelta del materiale ricade sull'utilizzo di bimetalli termostatici, o TBM, ovvero leghe che modificano la loro configurazione a seguito di modifiche intrinseche del materiale. In questo caso si ha un'espansione del materiale a seguito di un aumento di temperatura, mentre nel caso opposto si verifica una contrazione.

Il team di Art Build ha eseguito diversi test pratici per valutare quale fosse la forma ottimale per la destinazione d'uso finale, cercando di concentrarsi sulle forme triangolari, le quali consentono al meglio le risposte ai cambiamenti di calore e permettono di avere una maggiore stabilità nel fissaggio e resistenza alle sollecitazioni esterne date da vento, pioggia e inquinamento. A questo proposito infatti vengono utilizzati dei rivestimenti decorativi con funzione anticorrosiva che però non vadano a danneggiare o rallentare la risposta del movimento del petalo.

I test eseguiti sulle varie configurazioni possibili portano alla soluzione ottimale che consente di ridurre al minimo lo spreco di materiale, ovvero la forma di petalo trilobato, mostrato in Figura 64 nella configurazione aperta e chiusa.

---

<sup>29</sup> *Pho'liage: Towards a Kinetic Biomimetic Thermoregulating Façade*. Bionics and Sustainable Design. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes. Singapore: Springer, 2022;



Figura 64: Rappresentazione prototipo Pho'liage in configurazione aperta e chiusa

Tale sistema viene poi implementato grazie all'utilizzo di celle fotovoltaiche, in modo da aumentare la produzione di energia rinnovabile, rispetto a un sistema fisso. Infatti la variazione della configurazione porta ad una disposizione sempre perpendicolare dei raggi solari, in modo da avere risultati ottimali, in particolare su una facciata esposta a sud, orientamento utilizzato nello studio del sistema.

Le celle fotovoltaiche in silicio monocristallino vengono assemblate al TBM creando un dispositivo unico controllato completamente dalla radiazione solare, come mostrato in Figura 65, dove viene distinta la cella fotovoltaica, rappresentata in bianco, dall'attuatore TBM, in blu.

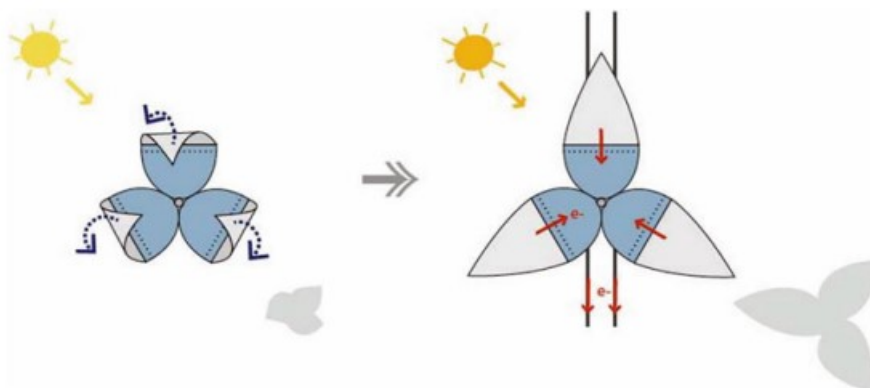
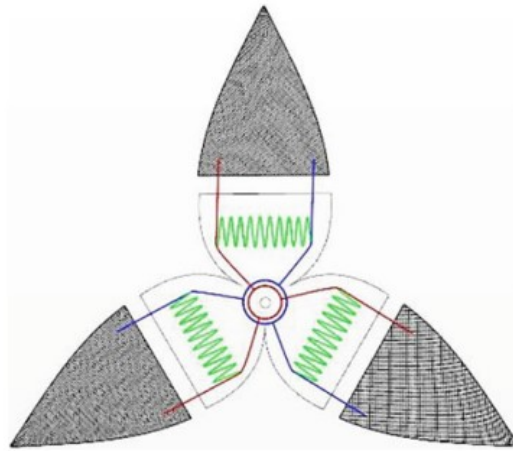


Figura 65: Rappresentazione sistema con integrazione di celle fotovoltaiche, in configurazione aperta e chiusa

I componenti fotovoltaici sono collegati ad un elemento resistivo mediante cavi conduttori, come mostrato in Figura 66.



*Figura 66: Dettaglio collegamento della cella fotovoltaica*

Il sistema proposto, senza però l'applicazione del fotovoltaico, trova applicazione nella nuova sede del IARC, Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro, con sede a Lione, in Francia, i cui lavori sono ultimati nel 2022.

La struttura di schermatura si compone di 1523 fiori che vengono collegati tramite dei cavi in alluminio, e si estende dal secondo al quinto piano. È importante inoltre sottolineare che i cavi hanno la possibilità di essere completamente rimossi dalla struttura in caso di manutenzione o sostituzione.

Tuttavia, essendo la soluzione molto recente, sono necessari ulteriori sviluppi e miglioramenti della tecnologia in modo da renderla competitiva sul mercato. Attualmente non mancano gli aspetti negativi, i quali sono legati principalmente al costo di ogni singolo dispositivo, alla scarsa produzione dei materiali bimetallici termostatici e alla problematica della sostenibilità ambientale, in quanto la lega utilizzata non ha possibilità di riciclo.

## Analisi comparativa

Dopo un'analisi dei diversi sistemi, alcuni dei quali come si è visto già applicati ed altri in via di ulteriori sperimentazioni, si possono trarre delle conclusioni su quali possano essere i sistemi più efficaci e più competitivi sul mercato anche sulla base di aspetti economici. Sicuramente tutti i sistemi introdotti sono accumulati da un raggiungimento delle esigenze di benessere, in quanto portano a un miglioramento delle condizioni di comfort sia visivo, evitando l'abbagliamento, sia termico, regolando l'effetto delle radiazioni solari. Inoltre, data la duplice funzione di schermatura solare e di produzione, tramite fonti rinnovabili, di energia, si giunge al conseguimento degli obiettivi di salvaguardia ambientale.

Per quanto riguarda un fattore costruttivo, tra i sistemi già applicati, invece si può dire che il caso di Zurigo, NEST HiLo, è sicuramente il più efficiente da un punto di vista della disposizione dei pannelli, in quanto hanno movimento bi-assiale, consentendo il miglior adattamento possibile alla direzione delle radiazioni solari.

L'unico aspetto che sicuramente necessita di ulteriori sperimentazioni è il comportamento della gomma a lungo termine anche in altri contesti climatici.

Molto simile in realtà è il sistema brevettato analizzato il quale, seppur non avendo ancora applicazioni reali, si presta bene ad essere utilizzato anche in diversi contesti climatici in quanto i materiali utilizzati, anche se non menzionati, saranno principalmente alluminio o acciaio.

Il sistema applicato nell'edificio per uffici a Linz invece è il sistema più semplice. Utilizza un meccanismo sicuro che non necessita di attuatori o sensori esterni, risultando quindi anche di facile manutenzione.

Il prototipo Pho'liage, come prima anticipato invece necessita sicuramente di ulteriori studi, ha però un alto potenziale in quanto consente anch'esso di evitare attuatori esterni e dispositivi tecnologici.





## CONCLUSIONI

L'obiettivo della presente tesi è stato quello di investigare le possibili integrazioni del fotovoltaico ai sistemi di schermatura adattivi in modo da raggiungere i propositi di sviluppo di edifici nZEB, *nearly Zero Energy Building*.

A seguito infatti dell'evoluzione del tema della sostenibilità ambientale, è sorta l'esigenza di pensare concretamente alle possibili soluzioni per una riduzione delle emissioni dei gas serra e per la conseguente problematica del riscaldamento globale. In quanto settore in continua crescita e in quanto responsabile della maggior parte di questi processi, il settore edilizio viene fortemente coinvolto nelle politiche di salvaguardia ambientale.

In particolare l'involucro vetrato, in quanto pelle dell'edificio che divide l'ambiente esterno da quello interno, ha grande impatto nel bilancio energetico di un edificio.

Esso, sviluppatosi a partire dall'800, viene analizzato tramite quattro casi studio riportati, i quali rappresentano le attuali tecnologie presenti per la costruzione di facciate continue, ovvero sistemi a montanti e traversi, a cellule prefabbricate, a fissaggio puntuale e a doppia pelle.

Il rapido sviluppo delle facciate continue però porta all'esigenza di valutare l'utilizzo di dispositivi di schermatura solare, i quali consentono di mantenere adeguate condizioni di comfort interno, a livello visivo e termico, e allo stesso tempo riescono a garantire un maggior risparmio energetico.

Questi dispositivi di schermatura hanno origine fin dall'antichità, ma è grazie anche all'architetto Le Corbusier che si apre la ricerca verso i sistemi moderni di protezione solare, che giungono allo sviluppo di dispositivi dinamici, i quali hanno un elevato grado di adattamento alle condizioni esterne, consentendo così una maggiore efficienza.

Allo scopo però di sviluppo di edifici nZEB è necessario non solo pensare alle soluzioni per il risparmio energetico, ma bisogna anche analizzare le modalità di produzione di energia tramite fonti sostenibili.

Proprio per questo vengono introdotti sistemi di schermatura solare con l'applicazione di pannelli fotovoltaici che possano integrare questi due aspetti.

A questo scopo sono stati analizzati nella tesi due casi studio, NEST HiLo, collocato a Zurigo, e SBL office, collocato a Linz. Dal confronto risulta che entrambi i sistemi hanno un'ottima efficacia sia dal punto di vista dell'ombreggiamento che della produzione di energia. La differenza sostanziale tra i due è il meccanismo di funzionamento, infatti

vediamo che nel primo caso abbiamo un sistema governato da un dispositivo di controllo centralizzato, il quale include anche un coinvolgimento da parte dell'utente che ha potere di modificare la configurazione e la disposizione dei pannelli in base alle proprie esigenze. Nel secondo esempio invece il sistema è del tutto automatizzato e consente quindi di evitare l'utilizzo di sistemi meccanici e non richiede energia per l'attivazione.

Si può affermare inoltre che i sistemi, della tipologia analizzata nella tesi, che effettivamente hanno trovato applicazione non sono numerosi, ad oggi infatti sono maggiormente presenti negli edifici dispositivi fotovoltaici fissi, che vengono maggiormente utilizzati principalmente per motivi economici.

Per questo l'analisi svolta parte da studi e da ricerche, alcune delle quali esposte nella parte conclusiva della tesi, nella quale si vanno a valutare un sistema brevettato e un prototipo, non ancora realizzati, che possono valide soluzioni da applicare in futuro.

Il sistema brevettato in realtà è composto da tutti elementi che possiamo facilmente trovare in commercio, l'innovazione quindi consiste in una combinazione di questi creando un frangisole dinamico che ha la capacità di ruotare attorno ad un asse in base alla posizione del sole.

Infine l'ultimo prototipo presentato, *pho'liage*, rappresenta una grande innovazione per il futuro che si spinge verso nuovi approcci biomimetici. Il sistema infatti riesce a perseguire gli obiettivi di ombreggiamento e produzione di energia tramite l'utilizzo di materiali che, solo per proprie caratteristiche intrinseche, riescono a modificare la propria configurazione senza bisogno di attuatori esterni.

Il sistema quindi, tra i due innovativi, che può vedere una più vicina applicazione è sicuramente il primo, ovvero il brevetto, in quanto come già osservato consiste nell'applicazione di una combinazione di componenti già presenti in commercio. Il secondo prototipo invece rappresenta ancora un futuro lontano, per le diverse problematiche elencate prima, legate in particolare alla disponibilità dei materiali e ad un aspetto economico. Nuove ricerche quindi possono spingersi verso la ricerca di nuovi materiali che possano essere competitivi e che rendano il sistema maggiormente disponibile per l'applicazione.





# BIBLIOGRAFIA

## CAPITOLO 1

- BPIE (Buildings Performance Institute Europe), *Reducing carbon emissions over the life a building: opportunities in the 2022 EPBD recast*, 2022;
- Canepa M., *Riflessioni sullo sviluppo sostenibile in architettura. A trent'anni dal rapporto Brundtland*, Mimesis, 2018;
- Decreto 21 gennaio 2016*, Piano d'Azione Nazionale sul Green Public Procurement (PANGPP);
- Halawa E., van Hoof, *The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview*, 2012;
- Lavagna M., *Politiche europee e orientamenti normativi sui temi della sostenibilità ambientale*, Dipartimento Architettura, Ingegneria delle costruzioni e Ambiente costruito, Politecnico di Milano, 2012;
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, *Protocollo di Kyoto della Convenzione sui Cambiamenti climatici* (versione italiana);
- Ministero della Transizione Ecologica, *Strategia nazionale per l'economia circolare*, 2022;
- Petriccione Livio, *Slide del corso di Architettura tecnica*, 2021;
- Rubini L., Sangiorgio S., Le Noci C., *Il nuovo edificio green. Soluzioni per il benessere abitativo e l'efficienza energetica*, Hoepli, 2016;

## CAPITOLO 2

- Aelenei L., Aelenei D., Mazzucchelli E.S., Romano R., *What is an Adaptive Façade? Analysis of Recent Terms and Definitions from an International Perspective*. Journal of Façade Design and Engineering, 2018;
- Altunkeyik E., *Curtain Wall: Analysis of European Office Buildings with Design and Retrofitting Strategies of the Curtain Wall*, tesi di master, Politecnico di Milano, 2019;
- Ausiello G., Compagnone M., Sommese F., *Imitare per costruire: dalla natura alla biomimetica*, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università di Napoli Federico II, 2020;
- Ceccherini Nelli L., D'Audino E., Trombadore A., *Schermature solari. In appendice: schermature fotovoltaiche*, Alinea, 2007;
- Faragalla, A.M.A.; Asadi, S., *Biomimetic Design for Adaptive Building Façades: A Paradigm Shift towards Environmentally Conscious Architecture*, Energies 2022;
- Loonen R.C.G.M., Trčka M., Cóstola D., Hensen J.L.M., *Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges*, 2013;
- Monticelli C., *La città e la sua pelle Architettura tessile per la rigenerazione e riqualificazione urbana*, Politecnico di Milano Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni, 2020;
- Murray C., *Contemporary Curtain Wall Architecture*, 2009;
- Pomponi F., Poorang P, Southall R., Ashton P., R.P. Farr E., *Energy performance of Double-Skin Façades in temperate climates: A systematic review and meta-analysis*, 2016;
- Rigone P., *Le facciate continue: la manutenzione dell'involucro edilizio vetrato*, Maggioli Editore, 2011;

Romano R., *Facciate doppia pelle per climi temperati*, 2014, pp. 48-55;

Rossetti M, Tatano V., *Schermature solari*, Maggioli Editore, 2012;

Tabadkani A., Roetzel A., Hong Xian Li, Tsangrassoulis A., *Design approaches and typologies of adaptive facades: A review*, 2021;

Zhang Xi, Hao Zhang, Yuyan Wang, and Xuepeng Shi., *Adaptive Façades: Review of Designs, Performance Evaluation, and Control Systems*, 2022;

### CAPITOLO 3

AA.VV, *NEST HiLo: Investigating lightweight construction and adaptive energy systems*, Journal of Building, P. Block, Engineering, 2017;

AA.VV, *The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes*, Frontiers of Architectural Research, 2016;

Zhang X., Lau S.K., Lau S.S.Y , Zhao Y., *Photovoltaic integrated shading devices (PVSDs): A review*, Solar Energy, 2018;

Baum R., *Studies on light-transmissive photovoltaics (LTPV): patterns of integration into architectural design*, Dipartimento di architettura, Università di Tokyo, 2012;

Bolla S., Tesi di laurea Triennale, *Struttura, funzionamento e analisi economica di un impianto fotovoltaico*, Università degli studi di Padova, 2011-2012;

Burrows K., Fthenakis V., *Glass needs for a growing photovoltaics industry*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015;

Cabras L., Tesi dottorato di ricerca, *Energia solare e architettura: integrazione della tecnologia fotovoltaica nell'organismo edilizio*, Università degli studi di Cagliari, 2009-2010;

Carrabba P., Padovani L.M., *I pannelli fotovoltaici a fine vita: Considerazioni sull'Impatto Ambientale e sulla Salute dei processi di smaltimento/riciclo/riuso*, ENEA, 2020;

Charpentier, L., et al. (2022). *Pho'liage: Towards a Kinetic Biomimetic Thermoregulating Façade*. Bionics and Sustainable Design. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes. Singapore: Springer, 2022;

Jayathissa P., Caranovic S., Hofer J., Nagy Z., Schlueter A., *Performative design environment for kinetic photovoltaic architecture*, Automation in Construction, 2018:

Lameirinhas M., Ricardo A., João Paulo N. Torres e João P. de Melo Cunha. 2022. *A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications*

Parida B., S. Iniyam S., Goic R., *A review of solar photovoltaic technologies*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011;

Zhang H., Gui Y., Cheng X., Qian C., brevetto CN114562061A, *Angle-adjustable photovoltaic sunshade curtain wall system*, 2022;

# SITOGRAFIA

## *CAPITOLO 1*

[europa.eu](http://europa.eu) (20/06/2023)

[UNFCCC.int](http://UNFCCC.int) (20/06/2023)

[www.ispraambiente.gov.it](http://www.ispraambiente.gov.it) (20/06/2023)

[www.mase.gov.it](http://www.mase.gov.it) (21/06/2023)

## *CAPITOLO 2*

[www.focchi.it](http://www.focchi.it) (19/07/2023)

[www.domus.it](http://www.domus.it) (20/07/2023)

[www.permasteelisagroup.com](http://www.permasteelisagroup.com) (23/07/2023)

[www.faraone.it](http://www.faraone.it) (06/08/2023)

[www.metrabuilding.com](http://www.metrabuilding.com) (06/08/2023)

<https://www.agc-glass.eu> (04/09/2023)

## *CAPITOLO 3*

<https://systems.arch.ethz.ch/demonstrators/nest-hilo> (18/08/2023)

<https://www.empa.ch/web/nest/hilo> (18/08/2023)

<http://www.coltgroup.com> (06/09/2023)

<https://www.artbuild.com/lab/pholiage> (06/09/2023)

## NORMATIVE

UNI 8989: 1981	Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione.
UNI 8290: 1981	Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia.
UNI 10838: 1999	Edilizia. Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia.
UNI 11277: 2008	Sostenibilità in edilizia. Esigenze e requisiti di ecocompatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di nuova edificazione e ristrutturazione
UNI EN ISO 7730: 2005	Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria
UNI EN 15251: 2007	Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica
UNI EN 17037: 2018	Daylight in buildings
UNI EN 13119: 2016	Curtain Walling – Terminology;



## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Rappresentazione schematica della relazione tra sistema edilizio e utente	7
Figura 2: Scala ASHRAE di sensazione termica, tratto da norma UNI EN 7730:2005	10
Figura 3: Distribuzione prevista dei voti delle persone termicamente insoddisfatte, tratta da norma UNI EN 7730:2005	10
Figura 4: Percentuale prevista PPD in funzione del valore medio PMV, tratta da norma UNI EN 7730:2005	11
Figura 5: a- Rappresentazione relazione tra PD e differenza temperatura tra arti e capo; b- Rappresentazione relazione tra PD e temperatura pavimento; c- Rappresentazione relazione tra PD e asimmetria radiante	11
Figura 6: Tabella raccomandazione per l'esposizione solare, tratta da norma UNI EN 17037:2018	13
Figura 7: Intervalli di classificazione del DGP, tratto da norma UNI EN 17037:2018	13
Figura 8: Confronto andamento progressi verso la neutralità climatica a confronto con gli obiettivi per il 2050, tratto da "EU Buildings Climate Tracker: Methodology and introduction of building decarbonisation indicators and their results"	16
Figura 9: Confronto tra il concetto di economia circolare e economia lineare, tratto da "Strategia nazionale per l'economia circolare", ministero della transizione ecologica.	17
Figura 10: a- Facciata del Reliance Building, Chicago, 1895, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019; b- Sezione esterna muro del Reliance Building, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019	22
Figura 11: a- Fagus Shoe-Last Factory, 1911, tratta da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019; b- Fagus Shoe-Last Factory sezione parete, tratta da " <a href="https://www.archdaily.com/612249/ad-classics-fagus-factory-walter-gropius-adolf-meyer">https://www.archdaily.com/612249/ad-classics-fagus-factory-walter-gropius-adolf-meyer</a> "	23
Figura 12: a- Halladie Building, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019; b- Halladie Building dettaglio facciata, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019	24
Figura 13: Maison Domino, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019	25
Figura 14: Bauhaus Building, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019	25
Figura 15: a- Progetto grattacielo, Mies van der Rohe, 1921, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019; b- Progetto grattacielo, Mies van der Rohe, 1922, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019	26
Figura 16: Dettaglio facciata Seagram Building, Mies van der Rohe, 1958, tratto da "Contemporary Curtain Wall Architecture", Murray, 2019	26
Figura 17: rappresentazione schematica sistema a montanti e traversi, tratto da Guida alla posa in opera delle Facciate Continue, UNCSAAL	30
Figura 18: Foto 101 Franklin Street	31
Figura 19: rappresentazione schematica sistema a cellule prefabbricate, Guida alla posa in opera delle Facciate Continue, UNCSAAL	32
Figura 20: Rappresentazione sistema a cellula	33
Figura 21: Sezione profilo con fissaggio strutturale	33
Figura 22: Sezione profilo con fermavetro	33
Figura 23: Foto complesso residenziale	34
Figura 24: rappresentazione schematica sistema a fissaggio puntuale, Guida alla posa in opera delle Facciate Continue, UNCSAAL	35
Figura 25: Sezione trasversale Air System	36
Figura 26: Rappresentazione ragno a quattro punti	36
Figura 27: Sezione trasversale sistema senza foratura	36
Figura 28: Rappresentazione sistema senza foratura	36
Figura 29: Vista facciata Pirelli Headquarters	38
Figura 30: Rappresentazione larghezza cavità	39
Figura 31: Movimento dell'aria all'interno dell'intercapedine	40
Figura 32: Rappresentazione configurazione spaziale	40
Figura 33: Rappresentazione dei metodi di ventilazione	41

<i>Figura 34:The Shard vista completa</i>	42
<i>Figura 35:Esempio diaframma grigliato, tratto da Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche</i>	43
<i>Figura 36:Esempio mashrabiyya, tratto da Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche</i>	43
<i>Figura 37:Foto Ministero dell'Educazione e della Sanità, 1939, Le Corbusier e Niemeyer, tratto da Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche</i>	44
<i>Figura 38:a- Palazzo dei filatori vista esterna, tratto da Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche; b-Palazzo dei filatori vista interna, tratto da Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche</i>	45
<i>Figura 39:a- Times Building, New York, tratte da <a href="http://www.fondazionerenzopiano.org">www.fondazionerenzopiano.org</a>; b-Times building, New York, vista dall'interno, tratta da <a href="http://www.fondazionerenzopiano.org">www.fondazionerenzopiano.org</a></i>	46
<i>Figura 40:a- Istituto Mondo Arabo, Parigi, tratto da Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche; b- Istituto Mondo Arabo, Parigi, particolare modulo vetrato, tratto da Schermature solari: evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche</i>	47
<i>Figura 41:Rappresentazione schematica classificazione facciate adattive, tratto da Design approaches and typologies of adaptive facades: A review</i>	48
<i>Figura 42:Immagine facciata ICT-Media, Barcellona, 2007, tratto da Design approaches and typologies of adaptive facades: A review</i>	51
<i>Figura 43:Immagine facciata museo dei bambini, Pittsburgh, 2004, tratto da Design approaches and typologies of adaptive facades: A review</i>	51
<i>Figura 44:a- The Movarian Library vista facciata, Brno, 2001, tratto da Design approaches and typologies of adaptive facades: A review; b- Dettaglio facciata doppia pelle, tratto da Design approaches and typologies of adaptive facades: A review</i>	52
<i>Figura 45:a- Facciata Kiefer Technic Showroom, Austria, 2007, tratto da Design approaches and typologies of adaptive facades: A review; b- Kiefer Technic Showroom dettaglio pannelli, 2007, tratto da Design approaches and typologies of adaptive facades: A review</i>	53
<i>Figura 46:a- Foto facciata The Bloom, Los Angeles, 2012, tratto da Design approaches and typologies of adaptive facades: A review; b- Dettaglio elementi di schermatura, tratto da Design approaches and typologies of adaptive facades: A review</i>	54
<i>Figura 47:Schematizzazione studio biomimesi</i>	56
<i>Figura 48:Sezione tipica di un modulo fotovoltaico in silicio cristallino</i>	65
<i>Figura 49:Rappresentazione confronto tra inclinazione e orientamento del pannello</i>	67
<i>Figura 50:Unità HiLo NEST, 2021, Zurigo, tratto da <a href="https://systems.arch.ethz.ch/demonstrators/nest-hilo">https://systems.arch.ethz.ch/demonstrators/nest-hilo</a></i>	70
<i>Figura 51:Vista facciata adattiva, tratto da <a href="https://systems.arch.ethz.ch/demonstrators/nest-hilo">https://systems.arch.ethz.ch/demonstrators/nest-hilo</a></i>	70
<i>Figura 52:Rendering del telaio e della rete metallica, tratto da "The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes"</i>	72
<i>Figura 53:Vincoli di movimento del pannello rispetto alla struttura, tratto da "Performative design environment for kinetic photovoltaic architecture"</i>	72
<i>Figura 54:a- Attuatore sgonfio, b,c,d rispettivamente con la 1a,2a,3a camera gonfiata, tratto da "The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes"</i>	73
<i>Figura 55:Prototipo dell'attuatore pneumatico, tratto da " NEST HiLo: Investigating lightweight construction and adaptive energy systems"</i>	73
<i>Figura 56:Foto uffici con applicazione frangisole fotovoltaico, Linz, Austria, 1999</i>	74
<i>Figura 57:Schematizzazione sistema frangisole, tratto da <a href="http://www.coltgroup.com">www.coltgroup.com</a></i>	74
<i>Figura 58:Schematizzazione sistema frangisole, tratto da <a href="http://www.coltgroup.com">www.coltgroup.com</a></i>	74
<i>Figura 59:Rappresentazione meccanismo movimento termo-idraulico, tratto da <a href="http://www.coltgroup.com">www.coltgroup.com</a></i>	75
<i>Figura 60:Schema del sistema di facciata con integrazione di frangisole fotovoltaico</i>	76
<i>Figura 61:Diagramma della lama parasole</i>	77
<i>Figura 62:Schema del sistema di autotrasmissione</i>	77
<i>Figura 63:Rappresentazione sistema energetico</i>	78
<i>Figura 64:Rappresentazione prototipo Pho'liage in configurazione aperta e chiusa</i>	80

<i>Figura 65:Rappresentazione sistema con integrazione di celle fotovoltaiche, in configurazione aperta e chiusa</i>	<i>80</i>
<i>Figura 66:Dettaglio collegamento della cella fotovoltaica</i>	<i>81</i>