



POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
ARCHITETTURA PER LA SOSTENIBILITÀ

Anno Accademico 2023 - 2024

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

L'INVOLUCRO ADATTIVO IN ARCHITETTURA

una proposta per la "Manica Nuova" presso la sede "Castello del Valentino" del
Politecnico di Torino.

Relatore

Prof. Valentino Manni

Candidato

Franco Caiozzi

Correlatore

Prof. Rossella Taraglio

Prof. Gabriele Piccablotto

Ogni passo della mia vita lo devo alle persone che mi hanno sostenuto incondizionatamente. Il loro affetto e amore mi hanno dato il coraggio di seguire ogni intuizione che ho sentito.

Sono profondamente grato alla mia famiglia, che mi ha sempre incoraggiato a guardare avanti: Andrea, Aldo, Piero, Lia e Angella.

Un ringraziamento speciale va ai miei amici, Fafi, Vicho, Santi e Paolo, che mi sono stati accanto nelle mie decisioni.

Esprimo la mia sincera gratitudine al professor Valentino Manni per la sua gentilezza e pazienza nel guidarmi durante l'ultima fase del mio percorso accademico, e ai professori Rossella Taraglio e Gabriele Piccablotto per aver dedicato il loro tempo al mio lavoro.

Infine, desidero ringraziare Asaggio per aver riposto fiducia in me, offrendo un'opportunità fondamentale per i miei passi futuri.

Riconosco che la più grande lezione appresa nel mio percorso formativo è stata quella di imparare ad ascoltare e seguire il mio cuore.

Indice

INTRODUZIONE	5
I INQUADRAMENTO.....	9
1.1 Obiettivi verso uno sviluppo sostenibile e impatto del settore edilizio sull'energia e sull'ambiente.....	9
1.1.1 Tendenze nel consumo energetico e nelle emissioni di gas serra degli edifici	11
1.1.2 Analisi del parco edilizio Europeo	13
1.2 Involucro architettonico, normativa e sostenibilità	16
1.2.1 Evoluzione della normativa energetica nell'edilizia	17
1.2.2 Evoluzione delle funzioni e prestazioni energetiche dell'involucro architettonico	17
1.3 Evoluzione dell'involucro verso l'efficienza energetica	20
1.4 Dinamismo architettonico e involucro adattivo.....	22
1.5 Involucro adattivo.....	25
II INTERAZIONE CLIMA, TEMPO E ARCHITETTURA	28
2.1 Dati climatici	28
2.2 Radiazione solare e sistemi di controllo	29
2.2.1 Energia solare sulla superficie.....	30
2.2.2 Effetto termico delle finestre	31
2.2.3 Sistemi di ombreggiamento	34
2.3 Temperatura dell'aria	37
2.4 Velocità del vento e ventilazione naturale.....	39
2.5 Umidità dell'aria e piovosità	39
2.6 Benessere termico e visivo	41
2.6.1 Benessere termico-igrometrico.....	42
2.6.2 Benessere visivo	43
2.7 Involucro e bilancio energetico	44
2.8 Il fattore tempo	45
III LE NUOVE TECNOLOGIE PER L'ARCHITETTURA ADATTIVA	47
3.1 Definizione e classificazione dell'involucro adattivo	47
3.1.1 Sfide nella classificazione dell'involucro adattivo.....	51
3.1.2 Approccio per la classificazione dell'involucro adattivo	52
3.2 Classificazione dell'involucro adattivo	53
3.2.1 Materiali adattivi.....	53
3.2.2 Vetro termocromico ed elettrocromico, esempi di materiali adattivi.....	54
3.2.3 Componenti adattivi	56
3.2.4 Sistemi adattivi	57
3.3 Casi studio di involucro adattivo	58
3.3.1 Caso studio: Arab world institute	58

3.3.2 Caso studio: Media TIC-Building	62
3.3.3 Caso studio: Al Bahar Towers.....	65
3.3.4 Caso studio: The Design Hub Façade	68
3.3.5 Caso studio: Kiefer Technic Showroom.....	71
IV PROPOSTA PER LA “MANICA NUOVA” PRESSO LA SEDE “CASTELLO DEL VALENTINO” DEL POLITECNICO DI TORINO	74
4.1 Indagine sperimentale “Manica Nuova” presso la sede “Castello del Valentino” del Politecnico di Torino e studio del contesto climatico della zona di progetto.....	79
4.2 Prima analisi: misure puntuali	81
4.2.1 Scelta dei punti da rilevare:	82
4.2.2 Strumenti: Igrometrico-termometro digitale HD8901.....	85
4.2.3 Risultati ottenuti	85
4.3 Seconda analisi: monitoraggio termoigrometrico.....	87
4.3.1 Posizionamento dello strumento.....	87
4.3.2 Strumento di misura: Hanwell ML4106 data logger.....	88
4.3.3 Risultati ottenuti	89
4.3.4 Considerazioni sintetiche finali e conclusione dell’indagine sperimentale...	90
4.4 Contesto climatico, studio dei fattori climatici rilevanti per l’ottenimento del benessere termico igrometrico.....	91
4.5 Castello del Valentino, contesto storico e culturale della zona di progetto.....	95
4.6 Studio del nodo progetto - facciata.....	97
4.7 Scelta della risposta adattiva.....	100
4.7.1 Proposta 1	102
4.7.2 Proposta 2	103
4.7.3 Proposta 3	106
4.7.4 Studio dell’irraggiamento solare sull’involucro verticale della “Manica Nuova” e le diverse proposte progettuali.	108
4.7.5 Sviluppo del modulo adattivo.....	114
4.8 Conclusioni e discussione tesi	119
4.8.1 Futuro dell’involucro adattivo	120
Bibliografia.....	121

INTRODUZIONE

Questa Tesi ha l'obiettivo di studiare gli involucri adattivi in ambito tecnologico/ambientale e il potenziale beneficio che essi possono apportare al settore delle costruzioni nell'ambito dell'efficienza energetica, costruzioni a basso impatto ambientale e raggiungimento del comfort ambientale degli spazi interni. Situato in un contesto in cui l'emergenza ambientale è diventata una delle principali questioni da affrontare nel mondo delle costruzioni. La tesi si propone di concludere con lo sviluppo di un progetto pratico sulla facciata di un edificio esistente; la “Manica Nuova” presso la sede “Castello del Valentino” del Politecnico di Torino.

INQUADRAMENTO

A tal fine, la ricerca inizia la prima parte della Tesi con l'ipotesi di un mondo in cui il settore delle costruzioni è responsabile di gran parte delle emissioni di CO₂ e del consumo energetico globale. Si stima, inoltre, che l'edilizia esistente, a livello globale, corrisponda a quasi la metà di quella che sarà nel 2050. Per questo motivo la prima parte della ricerca si concentra sullo stabilire l'importanza della crisi ambientale con il settore delle costruzioni, sia a livello europeo che mondiale.

Una volta confermata l'influenza dell'architettura nel contesto ambientale, il documento cerca di stabilire l'impatto dell'involucro architettonico come uno dei principali fattori nel consumo energetico degli edifici, senza trascurare le emissioni e i consumi della loro costruzione.

Per fare ciò viene effettuato uno studio sull'evoluzione formale e funzionale dell'involucro architettonico, evidenziando come la forma sia strettamente correlata alla funzione. Si cerca infatti di raccontare come diverse funzioni attribuite all'involucro, come ad esempio essere una barriera che regola il flusso energetico dell'edificio, siano state trasferite a diversi sistemi esterni ad esso, come i sistemi di riscaldamento, ventilazione o condizionamento dell'aria (HACV sistemi) consentendo nuove funzioni legate più al campo estetico/compositivo che a quello energetico.

Lo sviluppo storico dell'involucro porterà all'individuazione di momenti chiave, dall'architettura vernacolare ai massicci edifici preindustriali. Una volta arrivata la rivoluzione industriale insieme alle nuove tecnologie costruttive, si concepirà un nuovo modo di interpretare l'involucro, che così non è stato prendere in considerazione il fattore energetico come risorsa limitata. Essa culminerà, infatti, con l'arrivo della prima crisi energetica (o crisi petrolifera) nel 1973 e di quella successiva nel 1979, che segneranno un cambiamento nella prestazione energetica del sistema edilizio, e di conseguenza nell'involucro architettonico.

Dopo la crisi energetica, e con l'evolversi delle normative e degli interessi ambientali, l'intervento architettonico recupera ancora una volta la sua funzione di regolatore dei flussi energetici, cercando non solo di mitigare le differenze tra l'ambiente interno ed esterno, ma anche di adottare strategie che consentano l'incorporazione di fattori climatici che favoriscono l'ottenimento di condizioni ambientali interne desiderabili.

Si cercherà quindi di introdurre il fattore tempo nell'architettura, creando una componente dinamica con nuovi modi di interpretare l'architettura. Sebbene gli esordi dell'architettura in movimento corrispondano solo a sistemi teorici che poi, nella

pratica, implicano più una soluzione compositiva che energetica, inizieranno a delinearci nuove linee guida che adottano il movimento all'interno dell'architettura come un nuovo strumento che consente di valorizzare la fruizione di strategie volte ad una maggiore efficienza energetica e alla riduzione dell'impatto ambientale.

In effetti, l'architettura dinamica culmina in un nuovo sottogruppo concepito come architettura adattiva. Il termine adattivo, essendo un concetto ancora piuttosto ambiguo, può essere interpretato nell'ambito della sostenibilità come una soluzione che consente al sistema edilizio di rispondere e reagire a fattori esterni con l'obiettivo di migliorare la prestazione energetica del sistema allo stesso tempo ridurre le emissioni di CO₂ della propria costruzione.

In questo modo si introduce l'involucro climatico-adattivo, capace di reagire ai fattori climatici, come la radiazione solare, la temperatura dell'aria, il vento, ecc. che definiscono l'ambiente esterno, e formulano una risposta che si concretizza in un cambiamento all'interno della morfologia dell'intervento stesso con l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica dell'intero sistema edilizio.

Infatti, l'involucro adattivo rappresenta oggi un'opportunità per migliorare la situazione attuale dell'architettura nel contesto ambientale, senza trascurare le opportunità dal punto di vista compositivo dell'architettura, consentendo di conferire maggiore complessità all'involucro e attribuendo maggiori funzioni e benefici.

INTERAZIONE CLIMA, TEMPO E ARCHITETTURA

Il secondo capitolo di questa tesi si propone di studiare le potenzialità dell'involucro adattivo attraverso il campo energetico-ambientale. Per stabilire una relazione tra clima, architettura ed esseri umani, cerchiamo di studiare ciascuno dei fattori di ciascun concetto, cercando di sintetizzare e far convergere ogni elemento nell'involucro adattivo.

La prima parte di questo capitolo studierà i fattori climatici che sono interessanti nel campo dell'architettura adattiva. Questi fattori sono principalmente la radiazione solare, la temperatura dell'aria, la velocità del vento, l'umidità dell'aria e le precipitazioni. Sebbene esistano molti fattori climatici che variano a seconda della regione in cui si studia il clima, i fattori principali sono quelli menzionati in precedenza. Questi fattori stabiliscono anche le principali linee guida per le strategie passive, che cercano di adottare questi fattori come soluzioni che migliorano l'efficienza energetica del sistema edilizio. Al termine di ciascun fattore climatico si considererà di stabilire una relazione con l'involucro adattivo attraverso un esempio e un paragrafo conclusivo, in modo che si stabilisca una chiara relazione clima-architettura-adattabilità.

Tuttavia, lo scopo finale della climatizzazione degli ambienti, e per cui si creano differenze ambientali tra spazi interni ed esterni, è quello di ottenere il benessere degli utenti che abitano gli spazi. Cioè, l'involucro adattivo, oltre a migliorare l'efficienza energetica degli edifici, cerca di raggiungere livelli adeguati di benessere all'interno dell'ambiente costruito.

Per questo motivo la seconda parte del capitolo si concentra sulla determinazione del comportamento tra gli esseri umani e l'ambiente che li circonda. Tale comportamento definisce i parametri e le condizioni necessarie al mantenimento degli indici di benessere umano. Sebbene gli stati di comfort siano vari e le risposte fisiologiche siano attribuite a diversi fattori, questo capitolo cerca principalmente di determinare le condizioni di benessere termico e visivo, dato che sono le principali condizioni legate ai fattori climatici studiati e ai sistemi adattativi.

Una volta studiati i fattori climatici che determinano le condizioni dell'ambiente esterno, e le risposte fisiologiche del corpo umano, che definiscono le condizioni da mantenere nell'ambiente interno, è possibile determinare il bilancio energetico dell'edificio e il ruolo qualitativo dell'involucro adattivo come elemento regolatore dei flussi energetici, determinando la maggior parte del consumo energetico operativo dell'edificio.

Infine, in considerazione delle attuali situazioni di cambiamento climatico, l'involucro adattivo offre anche una soluzione resiliente alle avversità che i cambiamenti possono generare. Cioè, la variabilità climatica nel tempo potrebbe richiedere nuove funzionalità che potrebbero essere significative nello sviluppo di sistemi architettonici resilienti, in cui l'involucro adattivo trova un grande potenziale di sviluppo.

LE NUOVE TECNOLOGIE PER L'ARCHITETTURA ADATTIVA

Questo capitolo cerca di sviluppare il concetto di architettura adattiva dal campo tecnologico. Per fare ciò, cerchiamo di definire il concetto di involucro adattivo e la sua rispettiva classificazione tecnica. Tuttavia, la complessità e la novità di questo nuovo concetto presenta difficoltà nel dare definizioni chiare e precise.

Le aree con cui è correlata l'adattabilità dell'involucro sono numerose e, mentre alcune definizioni sono spesso considerate all'interno della maggior parte delle soluzioni adattive, a volte alcune tipologie di soluzioni adattive vengono trascurate dalla classificazione e non riescono ad essere incorporate all'interno di alcuna definizione stabilita.

Pertanto, questo capitolo cerca di stabilire una definizione e una classificazione flessibile, che consenta l'incorporazione di diverse discipline del campo adattivo, senza lasciare da parte la possibilità di aggiungere concetti e definizioni non ancora trattati dall'argomento.

Questa classificazione cerca di integrare diverse interpretazioni attribuibili ai sistemi adattivi, come i sistemi BPS (Building Performance Simulation) o gli schemi IPO (input-process-output), che consentono di sintetizzare la complessità delle discipline correlate all'interno della stessa metodologia che le fa convergere e consente di dare una risposta secondo i parametri integrati.

La classificazione si basa su un sistema di tre componenti principali; materiali, componenti e sistemi adattivi. Queste componenti possono essere indipendenti o correlate tra loro, quindi una componente adattiva può presentare materiali adattivi, oppure potrebbe non presentarsi, ma essere comunque una componente adattiva. Allo stesso modo, la componente adattiva può far parte o meno di un sistema adattivo, dato che il carattere adattivo non dipende dalla sua forma o composizione, ma dalla sua funzione.

Con l'obiettivo di presentare esempi pratici di soluzioni adattive che utilizzano materiali, componenti e/o sistemi adattivi, vengono realizzati diversi casi di studio, analizzando quelli più rilevanti e utili al fine di contribuire allo sviluppo di una proposta di modulo adattivo nella "Manica Nuova" presso la sede "Castello del Valentino" del Politecnico di Torino.

PROPOSTA DI MODULO ADATTIVO PER LA "MANICA NUOVA" PRESSO LA SEDE "CASTELLO DEL VALENTINO" DEL POLITECNICO DI TORINO

L'ultimo capitolo di questa tesi cerca di concludersi con un progetto pratico al fine di verificare la fattibilità e le potenzialità di un involucro adattivo. Realizzare cioè un

progetto pratico sulla facciata di un edificio esistente per migliorarne l'efficienza energetica e raggiungere il benessere degli spazi interni, permetterà di concludere quanto sia fattibile, dal punto di vista tecnologico, realizzare interventi di carattere energetico ambientale.

Il progetto è presentato in un edificio con un contesto storico e culturale di alto valore, che influenzerà notevolmente le soluzioni adottate. Inoltre, i limiti urbanistici (limiti patrimoniali) in cui l'intervento comportano l'utilizzo di soluzioni che non intervengono prevalentemente sull'edilizia esistente. Per questi motivi lo sviluppo del progetto è limitato da diversi fattori, che ne restringono le potenzialità funzionali a fronte della forte influenza del contesto.

Tuttavia, ciò rappresenta, se la proposta adottata è vantaggiosa, una maggiore opportunità dimostrando che i sistemi adattivi possono essere implementati in condizioni così limitanti. Infatti, gran parte del settore edilizio europeo è rappresentato da vecchi edifici, quindi questo progetto può essere un esempio tra i tanti interventi di riqualificazione energetica che possono essere realizzati e che si trovano in condizioni progettuali simili.

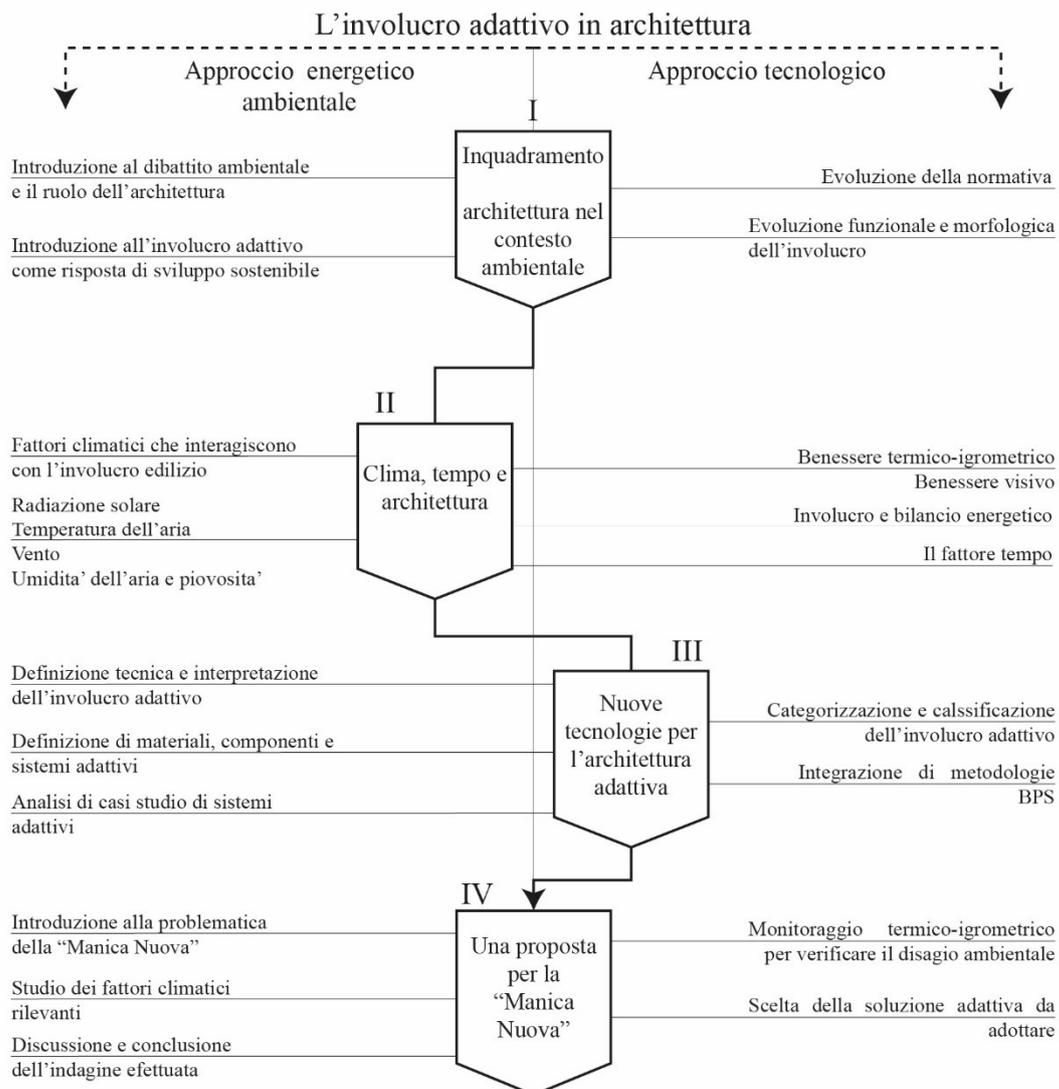


Figura 1 Schema del percorso nel quale si svolge la tesi. Ulteriore approfondimento della proposta per la "Manica Nuova" nel capitolo IV, pagine 77-78. Fonte: elaborazione propria, 2024

I INQUADRAMENTO

Negli ultimi decenni il ruolo dell'architettura all'interno dell'emergenza ambientale è stato sempre più studiato. Si stima che le emissioni di carbonio e il consumo di energia nel settore dell'edilizia siano elevati, il che potrebbe offrire diverse opportunità per contribuire allo sviluppo sostenibile attraverso la progettazione di una buona architettura.

Tuttavia, è necessario formulare un ragionamento critico sull'argomento. Sebbene l'architettura possa presentare opportunità, occorre studiare sotto quali aspetti tali opportunità si presenterebbero per promuovere lo sviluppo sostenibile.

Per comprendere il potenziale dell'involucro adattivo nello sviluppo dell'architettura sostenibile, è necessario capire in quali ambiti può essere utile e se, effettivamente, consentirebbe di ridurre le emissioni del sistema edilizio. Ad esempio, un'architettura adattiva che consenta di ridurre il consumo energetico di un edificio, ma presenti elevati costi di costruzione ed emissioni nell'ambiente, non rappresenterebbe una soluzione ottimale per lo sviluppo sostenibile.

Per questo motivo, lo sviluppo architettonico deve essere collocato nel contesto ambientale, nelle sue potenzialità, nelle opportunità e negli svantaggi del settore delle costruzioni, come è stato influenzato dalla crisi energetica e successivamente dalla crisi climatica e come l'adozione di strategie sostenibili può contribuire agli obiettivi di sviluppo sostenibile fissati dalle organizzazioni internazionali.

1.1 Obiettivi verso uno sviluppo sostenibile e impatto del settore edilizio sull'energia e sull'ambiente

L'involucro architettonico è strettamente correlato al consumo energetico dell'edificio. In questo contesto, esso può essere considerato come quella parte del sistema edilizio che separa e conforma l'edificio rispetto al contesto, ponendosi come elemento di separazione tra gli spazi interni e l'ambiente circostante. Una corretta progettazione dell'involucro è fondamentale per garantire elevate prestazioni energetiche, influenzando sul consumo energetico e contribuendo in modo significativo al risparmio energetico (Gaspari, 2020).

Come risulta da molti studi effettuati da diversi organismi internazionali come l'UE o l'ONU, l'impatto ambientale del settore edilizio si mostra abbastanza elevato, contribuendo in larga misura alle emissioni di CO₂ e rappresentando la destinazione di gran parte del consumo energetico attuale. In aggiunta, si stima che il patrimonio edilizio esistente potrebbe rappresentare solo la metà del settore edilizio del 2050, evidenziando l'importanza della costruzione di nuovi edifici e la sua potenzialità nell'impatto del settore edile dei prossimi anni.

Nell'attualità, l'efficienza energetica e l'uso di risorse energetiche rinnovabili sono al centro della transizione verso un'energia pulita. La Commissione Europea (2024) ha rivisto la direttiva sull'efficienza energetica, inizialmente adottata nel 2012, pubblicando la nuova direttiva riveduta sull'efficienza energetica nel 2023 (UE/2023/1791), con l'obiettivo di garantire una riduzione delle emissioni di gas serra di almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990. Il principio fondamentale della politica energetica, come indicato dalla Commissione, si basa sull'efficienza energetica, con l'obiettivo di ridurre

il consumo energetico dell'11,7% entro il 2030, raddoppiando l'obbligo annuo di risparmio energetico in settori quali l'edilizia, l'industria e i trasporti.

In ambito UE, secondo i rapporti della Commissione Europea (2024) relativi al 2021, il settore edile è responsabile del 42% del consumo finale di energia e produce circa un terzo di tutte le emissioni di gas serra. Inoltre, circa l'80% di questa energia è utilizzata per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti, nonché per la produzione di acqua calda sanitaria. A livello globale, la situazione del settore non è molto diversa.

L'Organizzazione delle Nazioni Unite mira, entro il 2030, ad aumentare l'uso di energie rinnovabili rispetto ad altre fonti di energia, raddoppiare il tasso globale di miglioramento dell'efficienza energetica e garantire l'accesso a servizi energetici convenienti, affidabili e moderni, al fine di soddisfare l'obiettivo 7 degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG 7) (ONU, 2024).

Inoltre, il Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite (UNEP) (2024) segnala che globalmente il 37% delle emissioni di CO₂ legate all'energia e ai processi e oltre il 34% della domanda di energia totale corrisponde al settore edilizio. L'UNEP indica che, secondo il Panel Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC), il settore edilizio potrebbe ridurre fino al 90% delle emissioni di gas serra nei paesi sviluppati e circa l'80% nei paesi in via di sviluppo.

Per di più, come indicato dall'UNEP (2024): *"La metà degli edifici che esisteranno nel 2050 non sono ancora stati costruiti..."*, evidenziando il potenziale e inevitabile contributo del settore delle nuove costruzioni nel contesto ambientale dei prossimi anni. Questo sottolinea non solo l'importanza della riduzione del consumo energetico degli edifici, ma anche la necessità di diminuire le emissioni legate alla realizzazione di nuovi progetti.

Diventa quindi evidente l'impatto ambientale dell'architettura sia a livello europeo che globale e al potenziale contributo che essa potrebbe dare alla riduzione delle emissioni di CO₂ dovute al consumo energetico degli edifici e alle emissioni prodotte per la costruzione di nuovi edifici.

In merito al contributo prevedibile dell'efficienza energetica del settore edile, l'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA) illustra le tendenze e gli indicatori dell'efficienza energetica in Europa attraverso l'indice di efficienza energetica (energy efficiency index, ODEX). Per quanto riguarda il settore residenziale, la valutazione si basa sul consumo finale di diversi impieghi, tra cui il riscaldamento, misurato come unità di consumo per metro quadrato (toe/m²). Questa stessa misura viene utilizzata anche per la climatizzazione nel settore dei servizi, mentre l'uso dei dispositivi elettrici (illuminazione e sistemi HVAC) viene misurato in kWh/anno/apparecchio. In questo modo è possibile valutare l'impatto del settore edilizio attraverso appositi grafici:

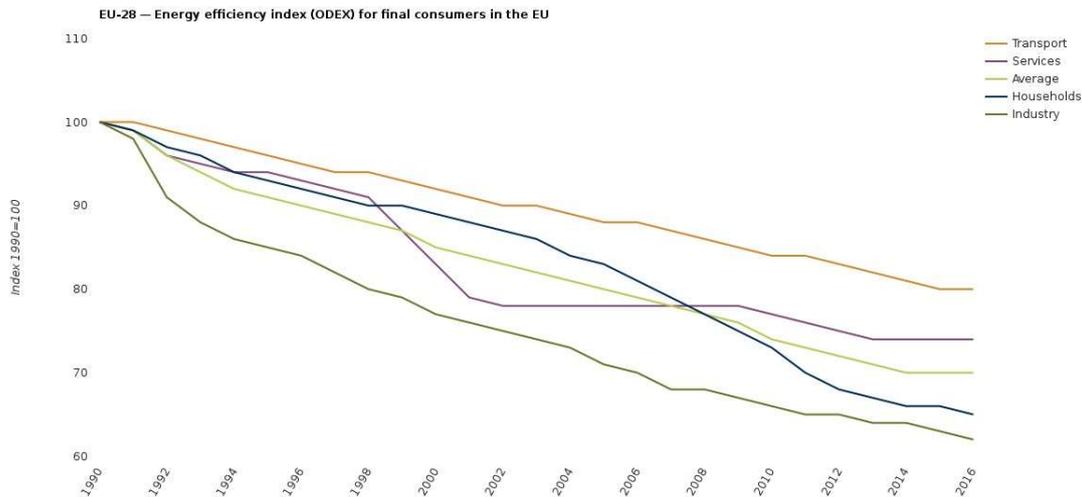


Figura 2 Indice di efficienza energetica (ODEX) per il consumo finale in Europa. Fonte: European Environment Agency (EEA), "Energy efficiency index (ODEX) for final consumers in the EU" (2024)

L'ODEX mostra un miglioramento complessivo dell'efficienza energetica in Europa del 30% (1,4% annuo), nel settore residenziale del 35% (1,6% annuo) e nel settore dei servizi del 26% (circa 1,0% annuo). Gran parte di questo miglioramento è attribuibile al progresso nell'efficienza del riscaldamento. Infatti, Gaspari (2020) indica che i requisiti energetici introdotti dalle direttive europee (Ecodesign, EPBD, Effort Sharing Decision ed Energy Efficiency Directive) hanno portato a un miglioramento dell'efficienza del 2,4% annuo dal 2005 (rispetto al miglioramento del 1,4% annuo dal 1990 al 2005).

Si può concludere che a partire dal 1990 si è confermato un miglioramento dell'efficienza energetica dei diversi settori in Europa; nondimeno, questi progressi non sono sufficienti per raggiungere gli obiettivi proposti per il 2050, richiedendo per i prossimi anni uno sviluppo ancora maggiore che trova grandi potenzialità nel settore delle costruzioni.

A tal proposito, l'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA) ha recentemente pubblicato che il settore edilizio in Europa è per lo più rappresentato da edifici vecchi, con circa il 75% degli edifici che sono inefficienti dal punto di vista energetico. Si stima che almeno l'85% del settore sarà ancora in uso nel 2050 e che il progresso nella ristrutturazione energetica degli edifici sia abbastanza lento.

Nonostante tutto, le emissioni di CO₂ del settore edilizio sono estremamente locali e dipendono in gran parte dal contesto geoclimatico in cui si trovano. In conseguenza i progetti che migliorano l'efficienza energetica del settore possono portare a soluzioni totalmente vari ed eterogenei. È quindi interessante approfondire e determinare quali siano le cause degli elevati consumi finali degli edifici.

1.1.1 Tendenze nel consumo energetico e nelle emissioni di gas serra degli edifici

Nel seguente grafico (Figura 3) vengono presentati i risultati relativi al consumo energetico per il riscaldamento nel settore residenziale, ottenuti tramite l'analisi di ODYSSEE¹ (2024). È da notare che nei paesi nordici il consumo energetico per il

¹ Base di dati gestita da Enerdata che contiene indicatori dettagliati di efficienza energetica e CO₂ con dati sul consumo energetico, i loro fattori determinanti (indicatori di attività) e le relative emissioni di CO₂

riscaldamento risulta essere significativamente superiore, principalmente a causa delle condizioni climatiche avverse: le temperature più basse durante l'inverno richiedono un maggiore utilizzo di energia per garantire il comfort termico, rispetto ai paesi del sud dell'Europa.

Questa disparità diventa evidente nei confronti di nazioni come Spagna, Cipro e Grecia, dove il potenziale di efficienza energetica nel riscaldamento è notevolmente inferiore rispetto ai paesi nordici come Estonia, Romania e Polonia.

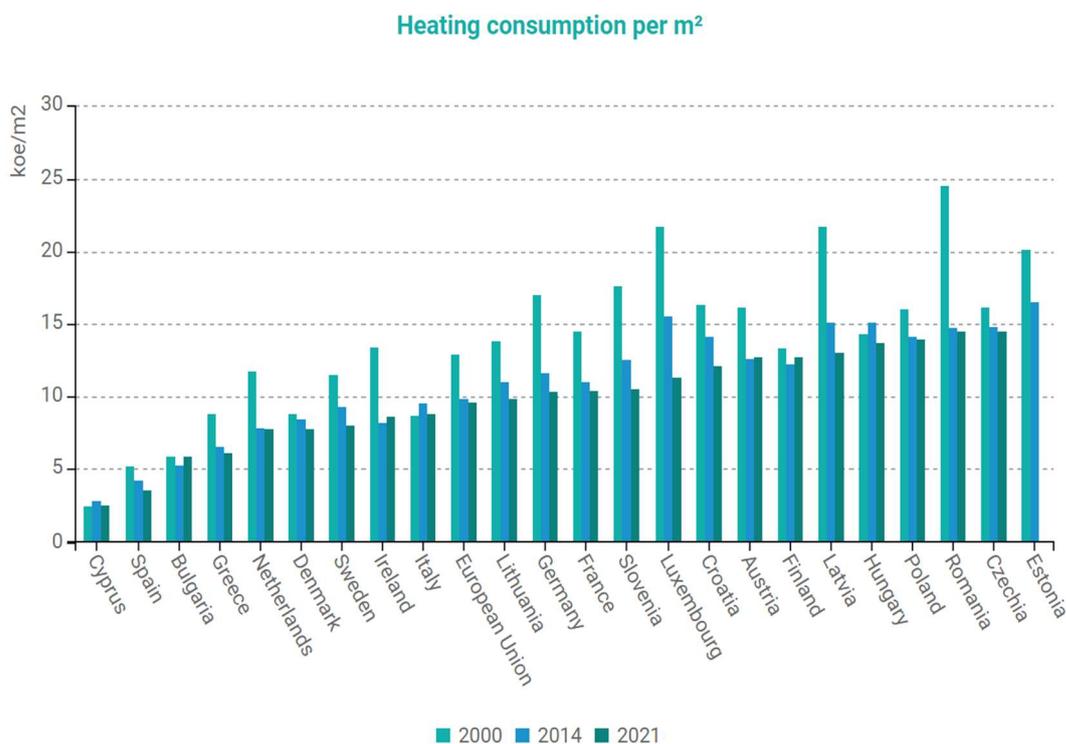


Figura 3 Consumo energetico per riscaldamento in Europa per metro quadro (superiore) e per abitazione (inferiore). Fonte: ODYSSEE-MURE, "Heating consumption per m² and per dwelling" (2024)

Il consumo energetico per il riscaldamento è misurato in chilogrammi di petrolio equivalente (kep, o koe in inglese) per metro quadrato e per abitazione. Si osserva una riduzione media in Europa del consumo energetico per il riscaldamento del 1,4% per ogni metro quadrato di abitazione, con una riduzione maggiore fino al 2% in paesi come Lussemburgo, Romania, Slovenia, Germania, ecc. Come accennato in precedenza, i paesi nordici presentano una notevole differenza di consumo rispetto ai paesi del sud, circa 15 koe/m² contro i 5 koe/m² rispettivamente, differenza dovuta alle diverse condizioni climatiche di ogni paese.

D'altra parte, secondo l'EEA (2023) le emissioni di gas serra nel settore edilizio dovute al consumo energetico hanno registrato una diminuzione del 31% tra il 2005 e il 2021 (Figura 4). Questo progresso è attribuibile agli standard di efficienza energetica per i nuovi edifici, alla ristrutturazione di quelli esistenti, alla decarbonizzazione dell'energia e del riscaldamento, nonché all'aumento delle temperature durante l'inverno.

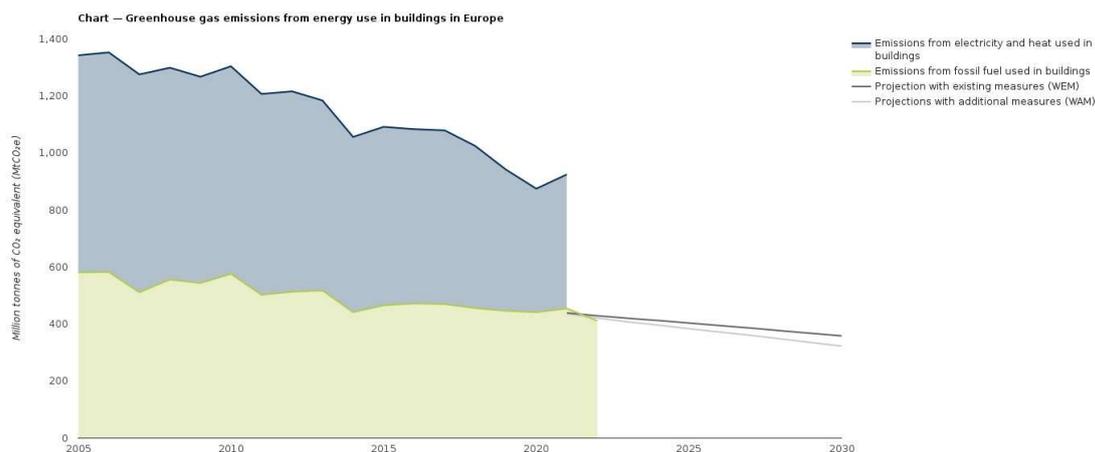


Figura 4 Emissioni di gas serra derivanti dal consumo energetico degli edifici. Fonte: European Environment Agency (EEA), “Greenhouse gas emissions from energy use in buildings in Europe” (2023)

È importante notare che l'aumento del consumo a partire dal 2021 è dovuto alla ripresa economica dalla pandemia da Covid-19 e all'inverno relativamente freddo di quell'anno ma che si prevede una diminuzione delle emissioni nei prossimi anni. Tuttavia, la previsione di riduzione delle emissioni di gas serra non è sufficiente per raggiungere una riduzione del 55% rispetto al 1990 entro il 2030. L'EEA suggerisce che il tasso di riduzione dovrebbe raddoppiare dall'attuale 1% annuo a un 2% annuo nei settori residenziale e non residenziale al fine di raggiungere gli obiettivi per il 2030 (indicando una riduzione del 60% rispetto ai livelli del 2015).

1.1.2 Analisi del parco edilizio Europeo

Il parco edilizio attuale è costituito da edifici che sono stati costruiti in periodi diversi. Il grafico successivo (Figura 5) mostra la data di costruzione degli edifici nel settore residenziale e dei servizi. Il 31% degli edifici residenziali costruiti prima del 1945 costituisce la maggior parte della percentuale, seguito dal 20% di edifici costruiti tra il 1945 e il 1969, il che significa che gli edifici di carattere storico rappresentano circa il 51% del totale, mentre gli edifici costruiti tra il 1970 e il 1999 coprono il 21%. Al contrario, gli edifici nuovi, costruiti tra il 2000 e il 2010, rappresentano il 16% della percentuale, mentre quelli costruiti dopo il 2010 rappresentano solo il 12% degli edifici totali nel settore residenziale in Europa.

Il grafico evidenzia una tendenza significativa alla diminuzione degli edifici di nuova costruzione, fenomeno attribuibile all'incremento delle costruzioni nel dopoguerra e alla successiva ristrutturazione delle abitazioni nei decenni successivi.

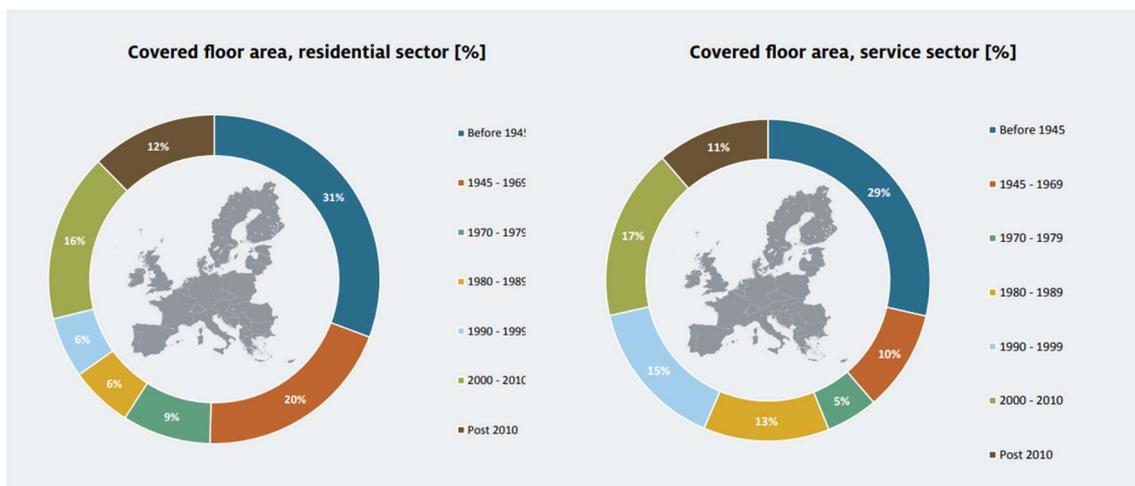


Figura 5 Distribuzione della superficie del patrimonio edilizio nell'EU27+UK nel settore residenziale e di servizi. Fonte: "European building stock analysis – A country by country descriptive and comparative analysis of the energy performance of buildings" (2021)

Si osserva una distribuzione simile nel settore dei servizi, con una minore percentuale di edifici costruiti prima del 1970 (39% rispetto al 51% nel settore residenziale) e una maggiore percentuale tra gli anni '80 e '90.

La distribuzione per fasce di età degli edifici è di grande importanza quando si analizza l'efficienza energetica del settore delle costruzioni poiché si dimostra una forte diminuzione dei consumi finali degli edifici con l'avanzare dell'anno di costruzione in cui sono stati edificati (Figura 6).

Passando da un consumo per riscaldamento di 252 kWh/m²a per gli edifici costruiti prima del 1945 a 125 kWh/m²a per quelli costruiti tra il 2000 e il 2010, con un ulteriore calo a 99 kWh/m²a per quelli costruiti dopo il 2010. In modo analogo, anche nel settore dei servizi si è registrata una diminuzione del consumo per riscaldamento.

Questi risultati evidenziano che, per gli edifici di nuova costruzione, sia nel settore residenziale che in quello dei servizi, il consumo energetico per il riscaldamento raggiunge livelli di efficienza energetica simili. Al contrario, gli edifici storici, che costituiscono una parte significativa del patrimonio edilizio, presentano una notevole disparità nei consumi energetici finali. Tuttavia, tali risultati sottolineano la crescente necessità di migliorare l'efficienza energetica degli edifici storici al fine di avvicinarli ai livelli di consumo energetico degli edifici di nuova costruzione.

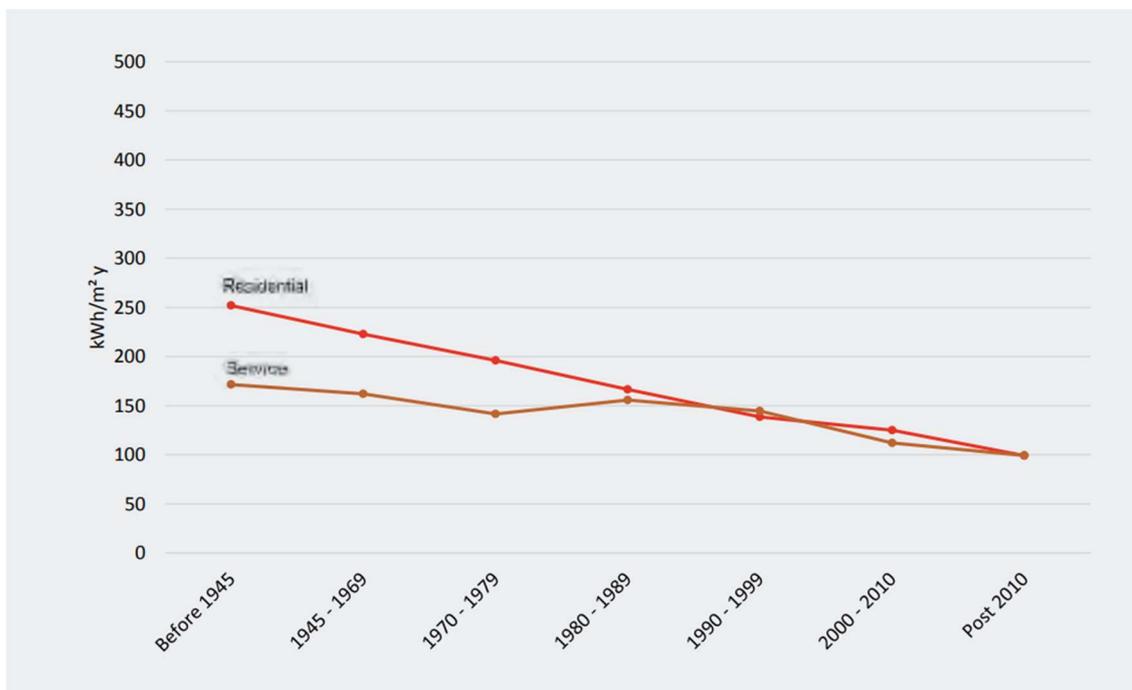


Figura 6 Sviluppo nel settore residenziale e di servizi in Europa del consumo energetico finale per riscaldamento e acqua calda, espresso in kilowatt ore su metro quadro per anno (kWh/m²a). Fonte: “European building stock analysis – A country by country descriptive and comparative analysis of the energy performance of buildings” (2021)

Dall'altra parte, il grafico sottostante (Figura 7) rappresenta il consumo energetico finale destinato al raffreddamento degli spazi in Europa. I risultati mostrano che nel settore residenziale il consumo energetico è di 14 kWh/m²a per gli edifici costruiti prima del 1945, con un aumento fino a 18 kWh/m²a negli edifici costruiti tra gli anni '40 e '60, ma una diminuzione fino alla condizione attuale, dove gli edifici più recenti presentano un consumo medio di 13 kWh/m²a.

Per contro, nel settore dei servizi i consumi sono significativamente più elevati rispetto al settore residenziale, con un consumo di 32 kWh/m²a per gli edifici storici, che diminuisce a 29 kWh/m²a per gli edifici degli anni '70. Nonostante ciò, dai '80 fino al 2000, si osserva un aumento del consumo energetico per il raffreddamento fino a 42 kWh/m²a, seguito da una diminuzione fino alla situazione attuale, con edifici di nuova costruzione che presentano una media di 32 kWh/m²a.

È importante sottolineare che il consumo energetico finale per il riscaldamento costituisce la maggior parte del consumo energetico totale, pari a 3280 TWh/anno, rispetto al consumo per il raffreddamento, che ammonta a 107 TWh/anno (Gevorgian et al, 2021). Tuttavia, va notato che il consumo per il raffreddamento è in aumento a causa delle temperature estive in aumento, mentre quello per il riscaldamento è in diminuzione a causa dell'aumento delle temperature invernali. Inoltre, le condizioni climatiche di ciascun paese influenzano significativamente il consumo energetico destinato al riscaldamento o al raffreddamento degli spazi, determinando variazioni eterogenee nel consumo energetico medio dell'Unione Europea.

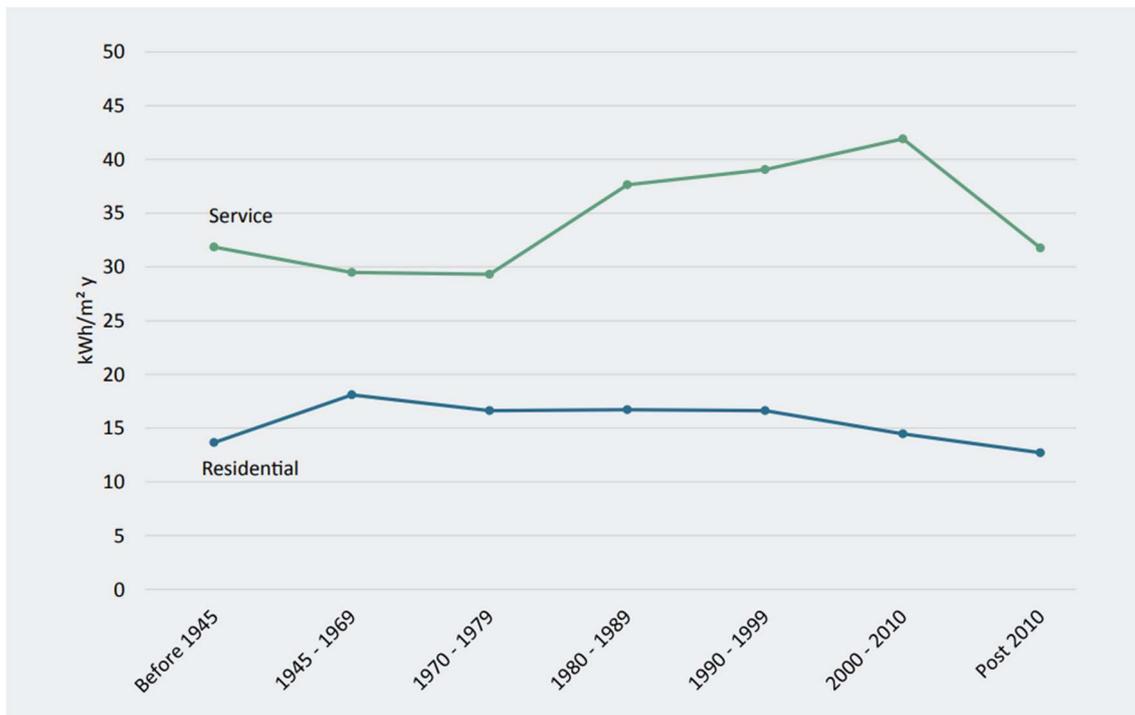


Figura 7 Sviluppo nel settore residenziale e di servizi in Europa del consumo energetico finale per raffrescamento degli spazi, espresso in kilowatt ore su metro quadro per anno (kWh/m²·a). Fonte: "European building stock analysis – A country by country descriptive and comparative analysis of the energy performance of buildings" (2021)

In conclusione, data la predominanza di edifici storici costruiti prima degli anni '70 (che costituiscono il 51% del totale residenziale e circa il 40% del settore dei servizi), è evidente la necessità di migliorare l'efficienza energetica di questi edifici.

L'involucro adattivo, quindi, potrebbe costituire una soluzione a basso impatto ambientale, grazie all'impiego di moduli adattivi che non solo non aumentano in modo eccessivo le emissioni ambientali, ma portano anche a una significativa riduzione del consumo energetico, migliorando allo stesso tempo il benessere degli spazi interni. Oltre alle strategie di isolamento e miglioramento del fabbisogno energetico per i periodi invernali, l'architettura adattiva potrebbe migliorare la prestazione energetica degli edifici durante i periodi in cui è richiesto il raffrescamento, riducendo il sovraccarico energetico durante tali periodi, sia nei nuovi progetti architettonici che nel patrimonio edilizio storico.

1.2 Involucro architettonico, normativa e sostenibilità

Il contributo del settore edile alle emissioni di CO2 legate alle costruzioni e al consumo di energia ha comportato la necessità di nuove soluzioni architettoniche sostenibili. Il problema sorto con la crisi energetica del 1973, e successivamente quella del 1979, ci ha permesso di osservare la vulnerabilità e la dipendenza energetica della società occidentale, rendendola conto dei problemi sociali e ambientali sorti con l'arrivo dell'industrializzazione, costringendola a smettere di considerare l'energia come una risorsa illimitata.

In architettura, l'evoluzione del dibattito ambientale ha avuto ricadute nello sviluppo di normative che hanno portato a una nuova nozione di involucro architettonico.

1.2.1 Evoluzione della normativa energetica nell'edilizia

Fabrizio Dellachà (2013) ci fa notare che le prime nozioni del concetto di "sviluppo insostenibile" hanno iniziato a prendere forma nel 1972 con il "Rapporto del Club di Roma", mentre quello di "sviluppo sostenibile" è stato introdotto nel 1987 con il "Rapporto Brundtland" (Our Common Future), che lo definisce come *“lo sviluppo in grado di soddisfare i bisogni della generazione presente senza compromettere quelli delle generazioni future.”*

A livello nazionale, la normativa sull'efficienza energetica è stata avviata con la **legge 373/76**, che ha introdotto i criteri sull'isolamento termico degli edifici e sulla progettazione degli impianti termici. In quanto indicato dalla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana (1976) questa legge si concentrava su tre aspetti principali: la progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici; l'isolamento termico degli edifici; e le sanzioni per la mancata osservanza. Questa legge mirava a ridurre il consumo energetico per il riscaldamento durante i mesi invernali e fu successivamente aggiornata e integrata, fino a confluire nel **D.lgs. 192/2005**, che recepisce le direttive europee in materia.

Per quanto riguarda la normativa europea nel settore edilizio, la Direttiva 93/76/CEE del Consiglio, nata nel 1993, ha dato vita al programma **SAVE**, volto a limitare le emissioni di CO₂ migliorando l'efficienza energetica. La direttiva richiedeva agli Stati membri di istituire programmi per la certificazione energetica degli edifici, l'isolamento termico e le diagnosi energetiche nelle imprese ad alto consumo energetico (Consiglio dell'Unione europea, 1993). Questi requisiti furono rafforzati con la "Energy Performance Building Directive" (**EPBD**) del 2002 e le sue successive revisioni del 2010 e 2018, che stabilirono metodologie per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici e imposero l'obbligo di certificazione energetica e di ispezioni periodiche degli impianti (Dellachà, 2013)..

In risposta alle direttive europee, l'Italia ha emanato il **D.lgs. 192/2005**, successivamente aggiornato dal **D.lgs. 311/06**, che introduceva l'obbligatorietà della Certificazione Energetica e promuoveva strategie passive per ridurre il consumo energetico, come l'uso di protezioni solari e l'impiego di energia solare per riscaldare una parte dell'acqua calda. Ulteriori aggiornamenti normativi, come il **D.lgs. 115/08** e il **DPR 59/09**, hanno orientato il mercato verso l'uso di energie rinnovabili e hanno consolidato le disposizioni obbligatorie in materia di efficienza energetica.

L'evoluzione delle normative ha evidenziato la crescente attenzione verso la sostenibilità, soprattutto nell'ambito dell'efficienza energetica e della riduzione delle emissioni di gas serra. Di conseguenza, l'involucro architettonico ha assunto un ruolo centrale, non solo separando gli spazi interni ed esterni, ma anche regolando il flusso energetico dell'edificio, influenzando in modo significativo la qualità e le prestazioni complessive.

1.2.2 Evoluzione delle funzioni e prestazioni energetiche dell'involucro architettonico

In modo analogo alla normativa energetica, la funzione dell'involucro si è evoluta nel corso della storia dell'umanità, essendo essenzialmente l'elemento di separazione tra l'ambiente interno ed esterno, variando in prestazioni e soluzioni tecnologiche.

Sebbene durante gran parte della storia la funzione dell'involucro fosse legata sia alla separazione dell'ambiente esterno con quello interno che alla regolazione del flusso energetico, l'arrivo della rivoluzione industriale e le relative nuove tecnologie hanno

permesso di attribuire nuove funzioni all'involucro e di derivare le funzioni di climatizzazione ad impianti e sistemi indipendenti dall'involucro.

Le diverse funzionalità dell'involucro sono particolarmente evidenti nell'evoluzione antropologica dell'architettura vernacolare, come ad esempio nel rifugio; gli igloo eschimesi, Matmata in Tunisia, la Iurta Mongola, gli insediamenti islamici in Marocco, ecc. È comune, indipendentemente dalle diverse condizioni climatiche di ogni tipologia di rifugio, la necessità di costruire spazi adatti al benessere umano con condizioni fisiche e morfologiche diverse da quelle dell'ambiente esterno. Queste esigenze hanno portato alla realizzazione di diversi sistemi di separazione capaci di minimizzare l'impiego di energia, sia durante le fasi di costruzione sia durante le fasi di gestione dell'edificio.

Considerando la Iurta, un rifugio tradizionale mongolo (Figura 8), come espressione architettonica di una società nomade, è possibile osservare come l'involucro svolga la funzione di proteggere dalle intemperie e dai pericoli, delimitando al contempo una sfera privata all'interno del rifugio (Giovine, 2013). Poiché si tratta di una società che non ha una dimora stabile e si sposta continuamente, sorge l'esigenza di un involucro leggero e facilmente montabile, per facilitare gli spostamenti.

Nel caso opposto, una società sedentaria richiede alloggi più stabili e duraturi, eliminando la necessità di smontare e trasportare la propria abitazione. Di conseguenza, l'involucro edilizio assume una funzione strutturale, oltre a quella di semplice tamponamento, evidenziando così una delle prime evoluzioni nella funzionalità dell'involucro.



Figura 8 Sinistra: Costruzione dell'Iurta Mongola. Primi stili di rifugio nomade in Asia centrale. Fonte: "Encyclopedic entry. Yurt", National Geographic (Paley, 2024).

Inoltre, come segnala Romano (2011), grazie all'arricchimento delle esigenze legate all'indipendenza dello spazio interno da quello esterno, l'involucro assume requisiti legati alla rappresentatività della funzione sociale dell'edificio e successivamente a un sistema di regolazione del comfort interno. Definendo l'evoluzione dell'involucro come segue:

“L'involucro architettonico ha quindi registrato una trasformazione strettamente legata all'evoluzione delle scoperte che hanno caratterizzato la specie umana nei secoli, evolvendosi in relazione all'uso dei materiali ed alla possibilità di sfruttare le loro

caratteristiche per garantire condizioni termo-igrometriche adeguate all'interno degli spazi confinati.” (Romano, 2011)

In questo modo si sono sviluppati edifici massicci caratteristici dell'Ottocento preindustriale, con facciate definite da una funzione piuttosto formale e compositiva, con la quale risale l'espressione sociale della facciata. Tuttavia, con l'arrivo della rivoluzione industriale, queste hanno perso consistenza, si sono smaterializzate trasformandosi in involucri più leggeri e trasparenti.

L'adattamento di nuovi materiali e sistemi costruttivi ha portato una nuova interpretazione dell'architettura, dove l'involucro edilizio diventa un concetto molto meno visibile al fine di permettere l'espressione razionale e funzionale dello spazio. Questo è particolarmente evidente nell'architettura razionalista presente nei progetti di Le Corbusier, alla Bauhaus oppure nel Gruppo 7 in Italia (Figura 9).



Figura 9 Unité d'habitation, simbolo dell'architettura moderna e opera fondatrice del Brutalismo. Fonte: Unité d'habitation, Marseille, France, 1945-1952. (Kozłowski, 1997)

Come segnala ancora Romano (2011), questa attenzione al rapporto spaziale e funzionale ha portato verso una progettazione universale dell'architettura e una minore attenzione verso l'ambiente esterno: le tipologie architettoniche locali, il contesto e la morfologia del territorio diventano elementi prescindibili al momento di progettare una nuova architettura.

Durante questo periodo, è possibile notare sempre di più un involucro più leggero, indipendente dalla struttura e con maggiore superficie trasparente, fino a trasformarsi nella conosciuta "curtain wall". Da un'ottica energetica/ambientale, grandi superfici vetrate dell'involucro significano un surriscaldamento eccessivo durante i mesi estivi e una enorme dispersione di calore durante il periodo invernale.

Nondimeno, l'introduzione di sistemi di riscaldamento e ulteriormente di raffrescamento ha significato un nuovo grado di libertà nel progettare, dove le prestazioni energetiche dell'involucro non erano più necessarie dato che questi nuovi elementi permettevano di

raggiungere un comfort termo-igrometrico e visivo e il consumo energetico dell'edificio non era ancora un tema di dibattito.

L'indipendenza e l'emancipazione delle funzioni dell'involucro dalle strutture massicce si sono evolute con continuità, che però non ha tenuto conto delle prestazioni energetiche fino alla crisi energetica del 1973, seguita da quella del 1979. L'aumento del prezzo del petrolio e dei suoi derivati ha reso evidente la stretta interdipendenza tra le fonti di energia e lo stile di vita.

Questo lo si è visto anche attraverso le pubblicazioni di Federico M. Butera (2014): *"una delle grandi direttrici del progettare prima della crisi energetica è stata il considerare l'energia a basso costo come una risorsa illimitata"*, riferendosi all'uso indiscriminato dell'energia per la produzione degli edifici e il condizionamento ambientale degli spazi interni.

La presa di coscienza di questo problema si è testimoniata negli indirizzi indicati nelle normative energetiche a cui hanno fatto seguito adozione di soluzioni tecnologiche. Infatti, si è iniziato a utilizzare vetri a camera e serramenti con taglio termico e tenuta dell'aria insieme a uno sviluppo dell'involucro opaco al fine di diminuire considerevolmente la dispersione termica, specialmente durante i mesi invernali.

Dal modo di progettare un'architettura universale e indifferente al contesto ambientale si è tornati a una maggiore attenzione del clima locale e dell'ambiente esterno. Insieme ai sistemi attivi, si è ritornati all'uso di sistemi passivi per il guadagno energetico degli edifici.

Sono numerose le pubblicazioni che testimoniano questo cambiamento. Tra queste "The passive solar energy book: a complete guide to passive solar home, green house, and building design" di E. Mazria, pubblicata nel 1979. Il controllo e la flessibilità dell'ambiente interno rispetto a quello esterno sono diventati nuove esigenze nel sistema edilizio.

Sebbene ci sia stato un notevole miglioramento dell'efficienza dei sistemi impiantistici per la climatizzazione, è stato l'involucro edilizio l'elemento concepito come "dispositivo tecnologico" che è diventato il baricentro della ricerca tecnologica per lo sviluppo di architetture energeticamente efficienti.

La ricerca attuale sull'involucro concepisce l'elemento di separazione come un dispositivo dinamico, permeabile e selettivo. L'involucro diventa l'elemento di interazione "attivo" (ovvero reattivo) tra l'ambiente interno e quello esterno.

Da questo punto di vista, è possibile valutare l'evoluzione tecnologica dell'involucro nel contesto ambientale. L'involucro diventa la membrana esterna dell'edificio, la barriera che separa l'ambiente esterno da quello interno ma che è in grado di reagire alle condizioni esterne. In analogia ad un essere vivente, l'involucro architettonico quindi agisce come la "pelle" del sistema edilizio concepito come un "organismo", capace di regolare la propria morfologia in modo reattivo al fine di mantenere condizioni ottimali per il benessere degli spazi interni.

1.3 Evoluzione dell'involucro verso l'efficienza energetica

Le prime soluzioni tecnologiche applicate all'involucro edilizio per migliorare le prestazioni energetiche si concentravano principalmente sull'isolamento. Inizialmente, il componente opaco dell'involucro ha subito trasformazioni significative: grandi masse murarie furono dotate di strati isolanti per ridurre lo scambio termico per conduzione. Parallelamente, l'involucro trasparente ha visto lo sviluppo delle vetrocamere, costituite

da due lastre di vetro separate da una intercapedine d'aria riempita con gas a bassa conducibilità termica.

Nel corso degli anni, le tecnologie si sono ulteriormente evolute. Oggi disponiamo di soluzioni più avanzate, con materiali per vetri che variano nelle proprietà trasparenti, trasmissive e riflettenti, e serramenti dotati di taglio termico e tenuta all'aria. I materiali isolanti per il componente opaco sono diventati più vari e disponibili, mentre le soluzioni per la coibentazione della copertura e per isolare il pavimento dalla terra sono diventate più sofisticate. Le stratigrafie murarie si sono complicate, diffondendo l'uso di facciate a doppia pelle. (Figura 10).

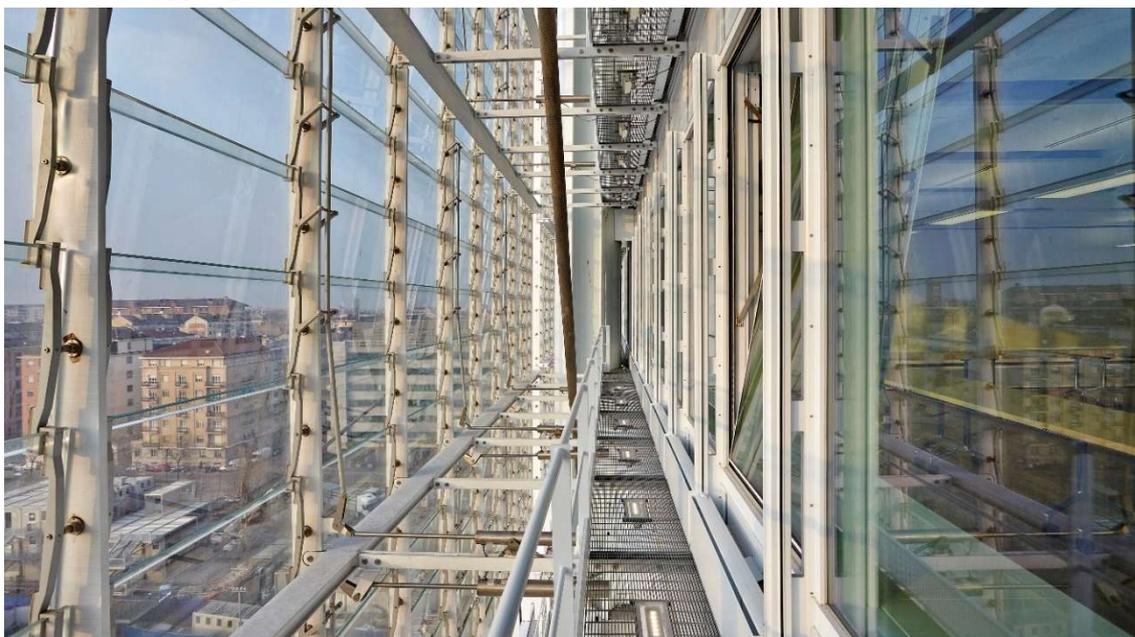


Figura 10 Vista della struttura a doppia pelle della Torre Intesa Sanpaolo. Fonte: “Per le facciate della Torre Intesa Sanpaolo sistema integrato con gli impianti” (Cappello, 2016)

In seguito a questo sviluppo tecnologico, vengono introdotte strategie per la progettazione. Sono molti i testi a cui i progettisti fanno riferimento, autori come Edward Mazria, Viktor Olgyay e Baruch Givoni, mettono in risalto l'importanza dell'impiego di soluzioni bioclimatiche, strategie passive e soprattutto sostengono l'importanza dello sfruttamento della luce solare in inverno e di ridurre il surriscaldamento estivo per ottenere un comfort termico-visivo adeguato.

Pubblicazioni più recenti come quella di Romano (2011) permettono di notare come la qualità funzionale di un edificio inizia ad essere legata all'efficienza dell'involucro architettonico nell'ambito energetico:

“Il cattivo funzionamento degli edifici moderni può essere attribuito al fatto di avere progettato l'involucro in maniera totalmente formalistica, prestando nulla o poca attenzione alle condizioni climatiche esogene. Il compito di mantenere le condizioni interne richieste è affidato agli impianti di condizionamento, con inevitabili sprechi, inefficienze e cattivo funzionamento.” (Romano, 2011)

Nell'attualità, l'involucro passivo può essere integrato con sistemi attivi come pannelli solari e collettori solari. Le soluzioni tecnologiche disponibili permettono di

² A seconda di Sergio Altomonte “L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile”.

massimizzare il guadagno solare attraverso vetrate isolanti, sistemi di chiusura trasparenti e opachi, e strategie di ombreggiamento efficienti per ridurre l'eccesso di calore estivo. Tuttavia, l'efficacia di questi sistemi dipende fortemente dall'orientamento e dal contesto del progetto, e la loro progettazione senza impianti di climatizzazione può comportare momenti di discomfort per gli utenti. Questi sistemi sono più comuni negli edifici residenziali, dove il controllo è demandato agli utenti (Romano, 2011).

L'architettura moderna mira a integrare l'efficienza energetica nell'involucro architettonico senza sacrificare la funzionalità formale e sociale dell'edificio. La ricerca tecnologica attuale si concentra sullo sviluppo di involucri capaci di interagire in tempo reale con l'ambiente esterno, creando così un'architettura adattiva. Tuttavia, queste soluzioni sono ancora recenti, e la complessità delle discipline coinvolte richiede che la progettazione tecnologica dell'involucro sia in grado di anticipare il fabbisogno energetico del sistema edilizio.

1.4 Dinamismo architettonico e involucro adattivo

L'involucro adattivo rappresenta una sottocategoria all'interno del vasto campo dell'architettura dinamica, un concetto che ha iniziato a prendere forma solo nella prima metà del XX secolo. Prima di questo periodo, il movimento nell'architettura era un'idea inesplorata, limitata a riflessioni teoriche come quelle presenti nell'opera "Architectural Fantasies" di Iakov Chernikhov, che già anticipava alcuni aspetti del dinamismo architettonico.

È solo in seguito che l'architettura dinamica ha trovato espressione pratica, grazie a pionieri come Buckminster Fuller attraverso la "Dymaxion house". Un esempio emblematico è la Villa Girasole (Figura 11), progettata a Verona nel 1935 da Angelo Invernizzi. Questo edificio residenziale, capace di ruotare attorno il proprio asse seguendo il sole al fine di sfruttare al meglio la radiazione solare, rappresenta uno dei primi esempi di architettura dinamica nella pratica. Tuttavia, nonostante l'innovazione, l'edificio non può essere considerato sostenibile a causa delle limitazioni tecnologiche dell'epoca.



Figura 11 Villa Girasole di Angelo Invernizzi, Verona, 1935. Fonte: Hidden Architecture, "Villa Girasole" (2024)

Successivamente, con lo sviluppo dell'informatica e della tecnologia edilizia negli anni '60 e '70, l'architettura dinamica ha iniziato a realizzare appieno il suo potenziale. Un esempio significativo è l'Institut du Monde Arabe³ (Figura 12) di Jean Nouvel, costruito a Parigi nel 1987. La facciata sud di questo edificio presenta un sistema modulare meccanico in grado di regolare l'ingresso di luce naturale attraverso la rotazione di elementi schermanti, simile al diaframma di una fotocamera.

La progettazione della facciata è stata dettata da ragioni energetiche: ridurre gli apporti solari durante il periodo di raffrescamento e massimizzarli durante il periodo di riscaldamento. La facciata, così concepita, permette di modulare il rapporto tra superficie opaca e trasparente e di gestire il passaggio della radiazione solare.

Sebbene la facciata fosse prevista di essere costituita da un sistema di sensori fotoelettrici capaci di reagire ai flussi energetici che entravano nell'edificio, problemi tecnici relativi ai sensori hanno impedito la reattività dell'involucro, che viene regolato in base all'ora del giorno piuttosto che in risposta ai flussi energetici esterni.

³ Questo progetto sarà ulteriormente approfondito nel capitolo III, nelle pagine 55-57.



Figura 12 Istitut du monde arabe di Jean Nouvel, Parigi, 1987. Fonte: imarab, "Istitut du monde arabe" (2024)

Un altro esempio di architettura dinamica è il Burke Brise Soleil (Figura 13a) progettata da Santiago Calatrava nel 2001, l'icona del Milwaukee Art Museum. In questo caso, l'intenzione di dare movimento al progetto è principalmente estetica, caratterizzato da una apertura di frangisole simile ad "ali", rappresentando un'architettura "rivoluzionaria" per l'epoca. Sebbene il suo impatto energetico non sia ottimale, l'edificio rappresenta un'innovazione significativa nel campo dell'architettura dinamica.

Un ulteriore caso di architettura dinamica è il progetto dello studio dRMM "Sliding House" (Figura 13b), costruito nel 2009 a Suffolk, Inghilterra. Questo edificio residenziale è composto da tre parti, il cui involucro può spostarsi per modificare la configurazione degli spazi interni ed esterni, influenzando le condizioni ambientali interne. A differenza della Villa Girasole, non è l'intera struttura a muoversi, ma solo l'involucro esterno, che permette di regolare termicamente e visivamente l'edificio in risposta alle variazioni climatiche.

Attualmente, concetti come "architettura dinamica" e "architettura in movimento", una volta solo teorici, sono diventati parte delle possibili soluzioni ai problemi energetici e ambientali.



Figura 13 a) Burke Brise Soleil di Santiago Calatrava, Milwaukee, 2001. Fonte: Milwaukee Art Museum, "Burke Brise Soleil" (2024). b) Sliding House dello studio dRMM, Suffolk, 2009. Fonte: dRMM studio "Sliding House. A house for all seasons" (2024)

Nondimeno, il concetto di involucro dinamico è ancora in evoluzione. Nuove tecnologie, come membrane cinetico-elastiche o bio-chimiche, stanno ampliando le possibilità progettuali in questo campo. Inoltre, l'attenzione si sta sempre più concentrando su una visione integrata dell'involucro, che tenga conto non solo degli aspetti energetici ed estetici, ma anche delle interazioni dinamiche con il contesto urbano e ambientale.

In definitiva, l'involucro dinamico rappresenta una tappa significativa nell'evoluzione dell'architettura contemporanea, offrendo nuove prospettive per la progettazione di edifici sostenibili e adattabili. La capacità di integrare il movimento come risposta alle variazioni climatiche pone le basi di queste prospettive in una nuova tipologia definita come involucro adattivo, che promette di contribuire in modo sostanziale alla sostenibilità dell'architettura futura.

1.5 Involucro adattivo

L'involucro adattivo è un concetto multidisciplinare definito in vari modi. L'organizzazione COST Action (2018) lo descrive come un sistema multifunzionale e altamente adattivo, capace di modificare le sue funzioni, caratteristiche o comportamenti nel tempo in risposta a requisiti prestazionali e condizioni esterne variabili.

Allo stesso modo, diversi autori definiscono l'involucro adattivo come *"involucro in grado di adattarsi alle mutevoli condizioni esterne sotto forma di fluttuazioni meteorologiche a breve termine, cicli diurni o modelli stagionali"* (Attia et al., 2018).

Il termine "adattivo" assume diverse sfumature semantiche, comprendendo concetti come dinamicità, intelligenza, interattività, cinematismo, reattività, intelligenza artificiale e commutabilità (Loonen R. C., 2013). Tuttavia, la varietà delle definizioni tecniche può causare ambiguità, rendendo complesso delineare una visione unitaria del concetto.

Ferguson et al. (2007), offrono una definizione chiara e precisa: *"l'adattabilità è la capacità di un sistema di adattarsi per fornire la funzionalità prevista in condizioni"*

continuamente variabili, attraverso modifiche nelle sue variabili di progettazione che cambiano i loro valori fisici.”

Basandosi su questa definizione, Loonen (2013) propone una definizione specifica per gli involucri adattivi al clima, sottolineando la capacità di questi sistemi di modificare ripetutamente e reversibilmente le proprie funzioni in risposta ai cambiamenti climatici e prestazionali, con l'obiettivo di migliorare le prestazioni complessive dell'edificio.

L'idea di un'architettura adattiva agli stimoli esterni risale agli anni '70, con la pubblicazione di "Soft Architecture Machines" di Nicholas Negroponte (1976), che teorizzava il ruolo attivo dell'ambiente esterno nel modificare l'architettura. Tuttavia, gli esempi pratici di sistemi adattivi erano limitati all'epoca. Il primo progetto significativo nel campo dell'architettura adattiva è l'Istitut du Monde Arabe di Jean Nouvel, precedentemente menzionato.

Con l'avanzamento della tecnologia, i progetti di architettura adattiva hanno compiuto significativi progressi, come dimostrato dalle Al Bahar Towers ad Abu Dhabi⁴ (Figura 14). Progettato dallo studio Aeda (AHR). L'involucro utilizza sistemi computazionali e parametrici per elaborare dati climatici raccolti da sensori, generando modifiche morfologiche della facciata tramite controlli e attuatori automatizzati, ottimizzando così l'illuminazione, la climatizzazione e riducendo il consumo energetico, migliorando al contempo il comfort interno.



Figura 14 Al Bahar Towers dello studio Aeda, Abu Dhabi, 2012. Fonte: Fabiana Valentini, "Al Bahar Towers, le torri di Abu Dhabi con facciata solare intelligente" (2024)

L'avanzamento tecnologico nel campo dell'architettura adattiva è evidente con la diffusione dei sistemi di Information and Technology Control, che consentono di applicare sistemi dotati di intelligenza artificiale all'edilizia, assicurando la gestione delle condizioni dell'ambiente anche in assenza di utenza umana e in base a una serie di esigenze, ottimizzando così le prestazioni funzionali e fisiche dell'edificio (Laura Aelenei, 2018).

⁴ Questo progetto sarà ulteriormente approfondito nel capitolo III, nelle pagine 61-63

L'involucro adattivo, grazie alla sua capacità di modulare il flusso energetico alterando le proprietà dei materiali o controllando elementi mobili come schermature solari e finestre, è una soluzione chiave per ridurre l'impatto ambientale e il consumo energetico degli edifici. La ricerca negli ultimi anni si è concentrata sullo sviluppo di metodologie per la progettazione di sistemi adattivi, classificandoli in base alle loro caratteristiche specifiche.

In conclusione, l'involucro adattivo rappresenta un progresso significativo verso un'architettura sostenibile. La sua capacità di rispondere dinamicamente alle condizioni esterne migliora l'efficienza energetica degli edifici, offrendo soluzioni versatili per affrontare le sfide climatiche locali e ridurre il consumo energetico globale.

II INTERAZIONE CLIMA, TEMPO E ARCHITETTURA

L'involucro adattivo integra un gran numero di fattori, parametri e discipline, che rappresentano un gran numero di interazioni e relazioni tra detti fattori. Quando si fa riferimento agli interventi clima-adattativi, vengono alla luce i principali fattori che definiscono l'ambiente esterno, che influenzano direttamente il sistema edilizio, il comfort e il benessere degli utenti.

Il rapporto tra l'essere umano e l'ambiente che lo circonda produce una risposta fisiologica che determina la sensazione di benessere delle persone. Allo stesso modo, gli ambienti degli spazi interni sono governati dall'ambiente esterno, determinato dal clima, e dal suo rapporto con l'involucro.

Le condizioni che si cerca di mantenere nell'ambiente interno tendono ad essere costanti, mentre quelle dell'ambiente esterno tendono ad essere variabili e sempre più imprevedibili. Allo stesso modo, le differenze tra i due ambienti si riflettono nella capacità delle persone coinvolte di rispondere, passivamente o attivamente, a tali cambiamenti. La particolarità dell'involucro adattivo è determinata dalla sua capacità di rispondere alle variazioni ambientali che si verificano nel tempo dando risposte in tempo reale.

Per comprendere la relazione tra clima, architettura, essere umano e tempo è necessario stabilire i fattori che caratterizzano ciascuno di questi temi. È bene precisare che i fattori di studio possono essere anche più numerosi e variegati; tuttavia, è necessario stabilire i fattori principali per poter sintetizzare le soluzioni adattative più adatte per ogni occasione.

2.1 Dati climatici

I fattori climatici costituiscono i principali parametri a cui risponde l'involucro adattivo. Elementi come la radiazione solare, la temperatura dell'aria, l'umidità e il vento, tra altri, definiscono le condizioni dell'ambiente esterno. L'ambiente interno, invece, è determinato dai parametri di comfort per il corpo umano, che dipendono essenzialmente dalla risposta fisiologica dell'organismo a questi fattori.

Il ruolo dell'involucro adattivo è quello di agire come un filtro e un regolatore del flusso di energia e di masse tra l'ambiente esterno e l'interno dell'edificio. Tale funzione diventa più o meno rilevante a seconda delle differenze tra le condizioni esterne e interne. Quando queste differenze sono minime, il contributo dell'involucro si riduce; al contrario, quando l'ambiente esterno si discosta significativamente da quello interno, l'involucro assume un ruolo cruciale nel mantenere condizioni di comfort ottimali.

L'interazione tra il corpo umano, l'architettura e il clima è quindi alla base del funzionamento dell'involucro adattivo. Nonostante ciò, in alcune circostanze, la sola azione dell'involucro potrebbe non essere sufficiente per mantenere condizioni di comfort all'interno degli spazi.

In questi casi, sarà necessario l'ausilio di impianti di riscaldamento o raffrescamento, il che comporta un aumento del consumo energetico dell'edificio. Per questo motivo, l'involucro adattivo, anche se non sempre riesce a garantire un comfort completo, ha il vantaggio di ridurre il carico sugli impianti, contribuendo così a un significativo risparmio energetico.

Pertanto, per valutare il consumo energetico di un edificio, è essenziale analizzare i parametri climatici che caratterizzano l'ambiente esterno e che influenzano il comfort degli utenti e l'efficienza dell'edificio stesso.

La relazione tra clima e architettura è stata ampiamente studiata, con riferimenti all'architettura vernacolare che dimostra come le costruzioni tradizionali si siano adattate alle condizioni climatiche locali (Rudofsky, 1964). Ulteriori ricerche, come quelle di Givoni (1969), discutono sulla relazione tra l'uomo e l'ambiente e hanno evidenziato come le condizioni climatiche influenzino il benessere fisiologico, fornendo ai progettisti le basi per sviluppare soluzioni in grado di garantire il comfort negli ambienti costruiti. Pertanto, la relazione tra uomo, architettura e ambiente è inseparabile e gioca un ruolo determinante nelle scelte progettuali contemporanee.

Il clima di una regione è il risultato di modelli complessi e dinamici, frutto di numerose interazioni tra diversi fattori. Quando si affronta la progettazione in un determinato contesto climatico, è fondamentale prendere in considerazione questi fattori per gestire le sfide legate al design sostenibile, all'efficienza energetica e al comfort umano. Con tutto ciò, i fattori climatici possono variare notevolmente in base alla regione, rendendo necessario un accurato riconoscimento di tali variabili per una corretta progettazione del sistema architettonico (Givoni, 1969).

2.2 Radiazione solare e sistemi di controllo

La radiazione solare è una forma di radiazione elettromagnetica emessa dal sole (Givoni, 1969). Sulla superficie terrestre, lo spettro solare si divide in diverse lunghezze d'onda, che possono essere raggruppate in tre principali regioni: ultravioletto, visibile e infrarosso. Solo una piccola parte di questo spettro è visibile all'occhio umano; le lunghezze d'onda più corte costituiscono la radiazione ultravioletta, mentre quelle più lunghe appartengono alla radiazione infrarossa. Nonostante ciò, è proprio nell'infrarosso che si raggiunge il picco di intensità dell'energia solare. Per semplicità, si può distinguere lo spettro solare come composto da radiazione luminosa e calore.

Durante il passaggio attraverso l'atmosfera terrestre, l'intensità della radiazione solare diminuisce e la sua distribuzione spettrale viene alterata da fenomeni di assorbimento, riflessione e diffusione (scattering):

Il fenomeno dell'assorbimento si presenta quando l'atmosfera assorbe la radiazione in base alla lunghezza d'onda. L'ozono assorbe la maggior parte dei raggi ultravioletti e tutte le lunghezze d'onda inferiori a 0,288 micron, mentre il vapore acqueo e l'anidride carbonica assorbono una parte rilevante della radiazione infrarossa.

La riflessione avviene principalmente a causa delle gocce d'acqua presenti nell'atmosfera. Le nuvole, per esempio, riflettono una porzione significativa della radiazione solare nello spazio esterno, mentre il resto raggiunge la superficie terrestre in forma diffusa.

Quando la radiazione solare colpisce molecole e particelle atmosferiche di dimensioni simili o inferiori alla lunghezza d'onda, essa viene diffusa nello spazio. Questo fenomeno permette di avere luce anche in assenza di sole diretto, poiché la radiazione viene dispersa in tutte le direzioni.

Questi fenomeni atmosferici riducono l'intensità della radiazione che raggiunge la Terra e alterano la sua distribuzione spettrale, influenzando il modo in cui l'energia solare viene percepita e utilizzata nell'ambiente.

L'influenza della radiazione solare nell'edilizia si distingue in due componenti: l'effetto del componente opaco, legato alle superfici esterne, e quello trasparente, relativo al calore trasmesso attraverso superfici vetrate. Gestire questi aspetti richiede attenzione all'orientamento, alla scelta dei colori esterni e all'uso di schermature (Lynes, 1968).

L'illuminazione naturale all'interno di un edificio richiede sempre la presenza della luce solare. Nonostante ciò, le esigenze di irraggiamento umano dipendono e variano con le condizioni climatiche prevalenti. Nelle giornate fredde, la radiazione solare è necessaria come agente di riscaldamento, mentre in quelle calde aumenta il discomfort e dovrebbe essere ridotta al minimo, di conseguenza, la progettazione degli edifici dovrebbe prevedere mezzi di controllo adeguati. Tuttavia, è interessante notare che una certa quantità sembra essere auspicabile per i suoi effetti battericidi e psicologici (Givoni, 1969).

A causa dell'inerzia termica dei materiali, esiste un ritardo temporale tra l'assorbimento del calore e il suo effetto all'interno dell'edificio: questo intervallo varia da pochi minuti, nel caso di materiali sottili, a diverse ore per pareti spesse e massicce (Givoni, 1969). Il riscaldamento è influenzato dalla resistenza e capacità termica dell'involucro edilizio.

2.2.1 Energia solare sulla superficie

La radiazione solare che incide su una superficie esterna è composta da tre componenti principali: la radiazione diretta del sole, la radiazione diffusa proveniente dal cielo e quella riflessa dalle superfici circostanti. I principali fattori che influenzano queste componenti includono la posizione del sole, la declinazione, l'angolo di altezza solare e l'angolo di incidenza, tra gli altri parametri (Figura 15).

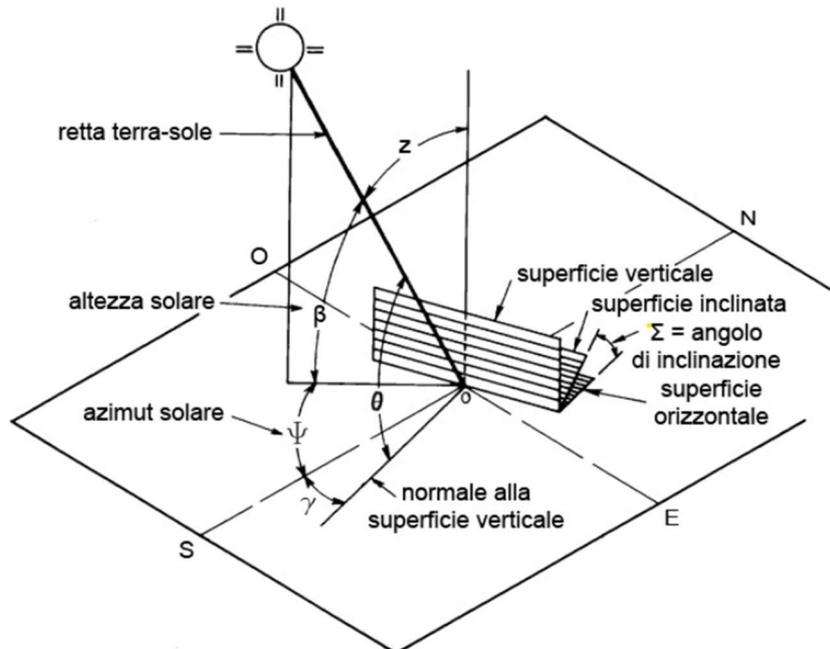


Figura 15 Angolo di incidenza di una superficie comunque orientata e inclinata. Fonte (Y. Casone, 2010)

La radiazione solare diretta su una superficie verticale dipende principalmente dalla posizione del sole, definita dall'altezza del sole sopra l'orizzonte (altitudine solare) e dalla sua direzione rispetto alla superficie (azimut solare). I pattern giornalieri e annuali di questi due elementi dipendono dalla latitudine geografica.

Come indicato da Givoni (1969), la quantità relativa di radiazione diffusa aumenta all'aumentare dell'altitudine del sole; nuvole e polveri atmosferiche fino a un certo grado incrementano questa componente. La radiazione non è diffusa uniformemente sopra l'intero arco del cielo. Attorno al sole, i raggi diffusi sono più concentrati, diminuendo con la distanza radiale dal sole.

La riflettanza delle superfici circostanti e del suolo influenza la quantità di radiazione riflessa. Sulle pareti rivolte lontano dal sole, la radiazione riflessa dal suolo è leggermente più elevata; una parete affacciata verso nord di un edificio nell'emisfero settentrionale, ad esempio, può ricevere più luce riflessa rispetto alla radiazione proveniente dalla volta celeste.

In sintesi, la radiazione solare totale che colpisce una superficie esterna è la somma della radiazione diretta, diffusa e riflessa (Figura 16). La radiazione diretta, calcolata per condizioni di cielo sereno, varia in base alla posizione geografica, mentre la radiazione diffusa è influenzata principalmente dalle condizioni atmosferiche locali. La componente riflessa dipende dall'albedo delle superfici circostanti.

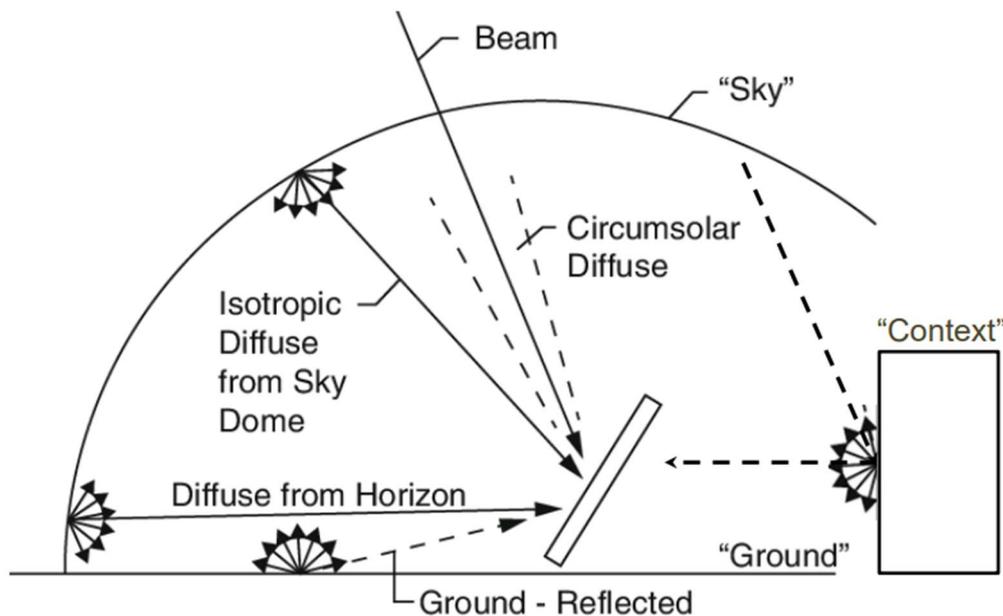


Figura 16 Componenti dell'irradiazione solare su una superficie (Favoino, 2022)

Givoni (1969) sottolinea che, con pareti ben isolate e di colore chiaro e finestre ombreggiate, l'impatto dell'orientamento sulla temperatura interna è ridotto. Tuttavia, se le superfici esterne sono scure e ampie aree vetrate non sono schermate efficacemente, l'orientamento può influire significativamente sulle condizioni termiche interne, evidenziando l'importanza di uno studio accurato del percorso solare per ottimizzare l'efficienza energetica dell'edificio. Attualmente, carte solari, dati climatologici e modelli parametrici consentono di progettare sistemi di ombreggiamento adeguati a ridurre l'incidenza energetica dovuto alla radiazione solare.

2.2.2 Effetto termico delle finestre

Il contributo delle superfici vetrate al bilancio energetico degli edifici, anche quando la loro estensione non è significativa, non può essere trascurato. Le superfici trasparenti, come finestre e componenti simili, hanno un impatto diretto sia sull'illuminazione naturale sia sulle condizioni termiche interne, influenzando il comfort e l'efficienza

energetica dell'edificio. In particolare, il surriscaldamento e le differenze di temperatura tra interno ed esterno, causate dall'interazione con la radiazione solare, sono diventati temi rilevanti per l'architettura sostenibile.

I materiali trasparenti, come il vetro, permettono la trasmissione diretta dell'energia radiante, prevalentemente nella gamma delle lunghezze d'onda visibili. Tuttavia, in determinate condizioni, anche la radiazione infrarossa può essere trasmessa.

Conforme a Givoni (1969), la radiazione solare che colpisce una superficie trasparente si suddivide in tre componenti principali (vedi Figura 17): una parte viene riflessa, una parte viene assorbita e dissipata dal materiale, mentre l'ultima frazione viene trasmessa all'interno dell'edificio. L'assorbimento provoca uno scambio termico per convezione e irraggiamento, mentre la componente trasmessa contribuisce direttamente al riscaldamento interno.

Questi tre componenti dipendono principalmente dall'angolo di incidenza della radiazione solare sulla superficie e dalle proprietà spettrali del materiale stesso. Definiti principalmente dalla loro trasmittività e dal range di lunghezze d'onda trasmesse, i materiali trasparenti rivestono un ruolo cruciale sia in termini di illuminazione naturale che di dinamica termica.

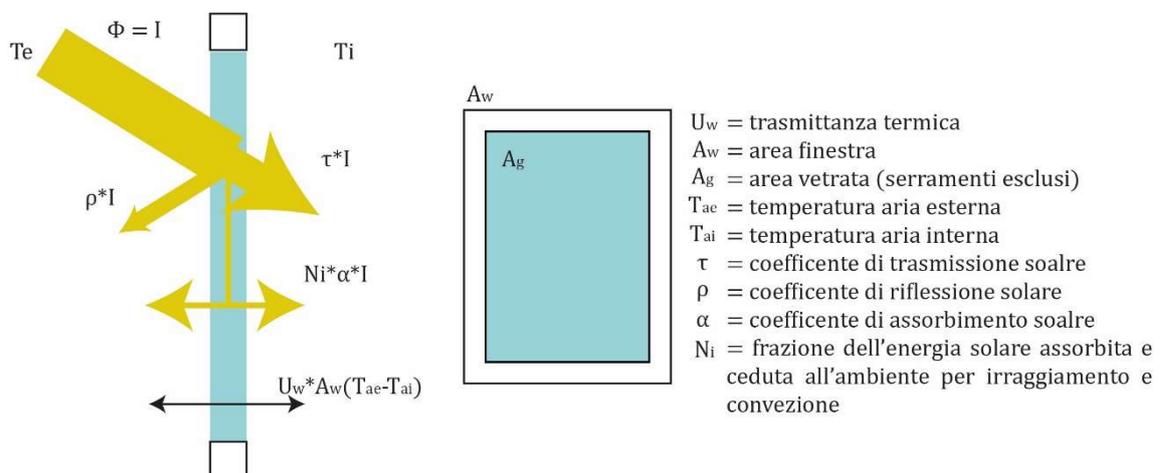


Figura 17 Bilancio energetico dell'involucro trasparente, l'apporto energetico dipende dai fattori di trasmissione, riflessione ed assorbimento. Fonte: elaborazione propria

Dalla figura 17, si nota la dinamica del contributo solare attraverso la superficie trasparente, che viene determinato dal coefficiente di trasmissione solare totale noto come fattore solare (g o FS) ovvero TSET. Tenendo conto delle tre parti; riflessione (ρ), trasmissione (τ) ed assorbimento (α), quest'ultimo considerando meccanismi di convezione ed irraggiamento (N_i). Ovvero;

$$TSET * I = (\tau_s + N_i \alpha_s) * I$$

Gli scambi termici attraverso le superfici vetrate, simili a quelli che avvengono sulle superfici opache, comprendono meccanismi di convezione, irraggiamento e conduzione. La trasmittanza termica (U) delle finestre, ovvero il flusso termico che attraversa una superficie unitaria per una differenza di temperatura unitaria, è un parametro chiave nella valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici (UNI EN ISO 10077-1:2018).

Le finestre, quindi, influenzano il flusso energetico complessivo sia in inverno che in estate, in funzione della differenza di temperatura tra l'ambiente esterno e quello

interno. Così, dati le dimensioni della superficie trasparente e in un contesto estivo in cui la temperatura esterna è superiore a quella interna, l'equazione relativa al flusso energetico diventa:

$$\Phi_{tot} = U_w * A_w (T_{ae} - T_{ai}) + TSET * I * A_g$$

In quanto al surriscaldamento dovuto al componente trasparente, Givoni (1969) indica che l'effetto serra si manifesta attraverso la trasparenza di materiali come il vetro e alcuni tipi di plastica, che permettono la trasmissione dei raggi con lunghezze d'onda nel range dello spettro visibile. Nondimeno, per gran parte delle lunghezze d'onda più lunghe, tali materiali tendono a comportarsi come se fossero opachi.

Per questo motivo, la radiazione solare che penetra attraverso la superficie vetrata ha la possibilità di essere assorbita dalle superfici interne. In ogni caso, queste superfici irradiano energia con lunghezze d'onda lunghe e quindi non vengono trasmesse nuovamente attraverso il vetro, accumulando calore all'interno dell'ambiente.

Infatti, una superficie vetrata esposta alla radiazione solare provoca un aumento della temperatura interna superiore a quello che si potrebbe ottenere con la radiazione solare diretta attraverso una finestra aperta, anche quando si considera l'effetto della ventilazione (Givoni, 1969).

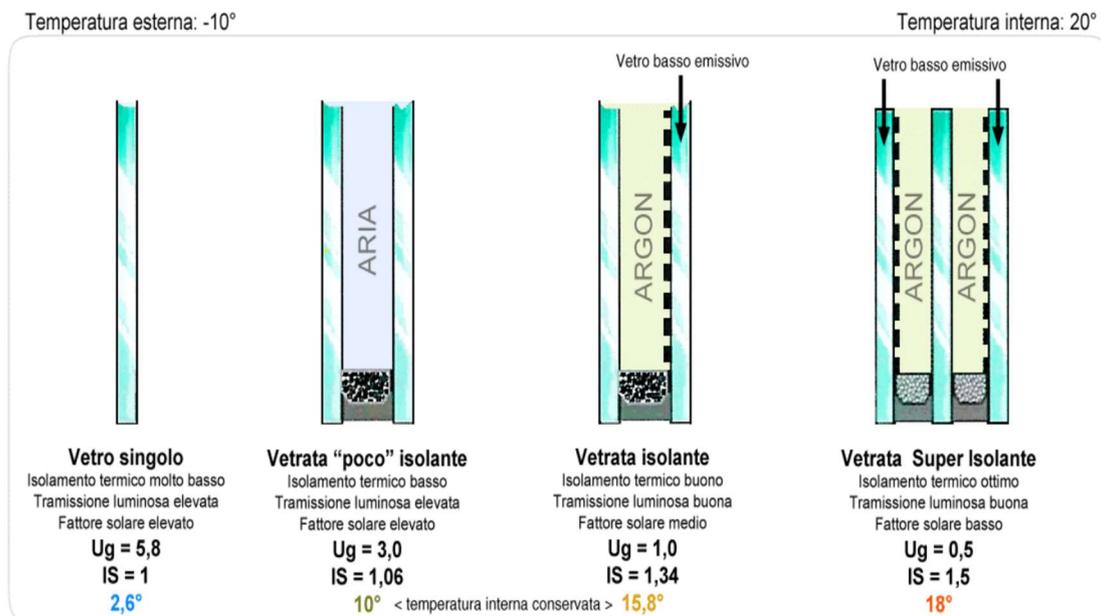


Figura 18 Esempi vetrate a confronto. Fonte (Tedeschi, 2023)

Nondimeno, una delle funzioni principali delle finestre è quella di permettere l'illuminazione naturale all'interno degli ambienti e di permettere la visibilità verso l'esterno, si sono quindi sviluppate delle soluzioni capaci di mitigare l'apporto energetico. Nel corso degli anni si sono sviluppate numerose soluzioni tecnologiche con l'obiettivo di ridurre la trasmittanza termica ed il fattore solare; attraverso serramenti con delle prestazioni più elevate al fine di ridurre i ponti termici, diverse soluzioni per la stratigrafia della superficie vetrata e l'utilizzo di materiali che variano i loro coefficienti di trasmissione, riflessione ed assorbimento (vedi figura 18). Infatti, esistono diversi tipi di vetri; i tipi principali sono vetri trasparenti, termo-assorbenti, termo-riflettenti e grigi o colorati (antiabbagliamento).

2.2.3 Sistemi di ombreggiamento

Come esposto nel paragrafo precedente, l'effetto termico della radiazione solare sulle superfici vetrate ha un impatto significativo sul bilancio energetico degli edifici. Le finestre, in particolare, rappresentano una via preferenziale per il trasferimento di calore, con una velocità e intensità molto superiori rispetto a quelle di una superficie opaca equivalente. Questo trasferimento di calore avviene quasi istantaneamente, soprattutto quando l'edificio è costruito con materiali leggeri. Con tutto ciò, l'installazione di dispositivi di ombreggiamento può modificare sostanzialmente questo effetto, riducendo il guadagno termico derivante dalla radiazione solare.

I dispositivi di ombreggiamento possono essere installati esternamente, internamente o tra i vetri di una finestra a doppio vetro (Figura 19). Tali dispositivi possono essere fissi, regolabili o retrattili e assumere diverse forme e configurazioni architettoniche. La funzione principale di questi sistemi è quella di controllare l'ingresso della radiazione solare, riducendo il surriscaldamento durante i periodi estivi e, all'occorrenza, permettendo l'accesso al calore solare nei mesi invernali. L'efficacia di questi dispositivi varia in base alle condizioni climatiche e alle specifiche esigenze degli edifici.

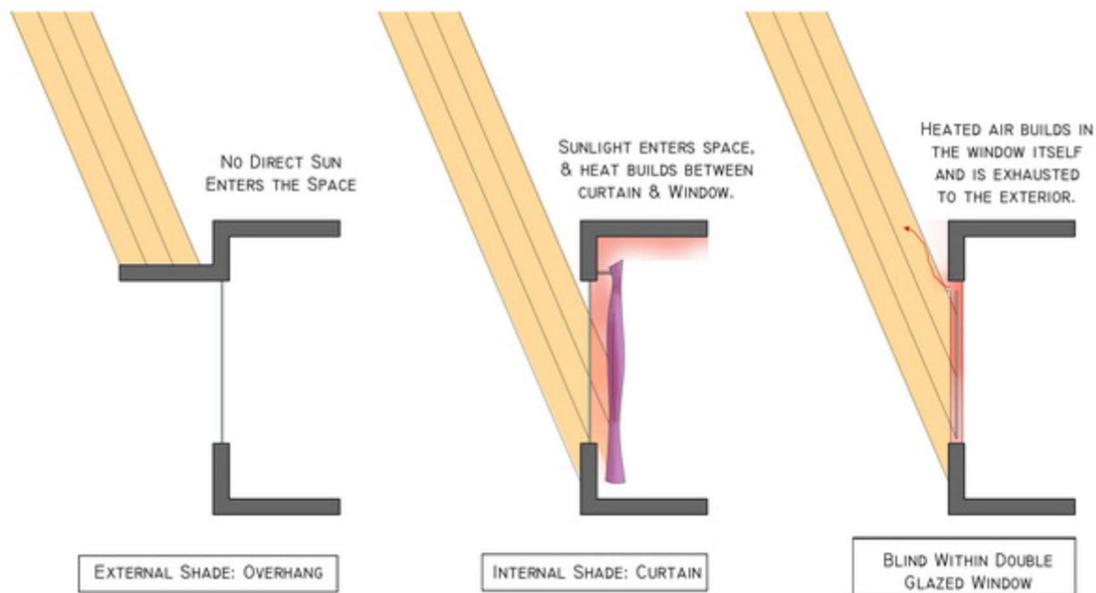


Figura 19 Posizioni e tipi di ombreggiatura, svantaggi e vantaggi. Fonte (Aiken, 2023)

I sistemi di ombreggiamento possono essere progettati per adattarsi a diverse esigenze termiche e visive. I dispositivi regolabili e retrattili offrono la massima flessibilità, consentendo agli utenti di modulare il guadagno termico e luminoso a seconda delle condizioni esterne. Al contrario, i dispositivi fissi esercitano il loro effetto in modo permanente, basandosi sull'orientamento dell'edificio e sui modelli solari giornalieri e stagionali (vedi figura 20). Per regolare questo impatto in conformità con le esigenze funzionali, è essenziale considerare attentamente questi aspetti durante la progettazione dei dettagli dei dispositivi di ombreggiatura (Givoni, 1969).

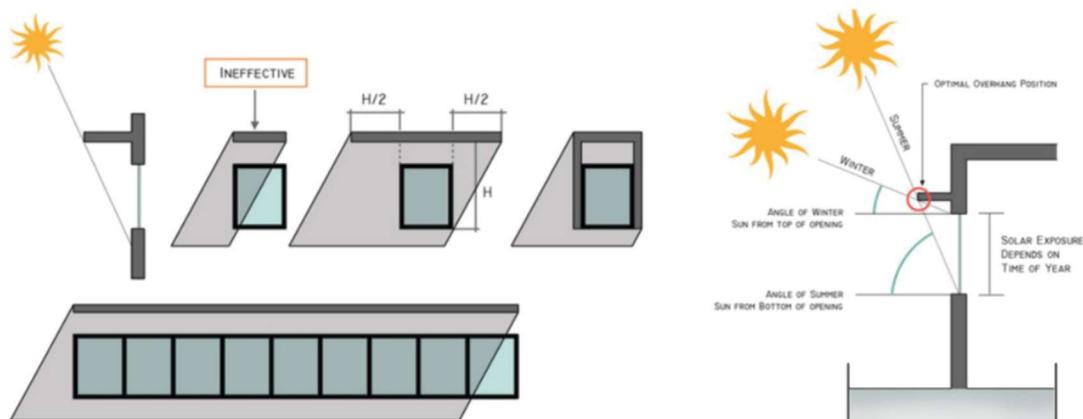


Figura 20 A sinistra elevazioni dei sistemi di ombreggiamento. A destra strategia di ombreggiatura di base per la progettazione di sistemi di ombreggiamento del prospetto sud. Fonte (Aiken, 2023)

La configurazione geometrica dei dispositivi di ombreggiatura regolabili (sia orizzontali che verticali, il loro rapporto larghezza-spaziatura, ecc.) non influisce sulla loro efficienza di ombreggiatura poiché possono sempre essere orientati per tagliare i raggi del sole. Tuttavia, l'efficienza dell'ombreggiatura regolabile è variabile e dipende dalla loro posizione rispetto al vetro, dal loro colore e dalle condizioni di ventilazione.

Attraverso gli studi condotti presso l'ASHRAE Research Laboratory (1969), Givoni indica che i dispositivi di ombreggiamento esterni sono di gran lunga più efficienti rispetto a quelli interni. I risultati evidenziano che:

- I dispositivi esterni sono molto più efficienti di quelli interni.
- La differenza di efficienza tra dispositivi esterni e interni aumenta se il colore delle schermature è più scuro.
- Per i dispositivi esterni, l'efficienza aumenta con un colore più scuro.
- Per i dispositivi interni, l'efficienza aumenta con un colore più chiaro.
- Con un'ombreggiatura efficiente, come le persiane esterne, è possibile eliminare oltre il 90% dell'effetto riscaldante della radiazione solare.
- Con un'ombreggiatura inefficiente, come dispositivi interni di colore scuro, circa il 75-80% della radiazione solare che colpisce la finestra potrebbe entrare nell'edificio.

In sintesi, un'ombreggiatura efficiente riduce il carico termico, migliorando il comfort interno e abbassando i consumi energetici, in particolare per il raffrescamento estivo.

A titolo di esempio metodologico (vedi figura 21), è possibile determinare i momenti in cui è richiesto il riscaldamento o il raffrescamento dell'ambiente interno di un edificio in una determinata zona attraverso l'uso dell'indice dei gradi giorno di riscaldamento (HDD - Heating Degree Days) o dei gradi giorno di raffrescamento (CDD - Cooling Degree Days).

Una volta identificati i periodi in cui la sollecitazione termica per il riscaldamento è maggiore, è possibile progettare sistemi di ombreggiamento che non ostacolano la radiazione solare che attraversa la finestra, contribuendo così al riscaldamento naturale dell'ambiente interno.

Al contrario, durante i periodi estivi in cui prevale la necessità di raffreddamento, la progettazione dei sistemi di ombreggiamento mira a bloccare efficientemente la radiazione solare durante tali periodi.

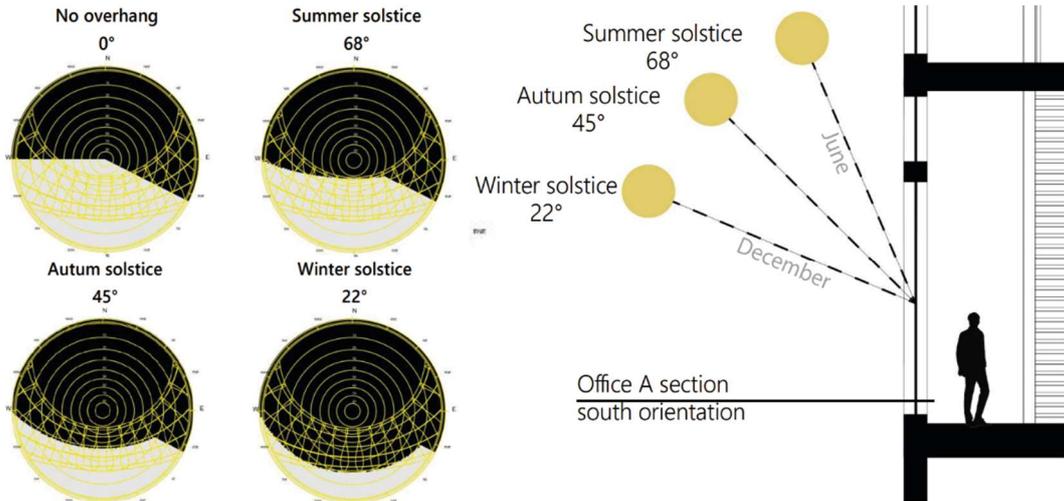


Figura 21 Studio del percorso solare a Torino e maschera di ombreggiamento verticale su carta solare. Fonte: elaborazione propria

L'esempio illustrato nella figura presenta lo studio di una facciata esposta a sud di un progetto realizzato a Torino. Questo studio mira a comprendere le ore del giorno e le stagioni in cui la luce solare penetra nell'involucro trasparente dell'edificio. Si fa uso della carta solare, che, attraverso l'impiego di software parametrici, consente di calcolare la maschera di ombreggiamento della facciata e di valutare come un elemento sporgente con diverse inclinazioni possa bloccare la radiazione solare diretta nei diversi momenti del giorno e dell'anno. Questo approccio agevola la progettazione di un sistema di ombreggiamento fisso che sia in grado di soddisfare il fabbisogno energetico previamente determinato.

Tuttavia, è importante chiarire come i dispositivi di ombreggiamento fissi possano ostacolare la vista verso l'esterno, pur essendo efficienti nel controllo della radiazione solare. In altre parole, una progettazione non corretta dei sistemi fissi potrebbe causare discomfort visivo all'interno dell'ambiente.

Inoltre, queste strategie di progettazione sono utili specificamente per il comportamento del sole rivolto al prospetto sud (nel caso delle zone geografiche appartenenti all'emisfero nord). Per quanto riguarda il prospetto nord, di solito non vi è alcuna esigenza di ombreggiamento, poiché la radiazione solare non colpisce direttamente l'involucro trasparente orientato in quella direzione. Le facciate est ed ovest presentano caratteristiche diverse, poiché l'angolo di inclinazione dell'elemento schermante non influisce particolarmente sulla quantità di energia solare che attraversa durante il giorno, e quindi i sistemi fissi non sarebbero particolarmente efficienti in confronto a quelli regolabili.

Da questo punto di vista, un sistema di schermatura solare adattabile potrebbe rappresentare un approccio corretto per lo sviluppo di sistemi di ombreggiatura per le facciate est ed ovest, oltre a costituire una soluzione per il prospetto nord al fine di impedire la radiazione solare diretta.

2.3 Temperatura dell'aria

Quando la temperatura della superficie terrestre supera quella dell'aria, gli strati d'aria a diretto contatto con la superficie vengono riscaldati per conduzione. Successivamente, il calore viene trasferito per convezione agli strati d'aria superiori. Fenomeni atmosferici come il vento, le turbolenze e le correnti d'aria aumentano il contatto tra la superficie e l'aria, intensificando il trasferimento di calore per convezione. Al contrario, durante la notte o in inverno, la dispersione di calore per radiazione verso il cielo raffredda la superficie terrestre, portando a un flusso di calore inverso, con conseguente raffreddamento dell'aria. Questo è il principale meccanismo di trasferimento termico tra l'aria e la superficie terrestre (Givoni, 1969).

La temperatura dell'aria ha un ruolo cruciale nella risposta fisiologica del corpo umano e nel garantire il benessere termico all'interno degli edifici. Poiché le condizioni di comfort termico all'interno degli spazi devono essere mantenute costanti, la temperatura esterna determina la differenza termica tra interno ed esterno e influisce sul flusso energetico attraverso l'involucro edilizio. Di conseguenza, la temperatura dell'aria è un fattore determinante per il fabbisogno energetico di un edificio: temperature esterne elevate richiedono un maggiore impiego di energia per il raffrescamento, mentre temperature più basse comportano un maggiore consumo energetico per il riscaldamento.

La temperatura dell'aria, insieme alla radiazione solare, influisce direttamente sulla temperatura superficiale dell'involucro edilizio. La differenza di temperatura tra l'ambiente interno e quello esterno, specialmente in assenza di radiazione solare diretta, determina il flusso di calore conduttivo attraverso l'involucro. Questo fattore è cruciale per la scelta dei materiali di isolamento, poiché materiali con bassa conducibilità termica possono ridurre significativamente il flusso termico.

In zone caratterizzate da inverni rigidi, l'uso di materiali isolanti è essenziale per garantire l'efficienza energetica degli edifici, mentre in climi tropicali, dove la temperatura esterna è più vicina alle condizioni di comfort, si preferiscono tecniche di ventilazione e ombreggiamento per evitare il surriscaldamento. È importante considerare che la temperatura dell'aria e delle superfici esterne dell'involucro varia su diverse scale temporali: durante il giorno, la temperatura dell'aria raggiunge il suo picco massimo, per poi diminuire gradualmente fino al minimo durante la notte.

Un controllo efficace delle variazioni di temperatura esterna e interna contribuisce non solo a garantire il benessere degli occupanti, ma anche a preservare l'integrità del sistema edilizio. Temperature superficiali interne troppo basse possono infatti causare discomfort termico e la formazione di condensa sulle pareti.



Figura 22 Bloom Pavillion, esempio di materiale adattivo che reagisce alla temperatura dell'aria. Fonte: "Design ideas for the Built World" (Architizer, 2024).

Per quanto riguarda l'involucro adattativo (Figura 22), la temperatura dell'aria è un parametro fondamentale per determinare quando è conveniente massimizzare o minimizzare l'apporto termico, migliorando così l'efficienza energetica dell'edificio.

L'applicazione principale di tale parametro si osserva nei sistemi trasparenti, dove i sistemi adattivi consentono di regolare l'apporto di energia solare per riscaldare passivamente gli ambienti interni e ridurre il consumo energetico. Allo stesso modo, in presenza di temperature elevate, i sistemi adattivi possono ridurre l'apporto solare o migliorare la ventilazione, diminuendo l'uso di sistemi HVAC.

Sebbene lo sviluppo tecnologico dei sistemi adattivi opachi sia meno avanzato rispetto ai sistemi trasparenti, l'interesse per questa soluzione è crescente (Miren Juaristi, 2024). Ad esempio, si sta lavorando su sistemi di isolamento dinamico che permettono di regolare la conducibilità termica della parete in base alle condizioni climatiche. In situazioni in cui la parete riceve radiazione solare diretta e la temperatura esterna è inferiore a quella interna, un involucro con conducibilità termica variabile potrebbe migliorare l'efficienza energetica dell'edificio, permettendo il flusso di calore verso l'interno.

Esempi di isolamento adattivo includono pannelli riempiti di gas, che modificano la loro conducibilità in funzione del gas con il quale si riempie, o pannelli meccanici che possono ruotare per alterare l'isolamento della parete. Questi sistemi innovativi rappresentano soluzioni promettenti per migliorare l'efficienza energetica degli edifici in condizioni climatiche variabili (Miren Juaristi, 2024).

2.4 Velocità del vento e ventilazione naturale

Il vento e la ventilazione sono fenomeni climatici strettamente legati al sistema edilizio e al benessere umano. Il vento, in un determinato contesto climatico, è influenzato da diversi fattori locali, tra cui la pressione atmosferica, la rotazione terrestre, le variazioni termiche tra terra e mare e la conformazione topografica della regione.

In un determinato luogo, il vento ha il potenziale di influenzare considerevolmente la ventilazione di uno spazio. La direzione prevalente del vento influisce direttamente sulle facciate degli edifici, determinando quali si trovano in condizioni di sopravvento, dove la pressione dell'aria è maggiore, e quali sottovento, dove si genera una depressione.

Questi movimenti dell'aria, da zone di alta a bassa pressione, possono consentire di agevolare il ricambio dell'aria interna, oppure di favorire il raffrescamento interno degli ambienti. Givoni (1969) segnala che il fattore più importante nella progettazione di una corretta ventilazione naturale è il provvedimento di un corretto orientamento delle aperture in modo di generare situazioni di sopravvento e sottovento.

La ventilazione ha diverse funzioni fondamentali, tra cui mantenere la qualità dell'aria sopra una determinata soglia mediante il ricambio dell'aria, indipendentemente dal clima. Inoltre, svolge un ruolo essenziale nel garantire il comfort termico, facilitando la dispersione del calore corporeo attraverso la sudorazione e riducendo la temperatura interna durante i periodi caldi. Durante le stagioni estive, quando la temperatura interna supera quella esterna, la ventilazione può raffreddare sia l'aria all'interno degli spazi abitati sia le strutture edilizie.

Tuttavia, le funzioni della ventilazione varia a seconda della localizzazione, il contesto climatico e i diversi requisiti durante le diverse stagioni: è da notare che il vento accentua gli scambi termici dell'ambiente interno, fenomeno che potrebbe essere favorevole o meno a seconda delle condizioni degli ambienti, essendo la funzione di ricambiare l'aria con una determinata frequenza l'unica funzione essenziale presente in ogni caso.

Sebbene la velocità del vento non influenzi direttamente l'adattamento dell'involucro edilizio, alcune tipologie di involucri adattivi sono progettate per modificare la propria morfologia e facilitare il flusso d'aria, migliorando così la ventilazione naturale.

2.5 Umidità dell'aria e piovosità

L'umidità dell'aria rappresenta la quantità di vapore acqueo presente nell'atmosfera. Come indicato da Givoni (1969), il vapore acqueo si diffonde nell'aria principalmente attraverso l'evaporazione da corpi d'acqua, vegetazione e superfici umide. La temperatura è un fattore determinante per la quantità di umidità che l'aria può contenere: in prossimità dell'equatore, dove le temperature sono più elevate, si osserva una maggiore umidità rispetto alle regioni polari. Le variazioni dell'umidità tra diverse latitudini seguono andamenti simili a quelli della temperatura e dei cicli di radiazione solare.

Esistono diversi modi per misurare l'umidità dell'aria. L'umidità assoluta si riferisce alla quantità di vapore acqueo per unità di volume di aria (g/m^3), mentre l'umidità specifica misura la massa di vapore acqueo per unità di massa d'aria (g/kg). Nondimeno, l'approccio più interessante nel settore adattivo è quello dell'umidità relativa.

Un'altra misura comune è l'umidità relativa (Φ), che rappresenta il rapporto tra l'umidità assoluta e la capacità massima di assorbimento dell'umidità dell'aria a una data temperatura. Quando l'aria raggiunge la saturazione, con un'umidità relativa del 100%,

si verifica il fenomeno della condensazione, questo parametro è particolarmente importante nello studio del comportamento dei materiali edilizi.

Un ulteriore indicatore dell'umidità è la pressione del vapore, espressa in mmHg, che rappresenta la parte della pressione atmosferica dovuta al vapore acqueo. Questo parametro è rilevante per comprendere la risposta fisiologica del corpo umano, poiché l'evaporazione del sudore dalla pelle dipende dalla differenza di pressione di vapore tra la superficie cutanea e l'ambiente circostante (Givoni, 1969).

I fenomeni climatici correlati all'umidità includono rugiada, nebbia e precipitazioni. Quando l'aria satura subisce variazioni di temperatura, l'umidità relativa si modifica di conseguenza. Un abbassamento della temperatura può portare all'aumento dell'umidità relativa, fino a raggiungere il punto di saturazione e causare la condensazione. La condensa si forma sulle superfici che hanno una temperatura inferiore a quella del punto di rugiada dell'aria, mentre la nebbia si verifica quando l'aria satura non trova superfici su cui condensare. Le precipitazioni, invece, sono il risultato del raffreddamento adiabatico dell'aria umida in ascesa, che porta alla formazione di pioggia.

L'umidità all'interno degli edifici ha importanti conseguenze sul comfort termico, sulla salute degli occupanti e sulle prestazioni strutturali. La presenza di umidità sulle superfici interne può favorire la formazione di muffe e cattivi odori, riducendo al contempo la resistenza termica delle pareti e incrementando il rischio di condensa. Inoltre, l'umidità può causare danni estetici, come macchie e scrostature, nonché deterioramenti strutturali come la deformazione dei materiali, il marciume del legno e la corrosione dei metalli.

Le cause dell'umidità negli edifici possono includere infiltrazioni di pioggia attraverso l'involucro edilizio, condensa superficiale e risalita capillare dal terreno. L'infiltrazione di acqua è influenzata principalmente dall'azione capillare e dalla pressione del vento, mentre la diffusione, la gravità e la temperatura giocano un ruolo minore (Givoni, 1969).

In modo analogo alla trasmissione termica delle pareti, il vapore acqueo può essere trasmesso attraverso pareti permeabili a causa di differenze di umidità tra l'ambiente interno ed esterno. In inverno, per esempio, si può creare un gradiente di pressione di vapore e un gradiente di temperatura all'interno della parete, provocando condensa interstiziale nel punto in cui la pressione di vapore supera il livello di saturazione a una determinata profondità. Per evitare accumuli di umidità e condensa i materiali utilizzati e la stratigrafia delle pareti devono favorire la traspirabilità senza compromettere l'isolamento termico.

Sebbene l'umidità atmosferica non abbia subito variazioni significative nel tempo, si è osservato un aumento di eventi piovosi estremi a causa del cambiamento climatico. Questo fenomeno pone nuove sfide per la resilienza degli edifici, richiedendo soluzioni che possano adattarsi a condizioni climatiche sempre più imprevedibili senza compromettere le prestazioni strutturali nei confronti di questo fenomeno.

Dall'altra parte, il fenomeno della pioggia è un fattore climatico predominante in architettura, poiché definisce direttamente l'umidità dell'ambiente. Le precipitazioni sono sostanzialmente *“tutti i fenomeni di trasferimento di acqua allo stato solido o liquido dall'atmosfera al suolo, come pioggia, neve, grandine, rugiada e brina”* (Wikipedia, 2024). Le precipitazioni influiscono direttamente sull'intervento edilizio aumentando l'umidità presente in superficie, l'ingresso di acqua all'interno dell'edificio e comportando in generale un rischio per la salubrità dell'edificio. Il nove tende invece ad

accumularsi sulle superfici di coinvolgimento, aumentando il peso che grava sul sistema costruttivo.

Per quanto riguarda l'involucro adattivo, diverse soluzioni ancora in fase sperimentali si sono sviluppate attraverso diversi sistemi, tra quelli più rilevanti sono i sistemi intrinseci dove il materiale "intelligente" reagisce direttamente all'umidità presente nell'aria, deformandosi e favorendo il passaggio di aria, incrementando il processo di ventilazione naturale attraverso l'involucro (figura 23).

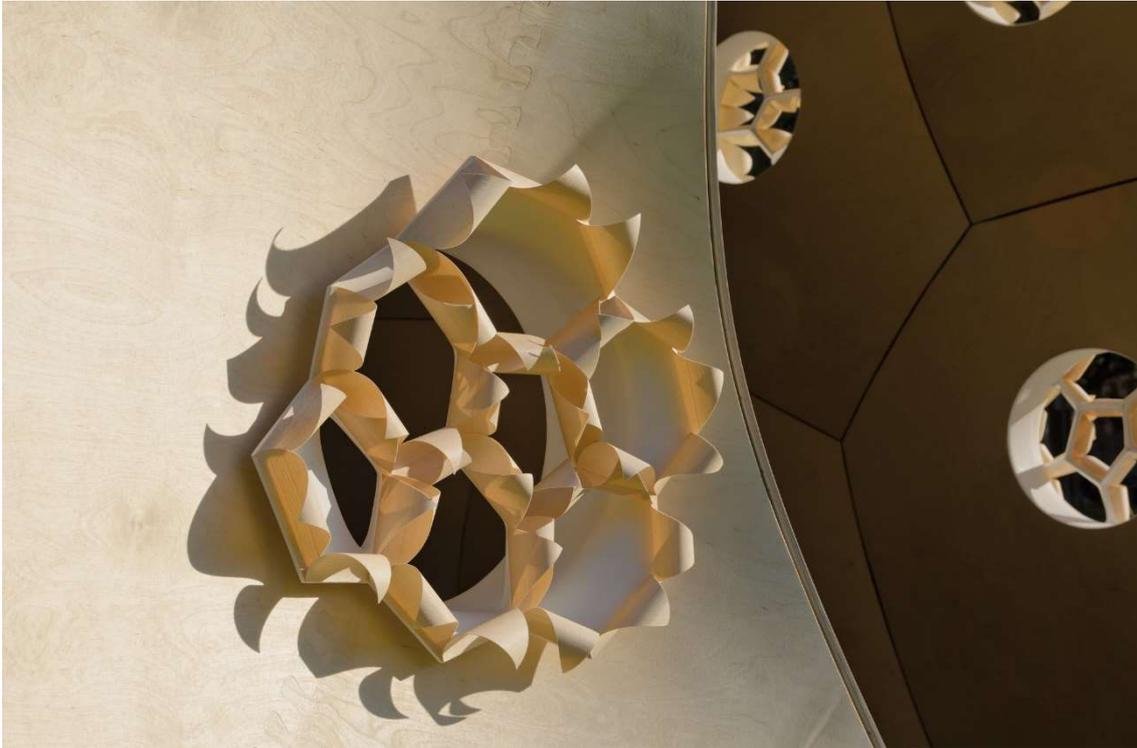


Figura 23 HygroSkin-Meteorosensitive Pavilion, esempio sperimentale di involucro adattivo il quale reagisce direttamente all'umidità dell'aria. Fonte: "Envelope that breaths, the HygroSkin-Meteorosensitive Pavillion" (Archdaily, 2024)

2.6 Benessere termico e visivo

Gli obiettivi principali dell'involucro adattivo che mirano allo sviluppo dell'efficienza energetica sono il mantenimento delle condizioni di comfort all'interno degli spazi interni. Sebbene l'involucro adattivo presenti difficoltà nell'ottenimento di alcuni fattori per il benessere generale dell'essere umano, le condizioni di benessere dove dimostrano la maggiore rilevanza sono quelle del benessere termo-igrometrico e visivo.

Sulla base, infatti, dei fattori climatici evidenziati, l'involucro adattivo cerca di generare negli spazi interni situazioni piacevoli per l'utente. Queste condizioni, però, non sono sempre le stesse. Il benessere termoigrometrico e visivo dipendono da numerosi fattori tra loro in modi diversi. A volte certi livelli di temperatura sono sgradevoli all'interno di un ambiente, mentre in altre circostanze tali livelli possono non rappresentare alcun problema per il comfort delle persone.

Per questo motivo è necessario considerare quali fattori influenzano il benessere termo-igrometrico e visivo e come si relazionano con il benessere visivo. Tali fattori definiscono le condizioni ambientali che si desidera siano mantenute nello spazio interno e, quindi, come l'involucro adattivo dovrebbe reagire ai fattori esterni.

2.6.1 Benessere termico-igrometrico

Il benessere termico si definisce come lo stato di piena soddisfazione nei confronti dell'ambiente stesso, fisiologicamente, questo stato si verifica quando il corpo umano non prova sensazioni di freddo o di caldo impiegando al minimo i suoi meccanismi di termoregolazione (Ministero della Salute, 2024). Esso dipende in larga misura dal mantenimento dell'equilibrio termico tra il corpo umano e l'ambiente circostante. Il raggiungimento di questo stato è influenzato da diversi fattori, tra cui quelli individuali, come l'attività fisica, l'abbigliamento e il metabolismo, e quelli ambientali, quali temperatura dell'aria, umidità relativa, radiazione e velocità dell'aria.

L'attività umana, quanto intensa o meno, comporta la produzione di energia da parte del corpo umano che viene trasformata in gran parte in calore. Questo calore viene scambiato con l'ambiente circostante attraverso diversi meccanismi di scambio, principalmente attraverso convezione con l'aria circostante e irraggiamento con le superfici vicine. La conduzione ha un ruolo minore, in quanto il corpo raramente è in contatto diretto con superfici solide. Per mantenere la temperatura corporea tra i 35,8°C e i 37,2°C, il corpo attiva meccanismi fisiologici di termoregolazione, come il flusso sanguigno, la sudorazione e la regolazione della temperatura cutanea e interna (Givoni, 1969).

La sudorazione, ad esempio, è un meccanismo di dissipazione del calore. In condizioni di temperatura elevata o durante attività fisica intensa, il corpo aumenta la produzione di sudore per favorire il raffrescamento evaporativo. La "traspirazione insensibile", ossia la perdita costante di acqua attraverso i pori, si verifica anche quando il corpo non suda visibilmente. Nonostante ciò, quando l'evaporazione del sudore non è sufficiente a compensare il calore prodotto, il corpo attiva la "sudorazione attiva", che diventa essenziale per evitare il surriscaldamento del corpo.

L'efficienza della sudorazione come meccanismo di raffreddamento dipende dalla capacità evaporativa dell'aria, determinata dalla differenza di pressione di vapore tra la pelle e l'ambiente. Se l'umidità ambientale è elevata, l'evaporazione del sudore risulta compromessa, portando alla sensazione di pelle umida e a una riduzione dell'efficienza del raffreddamento corporeo, con conseguente discomfort. In casi estremi, la sudorazione inefficace può provocare stress termico e rischi per la salute, come la disidratazione e la deplezione di elettroliti.

Per evitare tali condizioni di stress, è fondamentale controllare i parametri ambientali che influenzano il comfort termico: temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità dell'aria e temperatura media radiante. Esiste una sinergia tra questi fattori, e la regolazione combinata degli stessi può garantire il comfort anche in situazioni in cui alcuni parametri sono difficilmente controllabili. Ad esempio, in un ambiente con temperatura dell'aria elevata, è possibile aumentare la ventilazione per potenziare il raffreddamento corporeo e mantenere il benessere termico.

Il Ministero della Salute (2024) indica che, per garantire condizioni microclimatiche ottimali⁵, in inverno la temperatura dell'aria dovrebbe essere compresa tra 19-22°C, con un'umidità relativa del 40-50% e una velocità dell'aria di 0,01-0,1 m/s. In estate, questi valori dovrebbero variare tra 24-26°C, con un'umidità del 50-60% e una velocità dell'aria di 0,1-0,2 m/s.

⁵ Secondo i criteri generali del DPR 16 aprile 2013, n.74, nel quale segnala che gli spazi non devono superare una tolleranza di 20°C-2°C per impianti di riscaldamento in inverno e 26°C-2°C per impianti di climatizzazione estiva durante l'estate

In conclusione, per garantire il benessere termico dell'utenza è necessario un approccio che consideri le condizioni ambientali, regolando opportunamente i parametri che influenzano lo scambio termico tra il corpo umano e l'ambiente.

Per questo motivo, gli involucri adattivi possono contribuire al mantenimento del comfort termico, permettendo di rispondere in modo dinamico ai cambiamenti ambientali. Questi sistemi possono, ad esempio, regolare l'ingresso di radiazione solare per aumentare o ridurre gli apporti di calore all'interno dell'edificio. Inoltre, possono potenziare la ventilazione naturale in condizioni di elevata umidità, migliorando così l'efficacia dei meccanismi di raffrescamento corporeo e garantendo il comfort degli occupanti.

2.6.2 Benessere visivo

Il benessere visivo è un elemento essenziale per il comfort dell'utente in ambienti interni, indipendentemente dall'attività svolta. In altre parole, la qualità della luce presente nello spazio influenza direttamente il rendimento visivo, l'umore, la motivazione e il ciclo circadiano del corpo umano. La quantità di luce percepita durante l'esecuzione di un compito condiziona non solo l'efficacia dell'attività svolta, ma anche aspetti psicofisici dell'individuo, come il benessere generale e la capacità di concentrazione.

A seconda dell'attività svolta nell'ambiente interno, è necessario mantenere determinati livelli di illuminazione. Se la luce è insufficiente, l'utente può accusare stanchezza, mancanza di stimolazione e un calo della motivazione. Al contrario, un eccesso di illuminazione, soprattutto in presenza di forti contrasti luminosi, può provocare abbagliamento e affaticamento visivo (Innocenti, 2024).

Un altro aspetto essenziale è l'influenza della luce sul ciclo circadiano, il "ritmo biologico" umano che si ripete in cicli di circa 24 ore e regola funzioni come temperatura corporea, metabolismo, secrezione ormonale, sonno e appetito. Questo ciclo è sincronizzato principalmente attraverso la percezione della luce e dell'oscurità, in particolare quella naturale del sole. Secondo Innocenti (2024), l'alterazione del ciclo circadiano, causata da una scarsa esposizione alla luce naturale o dall'eccesso di luce artificiale, può portare a una serie di disturbi, tra cui insonnia, problemi cardiocircolatori, depressione e declino cognitivo.

Pertanto, l'illuminazione naturale è essenziale per il benessere visivo e per mantenere un ciclo circadiano equilibrato. Le principali fonti di luce naturale negli ambienti interni sono la radiazione solare diretta e la luce diffusa dal cielo. L'efficacia di queste fonti può essere ottimizzata tramite strategie architettoniche, come l'uso di superfici riflettenti e l'albedo, che influenzano la distribuzione della luce all'interno degli spazi.

In sintesi, il benessere visivo dipende dal controllo equilibrato dei parametri di illuminazione, in particolare della luce naturale, per migliorare non solo le prestazioni visive, ma anche il benessere psicofisico complessivo degli utenti. Il controllo di questi parametri dipende quindi dalle soluzioni architettoniche adottate, tra le quali, l'involucro adattivo può rappresentare un ulteriore strumento di controllo.

Questi sistemi adattivi possono essere progettati per regolare la quantità di radiazione solare diretta incidente sull'ambiente, permettendo la diffusione della luce del cielo in modo omogeneo e riducendo il rischio di sovraesposizione alla luce solare, senza comprometterne le altre funzioni, come la ventilazione, il controllo termico, la privacy e la vista verso l'esterno.

2.7 Involucro e bilancio energetico

I fattori climatici, l'involucro e le condizioni di benessere dell'ambiente interno contribuiscono al metabolismo dell'intero sistema edilizio. Nel bilancio energetico dell'edificio sono presenti tutti i parametri climatici sopra citati, che influenzano, a seconda del contesto climatico, in misura maggiore o minore il consumo finale dell'edificio.

Per semplificare l'analisi, è possibile costruire un modello standard di ambiente interno in cui le condizioni di comfort rimangono costanti. In questo contesto, gli apporti di calore, raffrescamento e ventilazione vengono regolati attraverso sistemi HVAC. Il consumo energetico finale di un edificio può essere misurato in base alla quantità di energia che questi sistemi devono fornire per mantenere le condizioni di benessere desiderate. Più basso è il consumo energetico necessario per il controllo del clima interno, maggiore è l'efficienza energetica dell'edificio.

Attualmente, i modelli di simulazione per i sistemi HVAC vengono utilizzati per calcolare il carico energetico necessario, permettendo di ottimizzare le soluzioni progettuali. Questi modelli simulano il comportamento energetico dell'edificio durante tutto l'anno, tenendo conto delle variabili climatiche e delle modalità di utilizzo degli spazi.

È possibile riassumere tutti i parametri coinvolti nel bilancio termico di un ambiente attraverso la seguente espressione:

$$\Sigma\phi_{HACV} = \phi_T + \phi_{SOL} + \phi_{INF} + \phi_{INT} + \phi_V$$

Di cui il parametro di flusso di calore conduttivo (ϕ_T) rappresenta la somma dei flussi termici che avvengono per conduzione attraverso le componenti opache e trasparenti ed i ponti termici presenti nell'involucro. Questi flussi sono dovuti alla differenza di temperatura tra le superfici interne ed esterne, che dipendono principalmente dal materiale dell'involucro, dalla sua stratigrafia e dalla temperatura dell'aria.

Il contributo solare (ϕ_{SOL}) si riferisce all'intero flusso termico dovuto alla radiazione solare diretta che entra attraverso l'involucro trasparente. Detto flusso dipende da fattori climatici legati alla radiazione solare del luogo quali ubicazione, ora del giorno e stagione dell'anno e dalle proprietà della componente trasparente quali area totale, fattore solare, angolo di incidenza del sole, sistemi di ombreggiatura, ecc.

Il flusso dovuto alle infiltrazioni d'aria (ϕ_{INF}) sono prodotti dagli scambi energetici che avvengono quando l'aria filtra attraverso le pareti. Questo fenomeno è dovuto alle differenze di pressione tra l'ambiente interno ed esterno e alle proprietà dei materiali dell'involucro.

Nell'ambiente interno si possono trovare diverse fonti di calore, tra cui l'occupazione del luogo, la densità delle persone che utilizzano lo spazio e l'attività che svolgono, le apparecchiature degli utenti come computer o diversi dispositivi elettronici comportano un apporto termico l'atmosfera interna dello spazio. Infine, i dispositivi di illuminazione producono a loro volta energia che viene trasmessa sotto forma di calore all'ambiente interno. Questi fattori che non dipendono essenzialmente dai parametri climatici producono un rilevante contributo termico interno (ϕ_{INT}).

L'ultimo fattore che produce un notevole scambio termico all'interno del metabolismo dell'edificio è il flusso termico attraverso la ventilazione (ϕ_V) che è dovuto principalmente allo scambio energetico per convezione dovuto alla ventilazione dell'ambiente interno. Le masse d'aria che entrano nell'ambiente si trovano solitamente in uno stato diverso rispetto alle masse in uscita, producendo uno scambio termico nello spazio. I sistemi di ventilazione meccanica possono ridurre l'entità del flusso di energia,

ciononostante, lo scambio termico dovuto alla ventilazione naturale potrebbe non essere mitigato. Infine, i parametri climatici legati a questa componente sono la velocità del vento, le differenze di pressione e la temperatura dell'aria.

Sebbene il flusso termico sia il principale elemento del bilancio energetico, anche l'illuminazione contribuisce al consumo energetico. Un uso corretto dell'illuminazione naturale riduce la necessità di illuminazione artificiale, migliorando l'efficienza complessiva.

In questo modo, l'involucro adattivo si integra nel controllo di uno o più flussi energetici, influenzando il bilancio termico e permettendo di ridurre il carico energetico dei sistemi HVAC. Esso può controllare la radiazione solare, la ventilazione naturale e i flussi termici conduttivi, consentendo una gestione più efficiente dell'energia. La sua implementazione dipende dallo sviluppo tecnologico e dalla capacità di sincronizzarlo con il bilancio energetico complessivo dell'edificio.

2.8 Il fattore tempo

Negli ultimi anni, l'analisi climatica di una zona ha richiesto una revisione del concetto di stabilità del clima. In passato, si considerava il contesto climatico come un fattore permanente, immutabile nel tempo. Nondimeno, i cambiamenti climatici hanno dimostrato che questi fattori non sono più costanti, ma variano sia a breve che a lungo termine. Questa variazione dinamica delle condizioni ambientali ha reso necessario adattare la progettazione e la gestione degli edifici ai mutamenti climatici:

“I cambiamenti climatici stanno diventando più rapidi e in grado di incidere sulle prestazioni previste non solo a lungo termine, ma anche durante la vita utile degli edifici, richiedendo nuovi paradigmi progettuali, in cui il clima è una variabile temporale che influenza la flessibilità e la resilienza del progetto” (Chiesa, 2020)

In relazione ai cambiamenti climatici a lungo termine, si fanno riferimento a diversi scenari climatici, definiti come rappresentazioni plausibili del clima futuro, utilizzate per valutare l'impatto potenziale del cambiamento climatico antropogenico (Carter, 2001).

Nella Figura 24 sono presentati diversi scenari che variano in base a criteri di proiezione. Gli scenari A1 descrivono un mondo caratterizzato da rapido sviluppo economico e tecnologico, con una popolazione in crescita fino al 2050 e poi in diminuzione. In questo contesto, gli scenari A1 si dividono ulteriormente in base alle tecnologie energetiche utilizzate: fossili (A1FI), non fossili (A1B), e miste (A1T)

Gli scenari B1, più ottimistici, ipotizzano un mondo che adotta tecnologie efficienti e sostenibili, con una riduzione dell'uso delle risorse e soluzioni globali per stabilità economica, sociale ed ecologica. Al contrario, lo scenario A2, più pessimistico, descrive un mondo caratterizzato da conflitti, sviluppo locale piuttosto che globale, e un continuo aumento della popolazione e delle emissioni.

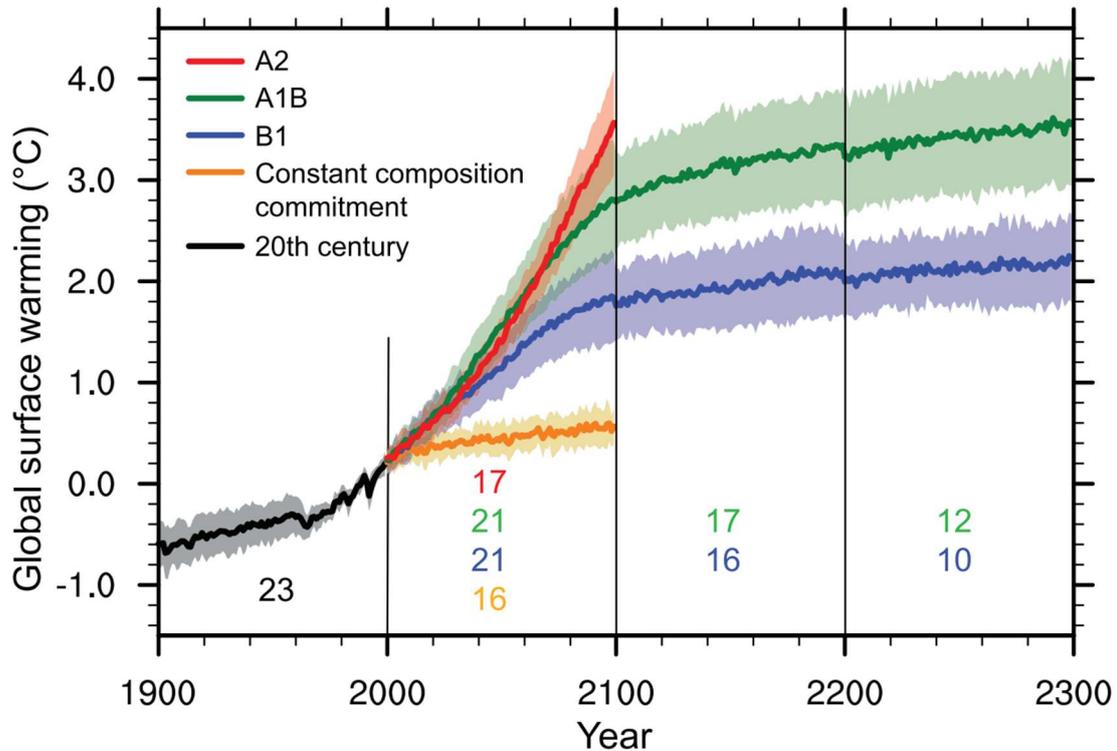


Figura 24 Media multimodale dell'innalzamento della temperatura superficiale (relativo al periodo 1980-1999) per gli scenari A2, A1B e B1, mostrati come continuazioni della simulazione del XX secolo. Fonte: IPCC (Chapter 10: Global Climate Projections, 2007)

Sebbene questi scenari non forniscano certezze assolute, essi confermano la necessità di considerare il clima come una variabile temporale nella progettazione architettonica. In particolare, per garantire il benessere e la funzionalità degli edifici di fronte a scenari climatici estremi, occorre sviluppare soluzioni resilienti.

Fenomeni climatici straordinari, come l'aumento delle temperature, tempeste più frequenti e intense, variazioni nelle precipitazioni, l'innalzamento del livello del mare e il rischio di inondazioni, stanno diventando sempre più frequenti. Nel 2023, si sono verificati almeno 500 eventi climatici estremi in Italia, il doppio rispetto a vent'anni fa.

Questi scenari evidenziano la necessità di realizzare edifici resilienti, cioè capaci di adattarsi ai cambiamenti mantenendo inalterata la loro funzionalità. Devono essere in grado di rispondere a fenomeni che potrebbero causare interruzioni nelle prestazioni dell'edificio, disturbando il benessere degli spazi di fronte a scenari disastrosi.

III LE NUOVE TECNOLOGIE PER L'ARCHITETTURA ADATTIVA

L'aspetto tecnologico dell'involucro adattivo deve essere in grado di integrare tutti i fattori ambientali che si intendono considerare. Le discipline coinvolte, i fattori che influenzano, i tipi di risposta, il funzionamento del processo di adattamento, ecc. Tutti gli aspetti che coinvolgono il sistema adattivo culminano in una soluzione tecnologica capace di tenere conto di ciascuno di questi fattori.

Data la complessità delle aree coinvolte in questi sistemi, sono state sviluppate nuove tecnologie che adottano schemi funzionali sempre più complessi e variegati. È per questo motivo che la ricerca di una definizione e classificazione dei sistemi adattivi rappresenta una sfida se si considerano tutte le discipline e i fattori correlati.

Tuttavia, grazie alla disponibilità tecnologica e all'uso dei sistemi BPS (Building Performance Simulation), è stato raggiunto un consenso sulla classificazione delle soluzioni adattive, basato in gran parte sulle soluzioni che sono state sviluppate fino ad oggi, a questo scopo dare una definizione che sia quanto più chiara possibile, senza tralasciare la flessibilità per l'incorporazione di nuovi progetti che adottino soluzioni in ambito adattivo.

3.1 Definizione e classificazione dell'involucro adattivo

Come indicato da Roel Loonen (2013), le facciate adattive sono involucri edilizi in grado di adattarsi alle mutevoli condizioni climatiche su base giornaliera, stagionale o annuale. Con "adattivo" intendiamo la capacità di rispondere o trarre beneficio dalle condizioni climatiche esterne per soddisfare in modo efficiente ed efficace le esigenze di comfort e benessere degli occupanti. Le facciate adattive sono involucri resilienti ad alte prestazioni multi-parametrici che, al contrario delle facciate fisse, reagiscono meccanicamente o chimicamente al clima esterno dinamicamente per soddisfare i carichi interni e le esigenze degli occupanti.

Visto da una prospettiva biomimetica, un sistema adattivo si comporta in modo simile a un organismo che modifica la sua struttura in risposta alle condizioni ambientali mutevoli. Attraverso questa interpretazione, Nebuloni definisce l'architettura adattiva mediante un approccio parametrico:

"...è possibile comprendere l'architettura adattiva come quei sistemi complessi in cui regole di trasformazione collegate agli input ambientali consentono a elementi liberi della costruzione di passare da una morfologia iniziale a una nuova e inaspettata configurazione." (Nebuloni, 2020)

Un'architettura adattiva viene quindi definita non più da una forma specifica e finita, ma dall'espressività di una serie di possibilità di configurazioni dipendenti da una funzione che, attraverso la manipolazione numerica di parametri di ingresso (dati climatici), interpreta la forma finale del sistema adattivo. Ciò si traduce in una soluzione finale caratterizzata da una forma determinata e diversa per ogni singolo momento, qualificando questo sistema architettonico come dinamico.

Nebuloni (2020) segnala in modo schematico che la composizione dell'architettura adattiva può stratificarsi attraverso un modello algoritmico Input-Processing-Output (I-P-O). Questo sistema adattivo inizia raccogliendo in modo selettivo, mediante sensori,

una serie di dati climatici quali temperatura dell'aria, radiazione solare, umidità, vento, ecc. Questi dati, successivamente, fungono da input per il processo adattivo.

La fase successiva implica l'interpretazione e l'elaborazione di tali dati attraverso l'operazione di processing. Questa fase è caratterizzata da istruzioni logiche progettate per ottimizzare l'efficienza del processo adattivo. Il risultato di questa fase è l'azione responsiva al livello dell'attuatore, rappresentando l'output del sistema adattivo.

L'output finale, quindi, rappresenta la forma definitiva dell'architettura adattiva, risultato di un complesso processo basato sui parametri climatici. Questo processo conferisce alla struttura la qualità della responsività, in cui il tempo, variando con i valori dei dati climatici, diventa una variabile nel progetto responsivo.

La potenzialità dei sistemi di involucro adattivo è strettamente correlata a una significativa riduzione dell'energia nel sistema edilizio, a un miglior benessere degli ambienti interni e alla possibilità di utilizzare meccanismi di energia rinnovabile (Loonen R. C., 2013) Fondamentalmente, queste relazioni derivano dalla capacità dell'involucro adattivo di modificarsi in modo reversibile per regolare i flussi energetici (e quindi le sue proprietà termiche-ottiche) che lo attraversano.

Lo stato dell'arte indica che le soluzioni tecnologiche per l'architettura adattiva sono varie, ma non sono ancora diffuse su scala globale, in parte a causa della mancanza di una comprensione approfondita dei benefici e dei possibili rischi, nonché dell'incapacità di misurarli in modo affidabile. Tuttavia, esiste un notevole potenziale nello sviluppo tecnologico dei sistemi adattivi.

Il problema legato alla mancanza di un sistema di misurazione per determinare i benefici del sistema adattivo è principalmente attribuibile alla sua complessità. I diversi parametri climatici locali (temperatura, radiazione solare, umidità, vento, ecc.), le esigenze termico-ottiche degli utenti, il fabbisogno energetico, l'interazione sistema-clima e utente-sistema, e la variabile temporale caratteristica del sistema adattivo presentano una sfida nell'analizzare il comportamento complessivo del sistema. Di solito, per la progettazione dei sistemi di controllo di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione (sistemi HVAC), i parametri vengono calcolati separatamente, trascurando in gran parte le condizioni climatiche locali e l'interazione con il resto del sistema edilizio.

L'articolo intitolato "Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of Adaptive Façade" (Roel C.G.M. Loonen, 2017) evidenzia la possibilità di utilizzare i sistemi di simulazione delle prestazioni degli edifici (Building Performance Simulation, BPS) per integrare la modellazione e la simulazione nell'analisi delle prestazioni delle facciate adattive, come indicato nello studio intitolato "Integrated Building Performance Simulation: Progress, Prospects and Requirements" (Clarke, 2015).

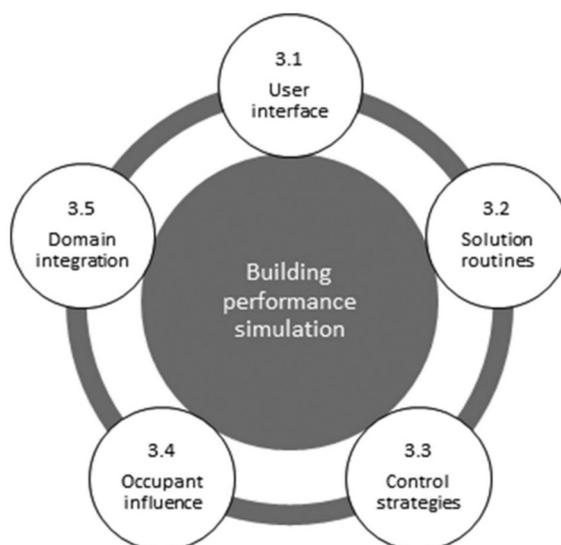


Figura 25 Modellazione BPS e fattori determinanti per la valutazione delle prestazioni dell'involucro adattivo. Fonte (Loonen R. C., 2013)

Tra i potenziali utilizzi dei modelli BPS (vedi Figura 25), spicca l'esplorazione di diverse strategie di controllo per massimizzare le prestazioni dell'involucro adattivo e valutare virtualmente diverse soluzioni tecnologiche e materiali. Per tali ragioni, la modellazione e la simulazione possono offrire informazioni cruciali sulla reciproca influenza tra gli aspetti progettuali e prestazionali degli involucri edilizi adattivi. Ciò può contribuire significativamente alla diffusione di tali tecnologie sul mercato edilizio e favorire lo sviluppo di soluzioni innovative.

Lo schema I-P-O e l'integrazione di modelli BPS nel sistema adattivo permettono quindi di classificare, in una prospettiva tecnico-informatica, questa tipologia di involucro attraverso tre diversi livelli: sensore-controllo-attuatore (vedi figura 26).

Viene illustrato come il sistema di involucro adattivo si integri nello schema, inizialmente concepito per i sistemi di controllo HVAC, sfruttando la variabilità e le potenzialità delle tecnologie a livello di attuatore (Loonen R. C.-M., 2015). In altre parole, la capacità dell'involucro adattivo e la sua categorizzazione si limitano alla possibilità di integrare soluzioni tecnologiche all'interno del modello BPS per valutarne le prestazioni. Per questo motivo, gran parte della ricerca tecnologica si concentra sulla soluzione del componente edilizio che deve essere controllato.

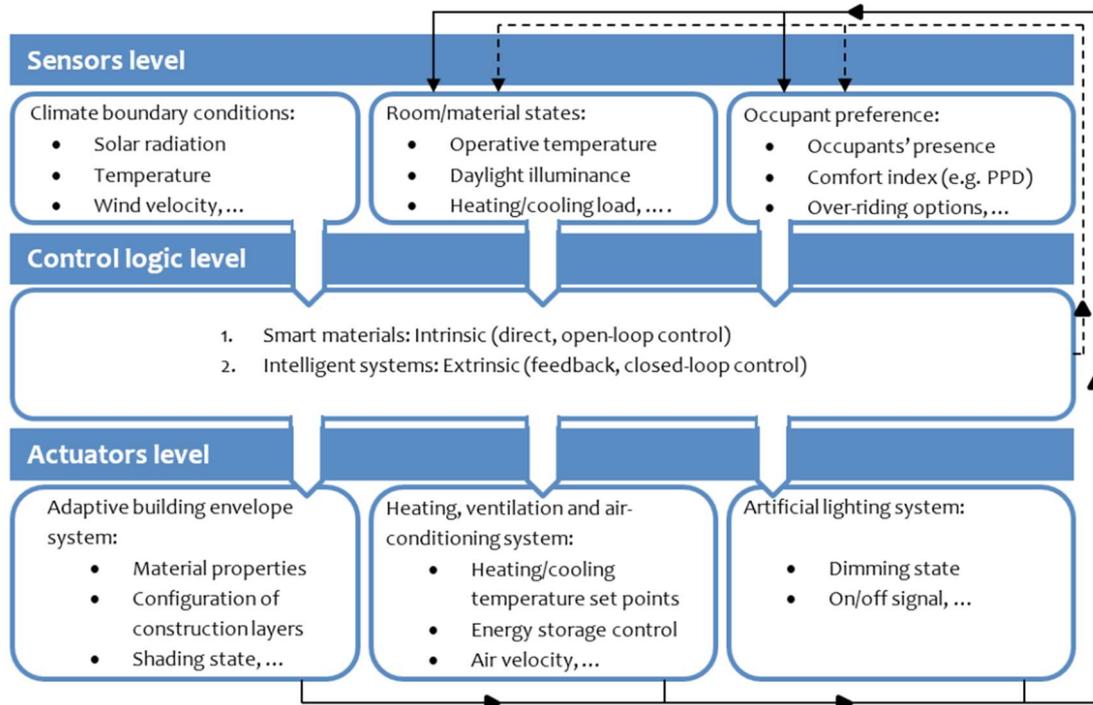


Figura 26 Strategie di controllo per sistemi edilizi compresi i sistemi adattivi. La linea tratteggiata corrisponde al sistema intrinseco mentre la linea continua corrisponde al sistema estrinseco. Fonte (Loonen R. C.-M., 2015)

In aggiunta, l'autore indica che il controllo dell'involucro adattivo può essere suddiviso in due modalità differenti, dipendenti dall'intelligenza che avvia il meccanismo. Il primo si contraddistingue per la reattività automatica del sistema, avviata direttamente dallo stimolo e non da un sistema esterno (cioè dall'utenza).

In questo sistema, lo stimolo genera un cambiamento nell'energia interna del materiale, producendo una reazione chimico-fisica che avvia il meccanismo adattivo. L'autore definisce questi sistemi come "diretti" e di "ciclo aperto" (open loop), facendo riferimento in particolare ai materiali intelligenti. Questo concetto è identificato come la componente intrinseca del sistema di controllo dell'involucro adattivo (come mostrato nella figura 26 tramite la linea tratteggiata).

D'altra parte, il secondo metodo di attivazione è quello estrinseco (rappresentato dalla linea continua), in cui l'attivazione del meccanismo avviene attraverso un componente esterno correlato a una funzione precedentemente determinata come "feedback rule".

Questo tipo di controllo è indicato come "feedback" o "ciclo chiuso" (closed-loop). La maggior parte dei sistemi adattivi corrisponde a un sistema di controllo estrinseco (anche chiamati sistemi intelligenti). Loonen sottolinea che i sistemi intelligenti richiedono una gestione del sistema di controllo per reagire in modo adattivo, comprendendo sensori, processori ed attuatori (Loonen R. C.-M., 2015).

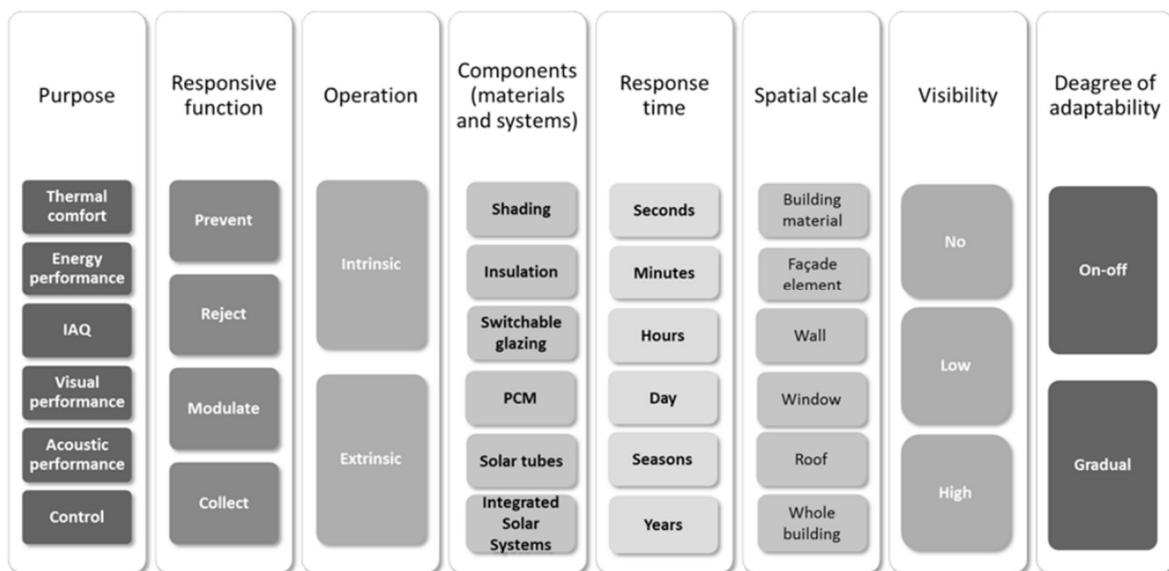


Figura 27 Fattori caratteristici dell'involucro adattivo (adattato da Loonen). Fonte: "Case studies - Adaptive Façade Network" (Laura Aelenei, 2018)

Altri fattori caratterizzanti dell'involucro adattivo (Figura 27), menzionati nell'articolo (Loonen R. C.-M., 2015), corrispondono all'identificazione degli obiettivi da raggiungere, come comfort termico, visivo, qualità dell'aria interna, ecc. Questi possono essere uno o più, a seconda del progetto in questione, senza trascurare l'utilizzo di energia, le emissioni di CO2 e il costo del ciclo di vita. Le tecnologie sono un altro fattore da considerare, la cui categorizzazione è ampia e varia a seconda di ogni progetto; comunque, determinano i sub-sistemi e i materiali dell'involucro adattivo e possono presentare uno o più elementi appartenenti a questo gruppo.

Il fattore tempo, come analizzato in precedenza, viene definito e misurato in base alla scala temporale dell'involucro edilizio in questione, che può variare da minuti, ore o giorni a una scala stagionale o annuale. Il livello spaziale e quello di visibilità corrispondono a fattori di cambiamento morfologico, sia a piccola scala, come a livello molecolare, sia come a gran scala, come ad esempio l'elemento di facciata oppure l'intero sistema edilizio. L'ultima viene definita attraverso il cambiamento nell'aspetto percepito dall'utenza. Infine, l'ultimo fattore corrisponde al grado di adattabilità, che, legato alla scala spaziale, rappresenta in che modo e in che misura l'involucro adattivo reagisce agli stimoli esterni. Questo varia da un grado non-adattivo, relativo all'operazione on-off e a funzioni fisse, fino a un'adattabilità graduale che varia secondo un range definito dall'intensità degli stimoli.

3.1.1 Sfide nella classificazione dell'involucro adattivo

Sebbene sia possibile assegnare una matrice relativa ai fattori caratteristici dell'involucro adattivo o associarla allo schema Input-Process-Output (I-P-O) tramite modelli Building Performance Simulation (BPS), risulta arduo valutare e categorizzare tale tipo di involucro sulla base della letteratura esistente e dei casi studio realizzati o in corso di realizzazione. Tra le principali criticità emerse vi è la mancanza di standardizzazione, strumenti di progettazione e metodi per valutare le prestazioni operative dell'involucro (Adaptive façades system assessment: An initial review, 2015).

Ulteriori problematiche relative alla letteratura esistente riguardano il limitato numero di casi studio documentati sulle prestazioni operative dell'involucro adattivo. L'unicità di

ciascun caso studio costituisce un ostacolo quando si cerca di stabilire un punto di riferimento (benchmark). Ogni caso è definito dal proprio contesto climatico e, di conseguenza, le soluzioni adottate possono variare notevolmente. La sensibilità al contesto climatico e occupazionale dà luogo a soluzioni estremamente localizzate.

L'aspetto multidisciplinare dell'involucro adattivo richiede la comprensione di vari concetti categorizzati in sottogruppi che possono interagire tra loro o meno. Di conseguenza, la classificazione dell'involucro adattivo si fa sempre più dettagliata. Pertanto, per sintetizzare la sua categorizzazione, è necessario identificare diversi modelli presenti nella letteratura esistente, che, come già accennato, corrispondono alla raccolta di informazioni, al processo delle stesse e all'azione fisica conseguente (sistema I-P-O).

Tenendo conto di questi aspetti, è stato fondamentale definire una classificazione in grado di raccogliere e categorizzare le informazioni esistenti, ma che fosse anche flessibile per adattarsi a futuri sviluppi. È importante considerare schemi da una prospettiva generale, ma capaci di approfondire analisi specifiche sullo sviluppo tecnologico dell'involucro. Infine, la classificazione deve fornire sia informazioni descrittive che quantitative per valutare le prestazioni dell'involucro.

3.1.2 Approccio per la classificazione dell'involucro adattivo

Nella ricerca dell'European Cooperation in Science and Technology, nell'ambito dell'azione COST TU1403, i parametri di ricerca per la categorizzazione dell'involucro adattivo si riferiscono alle strutture che compongono l'involucro (sistemi di facciata) e alle sub-strutture come componenti e materiali che, nel loro insieme, fanno parte di questi sistemi di facciata. La ricerca si basa quindi su tre macrogruppi:

Sono evidenziati i sistemi di facciata formati da componenti trasparenti o opachi, sia strutturali che tecnici. Questi sistemi di facciata hanno diversi scopi tecnici, come ad esempio l'isolamento, la protezione contro la pioggia, la protezione contro il vento, ecc. Il secondo gruppo riguarda i componenti, che sono l'assemblaggio di diversi elementi che, nel loro insieme, formano un'unità costruttiva o funzionale della facciata (dispositivi di ombreggiamento, serramenti, ecc.). Infine, nel terzo gruppo, vengono considerati i materiali come sub-gruppo dei sistemi adattivi (vedi figura 28).

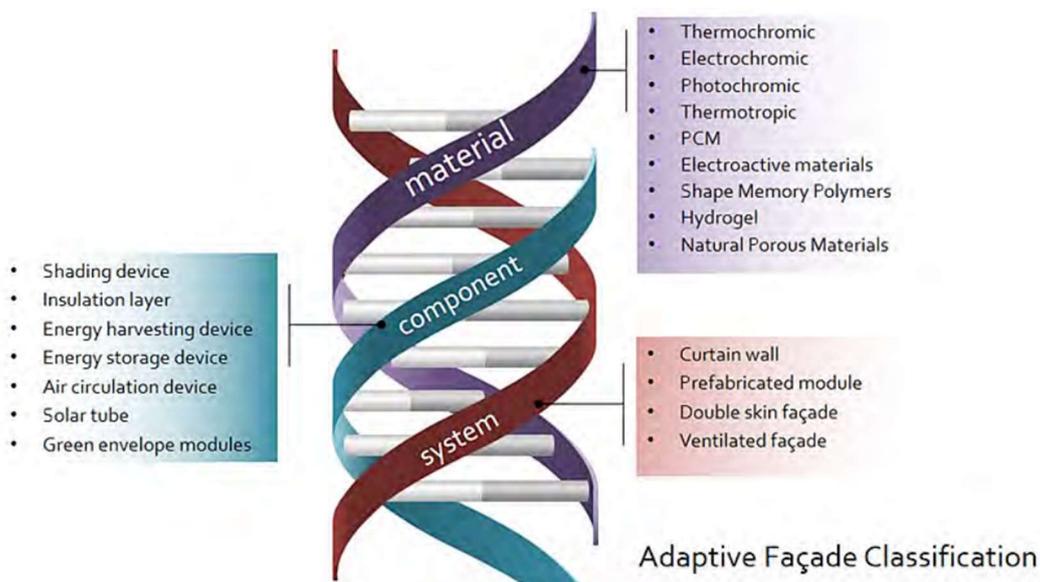


Figura 28 Diagramma di classificazione dei casi studio del WG 1 dalla collaborazione del COST Action TU 1403. Fonte (Laura Aelenei, 2018)

3.2 Classificazione dell'involucro adattivo

La classificazione dell'involucro adattivo viene quindi suddivisa in tre concetti piramidali. Alla base ci sono i materiali adattivi, che sono in fase sperimentale e sono ancora in fase di sviluppo, la loro praticità è di difficile applicazione data la scarsa operabilità dei materiali.

In secondo luogo, vengono presentati i componenti adattivi, che possono essere costituiti o meno da materiali adattivi, anche la loro diffusione è in fase di sviluppo; tuttavia, hanno applicazioni tecnologiche molto più pratiche rispetto ai materiali adattivi.

L'ultima parte della classificazione si riferisce ai sistemi adattivi, che possono comprendere sia materiali che componenti adattivi, la loro applicazione è molto più diffusa nel campo dell'architettura date le loro elevate prestazioni.

Tale classificazione è flessibile: una soluzione tecnologica può presentare i tre concetti ed essere classificata all'interno di ciascuno di essi, allo stesso tempo, la componente adattiva è ciò che definisce la classificazione finale di ciascuna soluzione. Una finestra che presenta materiali elettro attivi si distingue più per la composizione materiale della finestra stessa che per la sua struttura come finestra; quindi, la sua classificazione si troverebbe all'interno dei materiali adattivi.

Per questo motivo, diventa opportuno definire una soluzione attraverso un approccio critico rispetto alla sua funzionalità adattiva.

3.2.1 Materiali adattivi

I materiali adattivi sono comunemente noti come "smart materials" o "intelligent materials". Quando si fa riferimento ai materiali intelligenti, ci si riferisce spesso a materiali che possiedono capacità di risposta rapida, sia intrinseche che estrinseche. Queste capacità implicano concetti di intelligenza e discernimento nella risposta, sebbene non si consideri comunemente un materiale come "ingegnoso". Inoltre, i materiali presentano diverse caratteristiche: Immediatezza (risposta in tempo reale), Transitorietà (risposta a più stati ambientali), Auto-attuazione (intelligenza interna al materiale), Selettività (risposta discreta e prevedibile) e Direttività (risposta locale all'evento attivante) (Addington & Schodek, 2005).

Per quanto riguarda la classificazione dei materiali adattivi, si distinguono due tipi principali. Il primo tipo consiste in materiali che subiscono cambiamenti in una o più delle loro proprietà (chimiche, meccaniche, elettriche, magnetiche o termiche) in risposta diretta a cambiamenti negli stimoli esterni associati all'ambiente circostante. Questi cambiamenti sono diretti e reversibili, e non richiedono un sistema di controllo esterno per reagire agli stimoli. Questa categoria comprende materiali come quelli termocromici, termotropici e a memoria di forma.

Il secondo tipo consiste in materiali che trasformano un tipo di energia in ingresso (input) in un altro tipo di energia (output) in modo diretto e reversibile. Di conseguenza, un materiale elettro-restrittivo trasforma l'energia elettrica in energia elastica (meccanica), che a sua volta si traduce in un cambiamento di forma fisica. Questa categoria include materiali come quelli fotovoltaici, termoelettrici, piezoelettrici, fotoluminescenti ed elettrostrittivi.

3.2.2 Vetro termocromico ed elettrocromico, esempi di materiali adattivi

Come visto in precedenza, l'involucro trasparente del sistema edilizio riveste un ruolo significativo nello scambio energetico tra gli ambienti esterni e interni, contribuendo al bilanciamento del comfort visivo e al controllo del benessere termo-igrometrico. Ciò si traduce in una riduzione del consumo energetico necessario per la climatizzazione e l'illuminazione, rendendo tale involucro una componente essenziale del metabolismo edilizio.

Tuttavia, è possibile che un involucro trasparente, a causa di una progettazione errata, diventi la principale fonte di discomfort e aumento del consumo energetico dell'organismo edilizio. Dal momento che gran parte del controllo della radiazione solare è affidato a sistemi di ombreggiamento piuttosto che al componente trasparente stesso, i costi di installazione, manutenzione e gestione possono risultare elevati e rappresentare un ostacolo.

Le finestre adattive, o intelligenti, consentono di regolare i propri coefficienti di trasmissione al fine di controllare il flusso di energia e luce in relazione ai parametri ambientali esterni e alle esigenze degli utenti. Studi hanno dimostrato che le finestre dinamiche possono ridurre fino al 60% il consumo energetico destinato all'illuminazione, il 20% quello per il raffrescamento e il 26% del consumo finale per il riscaldamento (Casini, 2015).

Un primo approccio a un componente trasparente adattivo è rappresentato dai vetri termocromici (Figura 29). Questi materiali reagiscono chimicamente alle variazioni di temperatura superficiale esterna, passando da uno stato trasparente a uno opaco in pochi minuti, in modo autonomo e senza l'intervento dell'utente. Le temperature superficiali che consentono la trasparenza variano solitamente tra i 10°C, con massima trasparenza, e i 65°C, con massima opacità (Suntutive, 2024). Il materiale termocromico consiste in pellicole di plastica polivinilbutirrale (PVB) dello spessore di 1,22 millimetri.

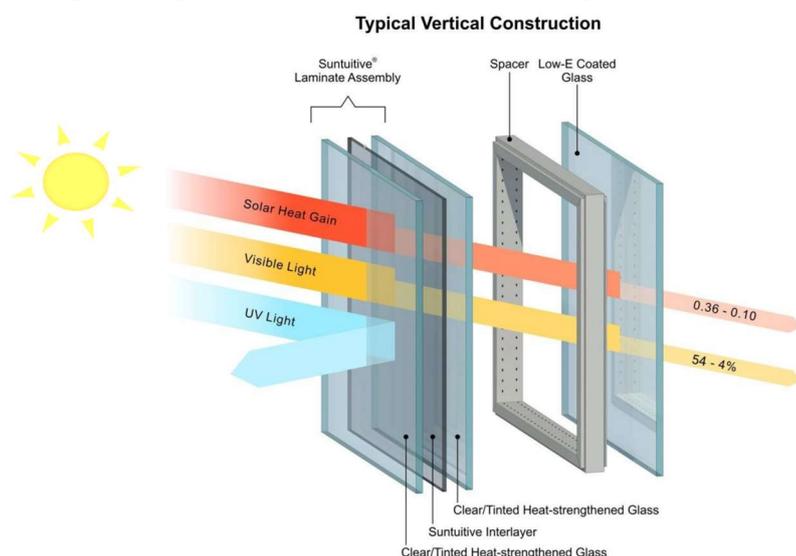


Figura 29 Costruzione tipica di finestre termocromatiche. Fonte: "Suntutive Dynamic glass. Technical information" (Suntutive, 2024).

Nondimeno, questa tipologia di vetro non permette un controllo diretto da parte degli utenti, in superficie di aree vetrate elevate potrebbe presentare disomogeneità del materiale e vi è il rischio che non si raggiunga una temperatura sufficiente per garantire

l'opacità o che non si regoli adeguatamente il flusso luminoso, causando abbagliamento agli utenti.

Un'altra tipologia di vetro adattivo, molto più diffusa rispetto a quella precedente, è il vetro elettrocromico (EC) (Figura 30). A differenza del vetro termocromico, questo materiale reagisce agli stimoli elettrici forniti dall'utente, modificando la trasmissione, la riflessione e l'assorbimento della luce attraverso il vetro. L'aggiunta o l'estrazione di ioni nello strato elettrocromico altera la colorazione del materiale mediante l'attivazione o la disattivazione del campo elettrico. Uno strato di ione conduttore (elettrolita) è inserito tra due strati, composti rispettivamente da un film elettrocromico (elettrodo) e uno strato di accumulo (contro elettrodo).

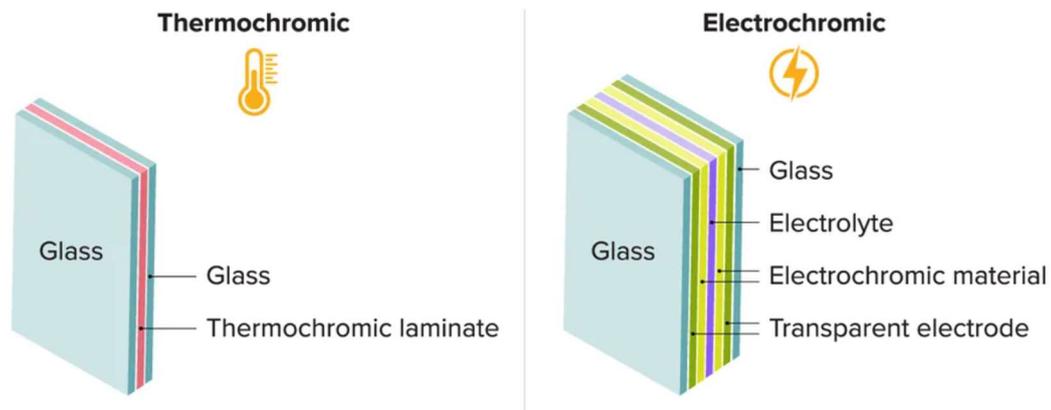


Figura 30 Stratigrafia di due tipi di vetri intelligenti, termocromiche a sinistra ed elettrocromiche a destra. Fonte: "What Will It Take for Smart Windows to Go Mainstream?" (Miller, 2022)

Come indicato dallo schema (figura 31) l'applicazione diretta di tensione provoca la migrazione degli atomi carichi dallo strato di accumulo attraverso l'elettrolita allo strato elettrocromico, il quale subisce una reazione di riduzione-ossidazione (redox) che comporta l'assorbimento della luce e, di conseguenza, un cambiamento nella sua colorazione. Una volta invertita la tensione, gli ioni migrano nuovamente dallo strato elettrocromico, attraverso l'elettrolita, fino allo strato di accumulo, riportando il vetro al suo stato trasparente. Questo cambiamento può avvenire in pochi minuti in modo completamente omogeneo (Hahn, 2024).

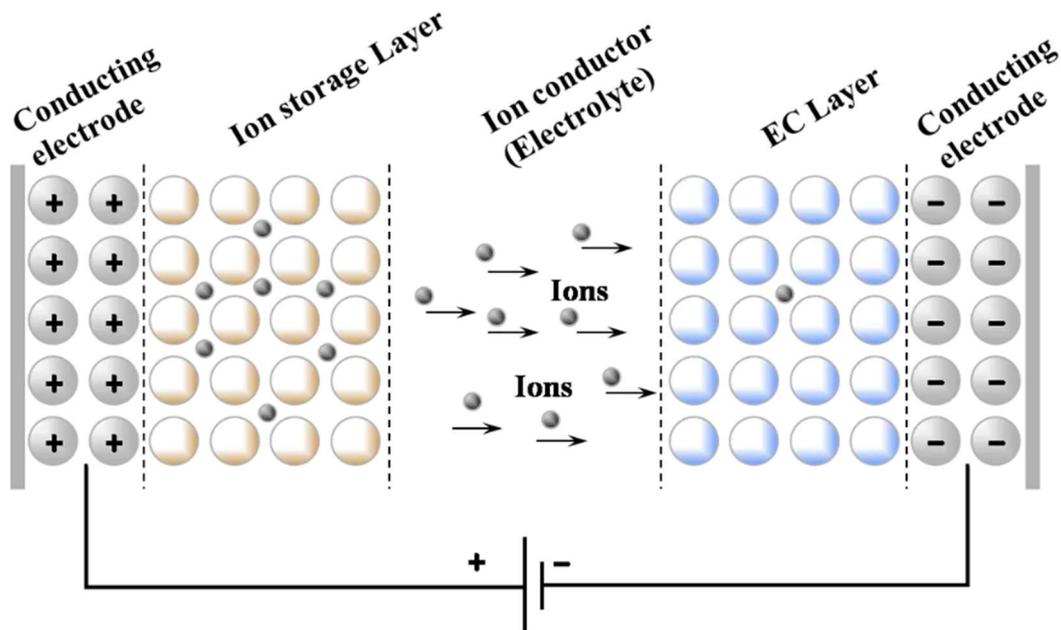


Figura 31 Cella elettrocromica, funzionamento della finestra elettrocromica. Fonte: "What is electrochromic smart glass?" (Hahn, 2024)

Come indicato da Casini (Casini, 2015) questa tipologia di involucro trasparente consente di ridurre il consumo energetico per l'illuminazione, regolando il flusso di luce e calore e riducendo l'energia utilizzata per il riscaldamento massimizzando il guadagno solare diretto e diminuendo il consumo per il raffreddamento bloccando il surriscaldamento causato dalla radiazione solare. Tuttavia, sebbene permetta la permeabilità visiva, questo materiale non riesce ad essere completamente opaco, rimanendo sempre in modo maggiore o minore trasparente e quindi influenzando la privacy dello spazio interno. Inoltre, il costo di questo materiale risulta piuttosto elevato rispetto ad alcuni sistemi di schermatura o al vetro comune.

3.2.3 Componenti adattivi

I componenti adattivi rappresentano gran parte dello stato dell'arte attuale. Sebbene i materiali adattivi permettano una risposta adeguata ai fattori climatici, la loro incapacità di renderli operabili a seconda delle necessità dell'utenza, non permette di sviluppare ulteriormente progetti adattivi pratici, rimanendo al momento come un campo ancora da sperimentare.

Dall'altra parte, i componenti adattivi permettono l'operabilità dell'utenza e una maggiore flessibilità alle esigenze che non coincidano con i fattori climatici-ambientali. Per questo motivo, l'uso di componenti adattivi permette una maggiore presenza dentro della progettazione di moduli adattivi.

Inoltre, i componenti adattivi possono presentare, all'interno della loro morfologia, materiali adattivi, il che rende possibile integrare i vantaggi di determinati materiali all'interno di un componente che può, a seconda delle esigenze dei progetti, essere eventualmente incorporato nei sistemi di facciata.

Per questo motivo, i componenti adattivi possono essere utilizzati nell'uso di sistemi modulari, dato che un componente può essere un modulo tra diversi implementati in un sistema di facciata adattiva. Tutti i casi studio analizzati in questo capitolo, infatti, presentano componenti adattive che definiscono la modularità dei sistemi studiati.

La definizione che Aelenei (2018) dà di una componente adattiva è la seguente: “Una componente può essere definita come l’assemblaggio di diverse tipologie di elementi. In questo modo si crea un’unità completa, costruttiva o funzionale, che fa parte di una facciata”.

Tra i componenti principali che non fanno parte di un sistema adattivo, come comunemente accade, ci sono la maggior parte dei componenti che presentano sistemi interattivi con l'utente. Cioè, sono sistemi adattivi che di solito sono regolati direttamente con le esigenze delle persone che interagiscono con il componente.

Per questo motivo viene evidenziata la rilevanza dei componenti adattivi per la loro interattività con l'utente, un aspetto molto poco presente nei materiali adattivi e raramente all'interno dei sistemi adattivi. Alcuni esempi notevoli sono le finestre interattive, che permettono di regolare l'illuminazione, la temperatura o altri fattori più complessi come l'opacità o la gestione con sistemi esterni direttamente dall'interazione con il componente.

Questa interazione tra l'utente e la componente adattiva risulta essere uno dei fattori più innovativi e caratteristici dell’involucro adattivo, consentendo all'utente di connettersi con sistemi di comunicazione e multimediali Aelenei (2018). Tuttavia, componenti adattive di questo tipo sono ancora in fase di sviluppo, dove la componente tecnologica, oltre allo sviluppo di soluzioni legate all'architettura e all'edilizia, dipende dallo sviluppo di sistemi di interazione con l'utente.

3.2.4 Sistemi adattivi

I sistemi adattivi rappresentano la soluzione più complessa e funzionale di un progetto adattivo. I sistemi integrano tutti i livelli e i fattori del progetto adattivo; dal livello sensoriale, nella raccolta dei dati ambientali, al livello di processo logico e di attuatore, in cui viene rappresentato il cambiamento nelle sue morfologie.

Infatti, come indicato da Aelenei (2018): “I sistemi di involucro si sono trasformati da soluzioni tecnologiche passive a sistemi attivi in grado di produrre energia rinnovabile e, soprattutto, trasformando gli edifici in sistemi dinamici e adattivi, in termini di configurazione spaziale e comportamento degli ambienti pelle esterna, per migliorare le condizioni di comfort interno.”

I sistemi adattivi possono presentare soluzioni che fanno uso di materiali adattivi (o intelligenti) come materiali a cambiamento di fase (PCM), pannelli fotovoltaici, ecc. Possono anche sviluppare soluzioni che fanno uso di componenti adattivi e li applicano in modo modulare, dando luogo allo sviluppo di un complesso sistema di sensori, processi che coinvolgono un gran numero di parametri e fornendo soluzioni a problemi che, in misura maggiore o minore misura, consentono un cambiamento nella morfologia del sistema.

I sistemi adattivi consentono, quindi, di fornire una soluzione più completa e assertiva al problema clima-ambientale. Dato che i fattori da considerare sono molteplici e coinvolgono molti fattori in diversa misura tra loro correlati, il trattamento dei dati a cui è sottoposto il sistema varia a seconda di ciascuna circostanza e la risposta che deve generare non dovrebbe presentare la stessa logica della risposta precedente. Poiché l'interpretazione dei risultati, pur basandosi su basi parametriche, non dovrebbe essere lineare.

In questi casi è utile paragonare il sistema adattivo con la capacità di un essere vivente di adattarsi all’ambiente esterno. Nel caso dell'uomo la risposta fisiologica dell'organismo varia a seconda delle condizioni dell'ambiente esterno; significa

temperatura radiante, temperatura dell'aria, umidità, ecc. Oltre a dipendere dalle caratteristiche di ciascuna persona; tasso metabolico, abbigliamento o attività svolta, ecc.

Allo stesso modo in cui l'essere umano può rispondere a tali fattori intrinsecamente, cioè iniziare a sudare, avere la pelle d'oca o altri meccanismi del corpo per regolare il proprio flusso energetico, i sistemi adattivi sono in grado di generare risposte automatiche, senza necessità interpretare i dati, come avviene nel caso dei sistemi che utilizzano materiali intelligenti.

D'altra parte, continuando con l'analogia con l'essere umano, ogni persona può interpretare il proprio senso di comfort e adottare misure estrinseche che le consentano di regolare le condizioni in cui si trova. Ad esempio, aprire o chiudere finestre, proteggersi dal sole, coprirsi, accendere impianti di climatizzazione, ecc. Allo stesso modo, i sistemi adattivi possono elaborare dati provenienti da condizioni esterne e interne e generare una risposta razionale in base all'entità dei fattori che ricevono.

3.3 Casi studio di involucro adattivo

Per comprendere come funzionano le facciate adattive e la loro relazione con materiali, componenti e sistemi adattivi, è opportuno studiare alcuni dei casi studio più rilevanti. Lo stato dell'arte è ampio, il tema dell'involucro adattivo è stato frutto di studio in diversi progetti, alcuni sono stati realizzati ed altri sono ancora in fase di progettazione.

Considerato che i coinvolgimenti adattivi non sono attualmente un tema così recente, ma che allo stesso tempo presenta potenzialità di sviluppo piuttosto rilevanti, è possibile avere un'idea delle potenzialità di tale tipologia di involucro attraverso casi esistenti. Sulla base dei risultati ottenuti da ciascun progetto, è possibile prevedere o quantificare l'impatto che potrebbero avere sul suo sviluppo.

3.3.1 Caso studio: Arab world institute

L'Institut du Monde Arabe rappresenta una delle prime espressioni di involucro adattivo. Progettato nel 1987 a Parigi, Jean Nouvel ha creato un sistema di facciata adattiva per la facciata sud dell'edificio, attraverso l'implementazione di 240 moduli adattabili situati tra le lastre di vetro di una facciata continua che cercano di ricreare la Musciarabia araba (Laura Aelenei, 2018). In principio, l'involucro reagisce all'ingresso della radiazione diretta, controllando l'illuminazione naturale all'interno dell'edificio.

Anche se attualmente il sistema viene attivato in base all'ora del giorno, il concetto originale si basava su un sistema che reagiva al fattore luce diurna.

I sensori fotoelettrici ricevevano l'informazione di luce naturale in ingresso (input) che veniva processata attraverso un sistema estrinseco che, in base ai parametri di comfort visivo, produceva un segnale che attivava il cinematismo dei moduli, modificando la superficie opaca dei moduli della facciata (output), consentendo il controllo della radiazione solare diretta all'interno dell'edificio.

La facciata utilizza un sistema meccanico modulare in cui ogni modulo ha elementi mobili opachi che ruotano attorno al centro di ciascun modulo. Il meccanismo funziona tramite impulsi elettrici che attivano un sistema meccanico idraulico costituito da pistoncini che, attraverso uno spostamento orizzontale o verticale, producono la rotazione del disco centrale di ciascun modulo che muove ciascun elemento opaco.

In questo modo i moduli funzionano come diaframmi meccanici, analogamente all'obiettivo di una macchina fotografica o al funzionamento dell'occhio umano. Essendo un sistema modulare, la ripetibilità di ciascun modulo può presentare facilità nella manutenzione, installazione e funzionamento dell'intero sistema edilizio.

Sebbene questo concetto funzioni per regolare l'illuminazione naturale degli spazi



Figura 32 Institut du monde arabe. Sinistra: vista interna. Destra: prospetto facciata. Fonte: "Institut du monde arabe (IMA)" (Nouvel, 2024)

interni e ridurre il consumo energetico dovuto al riscaldamento e al raffreddamento dell'edificio, l'elevata complessità tecnologica di questi moduli presenta elevati costi di produzione e manutenzione rispetto ad altre soluzioni di sistemi adattabili. Per questo motivo, senza tener conto del grande apporto compositivo che genera, una tale soluzione potrebbe risultare economicamente impraticabile o molto scomoda rispetto ad altre soluzioni modulari adattabili.

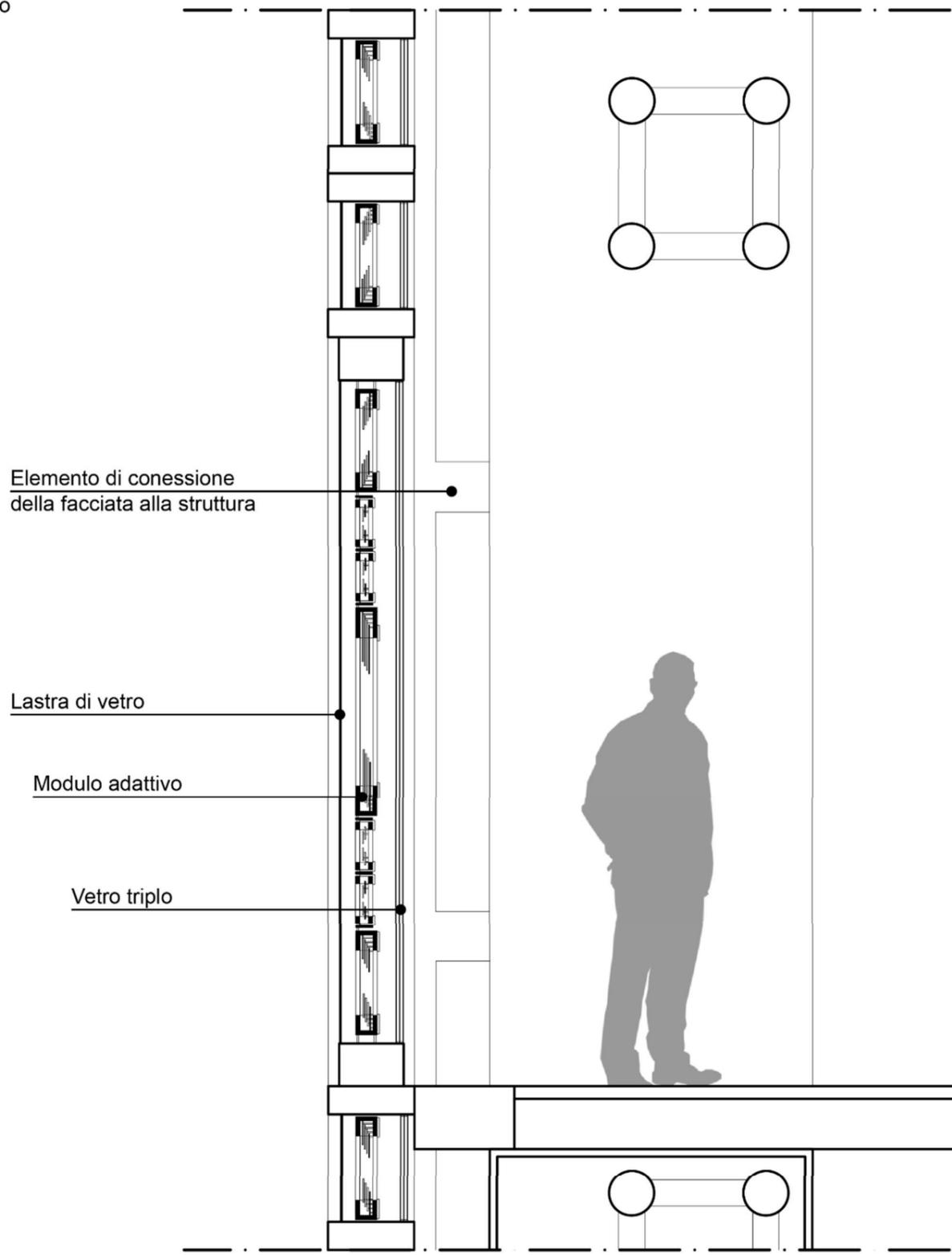
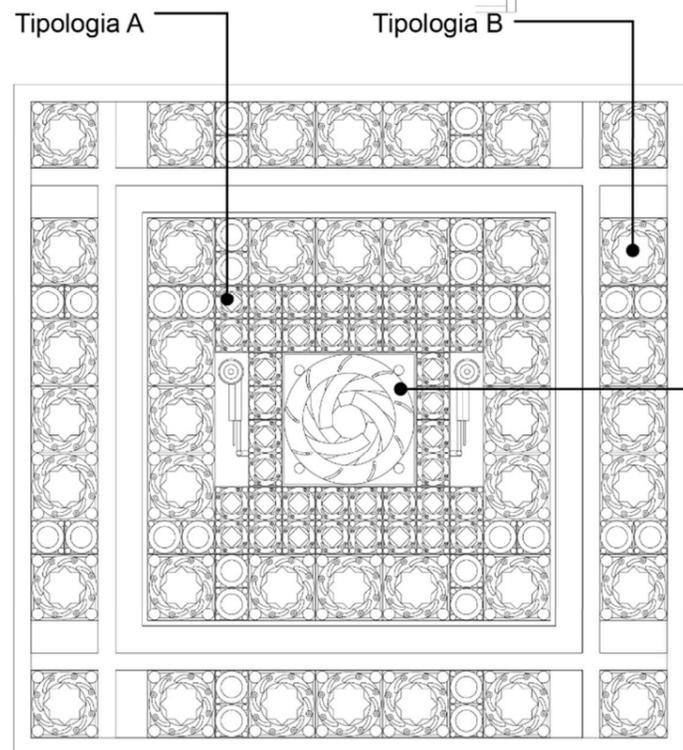
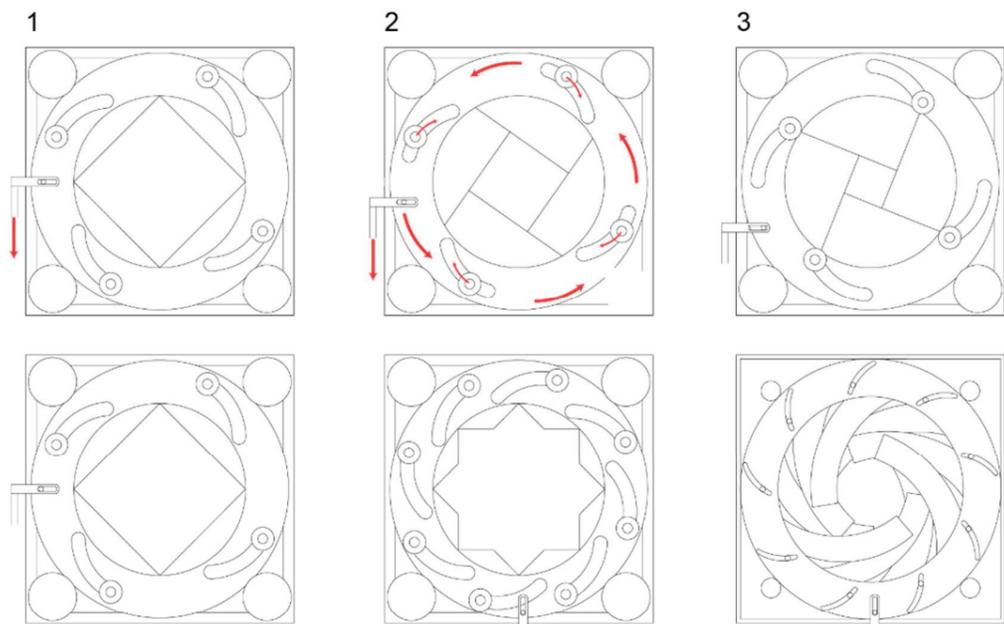
In ogni caso, questo edificio segna uno dei primi progressi nella regolazione dinamica dei flussi energetici attraverso l'involucro. Uno sviluppo tecnologico nei meccanismi che attivano i sistemi adattivi potrebbe portare ad un miglioramento dell'aspetto economico di tali soluzioni e, quindi, al raggiungimento di una migliore e più redditizia efficienza energetica senza compromettere i costi di produzione e manutenzione delle stesse.



Figura 33 Vista interna dell'Institut du monde arabe. Fonte: "Institut du monde arabe" (architecturestudio, 2024)

Tipo di dinamismo: meccanico
Parametri climatici di controllo: radiazione solare, luce naturale
Funzione: controllo termico del guadagno solare, controllo dell'illuminazione naturale
Sistema di dinamismo (output): rotazione dei moduli attraverso un sistema meccanico idraulico
Modularita': si
Parametro attuatore (Input): livello di luce diurna
Tipo di controllo: centralizzato

Cinematismo del modulo



SCALA 1:20

3.3.2 Caso studio: Media TIC-Building

L'edificio, costruito nel 2009 dallo studio Cloud 9 a Barcellona, Spagna, rappresenta un esempio avanzato di utilizzo di tecnologie innovative, come l'integrazione di un sistema di facciata adattabile con ETFE⁶ finalizzato alla riduzione delle emissioni di CO2 e al miglioramento dell'efficienza energetica. La progettazione si basa su un approccio parametrico, volto a ottimizzare gli spazi, massimizzare l'illuminazione naturale e migliorare il rapporto tra superficie distribuita e edificata.

In termini di adattabilità, la facciata è concepita come una "pelle" con l'obiettivo di massimizzare le prestazioni per garantire il comfort degli utenti.

Come indicato da Macedo (2007), la facciata è realizzata con una configurazione a diaframma. In pratica, i cuscini in ETFE, suddivisi in tre camere d'aria con pressione costante e circolazione d'aria variabile, garantiscono un isolamento termico ottimale.

La facciata utilizza tre strati di ETFE: il primo, esterno, è completamente trasparente, mentre il secondo e il terzo, semiopachi, consentono una configurazione flessibile che permette di regolare la radiazione solare, bloccandola completamente o lasciandola filtrare nell'ambiente interno, a seconda delle necessità.

Ogni facciata è progettata in base alle specifiche condizioni di esposizione solare. Ad esempio, la facciata sud-est è dotata di una doppia pelle in ETFE, con un fattore solare che varia da 0,35 quando aperta a 0,25 quando chiusa. La facciata sud-ovest, che riceve maggiore irraggiamento solare, dispone di due strati di ETFE riempiti di azoto; variando la densità del gas, è possibile ridurre il fattore solare da 0,45 a 0,10, grazie all'utilizzo di sensori di temperatura integrati nella facciata (Macedo, 2007).

L'edificio è dotato di oltre 300 sensori che contribuiscono alla gestione efficiente del consumo energetico. I sensori di presenza regolano i consumi in base all'occupazione degli spazi, mentre i sensori fotosensibili ottimizzano il consumo di illuminazione,



Figura 34(Superiore) Vista delle facciate CAC e Sancho D'Ávila. (Inferiore) Vista dell'involucro adattivo dall'interno. Fonte: "Media-TIC Building" (J.M. Hernandez e I. Baan, 2024)

⁶ Etilene-tetra-fluoro-etilene, polimero ancora in fase di ricerca e diffusione, con diverse prestazioni termiche, visive, antincendio, resistenza ai raggi UV e via dicendo. (Wikipedia, ETFE, 2024)

soprattutto al piano terra. Per quanto riguarda la facciata adattabile, 104 sensori con CPU⁷ monitorano i cuscini in ETFE, consentendo loro di agire come moduli autonomi e indipendenti.

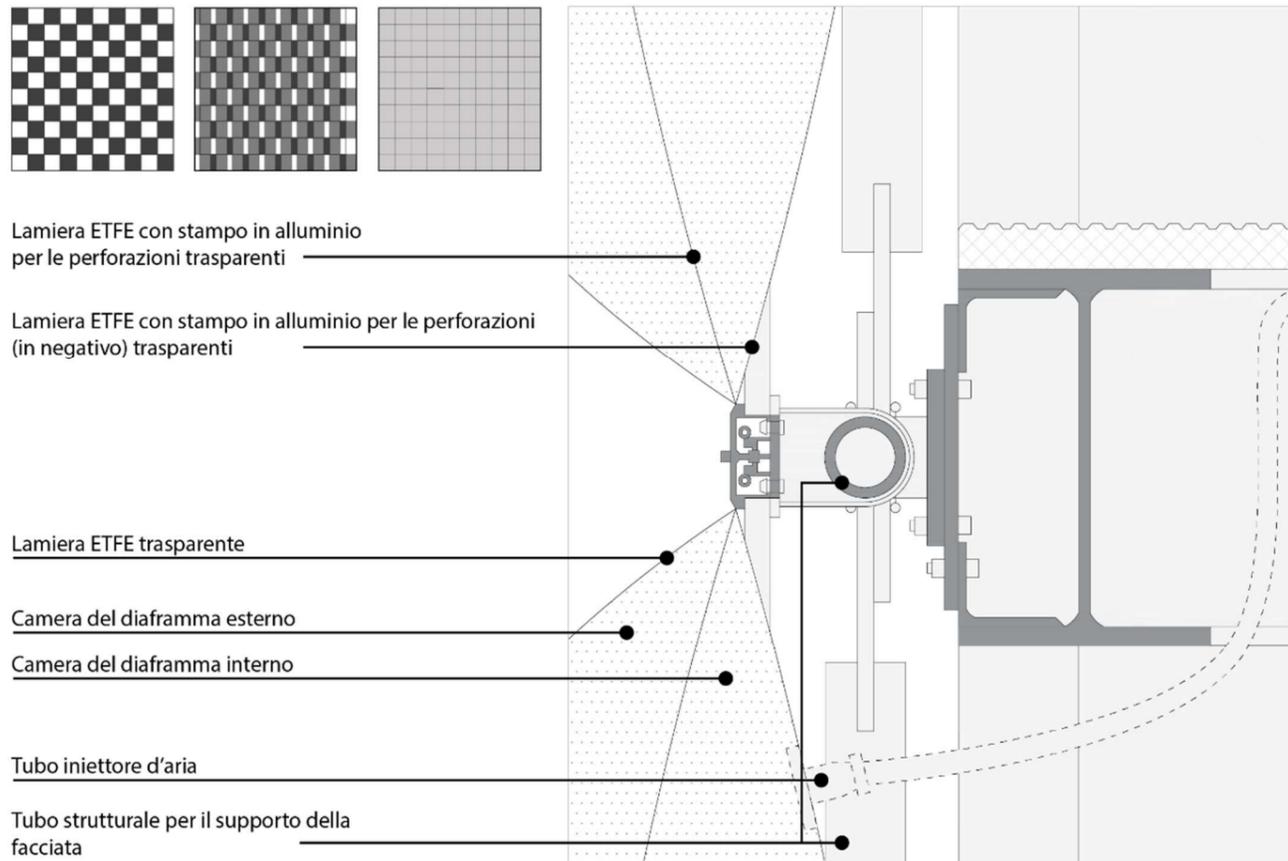
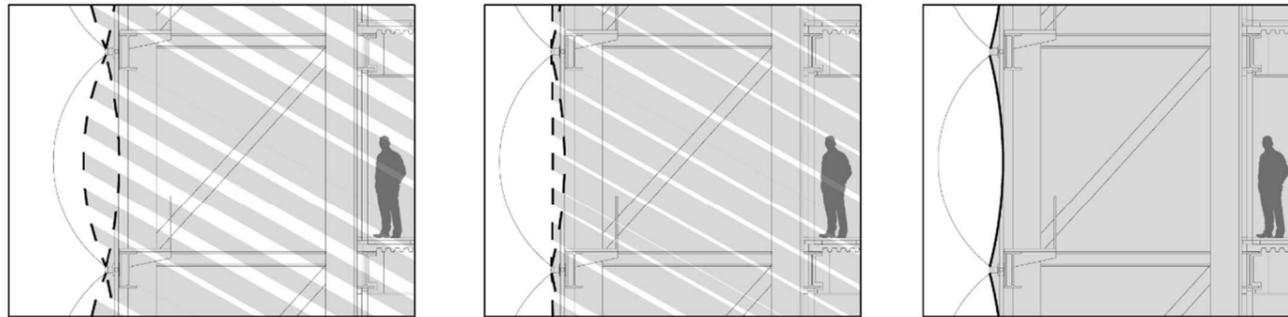
In conclusione, questo progetto rappresenta un esempio significativo di sviluppo tecnologico, grazie all'impiego di materiali innovativi come l'ETFE, l'uso di sistemi parametrici per la gestione energetica e l'implementazione di facciate adattabili. La facciata dell'edificio ha dimostrato di poter migliorare notevolmente l'efficienza energetica, con una riduzione di quasi il 70% del consumo energetico e del 60% delle emissioni di CO₂, rispetto agli edifici di riferimento. Questo risultato ha permesso all'edificio di ottenere la classificazione A nella certificazione energetica (Ruiz-Geli, 2024).



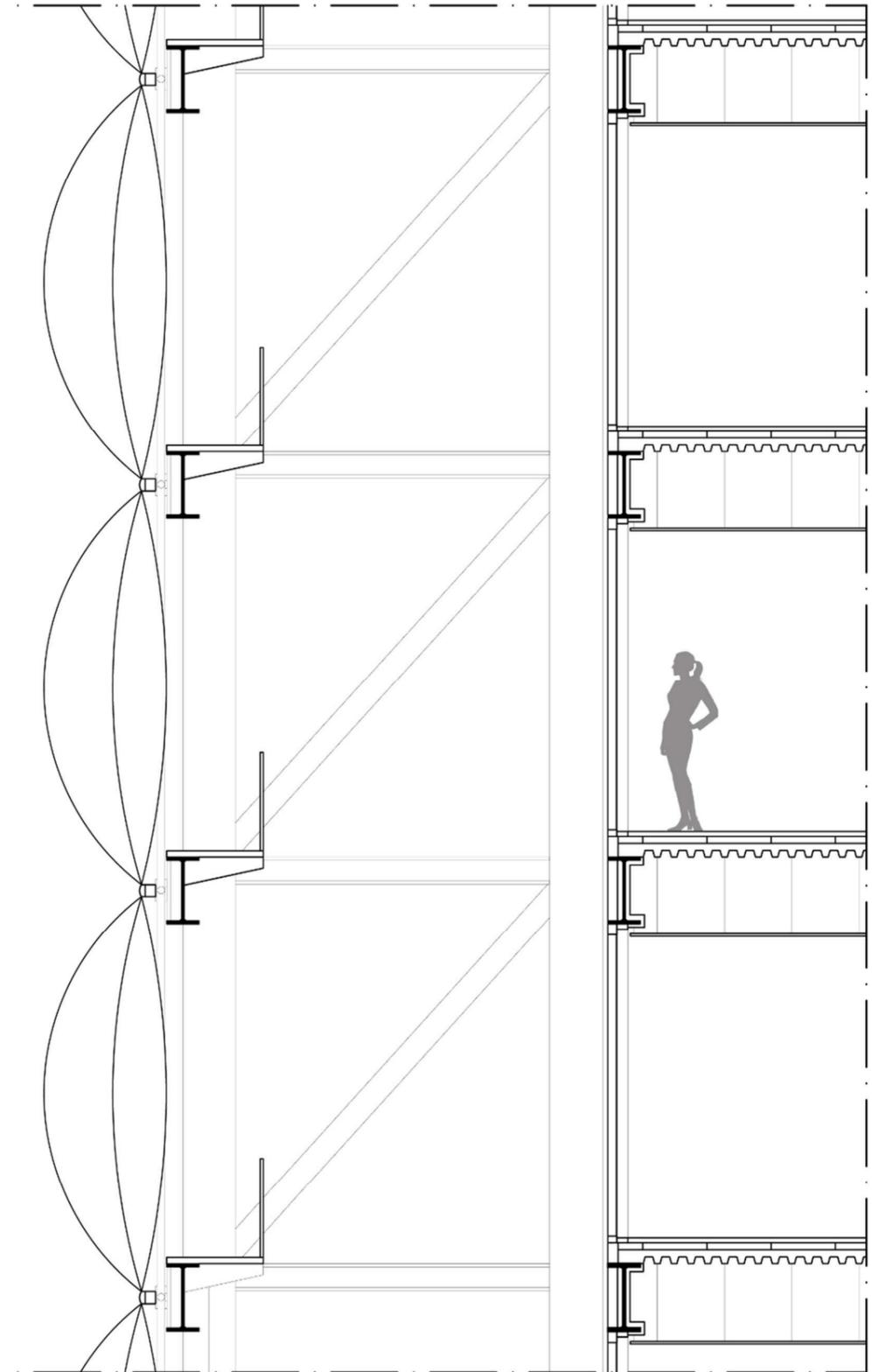
Figura 35 Vista degli spazi interni verso la facciata Sancho D'Ávila. Fonte: "Media-TIC Building" (I. Baan, 2024)

⁷ Central Processing Unit, determina il livello di controllo logico della facciata come un sistema intelligente estrinseco: i dati sensoriali vengono processati attraverso parametri e funzioni gestiti dalla CPU, dopo una previa programmazione. (Vedi figura 26)

Tipo di dinamismo: Meccanico idraulico
Parametri climatici di controllo: Radiazione solare, luce naturale, temperatura dell'aria
Funzione: Controllo termico del guadagno solare, controllo dell'illuminazione naturale, isolamento termico
Sistema di dinamismo (output): Tassellatura di lamiere perforate per la sovrapposizione attraverso un meccanismo diafragmatico
Modularità: Sì
Parametro attuatore (Input): Livello di luce diurna, temperatura dell'aria interna
Tipo di controllo: Modulare



SCALA 1:10



SCALA 1:50

3.3.3 Caso studio: Al Bahar Towers

Le Al Bahar Towers, progettate dallo studio Aedas in collaborazione con il gruppo ingegneristico Arup, sono due grattacieli situati ad Abu Dhabi, completati nel 2012. Questi edifici, alti 145 metri, si trovano in un contesto climatico caldo e arido, caratterizzato da temperature che raggiungono i 46°C e da un'elevata esposizione alla radiazione solare per la maggior parte dell'anno. A fronte di queste condizioni climatiche estreme, il progetto ha integrato un sistema di ombreggiatura adattivo, ispirato alla Mashrabiya araba (ARUP, 2024).

Il sistema di ombreggiatura consiste in una serie di moduli triangolari, progettati parametricamente e posizionati a due metri dalla facciata trasparente. Questi moduli, realizzati in PTFE⁸, formano una facciata dinamica che si apre e si chiude a seconda dell'esposizione solare, riducendo così la quantità di radiazione che penetra all'interno dell'edificio. Quando la facciata trasparente è maggiormente esposta alla radiazione solare, i moduli si aprono completamente per bloccare la luce diretta, mentre si chiudono quando le condizioni esterne non influiscono sul comfort termico interno. Il progetto prevede un totale di 1049 moduli, suddivisi in settori controllabili autonomamente, con la possibilità di gestione individuale per ogni modulo.



Figura 36 Vista del sistema di facciata adattiva delle Al Bahar Towers, 2012. Fonte: Fabiana Valentini, "Al Bahar Towers, le torri di Abu Dhabi con facciata solare intelligente" (2024)

Il funzionamento del sistema è regolato da un software di monitoraggio solare "sun-tracker"⁹, che coordina l'apertura e la chiusura dei moduli in base al percorso del sole. Inoltre, i moduli sono dotati di sensori di radiazione solare e il sistema è connesso a un anemometro posizionato sul tetto, in modo che i moduli possano chiudersi automaticamente in caso di venti forti, prevenendo danni strutturali.

⁸ Poli-tetra-fluoro-etilene, materiale simile al EFTE con delle differenze nelle sue proprietà; maggiore resistenza alle temperature, maggiore resistenza alla trazione e allo strappo. (Wikipedia, 2024)

⁹ Elemento di livello di controllo logico proprio di sistemi intelligenti che processano il percorso solare durante tutto l'anno, permettendo di controllare di forma estrinseca la risposta della facciata (Vedi figura 26)

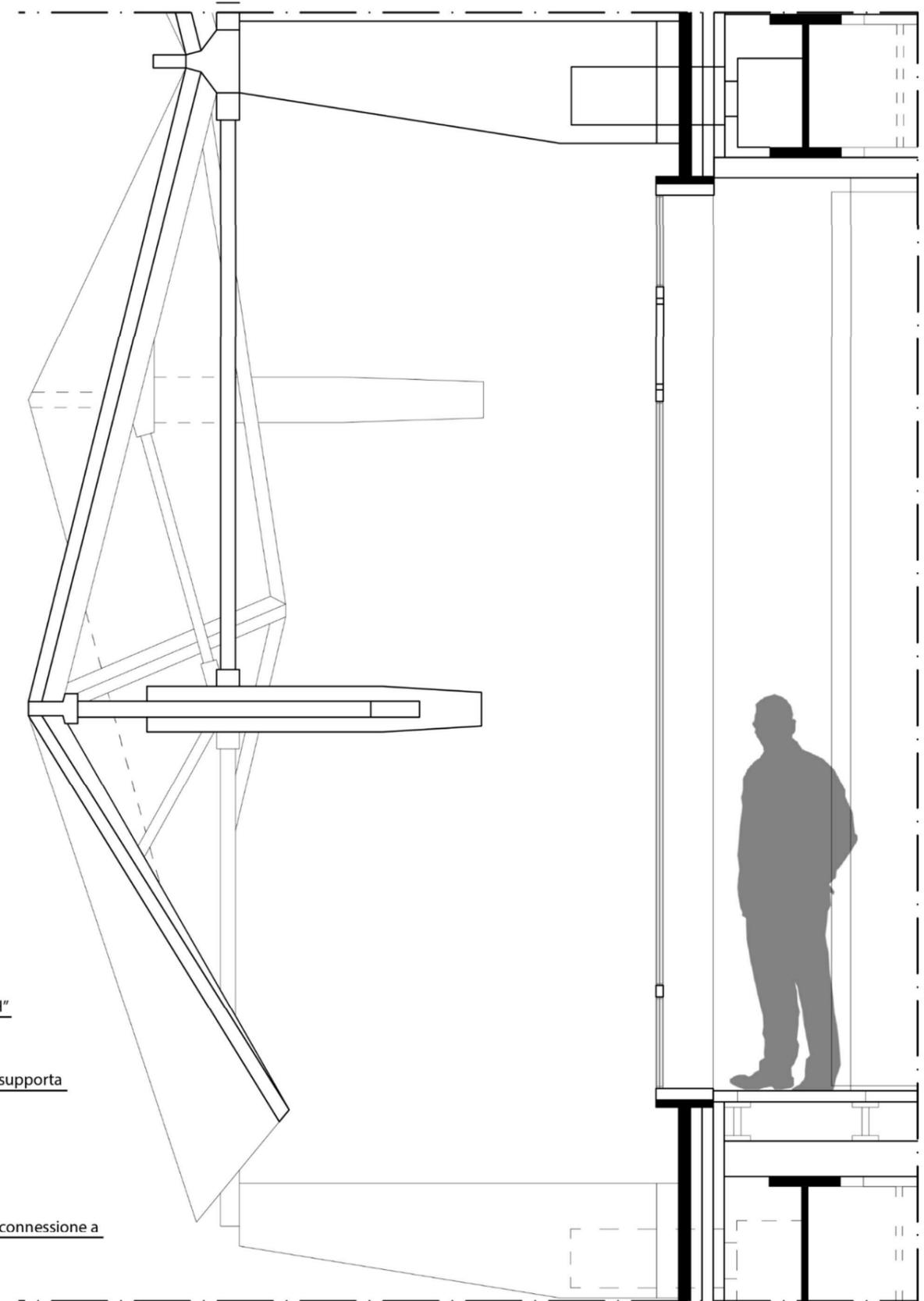
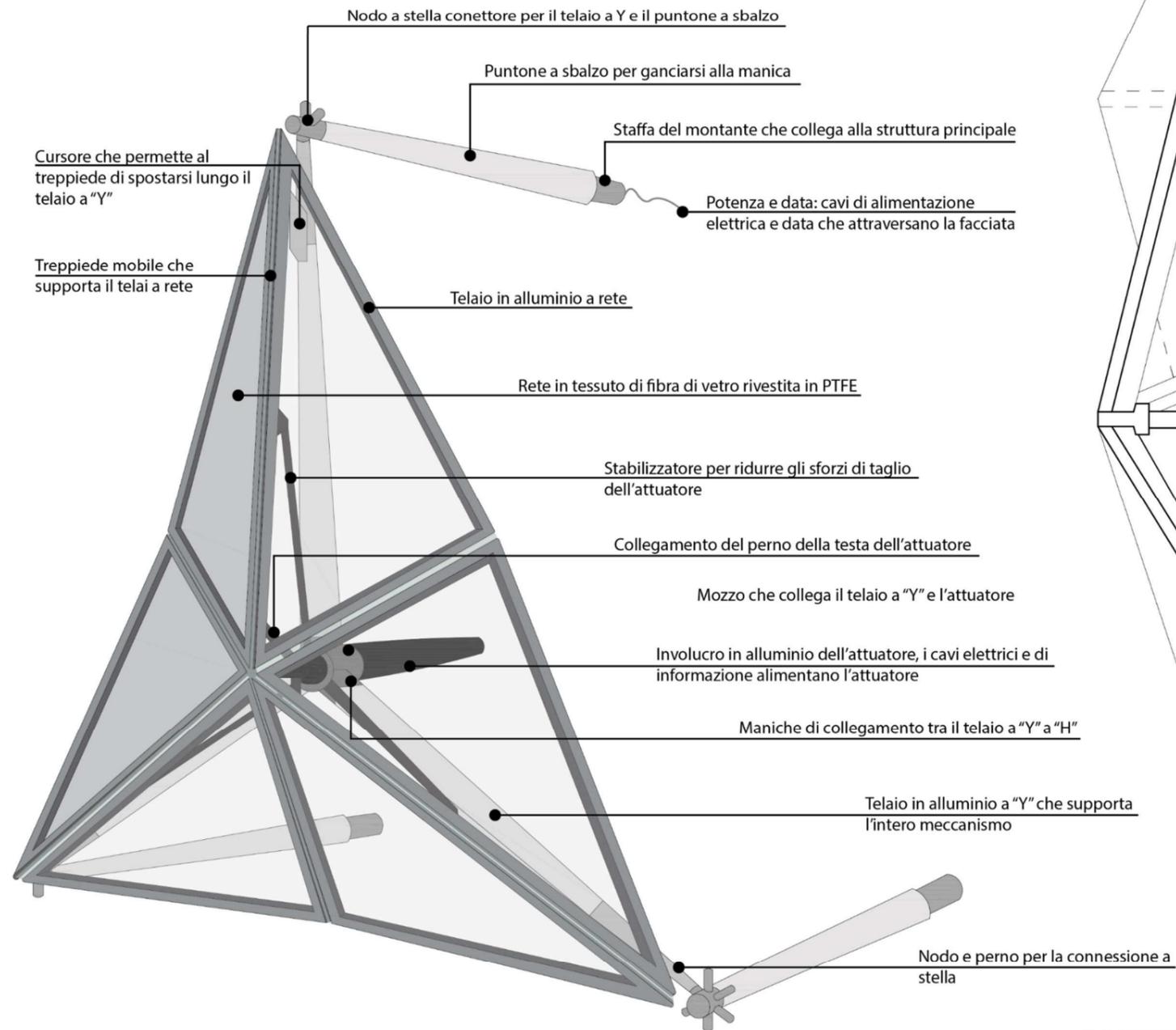


Figura 37 Particolare del modulo di componente adattivo delle Al Bahar Towers, 2012. Fonte: Fabiana Valentini, "Al Bahar Towers, le torri di Abu Dhabi con facciata solare intelligente" (2024)

Come indicato dallo studio Arup (2024), grazie a questa soluzione tecnologica, il progetto ha ottenuto la certificazione “Silver status” secondo il sistema LEED dell’US Green Building Council, riuscendo a ridurre del 50% la radiazione solare diretta e, di conseguenza, i consumi energetici per illuminazione e condizionamento.

In sintesi, le Al Bahar Towers rappresentano un esempio avanzato di architettura sostenibile, combinando l'efficienza energetica con un'identità culturale distintiva. Nonostante la tipologia di edificio a torre non sia generalmente la più efficiente dal punto di vista energetico, l'integrazione di un sistema di facciata adattiva ha significativamente ridotto il fabbisogno energetico di entrambi gli edifici.

Tipo di dinamismo: Meccanico idraulico
Parametri climatici di controllo: Radiazione solare, luce naturale, temperatura dell'aria
Funzione: Controllo termico del guadagno solare, controllo dell'illuminazione naturale, isolamento termico
Sistema di dinamismo (output): Tassellatura di lamiere perforate per la sovrapposizione attraverso un meccanismo diafragmatico
Modularita': Sì
Parametro attuatore (Input): Livello di luce diurna, temperatura dell'aria interna
Tipo di controllo: Modulare



SCALA 1:20

3.3.4 Caso studio: *The Design Hub Façade*

L'edificio progettato dallo studio Sean Godsell Architects nel 2012 a Melbourne, Australia, è stato concepito per ospitare spazi destinati all'educazione universitaria e alla ricerca nel campo del design. La facciata dell'edificio si compone di due strati distinti: uno strato interno, costituito da vetro doppio, e una facciata esterna, progettata per fungere da sistema di ombreggiamento adattabile, in grado di regolare la quantità di radiazione solare che entra all'interno dell'edificio.

L'involucro adattivo esterno è costituito da moduli circolari, ognuno dei quali è formato da dischi di vetro sabbato inseriti all'interno di cornici circolari di alluminio zincato, con una profondità di 13 centimetri. I dischi possono ruotare attorno a un asse orizzontale o verticale, permettendo così di controllare sia la luce solare sia il flusso d'aria che attraversa l'involucro dell'edificio. Questi moduli sono assemblati in pannelli di dimensioni 1,8 x 4,2 metri, con ciascun pannello composto da 21 moduli, di cui 12 operabili e 9 fissi, posizionati a circa 70 cm dalla facciata principale trasparente (Archello, 2024).

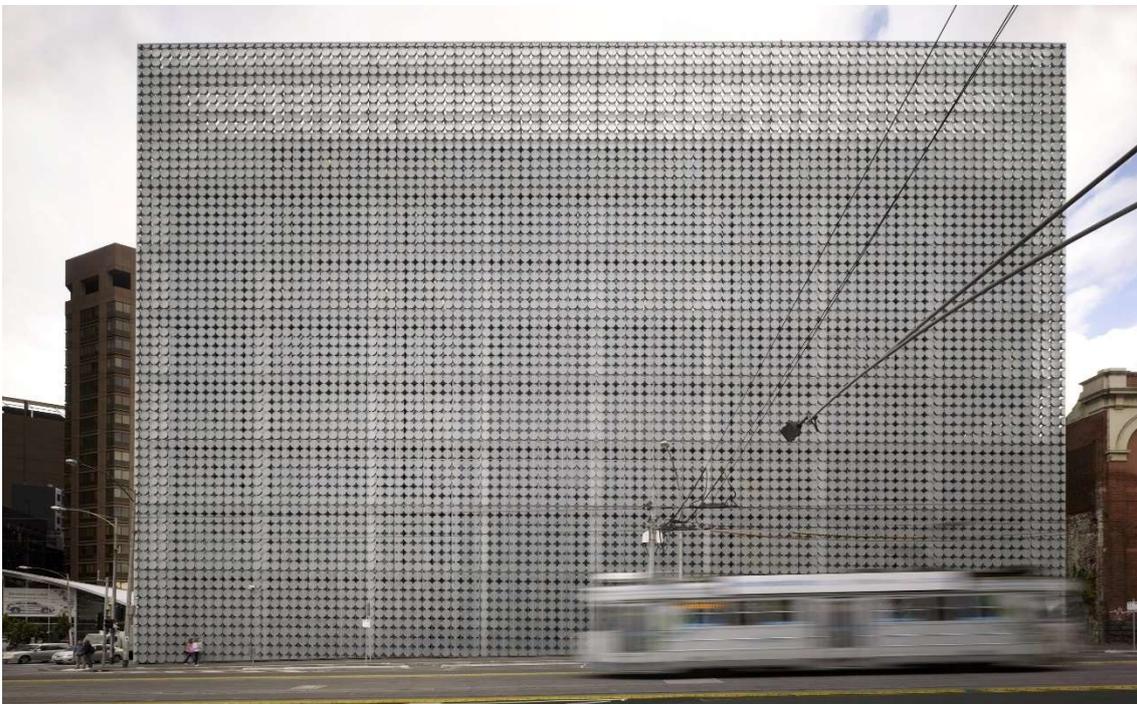


Figura 38 Vista esterna dell'edificio. Fonte: "RMIT Design Hub" (Carter, 2024)

Il sistema di gestione della facciata è regolato da sensori di umidità e temperatura posti all'interno dell'edificio. Questi sensori raccolgono dati ambientali che determinano la risposta della facciata adattabile. In base alla posizione del sole e ai parametri climatici rilevati, i dischi ruotano per regolare il flusso d'aria o ridurre la quantità di radiazione solare diretta che entra negli spazi interni. Questo sistema di facciata viene descritto come "estrinseco", poiché sviluppa una risposta esterna visibile e dinamica in base alle condizioni climatiche.

In quanto riguarda la facciata interna utilizza un sistema di raffreddamento passivo denominato "Coolgardie safe", il quale viene potenziato dall'azione della facciata esterna. Grazie alla regolazione del flusso d'aria, la facciata esterna contribuisce a migliorare l'efficacia del raffreddamento passivo, riducendo così il carico termico sugli impianti di climatizzazione. (Archello, 2024).

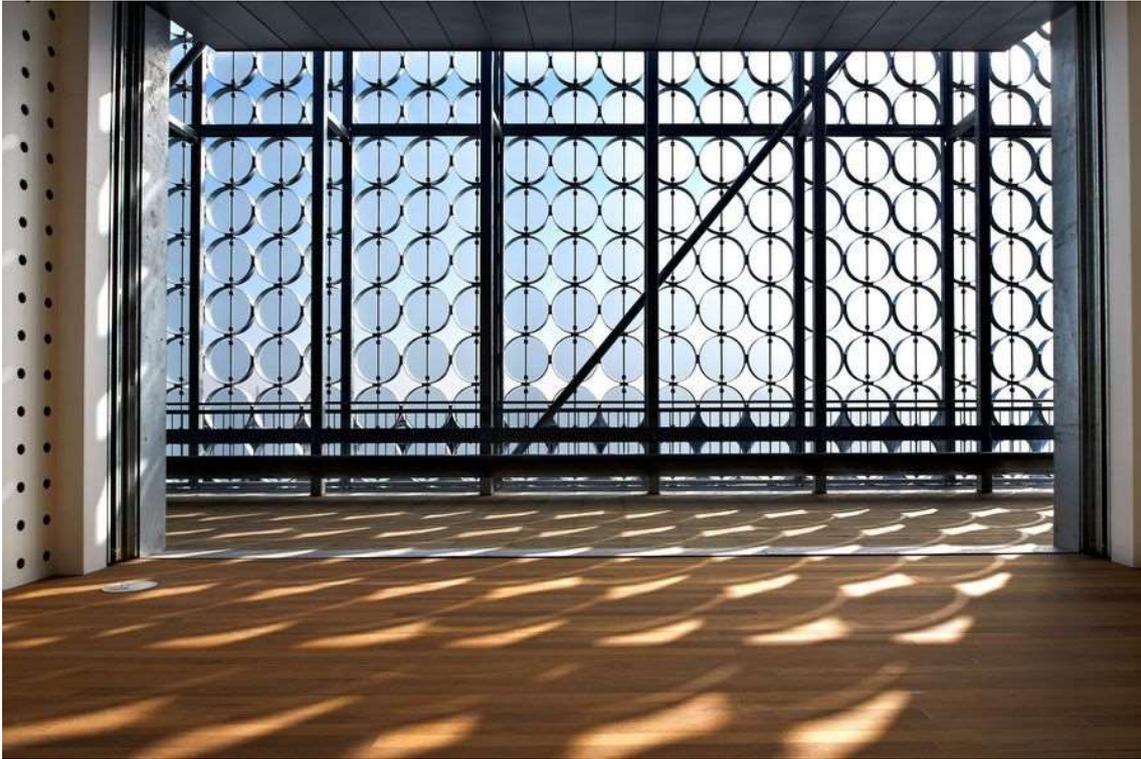


Figura 39 Vista interna dell'edificio. Fonte: "RMIT Design Hub to harness sunlight" (Carter, 2024)

Considerando il clima di Melbourne, caratterizzato da variazioni stagionali significative, l'integrazione di una facciata adattabile in grado di ottimizzare il raffreddamento passivo e ridurre l'ingresso di calore durante i mesi più caldi rappresenta una soluzione altamente efficiente dal punto di vista energetico. Questo sistema non solo migliora il comfort interno, ma riduce anche il consumo di energia per il condizionamento degli spazi, affrontando in modo efficace le sfide climatiche locali.

Tipo di dinamismo:
Meccanico

Parametri climatici di controllo:
Radiazione solare, flusso di aria

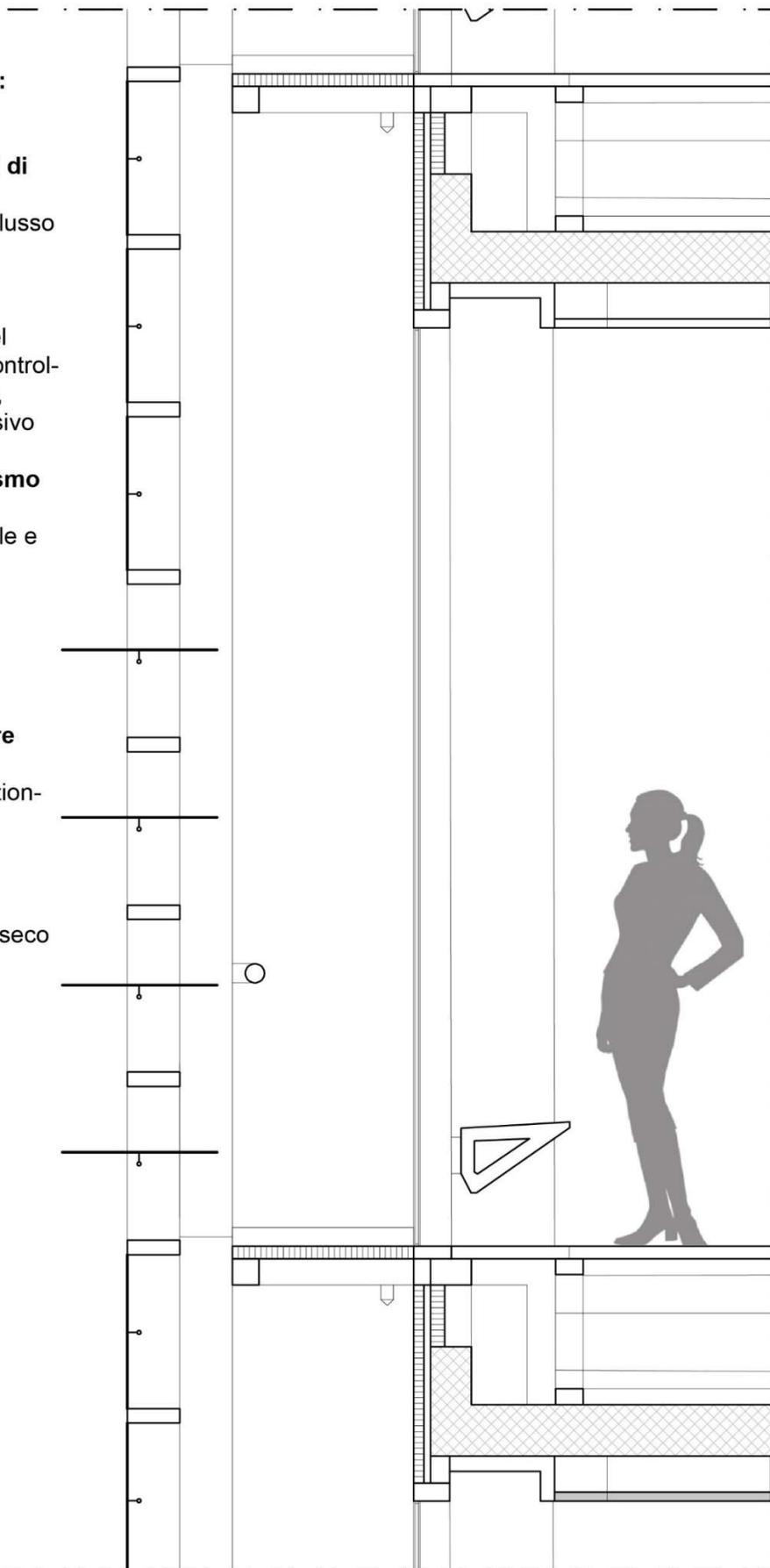
Funzione:
Controllo termico del guadagno solare, controllo della ventilazione, raffreddamento passivo

Sistema di dinamismo (output):
Rotazione orizzontale e verticale di dischi schermanti

Modularita':
Si

Parametro attuatore (Input):
Temperatura operativa
Umidita' relativa

Tipo di controllo:
Centralizzato, estrinseco



3.3.5 Caso studio: Kiefer Technic Showroom

Il progetto di uffici e showroom, completato nel 2007 a Bad Gleichenberg dallo studio Ernst Giselsbrecht + Partner ZT GmbH, è caratterizzato da una facciata adattabile in alluminio progettata per ottimizzare l'efficienza energetica e la gestione della luce naturale. L'edificio, situato in una zona dal clima temperato, affronta la sfida dell'illuminazione e della radiazione solare mediante una soluzione di facciata dinamica che consente di controllare l'ingresso della luce naturale e ridurre la radiazione solare diretta.

La facciata è costituita da pannelli in alluminio perforato che si dispiegano verticalmente grazie a binari installati su montanti strutturali in alluminio. Ogni pannello può essere ripiegato a metà grazie a cerniere centrali, consentendo agli utenti di regolare l'illuminazione naturale e la visibilità. I pannelli sono azionabili manualmente o, in assenza di intervento umano, possono essere gestiti automaticamente tramite un sistema di sensori interni. Questi sensori monitorano le condizioni ambientali e regolano la posizione dei pannelli per ottimizzare il flusso energetico e garantire il comfort interno.



Figura 40 Vista esterna dell'edificio con i moduli attivati in alternanza. Fonte: "Dynamic Façade (Kiefer Technic showroom)" (Ott, 2024)

Il sistema di controllo estrinseco e centralizzato consente all'edificio di modificare la propria configurazione durante il corso della giornata, conferendo un aspetto variabile a seconda delle ore e delle condizioni ambientali. Ciò permette di migliorare l'efficienza energetica dell'edificio, riducendo il fabbisogno di illuminazione artificiale e di raffrescamento.

In sintesi, questo progetto rappresenta una soluzione efficace e semplice che coniuga esigenze estetiche e prestazioni energetiche. La facciata adattabile offre una risposta innovativa alle problematiche legate alla gestione della radiazione solare e alla riduzione dei consumi energetici, dimostrando come l'architettura possa rispondere in modo dinamico alle condizioni climatiche e ai bisogni dell'utenza.



Figura 41 Vista particolare di ogni modulo aperto. Fonte: “Dynamic Façade (Kiefer Technic showroom)” (Ott, 2024)

Tipo di dinamismo:
Meccanico

Parametri climatici di controllo:
Radiazione solare, illuminazione naturale

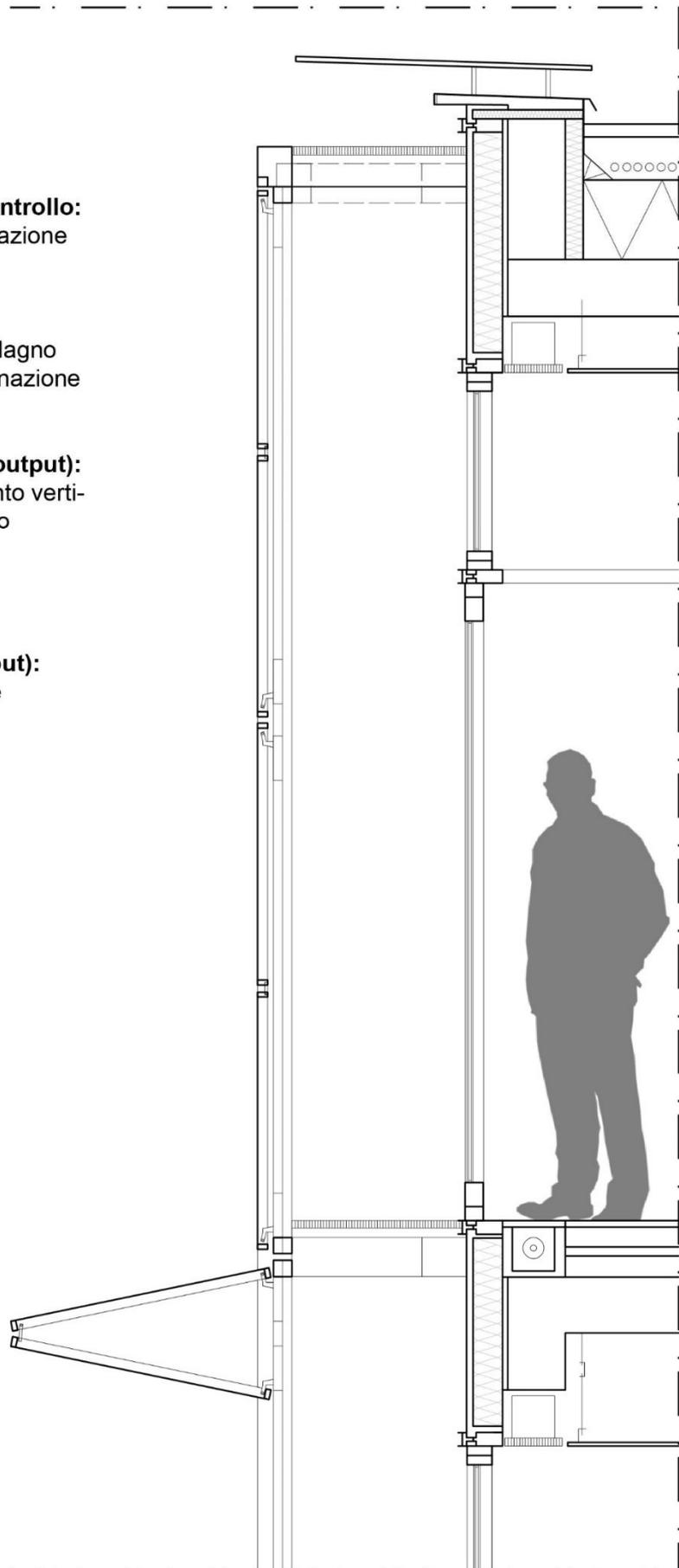
Funzione:
Controllo termico del guadagno solare, controllo dell'illuminazione naturale

Sistema di dinamismo (output):
dispiegamento/ripiegamento verticale dei moduli in alluminio

Modularita':
Si

Parametro attuatore (Input):
Temperatura operativa
Fattore di luce diurna

Tipo di controllo:
Centralizzato, estrinseco



IV PROPOSTA PER LA “MANICA NUOVA” PRESSO LA SEDE “CASTELLO DEL VALENTINO” DEL POLITECNICO DI TORINO

La “Manica Nuova” presso la sede “Castello del Valentino” del Politecnico è un corpo edilizio che presenta nel suo involucro un'alta percentuale di componenti trasparenti. Le facciate sud, est e ovest, costantemente esposte al sole, influenzano le condizioni ambientali interne, soprattutto nel corridoio del terzo piano e nei corpi scala.



Figura 42 Vista sud-est della “Manica Nuova” presso la sede “Castello del Valentino” del Politecnico di Torino. Involucro verticale completamente trasparente. Fonte: elaborazione propria, 23-05-2024

Queste condizioni generano discomfort termico per gli utenti, in particolare nel periodo estivo. Gli attuali sistemi di climatizzazione non mantengono adeguatamente un ambiente confortevole. Inoltre, il consumo energetico necessario per realizzarlo sarebbe

eccessivamente elevato. In risposta, si propone lo sviluppo di un sistema di facciata adattiva che consenta di modulare i guadagni termici, aumentandoli nei periodi freddi e riducendoli nei periodi caldi, considerando di mantenere una corretta illuminazione naturale all'interno degli ambienti e ottimizzando i consumi energetici.

Per verificare le condizioni di discomfort termico verranno effettuati due tipi di monitoraggio termico e igrometrico. Questo monitoraggio consentirà di quantificare le condizioni ambientali negli spazi di transito, come corridoi e scale, oltre che negli uffici. I dati ottenuti aiuteranno a determinare se le condizioni interne sono, effettivamente, dovute alle basse prestazioni energetiche dell'involucro edilizio nella sua componente trasparente.

Una volta stabilito il rapporto tra surriscaldamento e discomfort termico, verranno individuati i fattori climatici rilevanti al fine di migliorare le condizioni interni. Inoltre, questo progetto prende come punto di partenza la valutazione del contesto storico e urbano. Dato che l'edificio è un prolungamento del Castello del Valentino, patrimonio mondiale dell'UNESCO, l'intervento dovrà rispettare l'estetica storica del castello, evitando di alterarne l'aspetto e il valore culturale (Figura 43).

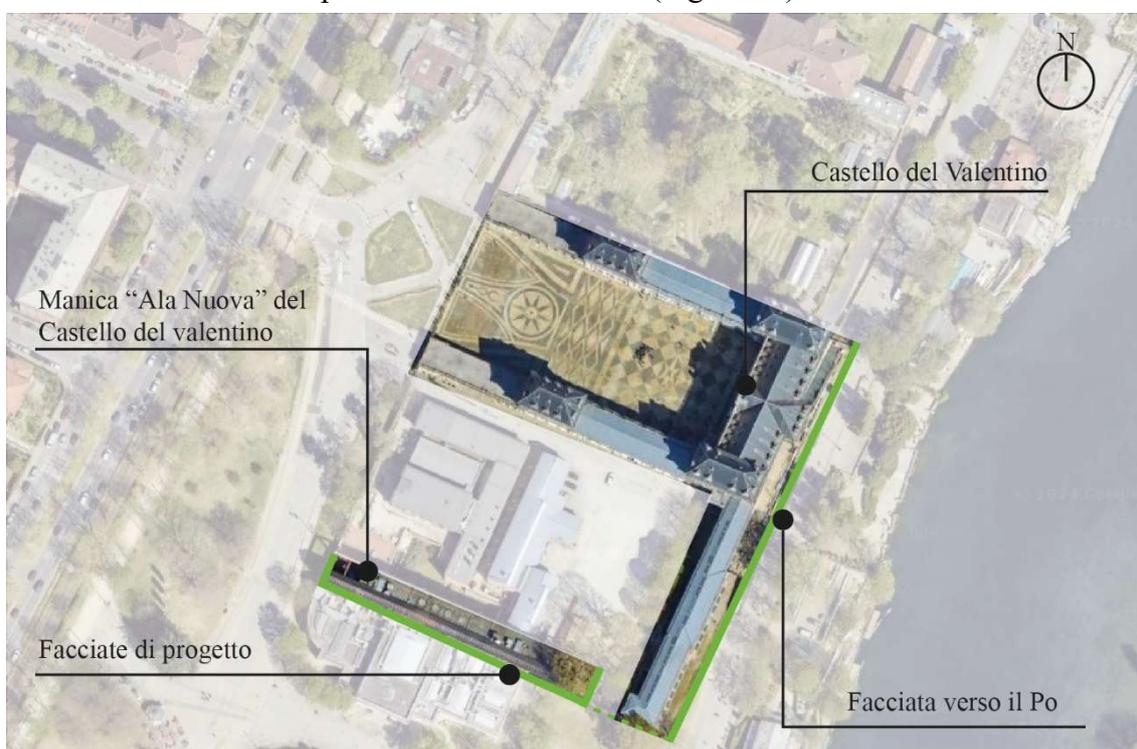


Figura 43 Relazione tra la "Manica Nuova" e il suo contesto, il Castello del Valentino. Fonte: elaborazione propria su mappa di Google Maps, 25-05-2024

Per questo motivo verrà proposta una sintesi compositiva delle facciate del castello. Ciò consentirà di individuare le tecnologie adattive più opportune per raggiungere una modularità compositiva che si armonizzi con l'estetica del castello. Il sistema adattivo proposto sarà orientato ad interagire con il flusso energetico della facciata, rispondendo principalmente alla radiazione solare diretta, pur mantenendo un'adeguata illuminazione naturale negli spazi interni

Si propone in questo modo di sviluppare un progetto che riduca al minimo gli interventi sulla facciata esistente, con l'obiettivo di offrire una soluzione efficiente sia in termini energetici che costruttivi. Per questo motivo verrà realizzata una proposta che si integra con l'attuale facciata e interviene esclusivamente sugli infissi esterni, senza intaccare il resto dell'edificio.

Le proposte di sistemi adattivi verranno preliminarmente valutate attraverso simulazioni in Ladybug Tools¹⁰, focalizzate sulla riduzione della radiazione solare ricevuta. Questa analisi consentirà di individuare in modo preliminare le soluzioni più efficienti in termini di adattamento alle condizioni climatiche esterne.

In questo modo, l'obiettivo è quello di realizzare un progetto che riesca a mantenere condizioni del benessere umano, migliorando allo stesso tempo l'efficienza energetica riducendo, o aumentando, i flussi energetici in base alle esigenze degli utenti e sviluppando una soluzione in cui l'intervento è minimo, al fine di ridurre i costi o facilitare la manutenzione del progetto (figura 44)

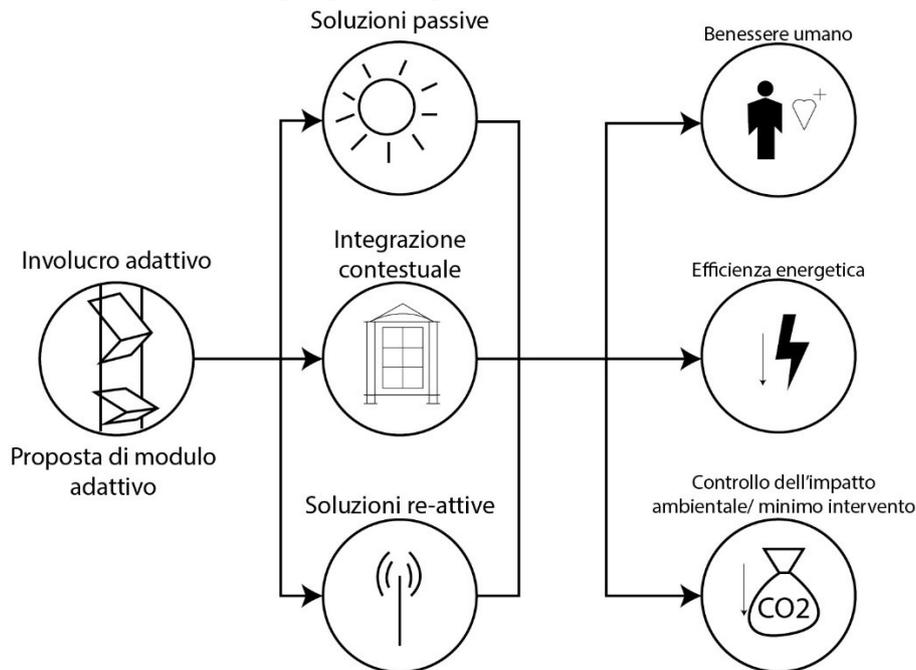


Figura 44 Schema delle soluzioni adottate al fine di raggiungere gli obiettivi proposti. Fonte: elaborazione propria, 2024

Lo schema del processo di progettazione del modulo adattivo (figura 45) riassume la metodologia utilizzata per lo sviluppo del progetto. In termini generali si cerca di sostanziare la necessità di un intervento sulla facciata per ottimizzarne le prestazioni energetiche e garantire il comfort negli spazi da essa delimitati. Per giustificare questo intervento vengono effettuati studi sperimentali in cui vengono misurate le condizioni ambientali interne e confrontate con quelle esterne; Dall'analisi dei risultati si conferma la necessità di effettuare tale intervento.

Si avvia così una metodologia progettuale che consente l'integrazione tra diverse discipline, con l'obiettivo di sviluppare una soluzione adattiva e integrata con le esigenze tecnologiche, ambientali, energetiche e compositive del progetto. La linea tratteggiata indica un approccio, il quale non è stato sviluppato ma, di fronte alla possibilità di svolgerlo, arricchirebbe i risultati.

¹⁰ Strumento di raccolta di applicazioni informatiche "open source" che supportano la progettazione ambientale attraverso l'integrazione delle interfacce di progettazione assistita da computer (CAD) 3D a una serie di motori di convalidati. Lo strumento importa file Energy Plus Weather (.EPW) in Grasshopper, per fornire una varietà di grafici climatici interattivi 2D e 3D per supportare le decisioni progettuali (LadyBug, 2024).

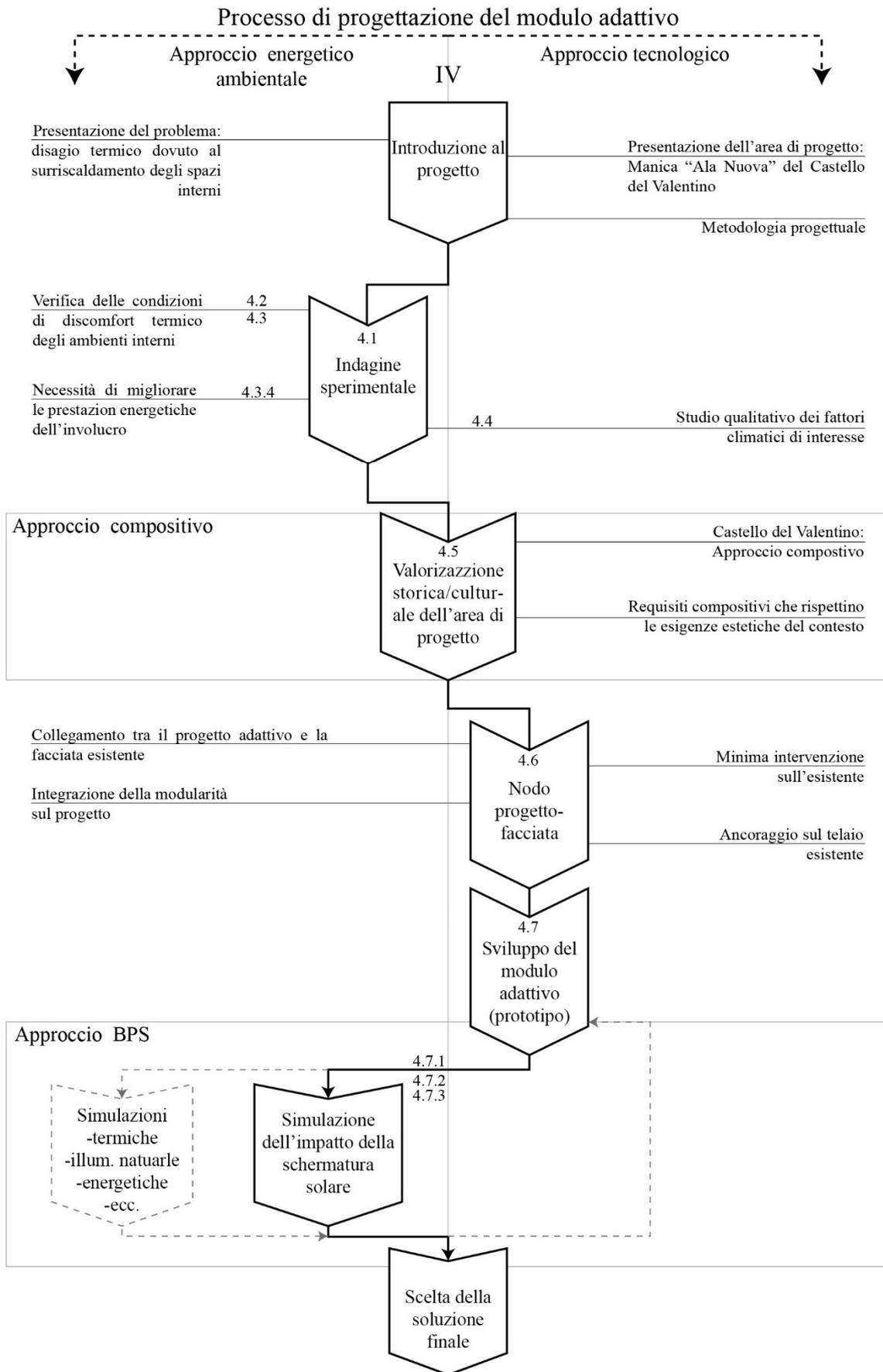


Figura 45 Schema del processo di progettazione del modulo adattivo, le linee tratteggiate rappresentano ulteriori processi, non considerati, che permettano di sviluppare soluzioni più arricchite. Fonte: elaborazione propria, 2024

Sebbene il progetto miri a integrare i sistemi adattivi con le esigenze sopra descritte, un ulteriore approfondimento dell'approccio energetico-ambientale può essere ottenuto tramite l'uso di strumenti di simulazione delle prestazioni dell'edificio (Building Performance Simulation, BPS¹¹). Questi strumenti consentono di ottenere una visione quantitativa e dettagliata dei parametri come temperatura, illuminazione e ventilazione (Figura 46).

Questa metodologia è stata utilizzata in maniera preliminare, le simulazioni effettuate coinvolgevano unicamente l'analisi e simulazione della radiazione solare¹² sulla facciata (elementi evidenziati in rosso), trascurando l'approccio quantitativo degli altri fattori climatici e comportamento dell'ambiente. La linea tratteggiata indica processi che hanno la possibilità di svolgersi dopo la scelta di una soluzione finale

Attraverso questo metodo è possibile prevedere e ottimizzare le risposte del sistema adattivo, contribuendo così a un'architettura sostenibile che sia compatibile sia con il patrimonio storico sia con le esigenze degli edifici futuri.

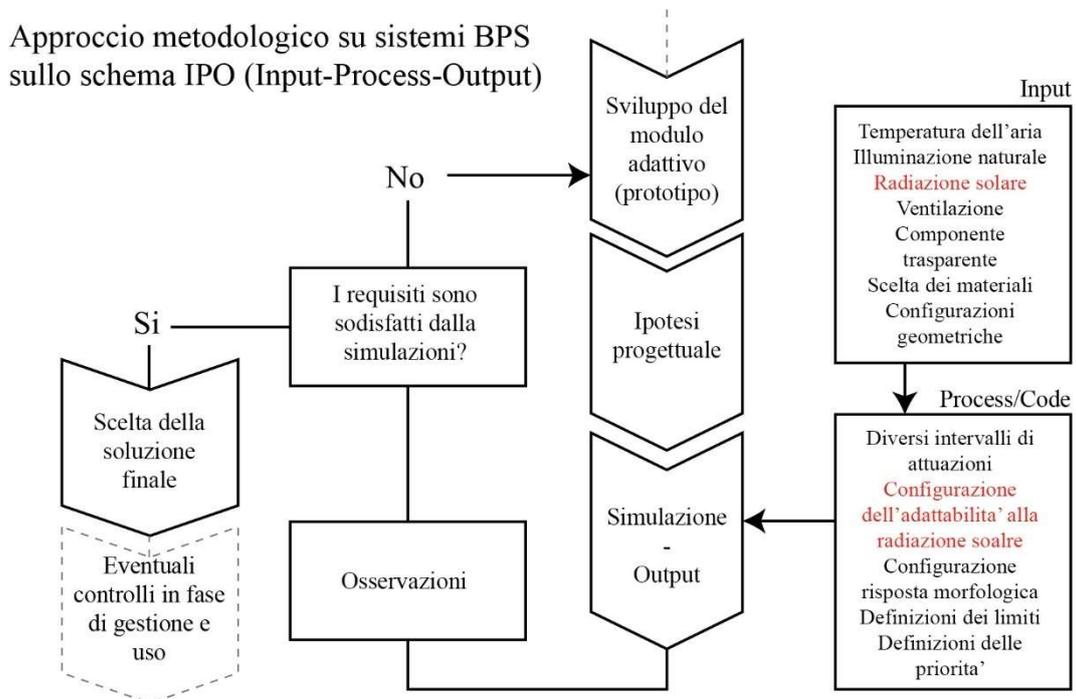


Figura 46 Schema metodologico su modelli BPS, in rosso gli elementi sviluppati, le linee tratteggiate indicano ulteriori processi che si possono svolgere dopo la costruzione del progetto. Fonte: elaborazione propria, 2024

¹¹ Le simulazioni di prestazione degli edifici (BPS) permettono la simulazione 3D basate su software che replicano le condizioni del mondo reale per analizzare il modo in cui influenzerebbero l'edificio. In sintesi, permettono di prevedere il comportamento dell'edificio al fine di supportare le scelte progettuali (pagine 49-50).

¹² I dati di climatici di input sono stati ricavati da file di Energy Plus Weather (.EPW) disponibili su CBE Climate Tool (2024). I valori corrispondono al rilievo dei dati climatici raccolti dalla stazione meteorologica dell'aeroporto di Torino Caselle, dal 1965 al 2021.

4.1 Indagine sperimentale “Manica Nuova” presso la sede “Castello del Valentino” del Politecnico di Torino e studio del contesto climatico della zona di progetto.

Il presente studio sperimentale si propone di verificare il surriscaldamento estivo negli spazi interni della “Manica Nuova” del Castello del Valentino, attribuito all'apporto solare. Per valutare se sia necessario un intervento di miglioramento delle prestazioni energetiche delle facciate degli edifici, soprattutto nel periodo estivo, è stata effettuata un'analisi delle condizioni ambientali interne ed esterne dell'area di studio. Questa analisi esamina come la radiazione solare e le prestazioni dell'involucro architettonico possano generare condizioni di discomfort termico negli spazi interni.

La ricerca si concentra su un'indagine sperimentale di breve durata nell'“Ala Nuova”, dove vengono misurate le condizioni termiche e igrometriche di alcuni spazi rappresentativi come le scale esposte a est e a ovest, i corridoi esposti a sud e un ufficio situato al terzo piano. Questi spazi sono stati selezionati per la loro esposizione diretta alla radiazione solare e per la loro suscettibilità al surriscaldamento estivo. Per questo motivo, si realizza uno studio preliminare del percorso solare nell'area di progetto che permette di valutare gli spazi e punti di interesse da rilevare (Figura 47).

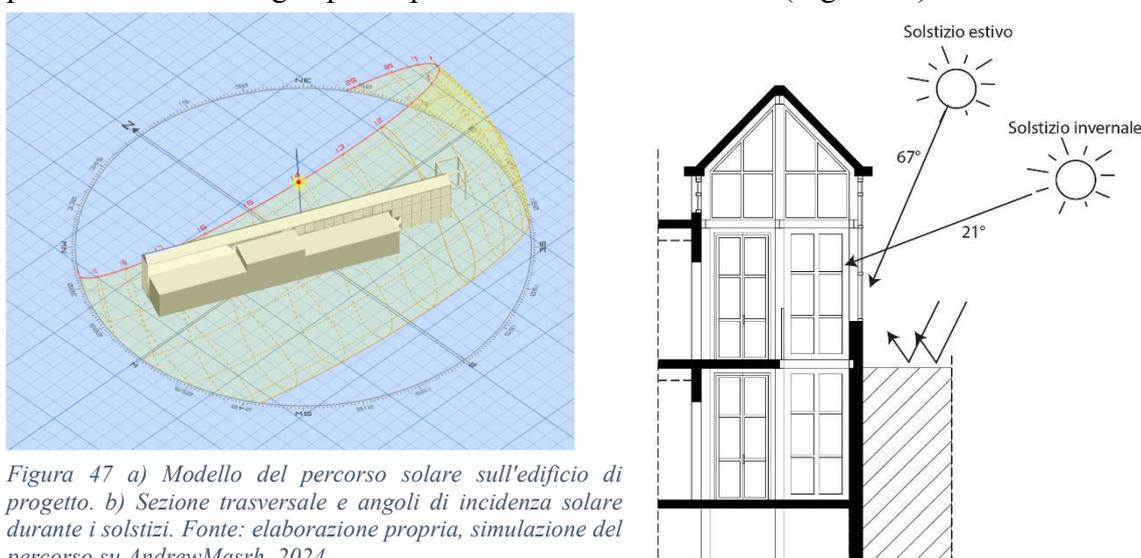


Figura 47 a) Modello del percorso solare sull'edificio di progetto. b) Sezione trasversale e angoli di incidenza solare durante i solstizi. Fonte: elaborazione propria, simulazione del percorso su AndrewMasrh, 2024.

Per stabilire un contesto più ampio, è stata valutata anche l'influenza termica dell'ambiente circostante, compresi gli alberi vicini e gli edifici adiacenti che potrebbero fornire ombra o riflettere le radiazioni. È stato verificato che gli alberi, situati negli angoli sud e nord-est dell'edificio, hanno un impatto limitato sulla protezione solare. Si è tuttavia osservato che l'edificio adiacente, pur fornendo una protezione solare minima, rifletteva parte della radiazione verso il corridoio superiore.

La prima analisi prevede la raccolta di dati in punti specifici di una griglia distribuita nelle zone di interesse, con l'obiettivo di misurare le condizioni termiche e igrometriche durante un'intera giornata negli spazi più esposti al sole. Parallelamente è stato effettuato un monitoraggio in un ufficio, dove porte e finestre sono state mantenute chiuse e gli impianti di condizionamento spenti, per studiare l'impatto delle condizioni del corridoio sull'ambiente interno dell'ufficio, minimizzando il più possibile i fattori che potrebbero alterare i risultati.

È importante ricordare che, durante la fase di raccolta dei dati, erano in corso lavori di manutenzione straordinaria sull'edificio che hanno comportato modifiche agli impianti, ai serramenti e infissi. Ciò ha generato condizioni atipiche nell'ambiente di studio, come

aperture temporanee nella facciata e impalcature che bloccavano parzialmente la radiazione solare. Questi interventi, iniziati alle ore 13:00, hanno influito sui risultati ottenuti nella prima parte dello studio; pertanto, l'interpretazione dei dati deve considerare questo contesto straordinario per garantire una valutazione accurata delle necessità di intervento sulla facciata.

Nel processo di analisi si è tenuto conto delle condizioni specifiche in cui sono state effettuate le misurazioni, inclusa la ventilazione trasversale in alcuni punti dovuta alle aperture nella facciata sud. Ciò consente di interpretare i risultati in modo informato e di riconoscere eventuali distorsioni causate da queste condizioni temporanee.

In conclusione, questo monitoraggio cerca di confermare l'ipotesi che il surriscaldamento e il discomfort termico negli ambienti esposti a sud siano imputabili all'irraggiamento solare e alla mancata capacità dell'involucro di mitigare le condizioni esterne sfavorevoli. Questa analisi preliminare, comprendente orientamento, morfologia della facciata, albedo e condizioni climatiche locali, fornisce una solida base per valutare la necessità di implementare un sistema che ottimizzi l'efficienza energetica delle facciate degli edifici e migliorare le condizioni di comfort interno.



Figura 48 a) Intervento sui serramenti, rimozione delle finestre ed installazione di un telo nero. b) installazione di montanti sulla facciata sud/est dell'edificio. fonte: elaborazione propria, 18-07-2024

NOTE SULLE CONDIZIONI DI MISURA:

- Corridoio piano 1: porta sul lato est chiusa durante l'intera giornata.
- Corridoio piano 2: porte est ed ovest aperte durante l'intera giornata.
- Installazione ponteggi schermanti sul prospetto sud-est alle 13:00
- Si presentano flussi di aria dovuto alle aperture in facciata sud, principalmente nei punti P2_02, P2_03 e P1_02 data la cross ventilation.



Figura 49 Durante la prima parte dell'indagine di misure puntuali, la facciata sud ed est erano libere di interventi, a partire dalle 13:00 le attività del cantiere hanno iniziato ad interferire nella misura dei punti. Fonte: elaborazione propria 18-07-2024

4.2 Prima analisi: misure puntuali

Questa prima analisi mira a registrare i dati di temperatura e umidità relativa dell'aria dei diversi spazi interni esposti alla radiazione solare e al presunto surriscaldamento degli ambienti. Per fare ciò, vengono determinati i punti da misurare con un termoigrometro durante un'intera giornata lavorativa, dalle 8:00 alle 18:00 del 18 luglio 2024.

Al momento di rilevare i dati di temperatura e umidità relativa, si posizionava la sonda dello strumento ad un'altezza di circa 1.70 [m] dal pavimento (altezza uomo) con le braccia tese in modo di evitare al massimo le variazioni nel rilievo dovute alla presenza umana e mantenendo l'ombreggiamento del dispositivo durante il periodo di misurazione. Appena finita la misurazione, e quando i dati mostrati dallo strumento rimanevano stabili, si procedeva con la registrazione delle misure (Figura 50).

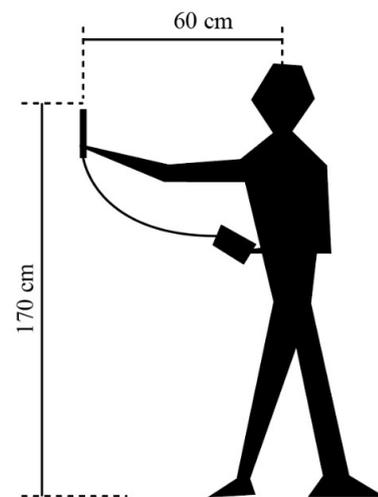


Figura 50 Schema dello svolgimento di rilievo puntuale

4.2.1 Scelta dei punti da rilevare:

Si è quindi effettuata una griglia di punti (P) sul piano terra (PT), secondo e terzo piano (P1 e P2 rispettivamente), focalizzando i due vani scala e il corridoio. Per ogni eventuale fattore che potrebbe alterare il rilievo dei dati, sono state inserite delle note al fine di considerarli per la valutazione e interpretazione dei dati. Il punto esterno (PE) di riferimento è stato preso nel cortile, curando di rilevare le misure in assenza di irraggiamento solare e lontano dagli autoveicoli parcheggiati, dato che potevano influenzare i dati del monitoraggio.

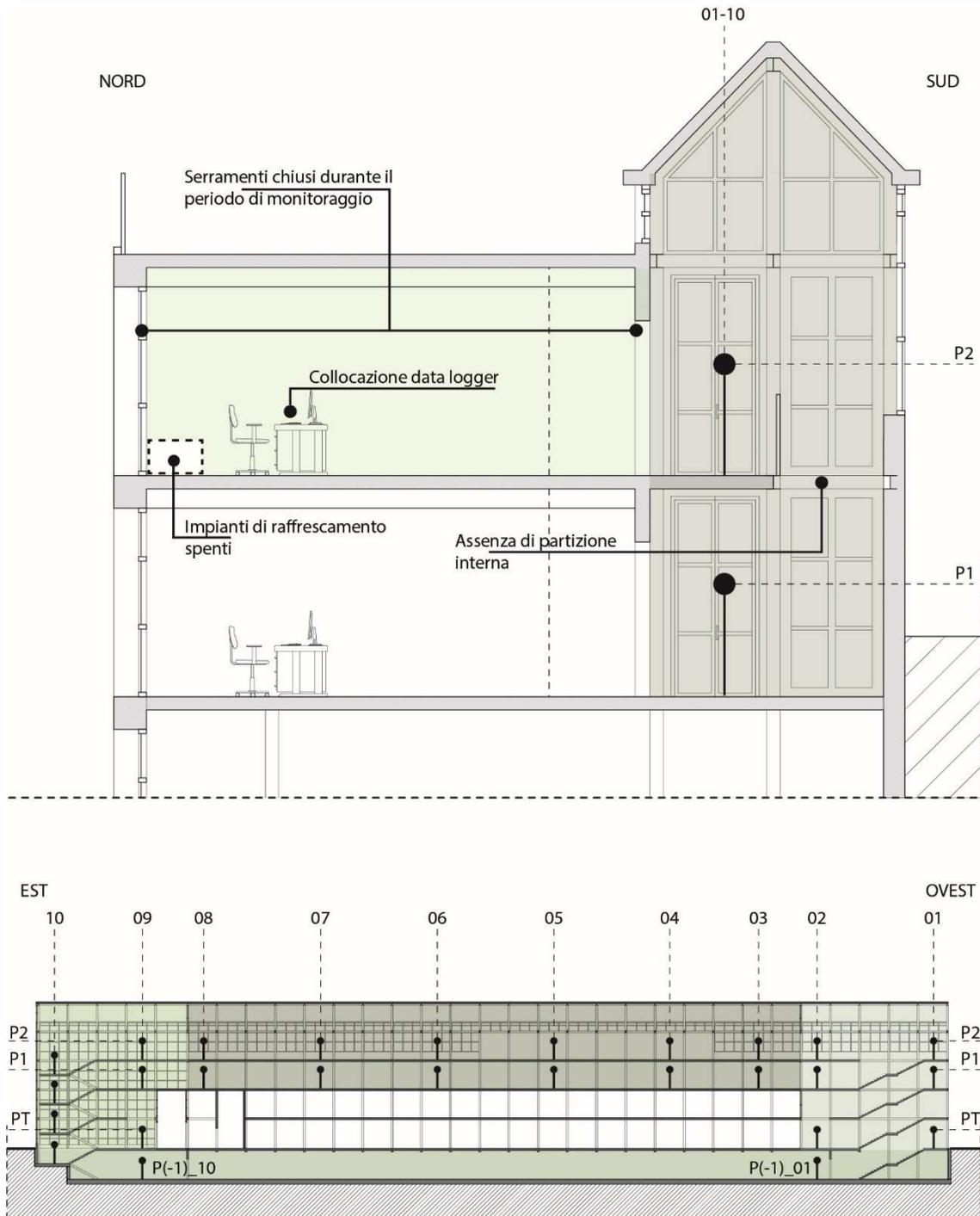
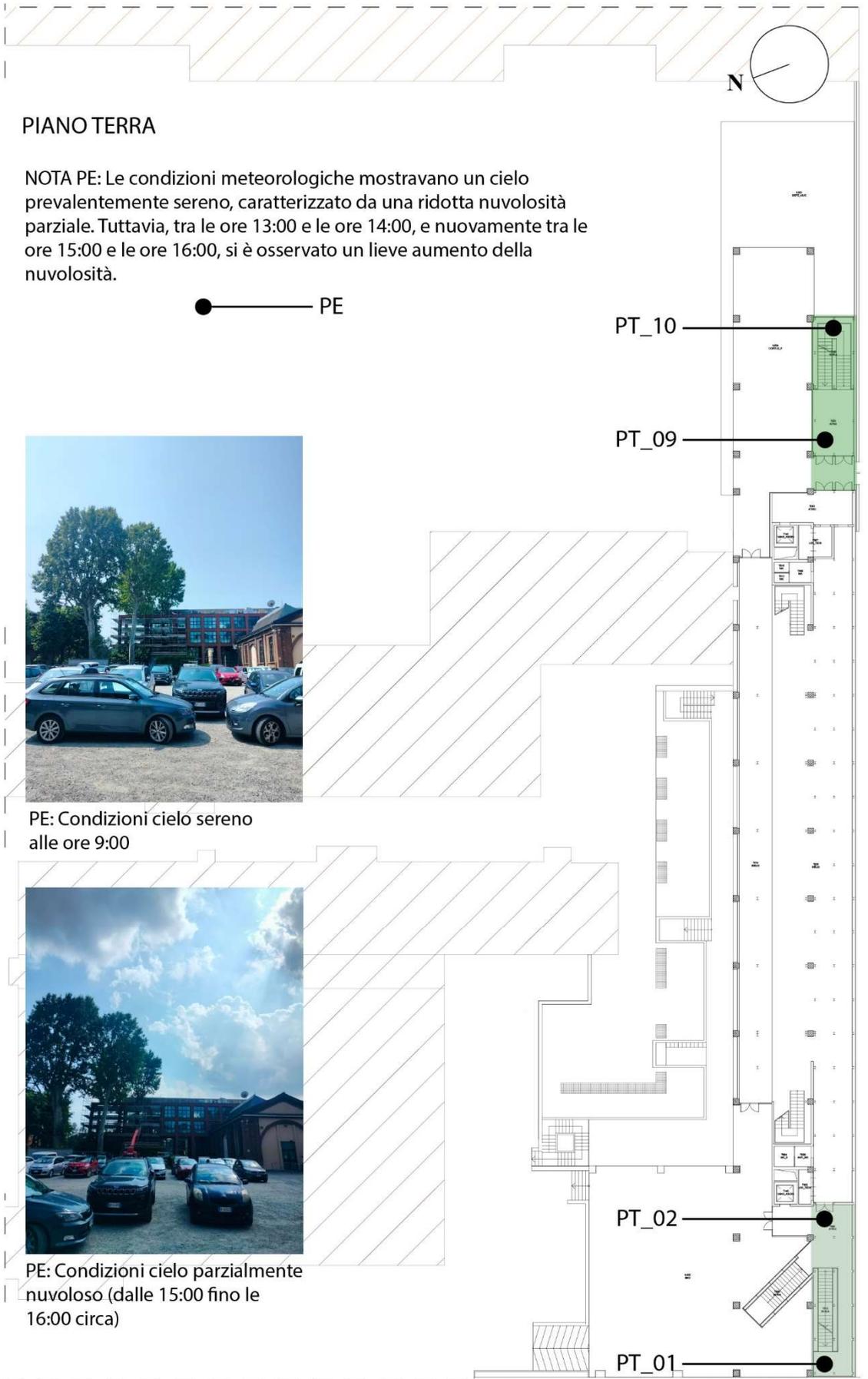


Figura 51 a) sezione trasversale dello stato di fatto e inserimento della maglia di punti da rilevare, viene segnalata la collocazione del data logger della seconda indagine sperimentale. b) Sezione longitudinale dello stato di fatto con la scelta di punti da misurare. Fonte: Elaborazione propria, 2024.

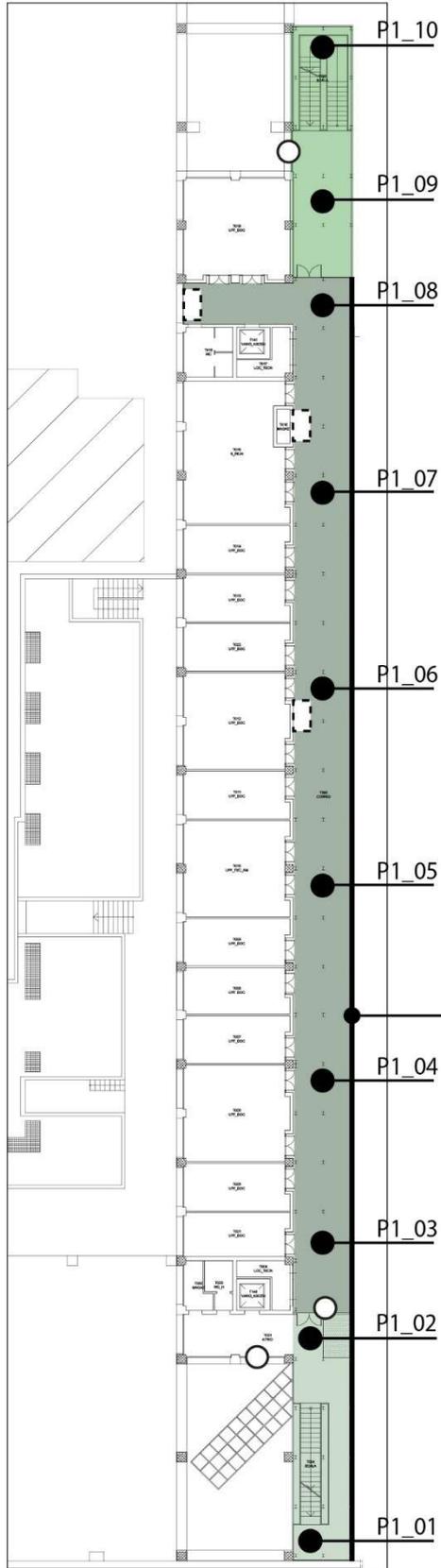


PUNTI DEL SECONDO E TERZO PIANO

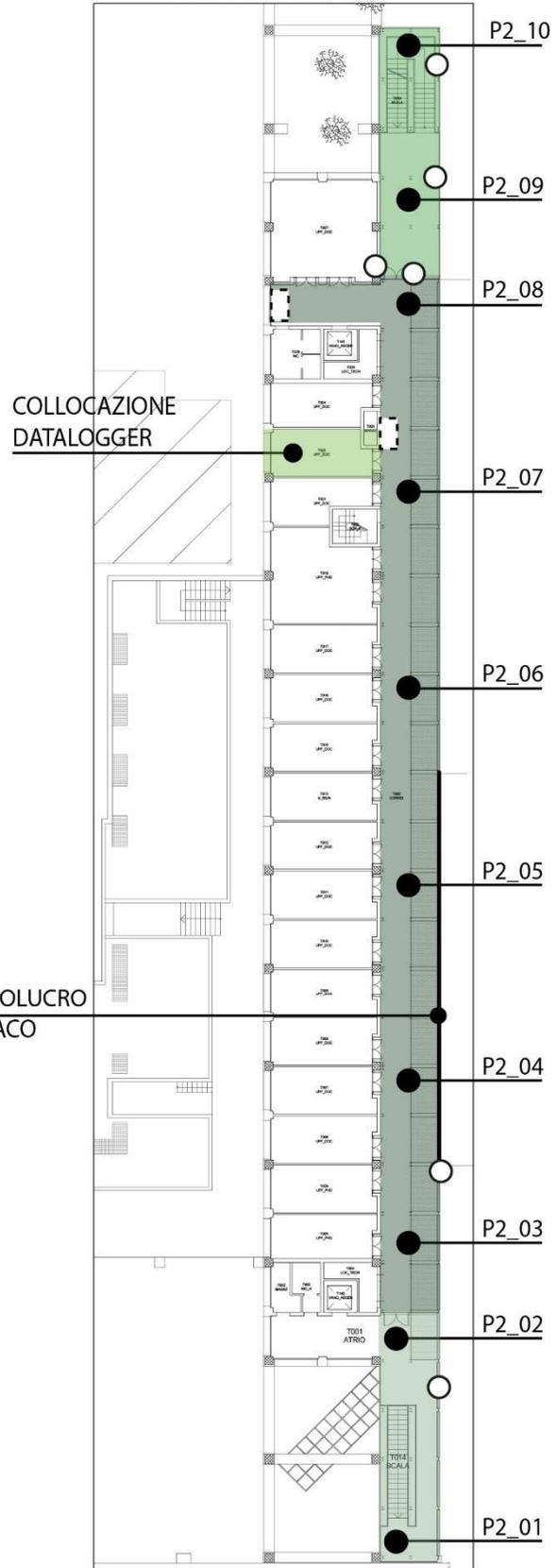
- Punti di Monitoraggio
- Punti di interesse, note e serramenti rimossi

⊞ Climatizzatori per il raffrescamento

PIANTA SECONDO PIANO (P1)



PIANTA TERZO PIANO (P2)



4.2.2 Strumenti: Igrometrico-termometro digitale HD8901

La prima parte di questo monitoraggio è stata realizzata con l'utilizzo dell'igrometro-termometro a microprocessore HD8901 il quale permette di ricavare misure quali temperatura, umidità relativa ed assoluta, temperatura del punto di rugiada, valori relativi e massimi e minimi. Lo strumento veniva utilizzato con una sonda per aria con contenitore di protezione di plastica.

In quanto indicato nella scheda tecnica, "lo strumento funziona con un condensatore sensibile all'umidità il cui dielettrico è formato da un polimero igroscopico. La temperatura viene rilevata da una termoresistenza al Platino Pt100".

Il campo di lavoro dello strumento può variare tra i -10°C e i 50°C e tra i 0% al 90% di umidità relativa, intervallo nel quale lo svolgimento dell'indagine si presentava in maniera idonea.



Figura 52 Foto strumento di misura, Igrometrico-termometro a microprocessore HD8901. Fonte: scheda tecnica (SRL, 2024)

4.2.3 Risultati ottenuti

I dati ottenuti sono stati valutati confrontando gli ambienti interni tra loro e con l'ambiente esterno. Sono stati considerati anche i punti misurati nel piano interrato, per non interferire nella valutazione comparativa degli ambienti.

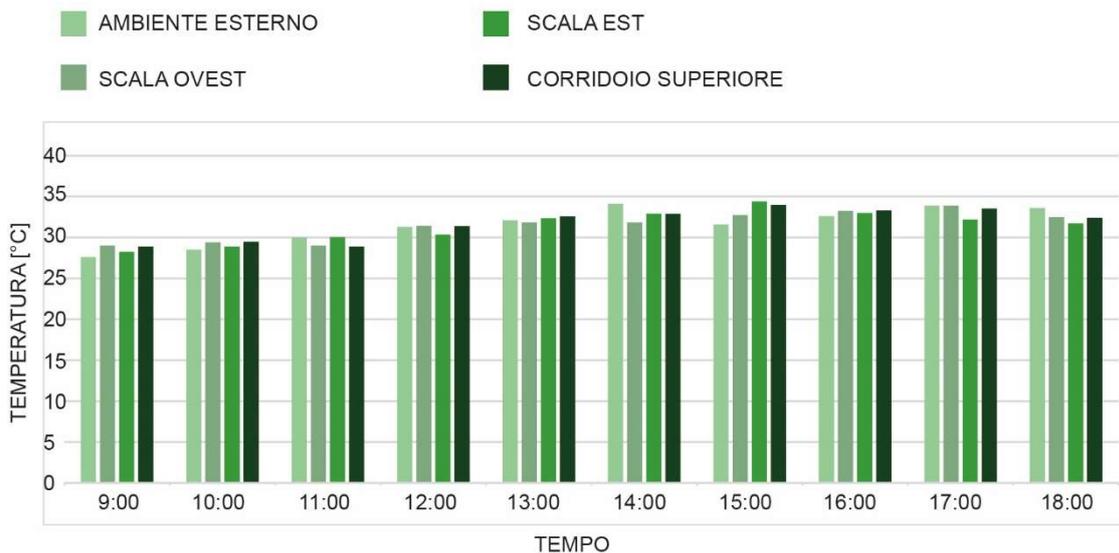


Figura 53 Andamento giornaliero della temperatura dell'aria degli ambienti nei piani superiori e ambiente esterno

Dalla Figura 53 si può notare che l'ambiente esterno è in condizioni di stress termico fin dalle prime ore del giorno. Questa situazione si ripercuote negativamente sugli ambienti interni, come corridoi e scale, che non riescono a mitigare efficacemente le elevate

temperature esterne. In alcuni casi, le temperature interne superano addirittura quelle esterne, compromettendo il benessere degli utenti.

L'aumento delle temperature negli ambienti interni è significativo soprattutto al pomeriggio. Questo fenomeno è da attribuire all'accumulo di calore nell'edificio dovuto alla radiazione solare che attraversa gli elementi trasparenti, in particolare nelle prime ore della giornata. Le scale poste sul lato est dell'edificio presentano temperature leggermente più elevate rispetto a quelle del lato ovest, a causa della maggiore esposizione solare durante la mattinata.

Infatti, durante il pomeriggio, le misurazioni mostrano che le temperature interne possono raggiungere valori superiori a 34°C, mentre le temperature esterne registrano un massimo di 31°C. Questo comportamento suggerisce una gestione inefficiente dei carichi termici all'interno dell'edificio, ponendo una sfida per mantenere condizioni termiche adeguate.

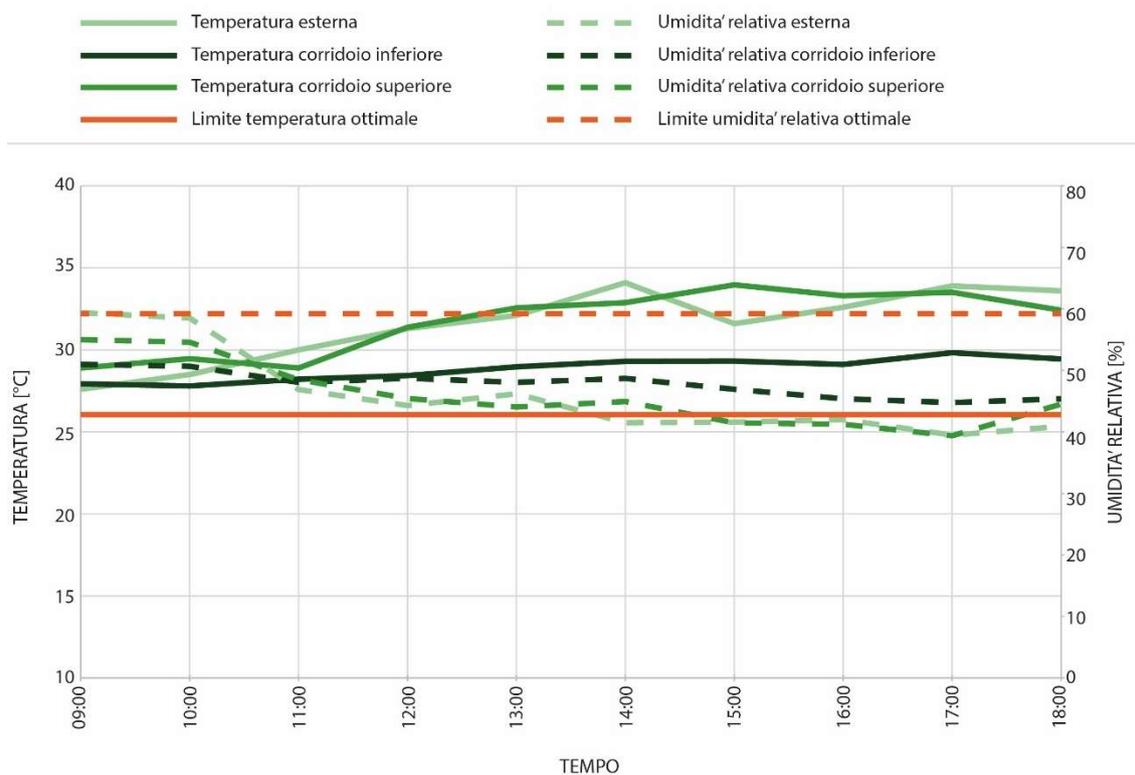


Figura 54 Comparazione corridoio inferiore e superiore; andamento delle temperature medie e umidità relativa.

Nei corridoi del secondo e del terzo piano (corridoi 1 e 2) si osservano notevoli differenze di temperatura, soprattutto nella seconda metà della giornata (figura 54). A partire dalle 11:00 la temperatura nel corridoio del terzo piano comincia ad aumentare notevolmente. Mentre il corridoio inferiore mantiene temperature comprese tra 28°C e 30°C, il corridoio superiore registra valori che non scendono sotto i 31°C, toccando la massima di 34°C alle ore 14.00. Questo andamento termico risulta critico per il comfort degli utenti.

Le differenze nella distribuzione del calore tra i due corridoi possono essere spiegate da diversi fattori. Entrambi gli spazi sono collegati da un vuoto interno situato in prossimità della facciata sud, che consente all'aria calda di salire verso il corridoio superiore, mentre l'aria più fresca tende a rimanere in quello inferiore. Inoltre, il corridoio del primo piano è stato mantenuto con le porte chiuse per la maggior parte del

tempo, il che contribuisce a mantenere una temperatura più stabile. Al contrario, il corridoio del terzo piano è direttamente esposto alla radiazione solare attraverso gli elementi trasparenti della facciata e le porte sono rimaste aperte dovuto a delle attività di cantiere nel piano soprastante, provocando scambi termici direttamente con i corpi scala e quindi un notevole aumento della temperatura.

Altro fattore rilevante è la posizione del corridoio superiore in prossimità del tetto dell'edificio, che accumula calore grazie alla radiazione solare diretta. Questo accumulo di calore sul tetto viene successivamente irradiato agli spazi interni, intensificando la sensazione di calore nel corridoio del terzo piano.

In conclusione, le differenze di temperatura tra i due corridoi sono fortemente influenzate dall'esposizione alla radiazione solare e dalla capacità del tetto di accumulare e trasferire calore. Consentendo l'ingresso dell'irraggiamento diretto attraverso l'involucro trasparente e provocando anche un accumulo di calore nella struttura dell'edificio, che viene successivamente irradiata verso l'interno.

4.3 Seconda analisi: monitoraggio termoigrometrico

La seconda analisi di questa indagine prevede l'utilizzo di un datalogger che registra la temperatura dell'aria e l'umidità relativa dell'ambiente interno di un ufficio della "Manica Nuova". L'obiettivo di questa analisi è valutare l'impatto del surriscaldamento del corridoio che serve l'ufficio.

4.3.1 Posizionamento dello strumento

Il data logger è stato collocato nell'ufficio del professor Valentino Manni¹³, situato al terzo piano dell'edificio, sulla scrivania da lavoro. Il monitoraggio è stato effettuato in un periodo di quasi 10 giorni, dalle ore 11:00 del 16 luglio 2024 alle ore 18:00 del 25 luglio 2024. Durante questo periodo le finestre e la porta dell'ufficio sono rimaste chiuse, l'impianto di climatizzazione è stato spento e con un'assenza di persone costante, al fine di evitare alterazioni esterne nei dati registrati. Al termine del monitoraggio, i dati raccolti sono stati esportati in un file Excel per essere analizzati.



Figura 55 Collocazione del data logger.
Fonte: elaborazione propria, 2024

¹³ Posizionamento segnalato negli elaborati grafici precedenti, vedi pagine 83-85.

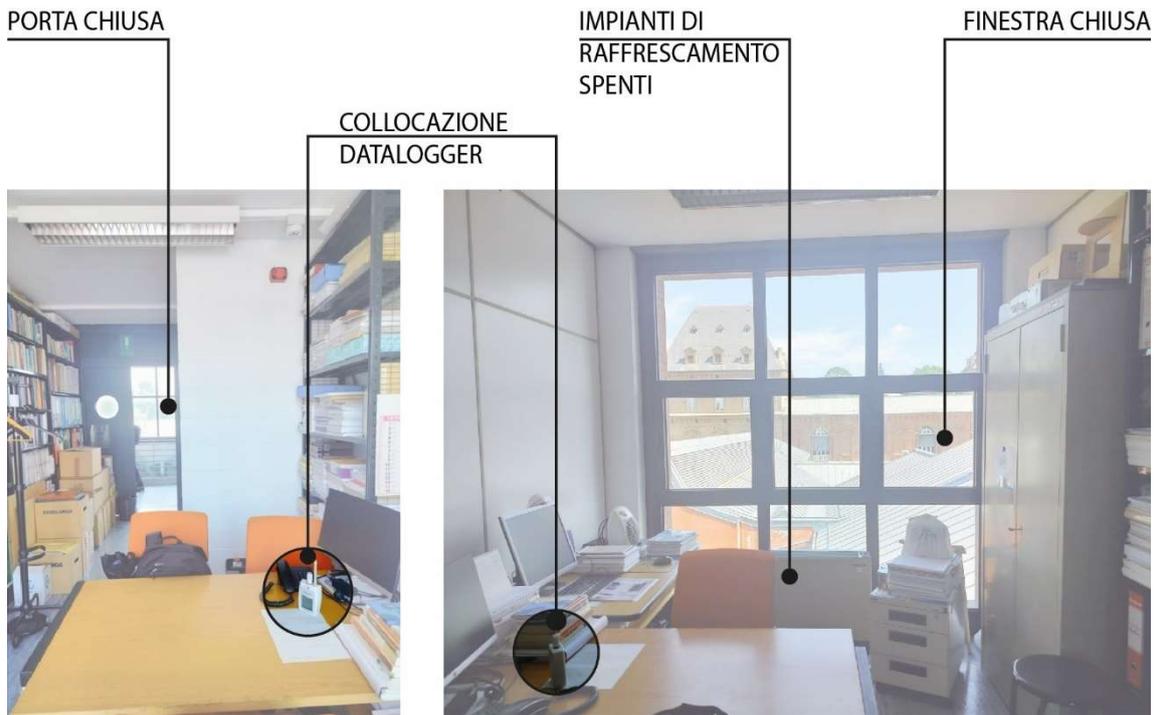


Figura 56 Collocazione del datalogger e considerazioni da tener presente per l'interpretazione dei risultati. Fonte: elaborazione propria, 2024.

4.3.2 Strumento di misura: Hanwell ML4106 data logger

La seconda parte del monitoraggio è stata effettuata utilizzando il datalogger Hanwell ML4106, un dispositivo progettato per registrare dati di temperatura e umidità relativa nell'ambiente. Questo strumento consente di effettuare misurazioni ad intervalli di 30 minuti, al fine di ottenere una rappresentazione accurata delle variazioni ambientali. La memoria ha la capacità di registrare fino a 50.000 misurazioni per canale, garantendo una raccolta dati continua e dettagliata durante tutto il monitoraggio.

Il sensore di temperatura del data logger funziona in un intervallo compreso tra -20°C e 65°C con una precisione di $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, garantendo misurazioni affidabili in condizioni di temperatura moderata. Inoltre, il sensore di umidità relativa, che utilizza un polimero capacitivo, può misurare tra il 10% e il 90% di umidità relativa senza condensa, con una precisione del $\pm 3\%$.



Figura 57 Strumento di misura, Hanwell ML4106. Fonte: scheda tecnica Hanwell, 2024.

4.3.3 Risultati ottenuti

Il grafico seguente (figura 58) mostra un confronto tra le condizioni ambientali di temperatura dell'aria e umidità relativa dell'ambiente interno dell'ufficio con quelle dell'ambiente esterno, indicando i limiti ottimali indicati dal Ministero della Salute (2024).

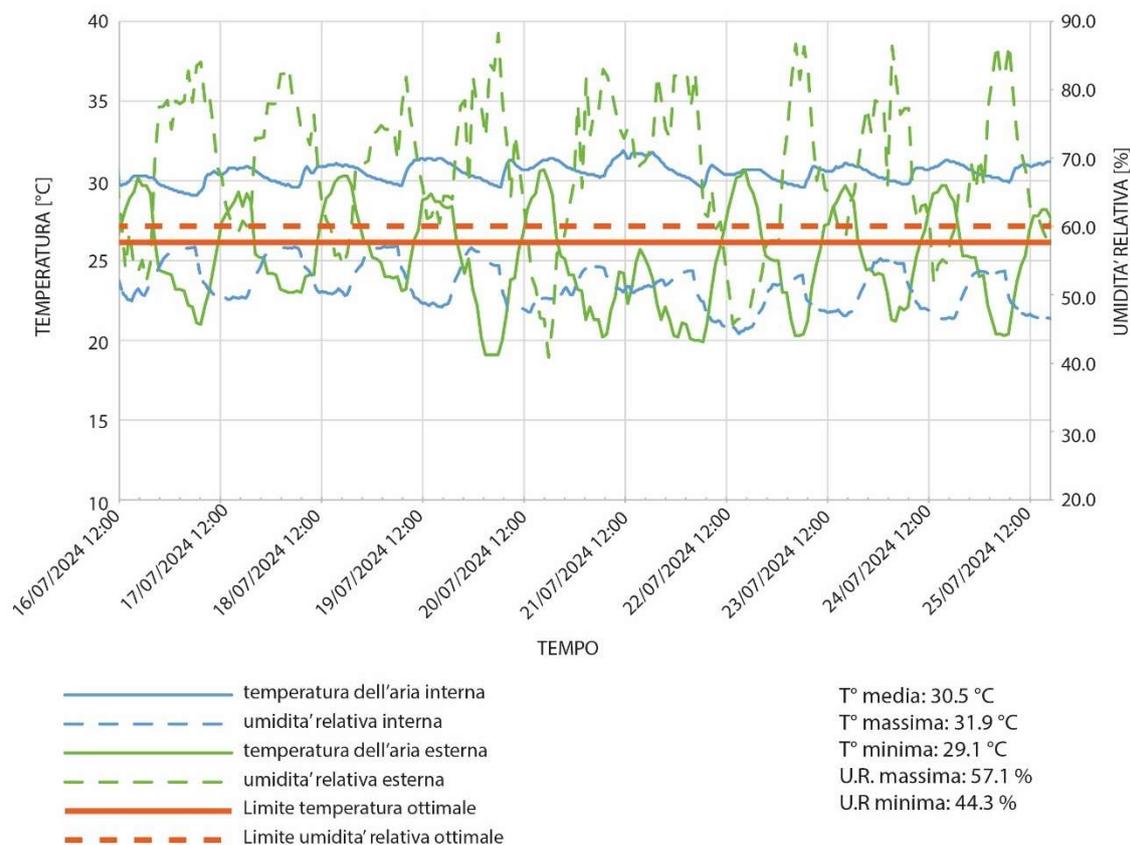


Figura 58 Relazione interno ed esterno, andamento della temperatura e umidità relativa interna ed esterna

Dai dati ottenuti si osserva che l'ambiente interno dell'ufficio non presenta un'influenza significativa delle condizioni esterne, soprattutto per quanto riguarda la temperatura. Durante tutto il periodo monitorato, la temperatura interna è rimasta relativamente stabile, con una media di 30,5°C, una massima di 31,9°C e una minima di 29,1°C, il che implica una variazione inferiore a 3°C. Questo comportamento indica che la temperatura interna non ha fluttuato considerevolmente nonostante i cambiamenti nell'ambiente esterno.

D'altra parte, l'umidità relativa ha mostrato una variazione maggiore rispetto alla temperatura. Nonostante questa differenza, i valori di umidità all'interno non hanno superato i limiti consigliati dal Ministero della Salute, il che fa pensare che le condizioni igrometriche siano adeguate.

Nonostante ciò, sebbene le temperature registrate siano rimaste costanti, ciò non significa necessariamente che l'ambiente offra condizioni confortevoli. Durante il periodo estivo l'ufficio ha vissuto situazioni di stress termico, il che suggerisce la necessità di implementare sistemi di climatizzazione meccanica per migliorare il comfort degli occupanti. La semplice costanza dei valori registrati non garantisce il benessere termico, poiché le temperature superano le soglie di comfort consigliate.

Si precisa che il monitoraggio è stato effettuato con porte e finestre degli uffici chiuse. Nel caso ipotetico che questi elementi venissero aperti, collegando l'ambiente interno con l'esterno o con i corridoi, si verificherebbe un maggiore scambio termico ed igrometrico, che potrebbe modificare sensibilmente le condizioni interne.

4.3.4 Considerazioni sintetiche finali e conclusione dell'indagine sperimentale

Sulla base delle analisi effettuate sui risultati dell'indagine sperimentale termigrometrico, è possibile affermare che gli ambienti interni della manica presentano condizioni insoddisfacenti per l'utenza, provocando discomfort e nuocendo alla salute delle persone all'interno.

Le condizioni degli ambienti interni sono dovute ad un involucro incapace di mitigare le condizioni, spesso estreme, dell'ambiente esterno. In altre parole, il costante ed elevato discomfort termico presente all'esterno dell'edificio si ripercuote all'interno degli ambienti interni, motivo per cui l'edificio non ha la sua funzione di protezione dalle intemperie, né di regolatore dei flussi energetici.

Gli impianti di climatizzazione e condizionamento, pur essendo accesi, sono utili solo negli uffici, con porte e finestre chiuse, poiché, se fossero aperte, accelererebbero il flusso di calore verso gli uffici, con conseguente spreco di energia e discomfort dentro dell'ambiente condizionato.

Si segnala, invece, che gli impianti di climatizzazione presenti nei corridoi erano attivi al momento del monitoraggio e, alla luce dei risultati ottenuti, non sono riusciti a raggiungere condizioni di comfort negli ambienti studiati: i corridoi e le scale sono costantemente in situazioni di discomfort termico pur avendo impianti di climatizzazione.

Sebbene l'inefficienza della facciata come regolatore del flusso termico dell'edificio sia da attribuire ai lavori di manutenzione in corso nel periodo di monitoraggio, e quindi le finestre e le porte aperte rappresentano condizioni straordinarie poiché durante gran parte dell'anno rimarrebbero chiusi, ciò non giustifica il fatto che, trattandosi di una facciata trasparente ed esposta a sud, le condizioni non saranno peggiori con detti elementi chiusi. Infatti, come indicato da Giovini (1969), sulla base dello studio effettuato dall'ASRHAE: "...una superficie vetrata esposta alla radiazione solare provoca un aumento della temperatura interna maggiore di quella che se potenzialmente si ottiene con radiazione solare diretta attraverso una superficie aperta, anche quando se si considera l'effetto della ventilazione".

In conclusione, potremmo affermare che i sistemi di climatizzazione sono inefficienti nel raffreddamento degli ambienti interni, con conseguente spreco energetico dato che gli ambienti sono sottoposti a temperature molto elevate. Gli apporti termici sono invece da attribuire alla componente trasparente dell'edificio poiché consente l'ingresso della radiazione solare, provocando l'effetto serra negli spazi interni. Per questo motivo, al fine di migliorare le prestazioni energetiche e raggiungere situazioni di comfort all'interno dell'edificio, è fondamentale ridurre gli apporti solari durante i periodi estivi, massimizzandoli durante il periodo invernale.

4.4 Contesto climatico, studio dei fattori climatici rilevanti per l'ottenimento del benessere termico igrometrico

Data la necessità di realizzare un progetto che consenta di raggiungere il benessere termico degli spazi interni, la proposta di un modulo adattivo ha il potenziale per ottenere il comfort umano attraverso un sistema che si adatti ai fattori esterni che influenzano l'interno dell'edificio.

Per questo motivo è opportuno studiare i fattori climatici più rilevanti nell'area di progetto e che rappresentano potenziali strategie per lo sviluppo di una soluzione in funzione dei requisiti definiti. I fattori più rilevanti sono: la temperatura dell'aria, la radiazione solare diretta e diffusa e la velocità del vento.

A loro volta, vengono analizzate le condizioni di comfort esterno per comprendere il ruolo dell'involucro nel mitigare le condizioni esterne per mantenere il comfort negli ambienti interni. Se cioè le condizioni dell'ambiente esterno non presentassero momenti di discomfort termico per le persone esposte alle intemperie, allora non ci sarebbe grande necessità di filtrare le componenti climatiche interne all'edificio, poiché queste non influenzerebbero negativamente gli spazi abitativi.

Nel caso opposto, se l'ambiente esterno presenta condizioni allarmanti per il benessere delle persone, allora è evidente la necessità di un involucro in grado di mitigare tali condizioni per mantenere il benessere al suo interno.

Il grafico (figura 59) rappresenta l'andamento della temperatura dell'aria esterna nel periodo estivo (21 luglio – 22 settembre), ricavando la temperatura massima, minima e la media giornaliera. Inoltre, il grafico sovrappone il modello di comfort termico adattivo (rivolto al benessere ambientale esterno) che permette di correlare il comfort esterno con quello interno: “L'ipotesi adattiva prevede che fattori contestuali, come l'accesso ai controlli ambientali, e la storia termica passata possano influenzare le aspettative e le preferenze termiche degli occupanti dell'edificio.” (Wikipedia, 2024)

Yearly chart ¹⁴

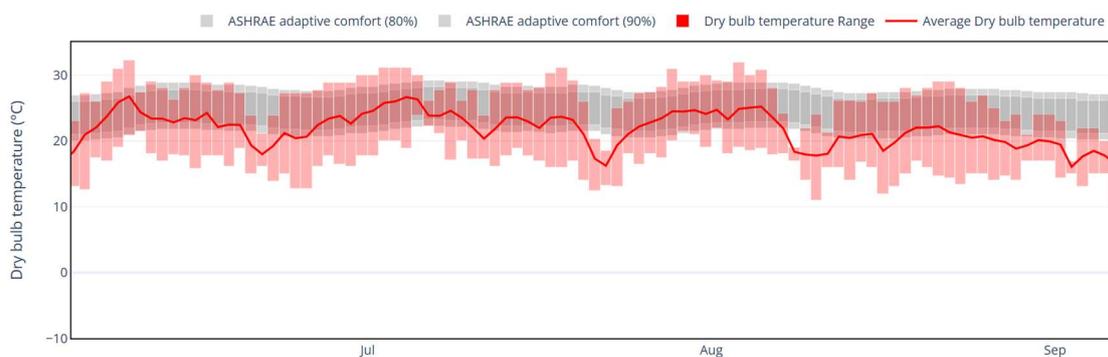


Figura 59 Andamento giornaliero della temperatura dell'aria durante il periodo estivo a Torino (21 luglio- 22 settembre). Fonte: CBE Clima Tool (Betti, 2023)

È quindi possibile notare un andamento della temperatura media che in gran parte va tra i 20°C e i 25°C con temperature massime intorno ai 30°C. Da quanto si può notare dal modello di confort adattivo, temperature massime così elevate possono indicare, infatti, condizioni di discomfort termico abbastanza frequenti, considerando che queste condizioni si presentino intorno al mezzogiorno.

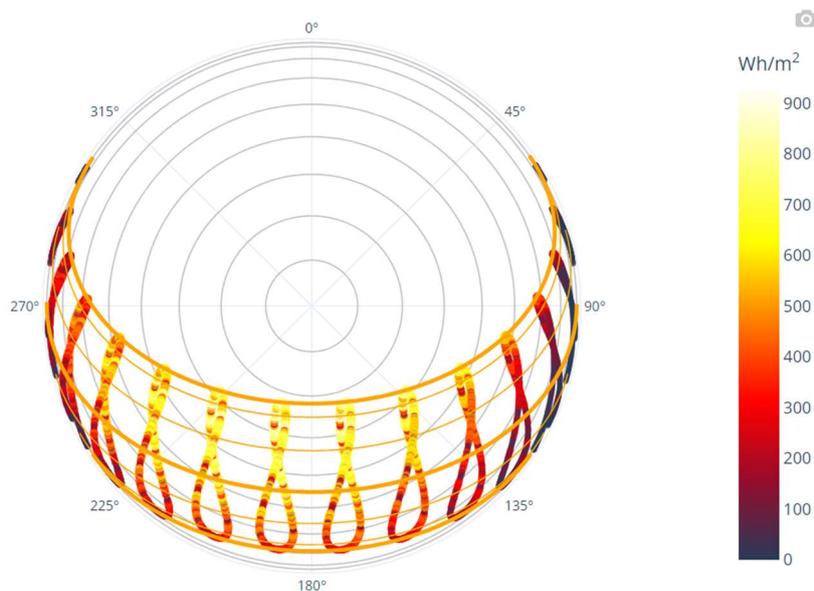


Figura 60 Radiazione solare orizzontale sul diagramma sferico del percorso solare a Torino. Fonte: CBE Clima Tool (Betti G., 2023)

D'altra parte, il diagramma del percorso solare è strettamente legato all'intensità della radiazione globale (figura 60). Il percorso solare definisce la rappresentazione geometrica sul diagramma; ogni punto del diagramma rappresenta la posizione del sole in un determinato momento dell'anno- le linee orizzontali rappresentano l'altezza solare e quindi ogni mese dell'anno- e in una determinata ora del giorno -attraverso le analemme, che rappresentano il percorso solare da est a ovest-. Su questo diagramma vengono inseriti i valori della radiazione solare orizzontale, espressi in Wh/m^2 , al fine di studiare il rapporto energetico del sole, su una superficie orizzontale, con il suo percorso durante tutto l'anno.

Effettivamente, dal diagramma viene dimostrato un chiaro aumento nei mesi estivi con variazioni nel suo punto massimo tra i 600 Wh/m^2 e i 900 Wh/m^2 tra le 10:00 e le 16:00 ore, comportamento che coincide con l'andamento giornaliero della temperatura dell'aria.

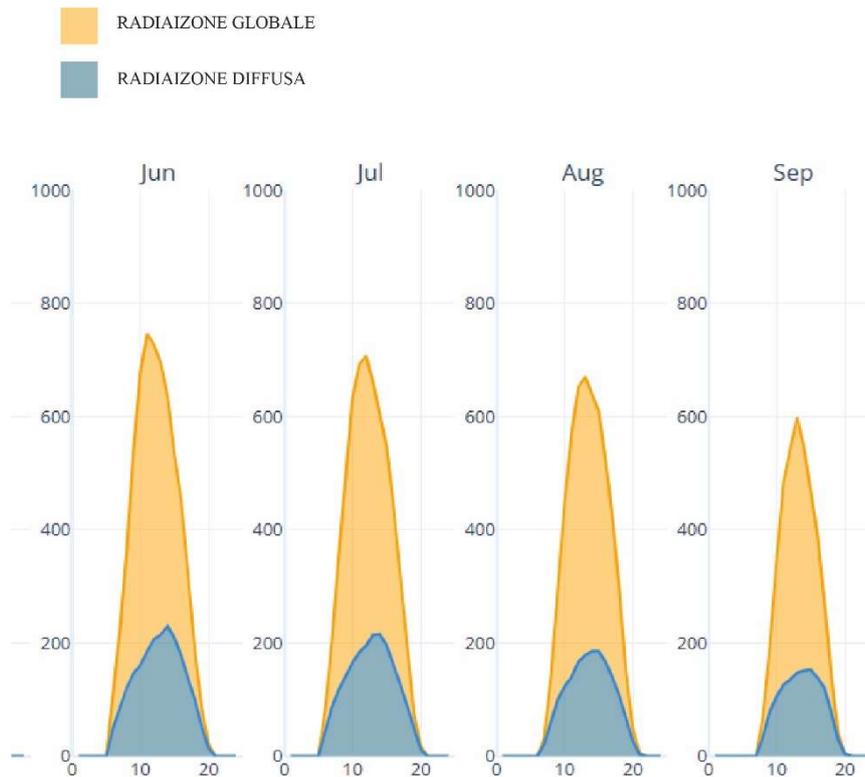


Figura 61 Grafico della radiazione solare orizzontale globale e diffusa durante il periodo estivo, espressa in Wh/m² (21 giugno - 22 settembre) a Torino. Fonte: CBE Clima Tool (Betti G., 2023)

Infatti, dalla comparativa tra la radiazione solare orizzontale globale e diffusa, è possibile notare un chiaro aumento nell'apporto energetico dovuto alla radiazione solare globale. Questo indica che a Torino, dovuto alle condizioni prevalenti di cielo sereno, e quindi poca nuovista, durante il periodo estivo la radiazione solare diretta rappresenta uno dei principali fattori a considerare al momento di valutare gli apporti energetici che determinano le condizioni dell'ambiente esterno.



Figura 62 Rosa dei venti, velocità del vento durante il periodo estivo (21 giugno - 22 settembre) in orario di ufficio (8:00 alle 19:00) a Torino. Fonte: CBE Clima Tool (Betti G., 2023)

La rosa dei Venti dimostra le condizioni del vento durante il periodo estivo, indicando la direzione prevalente del vento e la sua velocità. Dal diagramma è possibile notare che il vento ha una direzione prevalente Est-Ovest, ma una quasi nulla prevalenza da Ovest, Nord e Sud. Inoltre, presenta una velocità abbastanza ridotta, dalla quale è possibile concludere che il vento non si potrebbe considerare in gran misura per migliorare le condizioni riguardo il comfort termico/igrometrico dato che la velocità dell'aria non sarebbe sufficiente per accentuare gli scambi energetici di raffreddamento tra l'uomo e l'ambiente che lo circonda e quindi migliorare il benessere termico.



Figura 63 Grafico annuale dell'Indice universale del clima termico (UTCI) a Torino. Fonte: Clima CBE Tool (Betti G., 2023)

Il grafico della mappa termica UTCI (Indice universale del clima termico, figura 63) permette di visualizzare i momenti dell'anno nei quali le condizioni dell'ambiente provocano lo stress termico delle persone. Ogni punto del grafico rappresenta l'indice di confort termico dell'ambiente esterno in una determinata ora, attraverso l'asse verticale, e durante un momento dell'anno, attraverso l'asse orizzontale. Ogni punto del grafico viene caratterizzato da un colore, il quale indica le condizioni di benessere dell'ambiente esterno in quel determinato momento.

L'UTCI è un indice di misura che determina il benessere o discomfort termico umano in determinate condizioni ambientali esterne al fine di creare un modello fisiologico del benessere, basato sui fattori meteorologici, come la temperatura dell'aria, vento, radiazione, ecc. L'indice permette quindi di valutare le condizioni ambientali esterne di una determinata zona in base alle sensazioni di benessere o discomfort termico dovute alle condizioni climatiche prevalenti.

È possibile notare come le condizioni di discomfort termico dovuto al calore hanno un leggero aumento da aprile e maggio in torno al mezzogiorno che poi aumentano considerevolmente durante i mesi estivi, continuando anche dopo settembre.



Figura 64 Distribuzione percentuale del discomfort termico (UTCI) annuale durante le ore 8:00 e 19:00 a Torino. Fonte: Clima CBE Tool (Betti G., 2023)

Analizzando i risultati durante l'orario di ufficio, dalle 8:00 fino le 19:00, si rendono evidenti le situazioni di disagio termico nell'ambiente esterno, specificamente il discomfort dovuto all'eccessivo calore dell'ambiente. Luglio rappresenta il mese più estremo, dove le condizioni di completo benessere, con assenza di discomfort termico, rappresentano soltanto l'8.6% del tempo, considerando il discomfort termico moderato come una situazione ancora sopportabile, il periodo dove non esiste un discomfort termico molto elevato riguarderebbe soltanto il 34.9% del tempo. Per il 65.1% del tempo restante, le condizioni dell'ambiente esterno provocherebbero un forte discomfort termico, del quale un 22.6% del totale viene determinato come discomfort termico molto forte.

Diventa quindi evidente come le condizioni dell'ambiente esterno durante questo periodo sono completamente da evitare, riportando la chiara necessità di un sistema capace di mitigare queste condizioni, migliorando quelle degli spazi interni al fine di non presentare condizioni di discomfort termico così elevate.

In conclusione, visto che la facciata sud della "Manica Nuova" presso la sede "Castello del Valentino" del Politecnico di Torino risulta completamente esposta alla radiazione solare diretta dovuta al percorso solare, l'orientamento dell'edificio e l'assenza di sistemi di schermatura solare, i carichi termici dovuti alla radiazione solare diventano ancora più aggravanti.

Valutando i fattori climatici che influenzano l'ambiente esterno e, di conseguenza quello interno, vengono elaborate diverse considerazioni:

- La componente solare diretta è il più importante fattore a definire il benessere degli ambienti interni. In contrasto alla componente diffusa, la radiazione solare globale è abbastanza elevata.
- Gran parte dell'involucro esposto al sole è trasparente e in assenza di sistemi di ombreggiamento o dispositivi capaci di filtrare l'apporto energetico solare.
- La direzione e la ridotta velocità del vento non presentano condizioni favorevoli da tenere in conto al momento di adottare strategie passive di ventilazione naturale.
- Le condizioni dell'ambiente esterno presentano una gran percentuale di discomfort termico durante il periodo estivo, evidenziando la necessità di un sistema di involucro che sia capace di mitigare queste condizioni.

Per questi motivi, il fattore climatico più rilevante al momento di progettare una soluzione climatico-adattiva è la radiazione solare e la temperatura dell'aria, tenendo in conto le limitazioni dovute al vento e la mancata necessità di includere ulteriori parametri climatici, come l'umidità relativa, precipitazioni, ecc.

In questo modo, si definiscono le prime direttrici della proposta di modulo adattivo come soluzioni alla problematica ambientale degli spazi interni della "Manica Nuova" presso la sede "Castello del Valentino" del Politecnico di Torino.

4.5 Castello del Valentino, contesto storico e culturale della zona di progetto

Confermate le condizioni ambientali sfavorevoli per il comfort termico degli utenti, emerge la necessità di una soluzione che consenta di ottenere benessere ambientale, tenendo in considerazione sia i costi energetici sia quelli costruttivi di un nuovo intervento. Nonostante ciò, poiché il progetto riguarda una facciata esistente situata in un contesto storico e urbano di particolare rilevanza, l'obiettivo è proporre una soluzione adattiva che rispetti il patrimonio edilizio esistente, sia dell'edificio in questione sia del suo contesto. Essendo l'edificio parte integrante del complesso del Castello del Valentino, è essenziale studiarne e valorizzarne il carattere storico, culturale e urbano.

Il Castello del Valentino, sede del Politecnico di Torino è riconosciuto come patrimonio dell'umanità dall'UNESCO, fa parte dell'elenco delle residenze reali dei Savoia e costituisce un importante bene storico e culturale della città di Torino. Inoltre, è stato un elemento chiave nello sviluppo urbano lungo il fiume Po. Questa doppia importanza, sia culturale che storica, rafforza il carattere del castello come un polo di riferimento per la città.

Secondo le informazioni del sito ufficiale del Politecnico di Torino (2024): *“nel 1564, Emanuele Filiberto di Savoia acquistò una villa fluviale che sarebbe servita come base per la costruzione del castello. Posteriormente, sotto la commissione di Cristina di Francia, prima Madama Reale, l'edificio viene concepito originariamente come "maison de plaisance", l'edificio era strategicamente situato di fronte al fiume Po, dominando il paesaggio montuoso e il vigneto di Madama Reale sull'altra sponda”*. L'edificio, basato sul modello transalpino, era strutturato su quattro piani e all'epoca non rivestiva un ruolo urbano rilevante. Il nome "Valentino" deriva dalla zona morfologicamente diversificata in cui era situato il castello, conosciuta come "Vallantium", una regione con caratteristiche topografiche variegata.

L'UNESCO (1997) segnala che la progettazione del castello seguì lo stile del "pavillon système", commissionato dalla prima Madama Reale nel XVII secolo ed eseguito dagli architetti Carlo e Amedeo di Castellamonte. Questo disegno sarà fondamentale per la successiva evoluzione del castello. Nel corso del XVIII secolo, sotto il regno di Vittorio Amedeo II, fu progettato l'Orto Botanico, consolidando l'immagine del castello nel panorama urbano.

All'inizio del XIX secolo il castello non fu più utilizzato come residenza di corte. Nel 1850, il passaggio di proprietà dalla Corona allo Stato rafforzò il legame tra il castello e la città, consentendo la realizzazione del Parco del Valentino come spazio pubblico. Nel 1859, dopo la promulgazione della legge Casati, venne istituita nel castello la Regia Scuola di Applicazione degli Ingegneri, che comportò una serie di importanti ampliamenti e restauri. Questo processo culmina nella trasformazione del Castello del Valentino nella sede universitaria del Politecnico di Torino, dove si svolgono ricerche scientifiche e sperimentazioni. Secondo il Politecnico di Torino (2024), il castello svolge oggi un ruolo chiave nella conservazione e tutela del patrimonio culturale, pur rimanendo un luogo di ricerca avanzata.



Figura 65 Vista frontale del Castello del Valentino. fonte: Politecnico di Torino *“Castello del Valentino, Patrimonio dell'Umanità UNESCO”* (2024),

Anche il Parco del Valentino, che circonda il castello, ricopre un ruolo fondamentale nella vita urbana. Progettato inizialmente nel 1865 e ampliato nel 1921, il parco è stato riconosciuto nel 1947 come parte degli elementi naturali da tutelare. Negli anni è diventato luogo di progetti culturali come “Torino Esposizioni”, uno spazio pubblico destinato a favorire l'interazione tra la città e i suoi abitanti, oltre che a promuovere la cultura.

Nel 1997 il Castello del Valentino è stato riconosciuto Patrimonio dell'Umanità dall'UNESCO all'interno del sistema residenziale sabauda, rafforzandone il valore storico. Insieme al parco e ai suoi dintorni, il castello costituisce uno dei principali assi urbani di Torino, seguendo il corso del fiume Po. Quest'area si distingue sia per la sua funzione di parco urbano che per la sua rilevanza accademica, essendo sede del Politecnico di Torino (2024).

Considerata l'importanza storica e culturale del territorio del Valentino, qualsiasi intervento architettonico deve essere attentamente pianificato per preservarne l'essenza. Ciò include progetti contemporanei, come l'installazione di un sistema di facciata adattiva nell'Ala Nuova del castello. Questo intervento mira a migliorare le prestazioni energetiche dell'edificio regolando il flusso di energia attraverso la sua facciata sud, senza compromettere l'estetica o il valore storico del complesso architettonico.

4.6 Studio del nodo progetto - facciata

La prima fase del progetto si concentra sullo sviluppo di una soluzione tecnologica adattiva per la facciata della “Manica Nuova” presso la sede “Castello del Valentino” del Politecnico di Torino. Questo intervento è limitato da precise condizioni spaziali, poiché il progetto non può sporgere più di 50 cm dalla facciata esistente a causa di vincoli edilizi. Ciò esclude la possibilità di una struttura autoportante e costringe il sistema ad essere integrato direttamente nei serramenti (figura 66).



Figura 66 Facciata "Ala Nuova" in confronto all' edificio adiacente, la ringhiera delimita il confine edificabile e la griglia di progetto 100x100cm definita dai telai delle finestre. Fonte: elaborazione propria, 23-05-2024

Per rispettare sia il contesto storico che l'estetica del Castello, la proposta progettuale considera i ritmi e le proporzioni della facciata storica rivolta verso il fiume Po. Il sistema adattivo è destinato a mantenere la continuità modulare della facciata e ad agganciarsi ai serramenti, garantendo così un'armoniosa integrazione con l'insieme architettonico (Figura 67).

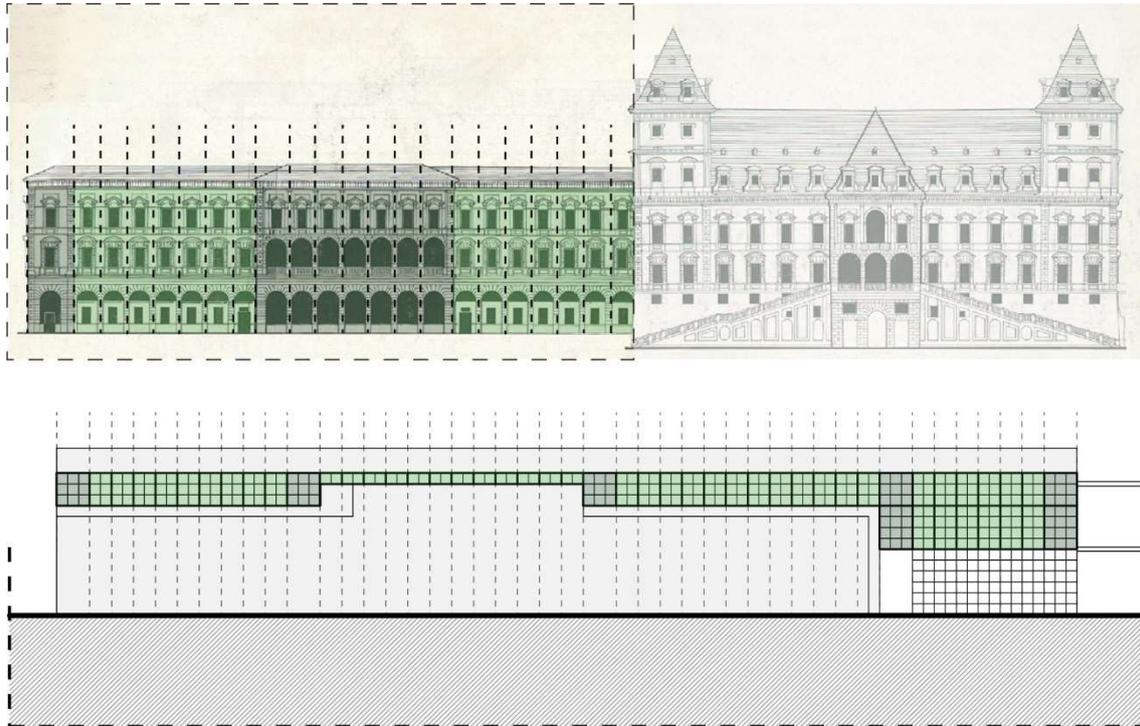
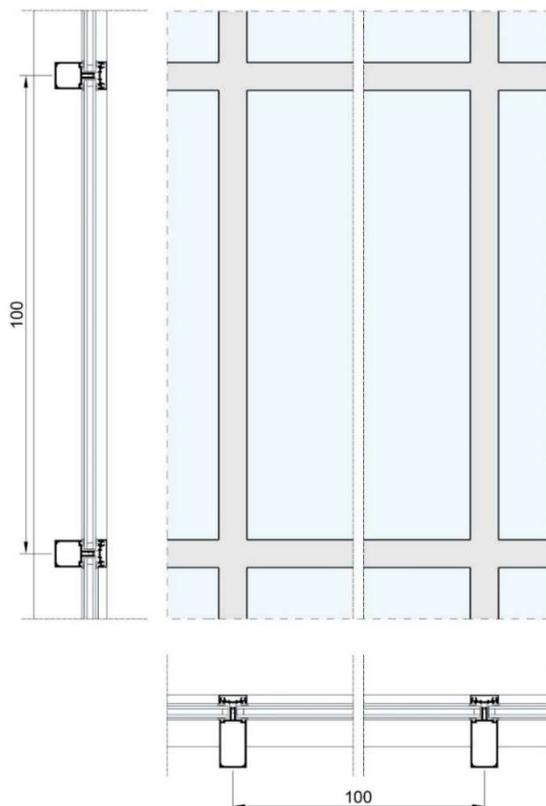


Figura 67 a) Studio compositivo del Prospetto est del Castello del Valentino. b) Applicazione modulare delle proporzioni e ritmo sulla facciata sud della "Manica Nuova" fonte: elaborazione propria su disegni di Giovanni Tommaso Borgonio (Comune di Torino, 2024)



In questo modo le soluzioni tecnologiche mirano a aderire agli infissi esistenti seguendo la nuova modularità adottata. Per poterlo collegare alla facciata esistente è necessario studiare il funzionamento della facciata esistente e come sono composti i serramenti (figura 68).

Infatti, i serramenti presentano un telaio in alluminio con delle doppie lastre di vetro che consentono la presenza di una vetrocamera all'interno degli strati.

Questi serramenti presentano uno stratto di giunzione che viene coperto con un tappo di finitura all'esterno della facciata.

Figura 68 Stato di fatto finestre della "Manica Nuova".
Fonte: Elaborazione propria, 2024

Date queste condizioni e limitazioni, sono state prese in considerazione due soluzioni strutturali per ancorare il sistema adattivo. Il primo è costituito da un sistema di binari installati direttamente sui serramenti, consentendo così di ridurre al massimo la distanza tra il modulo adattivo e la facciata. Tuttavia, questa soluzione, basandosi su un collegamento continuo ai telai, potrebbe rendere difficoltosa la manutenzione e lo smantellamento degli elementi della facciata. All'interno di questa prima opzione vengono proposte due varianti (Figura 69), la prima con binari paralleli ai serramenti e la seconda con binari perpendicolari ai telai, consentendo diverse configurazioni di installazione a seconda dell'esigenza progettuale.

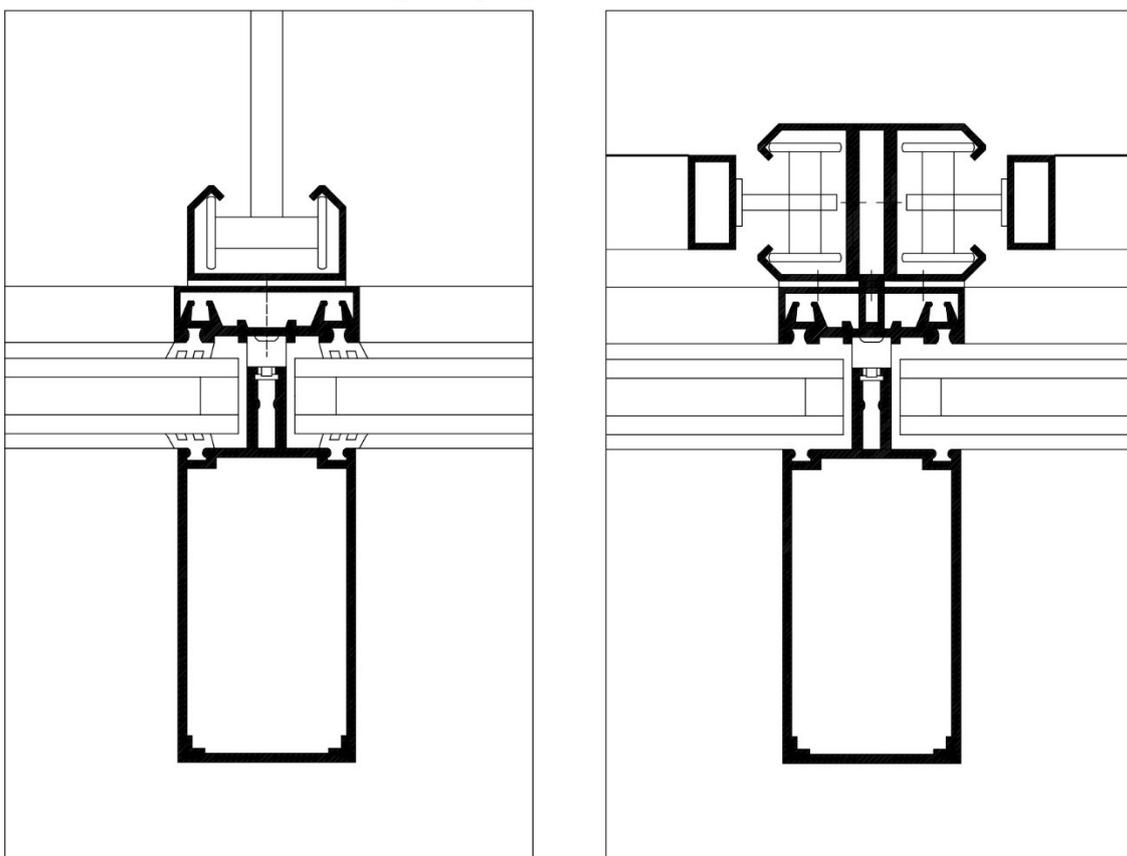


Figura 69 Prima soluzione di sistema di collegamento diretto, a) variante perpendicolari b) variante con binari paralleli. Fonte: elaborazione propria, 2024.

La seconda soluzione (figura 70) prevede l'utilizzo di staffe ancorate in punti specifici della facciata, in modo che il contatto con la stessa sia puntuale e non continuo. Ciò agevola la manutenzione e l'eventuale smantellamento del sistema adattivo senza intaccare gli elementi esistenti della struttura, garantendo inoltre una maggiore indipendenza al progetto. Nonostante ciò, questa soluzione potrebbe generare una leggera distanza tra la facciata e il modulo adattivo e il sistema di staffe potrebbe essere visibile dall'interno dell'edificio, il che potrebbe influenzare l'estetica dello spazio interno.

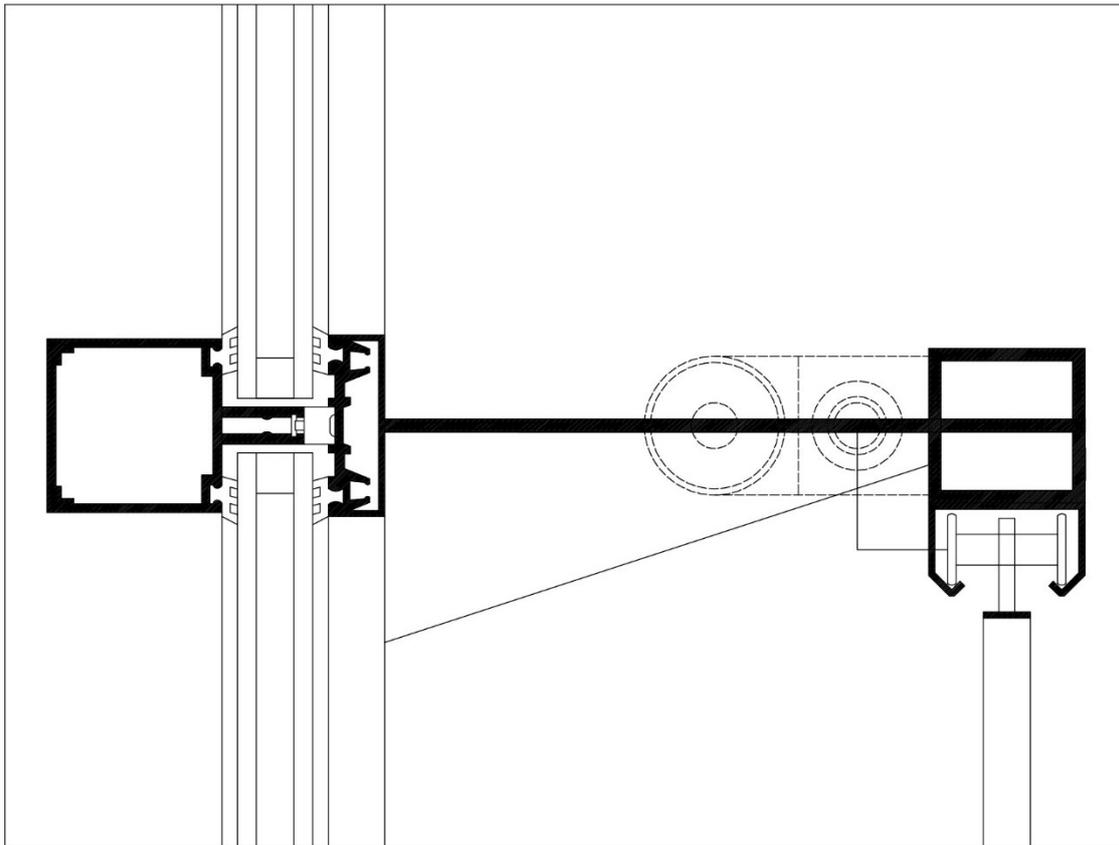


Figura 70 Seconda soluzione di sistema di collegamento attraverso l'ancoraggio di mensole e studio dell'attuatore. Le linee tratteggiate indicano l'ipotetica collocazione dell'attuatore. Fonte: elaborazione propria, 2024

Per quanto riguarda i nodi di ancoraggio, viene proposto un sistema mediante bulloni nascosti che vengono fissati in modo discreto ai serramenti esistenti, in modo che i punti di ancoraggio non interferiscano con l'estetica della facciata. Questi nodi sono posizionati ai vertici di ciascun modulo adattivo, lungo la facciata ogni due o tre metri, e in altezza ad intervalli di circa quattro metri o in base al livello del progetto.

Con queste alternative strutturali, il progetto presenta un intervento che risponde sia ai limiti spaziali che ai criteri estetici dell'edificio, garantendo un'integrazione visiva e funzionale con la facciata storica del Castello del Valentino.

4.7 Scelta della risposta adattiva

Il progetto è stato pensato in modo che la facciata risponda a due principali fattori climatici: la radiazione solare e la temperatura. I sensori esterni posizionati strategicamente raccolgono informazioni su questi fattori, mentre i sensori interni monitorano la temperatura ambientale e l'illuminazione per valutare lo stato di comfort all'interno dell'edificio. Questo approccio sensoriale di base consente al sistema di adattarsi dinamicamente; Tuttavia, il progetto contempla la possibilità di integrare sensori aggiuntivi che misurano altri parametri, come il consumo energetico per l'aria condizionata e l'illuminazione, al fine di migliorare la precisione e la capacità di risposta del sistema adattivo.

Poiché il sistema non utilizza materiali con proprietà adattive, il controllo della facciata avviene attraverso un sistema di gestione intelligente che elabora i dati raccolti dai sensori e genera una risposta in base a configurazioni prestabilite. Quando la temperatura interna scende al di sotto dei livelli di comfort, il sistema massimizza la

cattura della radiazione solare per riscaldare l'ambiente. Altrimenti, se la temperatura interna supera i livelli di comfort, il sistema minimizza l'apporto solare per evitare il surriscaldamento. Allo stesso tempo, si cerca di mantenere adeguati livelli di illuminazione naturale, garantendo che le modifiche volte a ridurre l'apporto energetico del sole non compromettano la qualità dell'illuminazione interna.

Il sistema adattivo incorpora anche un processo di feedback, che adatta le sue risposte in base agli effetti registrati dopo ogni intervento. Ciò consente al sistema di affinare il proprio funzionamento nel tempo, valutando se le risposte precedenti hanno generato l'impatto desiderato sulle condizioni interne.

A livello di attuatore, il sistema si configura come una facciata adattiva che utilizza protezioni solari ancorate alla struttura esistente. Le varie posizioni di queste protezioni vengono regolate in funzione dei dati climatici raccolti ed elaborati. Sono state valutate tre possibili configurazioni per gli attuatori, considerando la loro capacità di ridurre l'accumulo della radiazione solare nei periodi di maggiore richiesta di raffrescamento, e sono state confrontate con lo stato attuale della facciata. La decisione di non includere sensori aggiuntivi, come quelli della velocità del vento, si basa sulla bassa incidenza di questo fattore nel sito di progetto e sui vincoli normativi che vietano l'apertura delle finestre sulla facciata sud. Lo schema (figura 71) illustra le strategie di controllo adottate per affrontare il progetto.

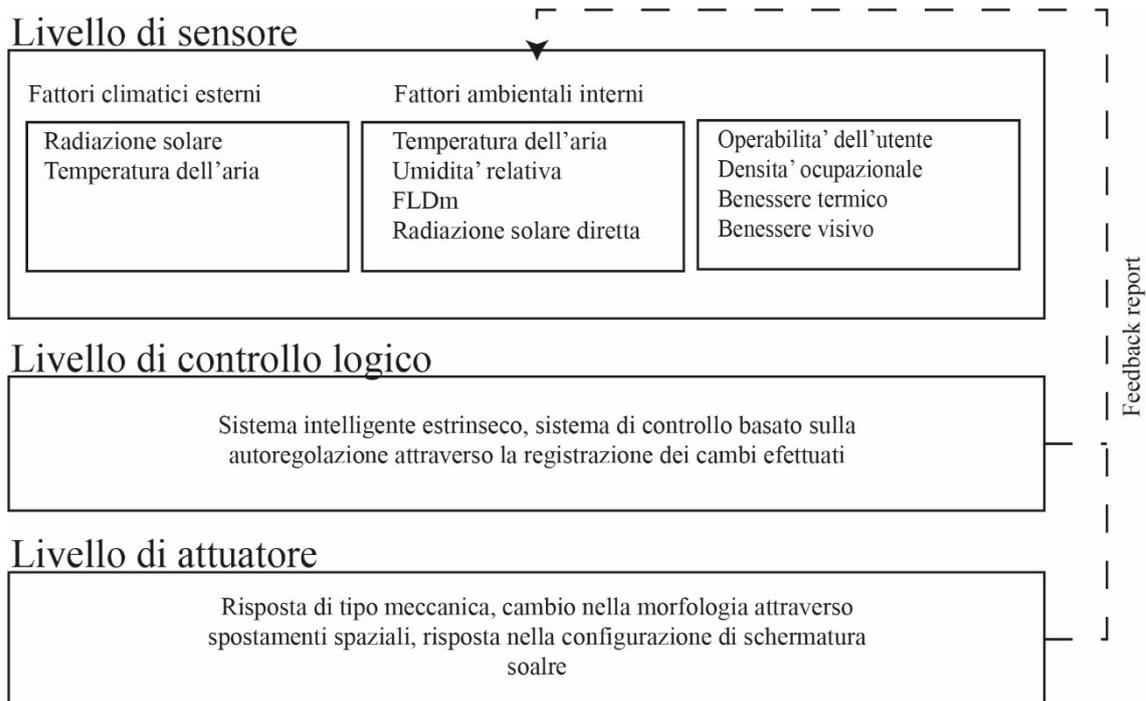


Figura 71 Schema delle strategie di controllo per il sistema adattivo di progetto, la linea tratteggiata indica il sistema di Feedback (registro dei risultati delle risposte adattive precedenti per autoregolare la prossima risposta adattiva). Fonte: elaborazione propria, 2024.

4.7.1 Proposta 1

La prima proposta cerca di utilizzare un sistema ispirato alle pieghe degli origami per aumentare o ridurre la superficie opaca della facciata. In questo modo, durante i periodi caldi, il sistema sarebbe in grado di ridurre notevolmente l'apporto solare agli spazi interni.

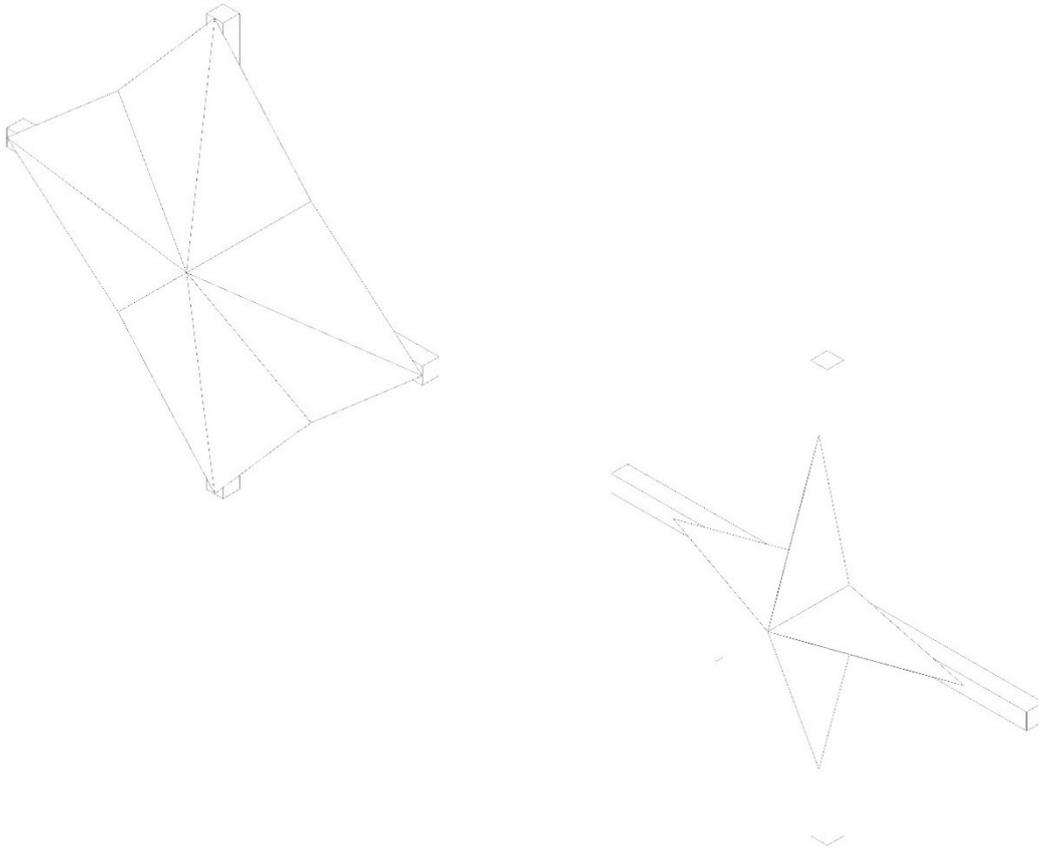


Figura 72 Schema assonometrico proposta 1, modulo adattivo di 200cm x 200cm. Fonte: elaborazione propria, 2024

Questa soluzione propone un ancoraggio basato su un sistema di binari posti ai vertici della maglia, in questo modo la distanza tra il modulo e la facciata è minima. Tuttavia, quando il modulo è chiuso potrebbe sporgere fino a 40 cm.

Pur essendo una delle soluzioni più sorprendenti in termini di innovazione e dinamismo, questa proposta in gran parte non coincide con la griglia compositiva, risultando in una minore compatibilità estetica con il contesto del progetto.

Un altro svantaggio è l'implementazione del motore situato al centro di ciascun modulo, all'esterno della facciata, che rappresenta un problema per la manutenzione del dispositivo.

Inoltre, configurazioni dei moduli che mirano a ridurre l'irraggiamento solare diretto potrebbero comportare una scarsa illuminazione naturale all'interno degli ambienti, per cui nel caso in cui tale configurazione implicasse una totale opacità della facciata, sarebbe necessario accendere i sistemi di illuminazione artificiale non coincide con gli obiettivi del progetto.

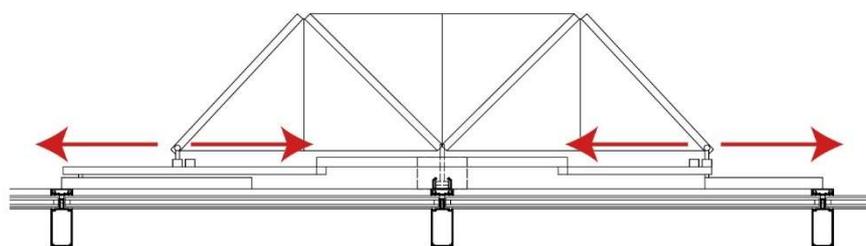
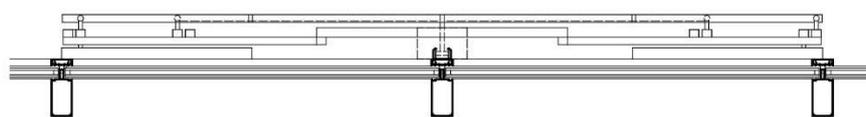
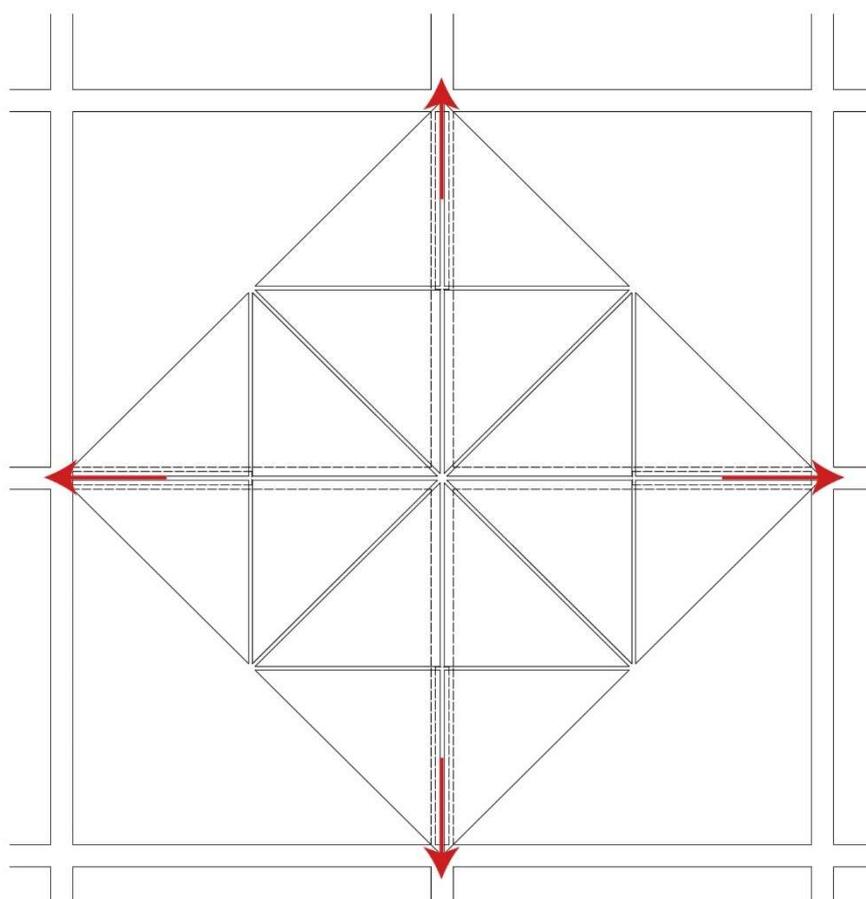


Figura 73 Schema della prima soluzione di progetto, basata sulla ripiegatura stile origami attraverso binari uniti al telaio esistente. Fonte: elaborazione propria, 2024

4.7.2 Proposta 2

La seconda proposta cerca di ridurre semplicemente la componente solare e aumentare l'illuminazione naturale presentando elementi di protezione solare che si adattano

all'angolo solare in base alle esigenze termiche e visive degli ambienti interni. Questo sistema si basa su una piega verticale che copre almeno la metà del modulo che, spostato verticalmente, può fungere da elemento di protezione solare, anche quando rimane aperto.

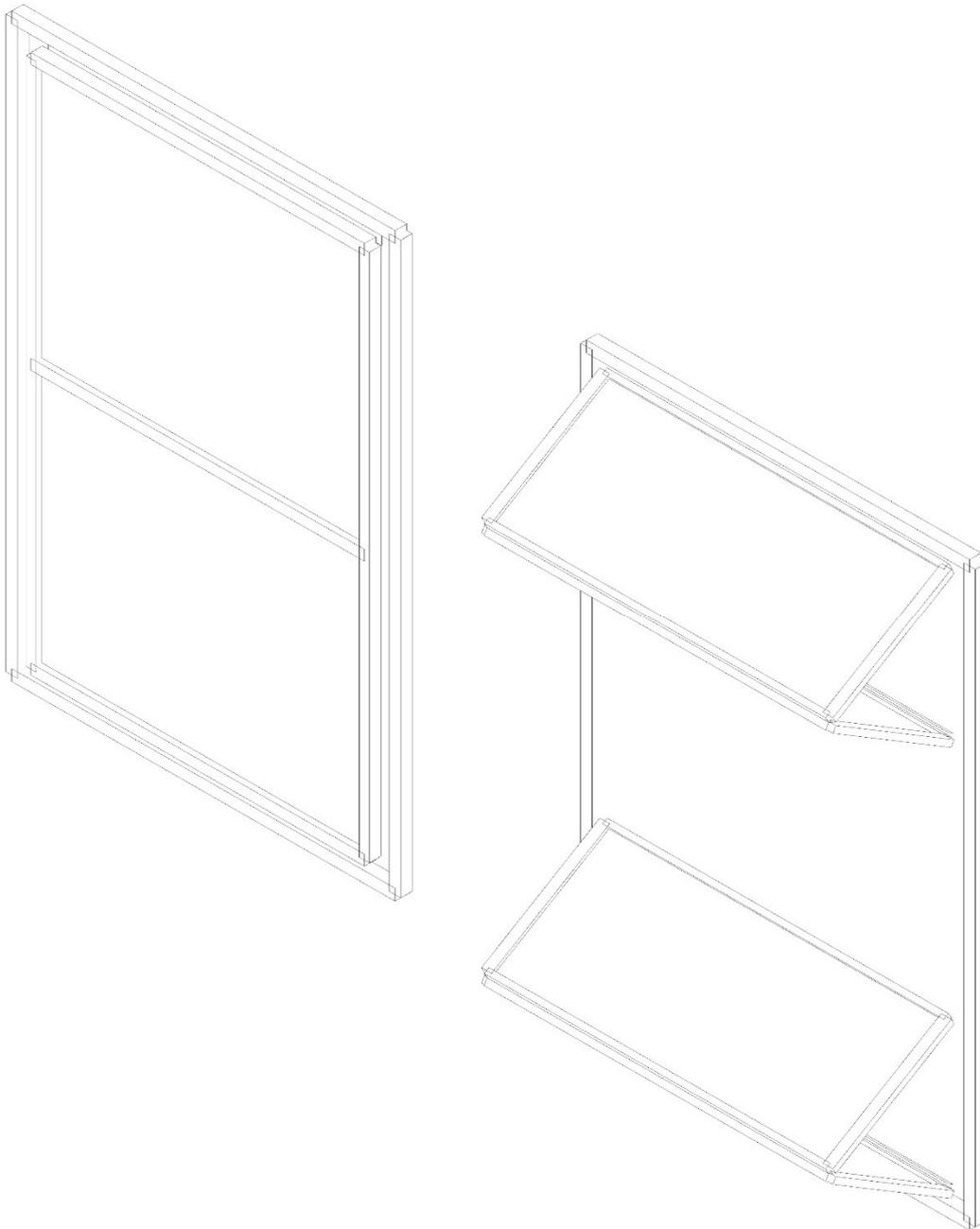


Figura 74 Schema assonometrico proposta 1, modulo adattivo di 200cm x 300cm. Fonte: elaborazione propria, 2024

Questa soluzione permette di dare integrità al modulo in modo compositivo e cerca di offrire una soluzione semplice allo spostamento del modulo. Tuttavia, l'utilizzo di binari fissati direttamente alla struttura esistente complica il sistema di ancoraggio non potendo presentare una soluzione per il sistema a fune che consenta lo spostamento del modulo.

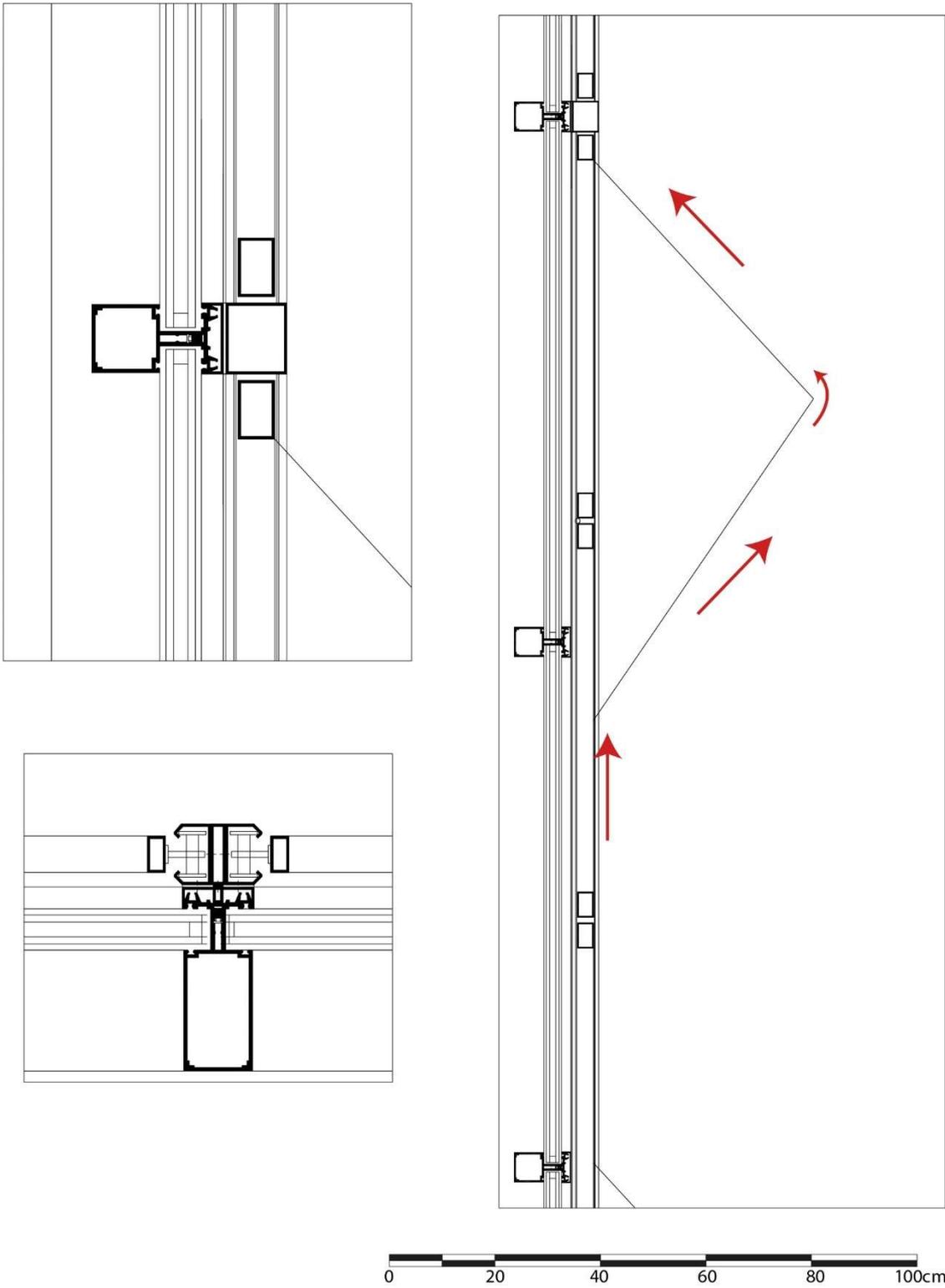


Figura 75 Schemi tecnici proposta 2, sistema verticalmente piegabile attraverso binari agganciati al telaio esistente.
Fonte: elaborazione propria, 2024

4.7.3 Proposta 3

La terza proposta rappresenta un'evoluzione della precedente, sia in termini tecnologici che energetici. La soluzione utilizza lo stesso sistema di piegatura che si muove tramite l'asse verticale che, a differenza del modello precedente, utilizza come ancoraggio alla facciata un sistema di staffe, alle quali sono destinati ad inserirsi i binari che ne permettono lo spostamento. Questa soluzione tecnologica lascia spazio tra le rotaie dei diversi moduli per consentire il sistema di funi collegate all'attuatore.

Inoltre, in termini energetici, questa proposta ha dimostrato prestazioni energetiche più efficienti consentendo l'utilizzo di moduli aperti senza compromettere il benessere visivo degli utenti che abitano l'interno dello spazio.

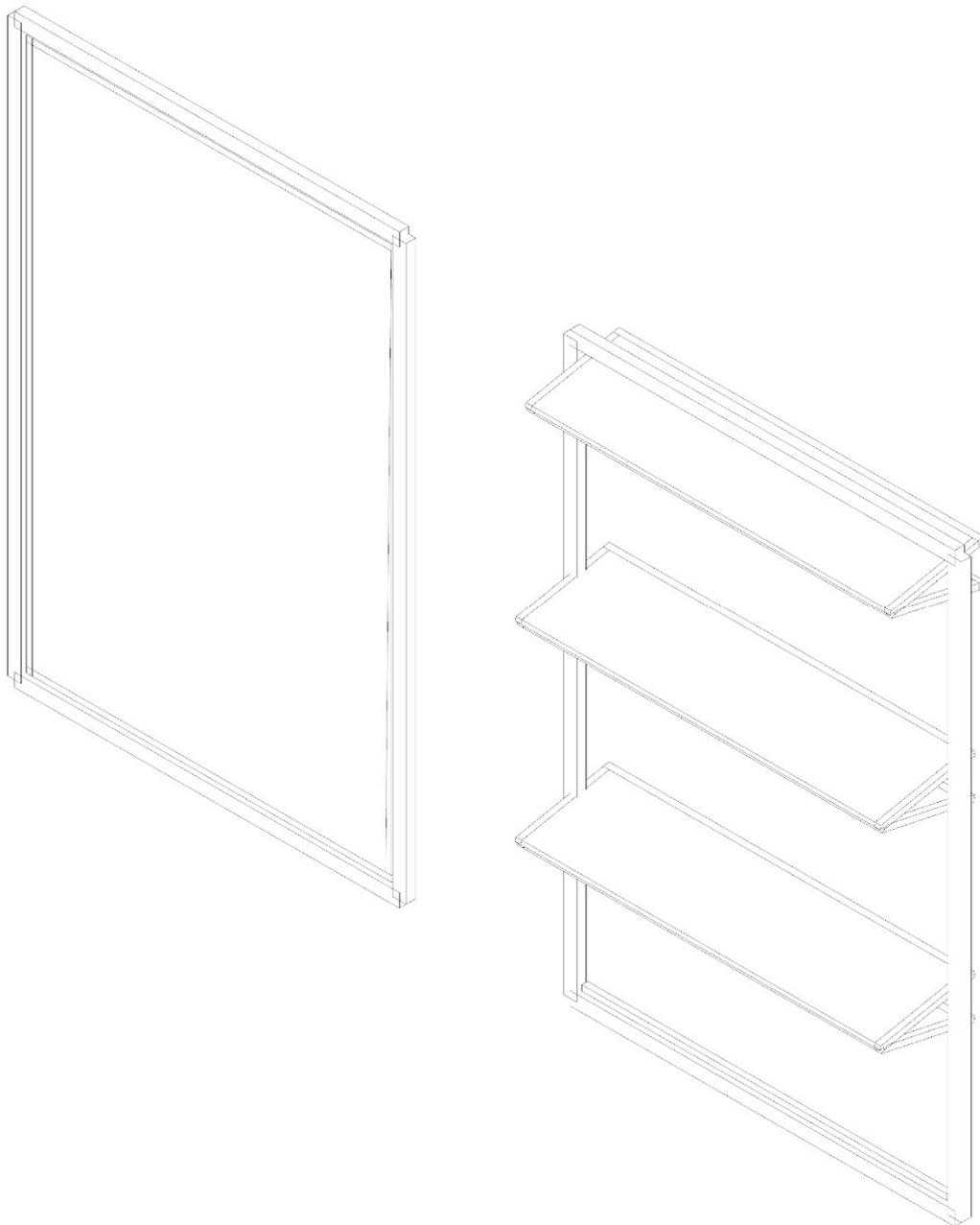
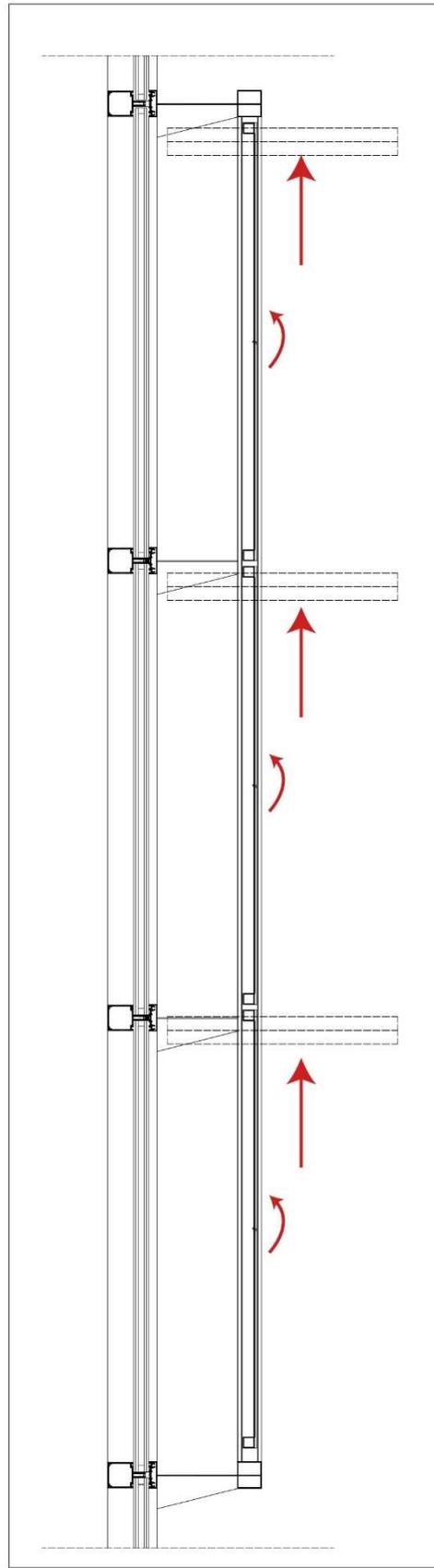
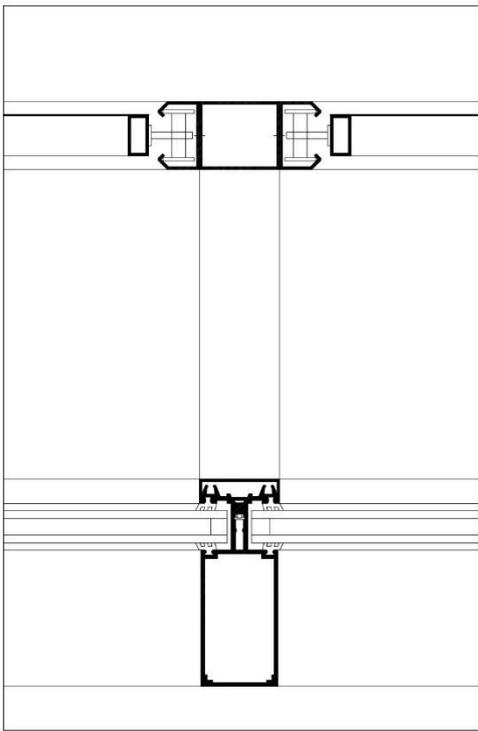
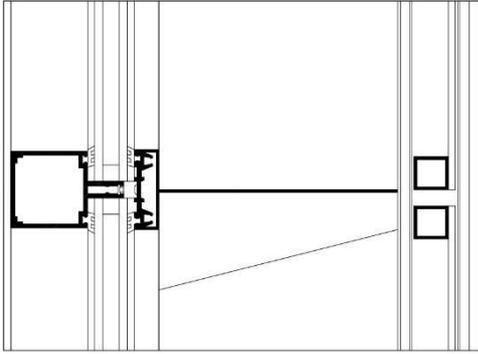


Figura 76 Schema assometrico proposta 3, modulo adattivo di 200cm x 300cm. Fonte: elaborazione propria, 2024



0 20 40 60 80 100cm

Figura 77 Schemi tecnologici proposta 3, sistema verticalmente piegabile attraverso binari installati supportati da un telaio agganciato alle mensole per collegarsi con la facciata esistente. Fonte: elaborazione propria, 2024

4.7.4 Studio dell'irraggiamento solare sull'involucro verticale della "Manica Nuova" e le diverse proposte progettuali.

Per studiare il comportamento della facciata di fronte all'irraggiamento solare durante i momenti di raffreddamento, si cerca di definire i parametri entro i quali un edificio a Torino avrebbe bisogno di attivare gli impianti di riscaldamento o raffreddamento per regolare il comfort degli spazi interni. Il grafico seguente (figura 78) mostra i gradi giorno di riscaldamento (HDD) e i gradi giorno di raffreddamento (CDD) a Torino durante tutto l'anno, queste misurazioni indicano i gradi giorno (GG) in cui, al di sopra di una certa temperatura base o al di sotto di un certo limite vengono attivati impianti di temperatura, raffreddamento o riscaldamento per mantenere condizioni di comfort all'interno degli ambienti (Betti G., 2023).

Queste misurazioni ci consentono di comprendere e prevedere preliminarmente il consumo energetico che verrebbe utilizzato nell'edificio. Si precisa tuttavia che tali misurazioni sono indicative in quanto tali dati si basano solo sulla differenza tra la temperatura dell'aria esterna e l'ipotetica temperatura dell'aria interna in cui si intende mantenere le condizioni di comfort, ma non tengono conto di tutti i fattori che determinano la temperatura effettiva dell'ambiente interno.

Nel caso della "Manica Nuova" il CDD potrebbe essere più elevato in quanto il grafico non tiene conto del surriscaldamento dovuto alla componente solare che entra negli ambienti. Allo stesso modo, gli HDD potrebbero probabilmente essere più piccoli dato che, per lo stesso motivo, gli ambienti interni si possono trovare a temperature più elevate anche quando la differenza stimata tra ambiente interno ed esterno giustifica l'attivazione dei sistemi di riscaldamento.

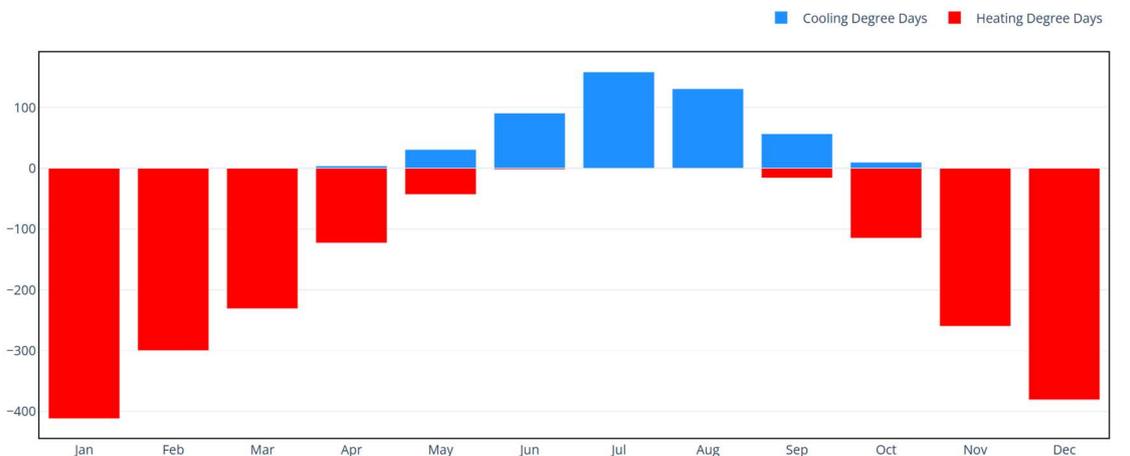


Figura 78 Gradi Giorno di riscaldamento e raffreddamento (Heating e Cooling Degree Days, HDD e CDD) annuali a Torino. Fonte: CBE Clima Tool (Betti G., 2023)

Tenendo conto di questi fattori si è deciso di mantenere i limiti a 16°C per il riscaldamento e 21°C per il raffreddamento. Il grafico coincide con quanto studiato durante l'analisi climatica: durante i mesi estivi, da giugno a settembre, il numero di gradi giorno in cui si desidera raffreddare l'edificio rappresenta 91°-159°-131°-57° per rispettivamente i mesi di giugno, luglio, agosto e settembre.

Tali dati, oltre ad indicare in forma preliminare gli ipotetici consumi energetici destinati al raffreddamento degli ambienti, verranno utilizzati per lo studio comparativo delle soluzioni proposte. Cioè, dato che i CDD rappresentano il periodo di interesse durante il quale si vuole ridurre il consumo di raffreddamento, le successive simulazioni relative

alla radiazione solare (Figura 79) verranno valutate nei momenti in cui l'edificio presenta, ipoteticamente, la necessità per attivare impianti di raffreddamento.

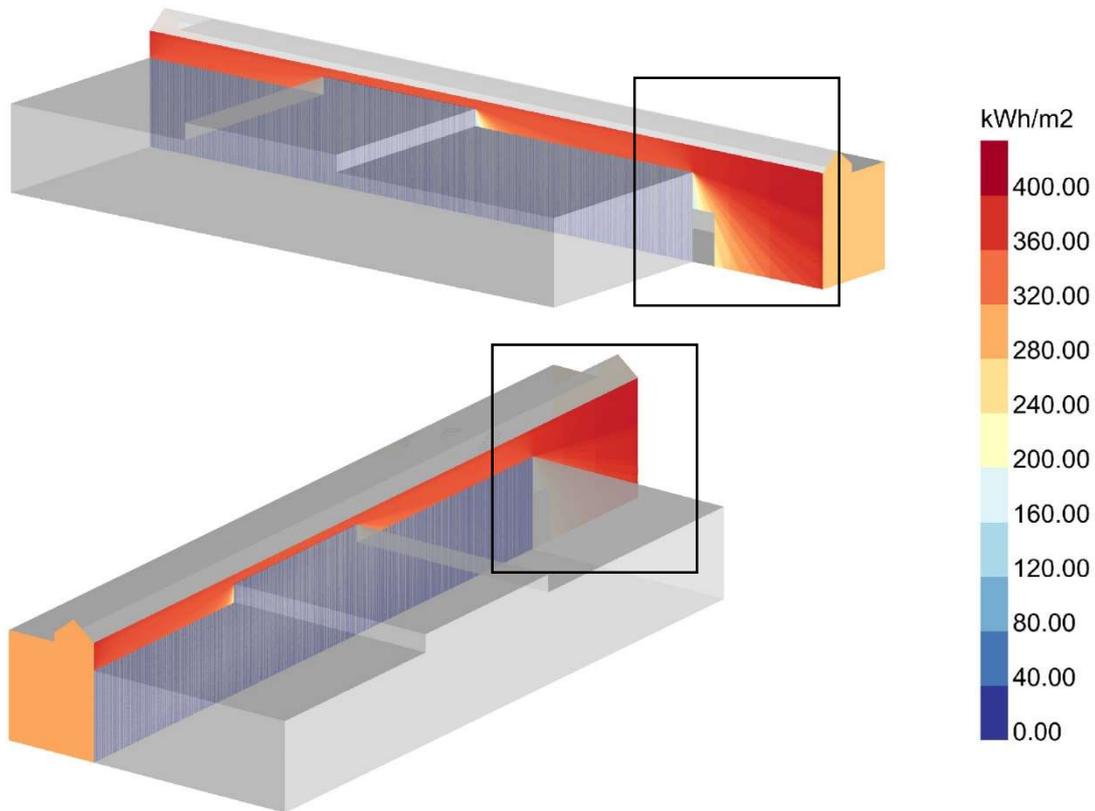


Figura 79 Studio della radiazione solare incidente sulla facciata (kWh/m^2) durante il periodo di raffrescamento (CDD) nelle facciate di progetto. Il rettangolo indica la facciata di studio per l'applicazione delle simulazioni. a) vista sud-est. b) vista sud-ovest. Fonte: elaborazione propria su software LadyBug, 2024.

Dalla figura si può notare che la facciata sud riceve la maggior quantità di radiazione solare durante l'anno (circa $400 kWh/m^2$ nei punti più critici), soprattutto in corrispondenza dell'angolo della facciata sud/est. D'altra parte, entrambe le scale, rivolte a est e a ovest, ricevono circa la metà di quanto riceve la facciata sud (circa $240 kWh/m^2$), variando leggermente tra loro (intorno a $40 kWh/m^2$ in più sulla scala esposta ad ovest) dimostrando che è più efficiente ridurre gli apporti solari sulla facciata sud e dare uguale importanza ad entrambe le scale.

Stato di Fatto

Radiazione incidente cumulativa: 341.20 [kWh/m²]



Figura 80 Simulazione della radiazione solare sullo stato di fatto nella facciata sud-est della "Manica Nuova" durante i periodi di raffrescamento (CDD). Fonte: elaborazione propria su LadyBug, 2024

Questa simulazione (figura 80) indica il punto di riferimento per l'analisi dei risultati delle soluzioni successive, che cercheranno di raggiungere una diminuzione tra il 40-60% della radiazione incidente sulla superficie di studio, la quale è rappresentata da una media di 341,20 [kWh/m²], nondimeno, è possibile notare una differenza poiché la facciata si estende verso est: l'adiacente edificio, Promotrice delle Belle Arti, riesce a proteggere una porzione della facciata sinistra. In ogni caso l'ombreggiamento è poco rilevante per il resto della facciata.

Soluzione 1 configurazione aperta

Radiazione incidente cumulativa: 340.80 [kWh/m²]

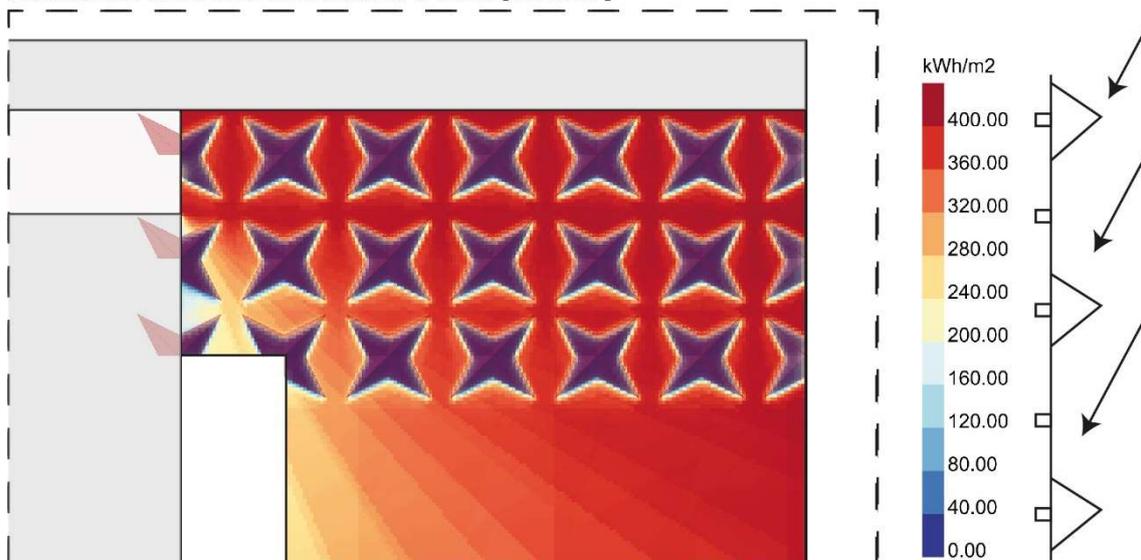


Figura 81 Simulazione della radiazione solare con la soluzione 1, configurazione aperta. Fonte: elaborazione propria su LadyBug, 2024

La prima configurazione della soluzione 1 (figura 81) presenta difficoltà nel proteggere la facciata e nel mantenere livelli di illuminazione naturale desiderabili. Questa configurazione cerca di non ostacolare l'ingresso dell'illuminazione negli spazi, tuttavia, per raggiungere questo obiettivo mantiene elevati livelli di radiazione solare diretta che, oltre a generare discomfort termico, potrebbero rappresentare anche livelli di discomfort visivo.

La radiazione solare incidente, infatti, è mediamente pari a 340,80 [kWh/m²], valori molto vicini a quelli dello stato della facciata esistente. Si può concludere che questa configurazione non è ottimale per ridurre la radiazione solare diretta; quindi, dovrebbero essere analizzate altre configurazioni in risposta alla radiazione solare.

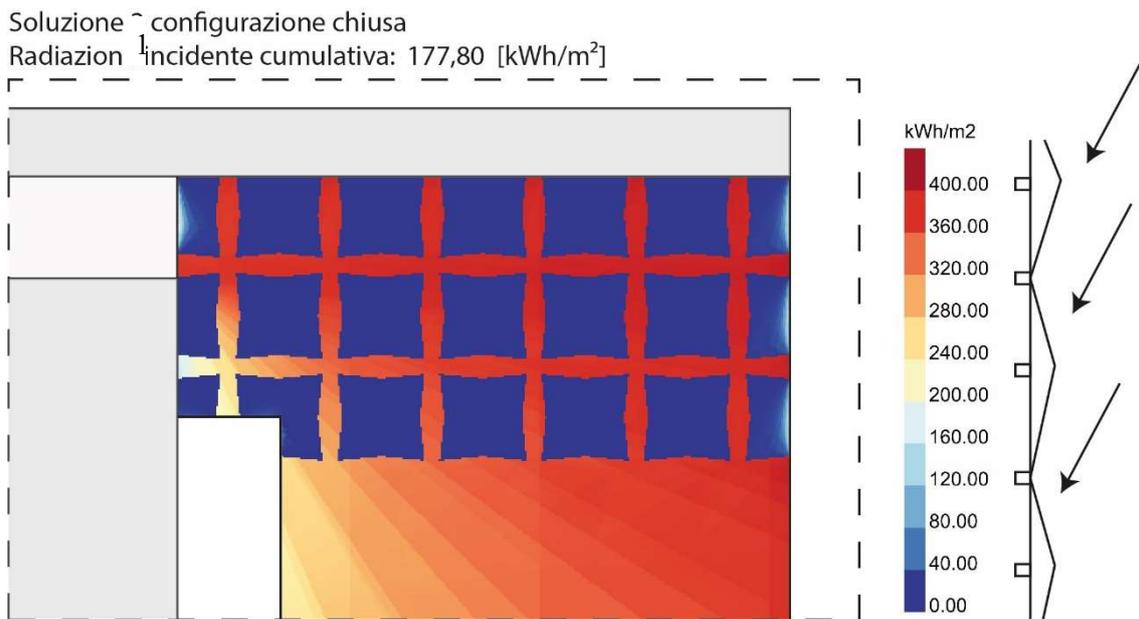


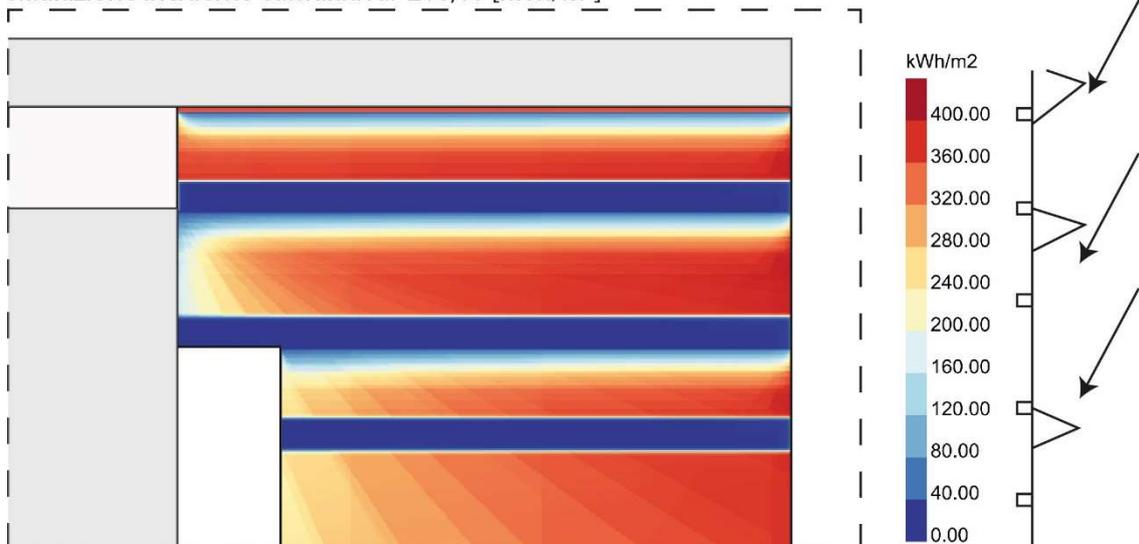
Figura 82 Simulazione della radiazione solare con la soluzione 1, configurazione chiusa. Fonte: elaborazione propria su LadyBug, 2024

La configurazione chiusa (figura 82) di questo modulo permette di ridurre notevolmente l'irraggiamento sulla facciata esistente: la media cumulativa va da 340,80 a 177,80 [kWh/m²], il che significa una riduzione di quasi il 48% dell'irraggiamento totale che riceve la facciata. Tuttavia, come si vede nell'immagine (figura 82), per mantenere tale riduzione è necessario chiudere eccessivamente i moduli, riducendo la visibilità della componente trasparente e bloccando gran parte dell'illuminazione naturale all'interno degli spazi. Ciò significa che, nonostante il modulo sia in grado di ridurre la radiazione solare, potrebbe provocare discomfort visivo all'interno, per cui sarebbe necessario comunque attivare i dispositivi di illuminazione artificiale.

Alla luce di questi primi risultati è necessario sviluppare un modulo che riesca a soddisfare sia i livelli di visibilità che quelli di illuminazione naturale e protezione solare.

Soluzione 2 configurazione aperta

Radiazione incidente cumulativa: 216,10 [kWh/m²]



Soluzione 2 configurazione chiusa

Radiazione incidente cumulativa: 178,85 [kWh/m²]

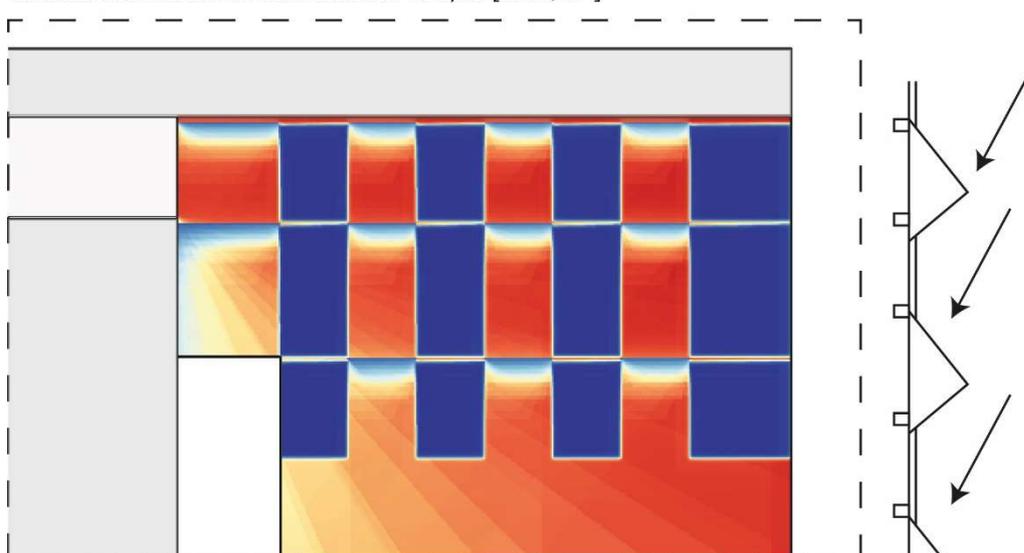


Figura 83 Simulazione della radiazione solare con la soluzione 2, a) configurazione aperta, b) configurazione chiusa. Fonte: elaborazione propria su LadyBug, 2024

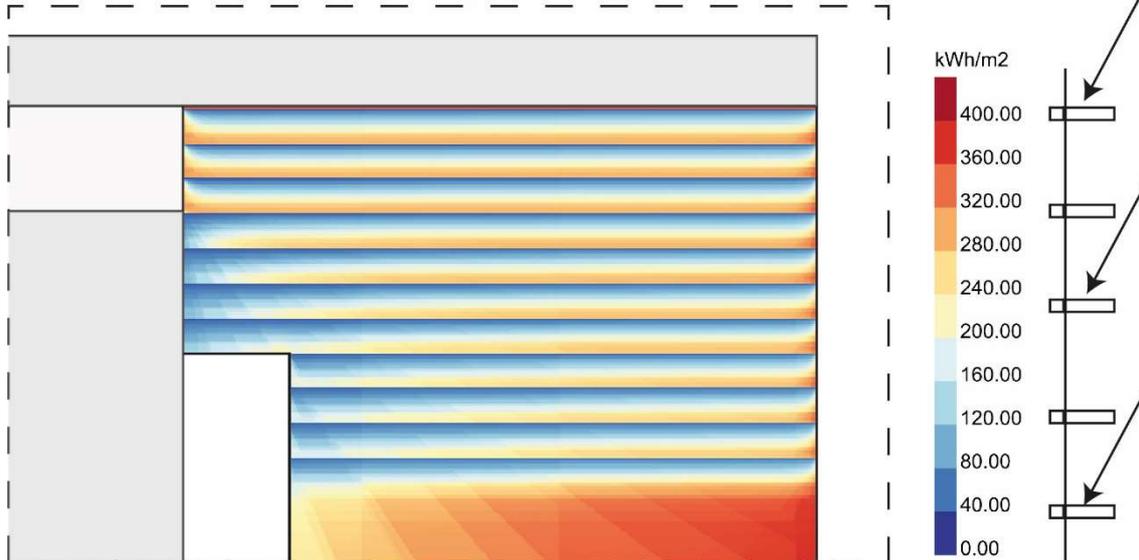
La soluzione 2 (figura 83) presenta miglioramenti in termini di efficienza rispetto alla soluzione precedente. Sulla base dei risultati ottenuti, la soluzione 2 presenta un irraggiamento di [kWh/m²] nella sua configurazione aperta, che dimostra una riduzione del 36,7% rispetto all'incidenza attuale. Sebbene tale riduzione sia inferiore rispetto alla prima soluzione, questa configurazione consente alla luce naturale di entrare all'interno dell'edificio e non riduce la visibilità dell'utente verso l'esterno della facciata, motivo per cui si rivela una misura più idonea a risolvere il problema problemi individuali.

Inoltre, è possibile combinare la configurazione aperta con quella chiusa, consentendo di ridurre ulteriormente l'irraggiamento diretto a costo di ridurre anche l'illuminazione naturale e la permeabilità visiva dell'edificio. La configurazione chiusa presenta infatti un'incidenza pari a 178,85 [kWh/m²], del tutto simile a quanto ottenuto con la configurazione chiusa della soluzione precedente.

Per questo motivo, sulla base dei risultati ottenuti, viene effettuata un'analisi qualitativa, che consiste nel proporre un modulo, basato sulla soluzione 2, che consente di avere una configurazione aperta che massimizza sia l'illuminazione naturale che la protezione solare diretta. I risultati sono mostrati nell'immagine seguente (figura 84).

Soluzione 3 configurazione aperta

Radiazione incidente cumulativa: 150,20 [kWh/m²]



Soluzione 3 configurazione chiusa

Radiazione incidente cumulativa: 143,40 [kWh/m²]

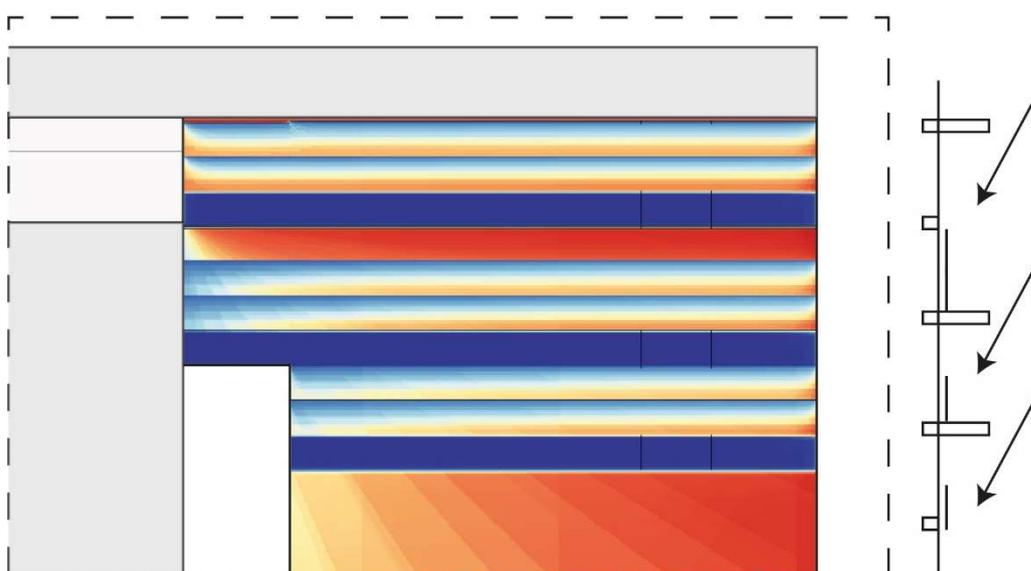


Figura 84 Simulazione della radiazione solare con la soluzione 3, a) configurazione aperta, b) configurazione chiusa. Fonte: elaborazione propria su LadyBug, 2024

L'efficienza della soluzione 3 dimostra notevoli miglioramenti, sia qualitativamente che quantitativamente. Quando la configurazione aperta è attivata, consente di ridurre l'impatto della radiazione solare attuale di quasi il 60%, passando dai 341,20 [kWh/m²] dello stato attuale a 150,20 [kWh/m²], dimostrando una grande riduzione dell'incidenza della radiazione solare.

L'immagine (figura 81a) mostra l'uniformità nella distribuzione della radiazione solare, il che significa che questa soluzione può impedire alla radiazione di entrare in punti specifici dell'edificio. La configurazione aperta, invece, mantenendo libera gran parte della superficie trasparente, consente l'ingresso di grandi quantità di illuminazione naturale in grado di mantenere buoni tassi di comfort visivo all'interno degli spazi.

Inoltre, nel caso in cui la serratura angolare non possa consentire una protezione completa dal sole quando i moduli sono aperti, è possibile chiuderli (figura 84b). Sebbene il modulo chiuso possa ridurre la visibilità e l'illuminazione interna, questo accorgimento può mitigare parzialmente la radiazione solare senza dover chiudere tutti i moduli, poiché sostanzialmente con i moduli aperti è già possibile ridurre del 40% la radiazione solare diretta in assenza di moduli.

Dato che è stato possibile ridurre notevolmente l'irraggiamento solare senza dover intervenire eccessivamente sull'illuminazione naturale e sulla visibilità delle finestre, si è deciso di proseguire con questa opzione come soluzione definitiva al problema dell'energia solare.

4.7.5 Sviluppo del modulo adattivo

In base ai risultati ottenuti, si decide di sviluppare ulteriormente la terza proposta di modulo adattivo, considerando la griglia modulare al fine di mantenere la composizione e ritmo degli edifici con i quali la nuova facciata interagisce.

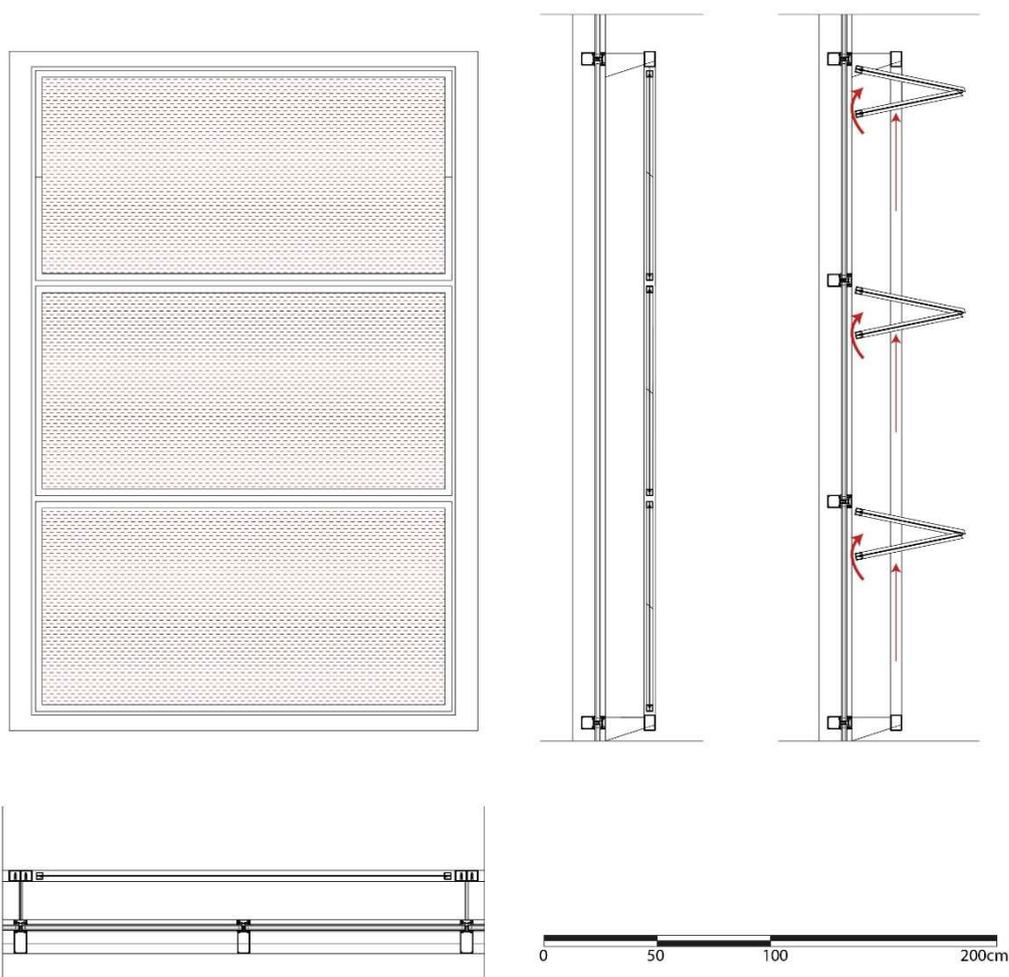


Figura 85 Sviluppo della scelta di proposta di modulo adattivo per la "Manica Nuova" del Castello del Valentino scala di dettaglio 1:50. Fonte, elaborazione propria, 2024

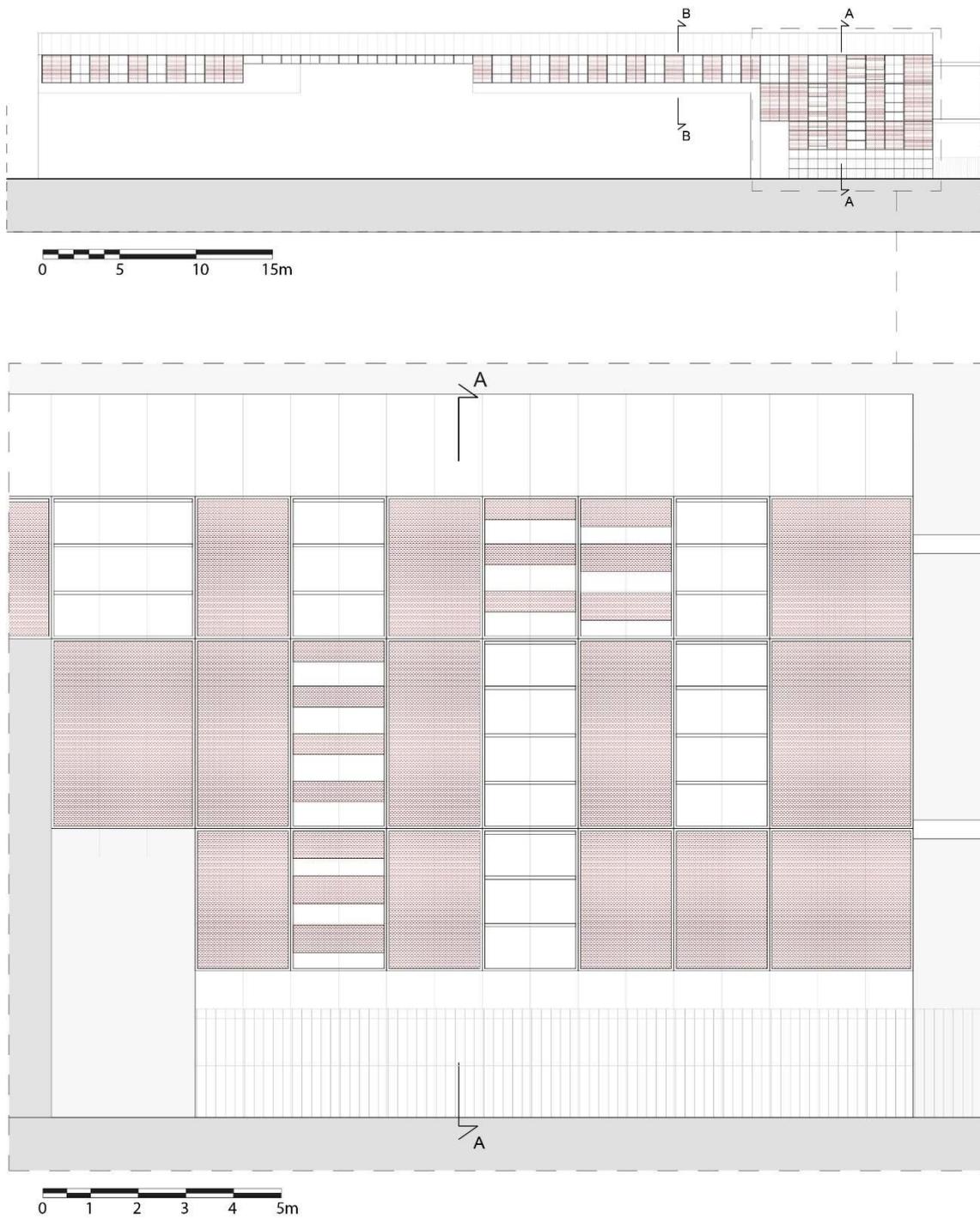


Figura 86 Prospetti della proposta di modulo adattivo nella facciata sud della “Manica Nuova” della sede “Castello del Valentino” del Politecnico di Torino. a) scala di dettaglio prospetto 1:500. b) scala di dettaglio prospetto 1:100. Fonte: elaborazione propria, 2024

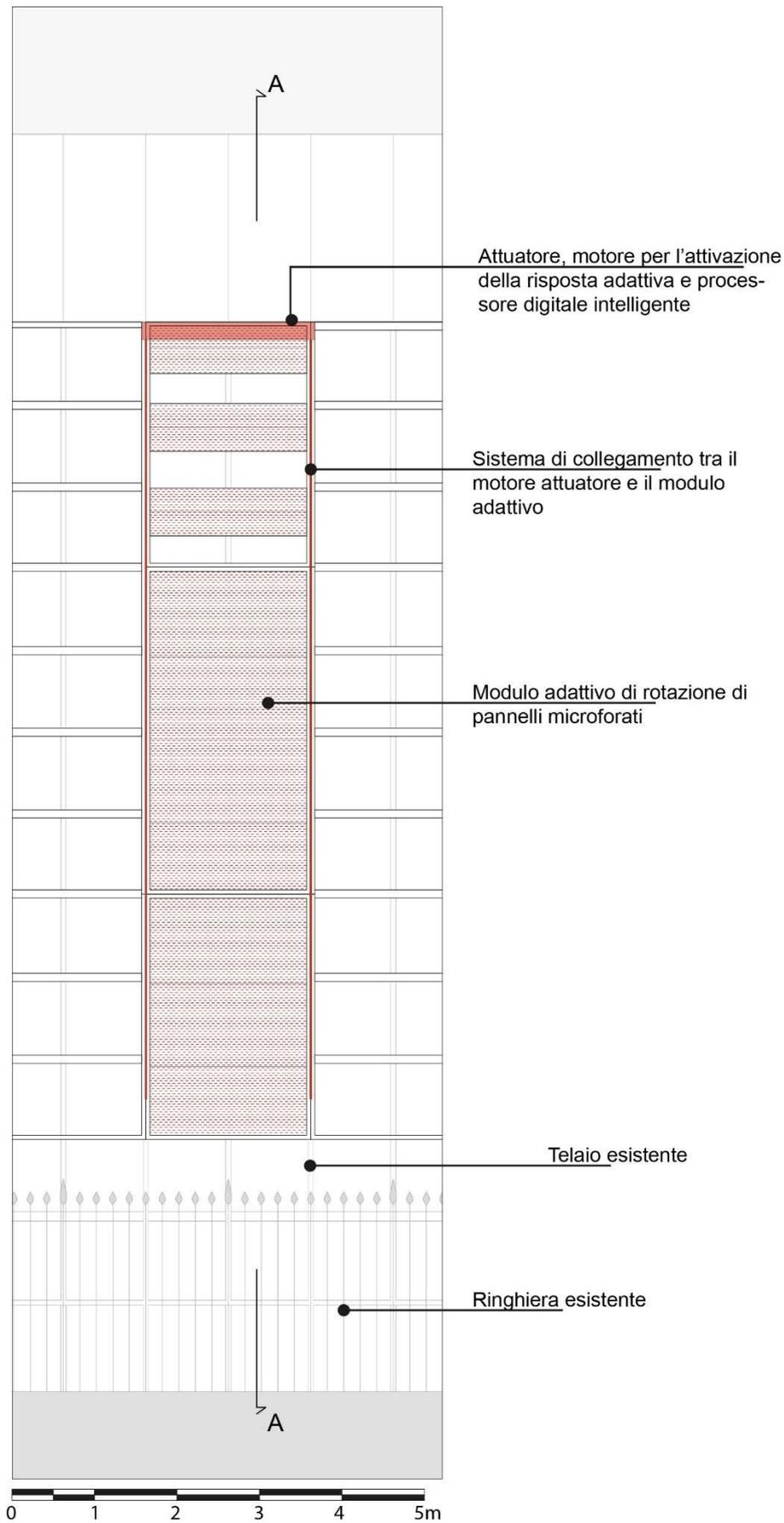


Figura 87 Prospetto della proposta di modulo adattivo sulla facciata sud della "Manica Nuova", scala di dettaglio 1:50. Fonte: elaborazione propria, 2024

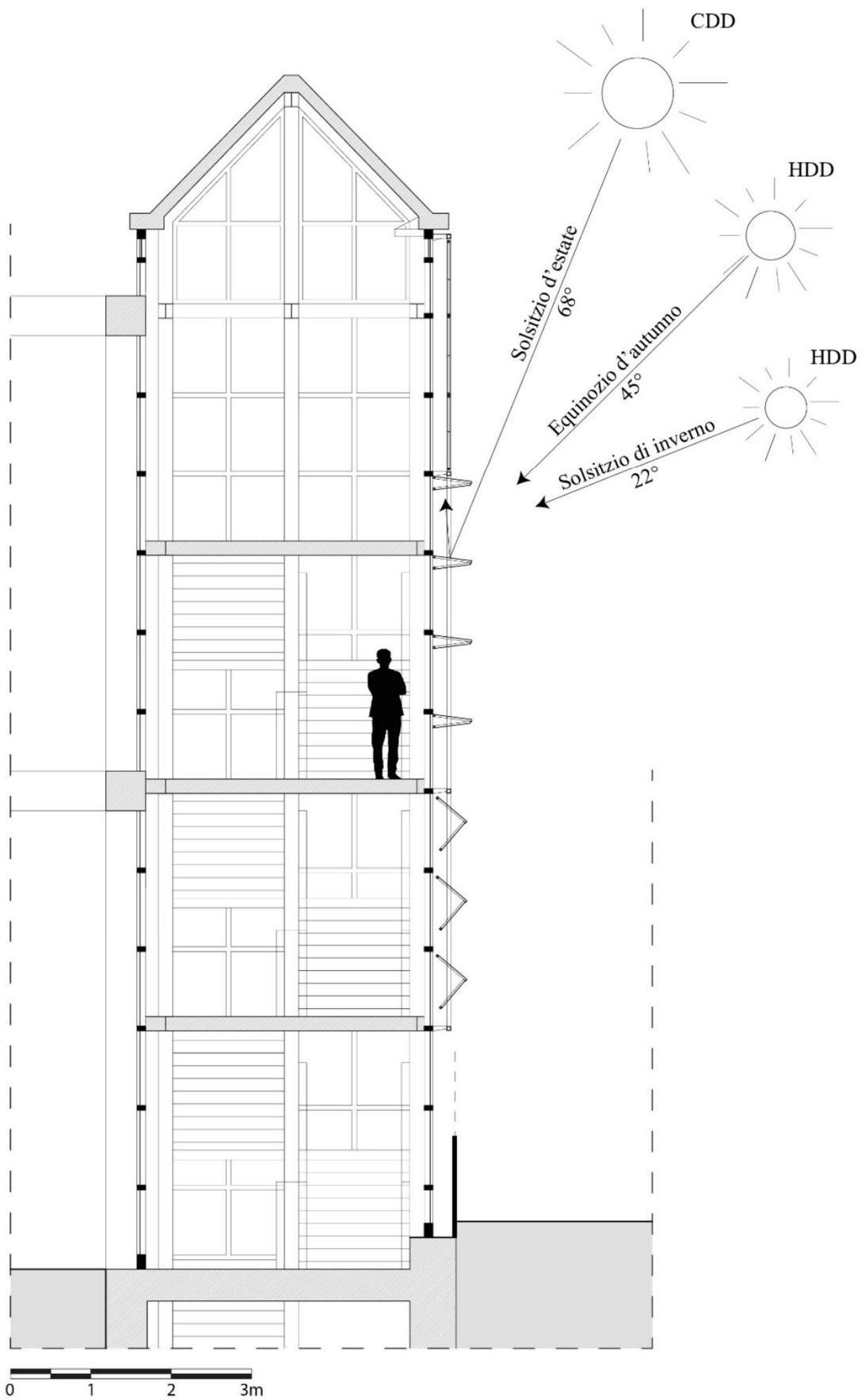


Figura 88 Sezione della proposta di modulo adattivo sulla facciata sud della "Manica Nuova", scala di dettaglio 1:50. Fonte: Elaborazione propria, 2024

Definizioni dei fattori caratteristici dell'involucro adattivo

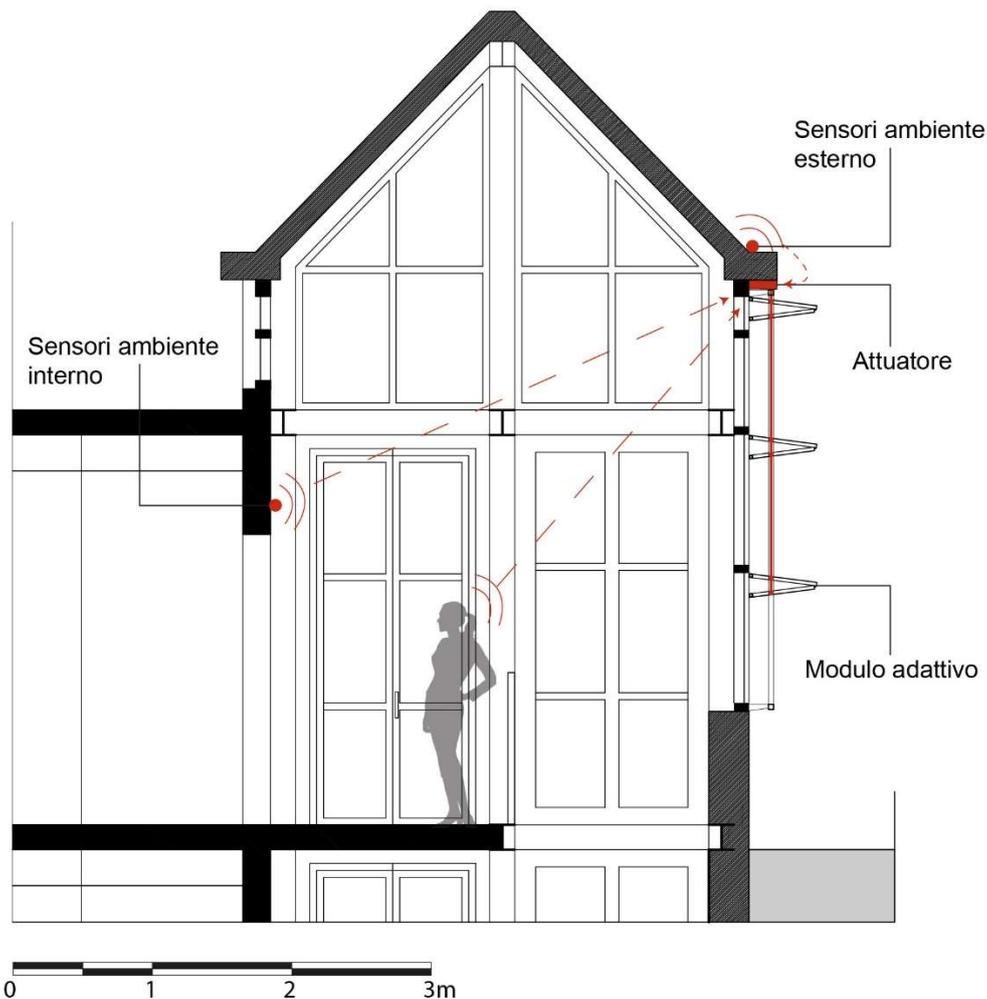
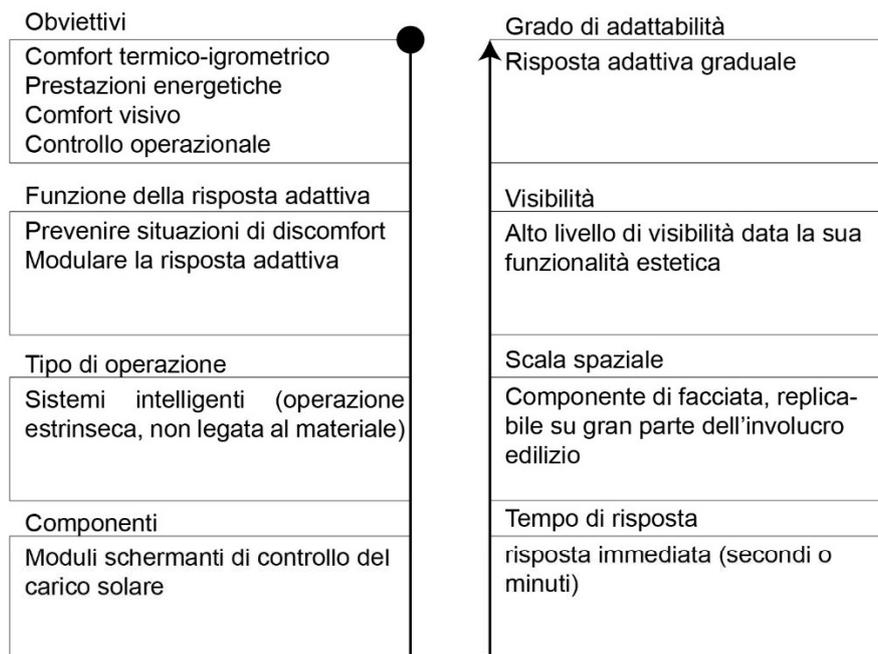


Figura 89 a) Schematizzazione e definizione dei fattori caratterizzanti dell'involucro adattivo. b) Sezione B della proposta per la "Manica Nuova", scala di dettaglio 1:50. Fonte: elaborazione propria, 2024

4.8 Conclusioni e discussione tesi

Sulla base delle ricerche effettuate e dei risultati ottenuti, sia a livello tecnologico che energetico, è possibile sviluppare un'idea chiara delle potenzialità e della fattibilità dei sistemi adattivi. Questi sistemi si distinguono per i loro punti di forza e criticità, oltre a offrire diverse considerazioni utili durante lo sviluppo di soluzioni architettoniche adattive.

L'involucro adattivo mostra un notevole potenziale nell'ottimizzazione dei flussi energetici. In contesti dove la differenza ambientale tra spazi interni ed esterni è significativa e dove le variazioni climatiche, nel breve e lungo termine, sono frequenti e imprevedibili, tali sistemi dimostrano una capacità di risposta efficace grazie all'interpretazione dei dati ottenuti, proponendosi come soluzioni resilienti ed efficienti.

Da un punto di vista tecnologico, gli involucri adattivi non presentano solitamente grossi problemi, dato che la multidisciplinarietà della componente adattiva solitamente non ha un impatto sulle soluzioni tecnologiche adottate. Infatti, sulla base dei casi di studio e della proposta di progetto del modulo adattivo, la difficoltà maggiore nell'assumere soluzioni adattive è creare un sistema di previsione del modulo basato su sistemi BPS.

Parallelamente, gli involucri adattivi contribuiscono non solo all'efficienza energetica del sistema edilizio, ma anche al comfort interno degli ambienti dell'edificio, riducendo il carico sui sistemi di climatizzazione. La loro capacità di adattarsi dinamicamente consente di mantenere condizioni di benessere costanti, diminuendo così la dipendenza della climatizzazione degli spazi agli eventuali impianti di controllo ambientale.

Considerando che gran parte del patrimonio edilizio europeo è costituito da edifici esistenti, e che si stima che entro il 2050 il numero di edifici a livello globale sarà raddoppiato, le nuove tendenze architettoniche come l'involucro adattivo si dimostrano applicabili sia ai progetti di nuova costruzione che alle riqualificazioni.

Infatti, la proposta per la "Manica Nuova" del Castello del Valentino, rappresenta un progetto che parte da un edificio esistente, propone e dimostra la versatilità di sistemi adattivi sul patrimonio edilizio esistente, integrando le componenti compositive, estetiche e storiche del contesto in cui è inserito, mantenendo minimo intervento sulla facciata esistente.

Per questo motivo, l'involucro adattivo rappresenta non solo una soluzione capace di raggiungere benessere all'interno degli ambienti e di migliorare l'efficienza energetica del sistema edilizio, ma soluzioni di basso impatto ambientale, la quale costruzione non contribuisce in modo significativo alle numerose emissioni del settore edile.

Tuttavia, nonostante esista un gran numero di progetti di involucro adattivo, alcuni già realizzati ed altri in fase di progetto, la reale efficienza dei sistemi adattivi è limitata all'interpretazione delle previsioni delle simulazioni di prestazione energetica (BPS), pertanto, per ottenere risultati concreti sulle reali prestazioni dei sistemi adattivi, è necessario studiare il comportamento dell'edificio nella sua fase operativa. Ma, sulla base di quanto studiato durante la fase di ricerca, ci sono poche informazioni riguardanti la fase operativa dei progetti di involucro adattivo realizzati.

Un altro limite che rimane presente nella progettazione degli involucri adattivi è l'elevato utilizzo di software e metodologie legate ai suddetti sistemi di modellazione BPS. Sebbene la digitalizzazione del processo di progettazione consenta una migliore integrazione e ottimizzazione di molte delle discipline coinvolte nella fase di progettazione di un edificio, i limiti che riguardano l'involucro adattivo sono strettamente legati ai limiti dei sistemi utilizzati in BPS.

Di questo modo, il potenziale dell'involucro adattivo rappresenta una soluzione fattibile al problema ambientale; permette di raggiungere condizioni dell'ambiente interno adatte al comfort ambientale degli utenti, riesce a migliorare le prestazioni energetiche dei sistemi edilizi e consente soluzioni a basso impatto ambientale, riducendo le emissioni di CO2 durante la fase di costruzione e durante la fase di uso dell'edificio.

4.8.1 Futuro dell'involucro adattivo

L'involucro adattivo non è un tema di recente novità. L'integrazione del movimento in architettura è stata discussa per diversi decenni, l'uso e il potenziale del movimento e il fattore tempo in architettura hanno fornito indicazioni sul futuro dell'involucro adattivo.

Da un punto di vista tecnologico, c'è molto potenziale da sviluppare nei materiali adattivi. Fino ad ora, i materiali hanno presentato limitazioni nell'operabilità da parte degli utenti e nella loro durata e manutenzione. Dall'altra parte, si sono viste interessanti proposte sperimentali nell'uso di alghe, biometalli o materiali igroscopici che potrebbero eventualmente essere sviluppati nel campo dell'architettura.

Sebbene i sistemi adattivi siano limitati dalla digitalizzazione dei processi di progettazione, lo sviluppo di strumenti volti alla simulazione delle prestazioni degli edifici può migliorare ulteriormente l'integrazione dei sistemi adattivi alle nuove metodologie di progettazione.

Infine, lo sviluppo dell'involucro adattivo genera molte aspettative sul futuro della progettazione sostenibile. L'integrazione di un involucro edilizio che si adatta nel tempo e riesce a variare la propria configurazione morfologica con l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica, ridurre l'impatto ambientale della realizzazione di nuovi progetti e mantenere condizioni di benessere negli ambienti, può significare un grande passo in avanti per raggiungere gli obiettivi di sviluppo sostenibile per i prossimi decenni, sia a livello globale come Europeo. Dimostrando grandi potenzialità che possono essere sfruttate sia in edifici di nuova costruzione che in progetti di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente.

Bibliografia

4.9 SITIOGRAFIA

- Aiken V. (2023). *Control of solar radiation through shading*. Tratto da Terri Boake: <https://tboake.com/carbon-aia/strategies1b.html>, consultato il 25/11/2023.
- Archdaily. (2024). *HygroSkin-Meteorosensitive Pavilion / Achim Menges Architect + Oliver David Krieg + Steffen Reichert*. Tratto da Archdaily, Prjects, Pavillion, France: <https://www.archdaily.com/424911/hygroskin-meteorosensitive-pavilion-achim-menges-architect-in-collaboration-with-oliver-david-krieg-and-steffen-reichert>, consultato il 01/11/2024.
- Archello. (2024). *RMIT Design Hub*. Tratto da Archello: <https://archello.com/it/project/rmit-design-hub>, consultato il 29/08/2024.
- Architecturestudio. (2024). *Studio architecturestudio*. Tratto da Institut du Monde Arabe: <https://architecturestudio.fr/projets/pastb1-institut-du-monde-arabe/>, consultato il 25/04/2024.
- Architectuul. (2024). *Hidden Architecture*. Tratto da Villa Girasole: <https://hiddenarchitecture.net/villa-girasole/>, consultato il 25/04/2024.
- Architizer. (2024). *Design ideas for the built world*. Tratto da Caddetails: <https://caddetailsblog.com/post/this-fascinating-material-can-breathe-on-its-own>, consultato il 20/10/2024.
- ARUP. (2024). *The Al Bahar Towers*. Tratto da International Federation of Consulting Engineers: https://fidic.org/sites/default/files/5pages_A1%20Bahar%20Towers_Arup.pdf, consultato il 29/08/2024.
- Betti G. T. F. (2023). *CBE Clima Tool*. Tratto da <https://clima.cbe.berkeley.edu/>, consultato il 17/11/2023.
- Betti G. T. F. (2023). *CBE Clima Tool*. Tratto da CBE Clima Tool: A free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design. Build. Simul.: <https://clima.cbe.berkeley.edu/>, consultato il 12/08/2023.
- Cappello A. (2016). *Per le facciate della Torre Intesa Sanpaolo sistema integrato con gli impianti*. Tratto da Impresse Edili: <https://www.impreseedilnews.it/per-le-facciate-della-torre-inesa-sanpaolo-realizzato-un-sistema-integrato-con-gli-impianti/>, consultato il 18/04/2024.
- Carter E. (2024). *Architecture AU*. Tratto da RMIT Design Hub to harness sunlight: <https://architectureau.com/articles/rmit-design-hub-to-capture-sunlight/#>, consultato il 29/08/2024.
- Comissione Europea. (2024). *Direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia*. Tratto da European Commission: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en?prefLang=it&etrans=it, consultato il 11/03/2024.
- Comune di Torino. (2024). *Il Castello del Valentino*. Tratto da Archivio storico della citta' di Torino: http://www.comune.torino.it/archiviostorico/mostre/barocco_2001/baroc2001teca1.html, consultato il 15/07/2024.

- Consiglio dell'Unione europea. (1993). *Direttiva 93/76/CEE del Consiglio, del 13 settembre 1993, intesa a limitare le emissioni di biossido di carbonio migliorando l'efficienza energetica (SAVE)*. Tratto da EUR-Lex Access to European Union law: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A31993L0076>, consultato il 13/09/2024.
- Dellachà F. (2013). *Dalla direttiva europea EPBD all'APE: un percorso con tanti salti*. Tratto da Ingenio Informazione tecnica e progettuale: <https://www.ingenio-web.it/files/dellacha-ape-sito.pdf>, consultato il 11/12/2023.
- EEA. (2023). *Greenhouse gas emissions from energy use in buildings in Europe*. Tratto da European Environment Agency: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-energy?activeAccordion=546a7c35-9188-4d23-94ee-005d97c26f2b>, consultato il 12/03/2024.
- EEA. (2024). *Energy efficiency index (ODEX) for final consumers in the EU*. Tratto da Energy Environment Agency: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/energy-efficiency-index-in-households-3#tab-chart_1, consultato il 12/03/2024.
- EnerData. (2024). *ODYSSEE-MURE*. Tratto da PROJECT OVERVIEW: <https://www.odyssee-mure.eu/project.html>, consultato il 02/08/2024.
- Comissione Europea. (2024). *Direttiva sull'efficienza energetica*. Tratto da Sito ufficiale dell'Unione Europea: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en?prefLang=it&etrans=it, consultato il 11/03/2024.
- Giovine F. (2013). *Nascita ed evoluzione dell'involucro*. Tratto da ABEC - Facade Engineering: <http://www.abec-facadeengineering.com/wp-content/uploads/2016/01/2013Nuova-Finestra-388.pdf>, consultato il 02/06/2024.
- Givoni B. (1969). *Man, climate and architecture*. Amsterdam: Elsevier.
- Hahn T. (2024). *What is electrochromic smart glass*. Tratto da smart glass world: <https://www.smartglassworld.net/what-is-electrochromic-glass>, consultato il 15/03/2024.
- imarab. (2024). *imarab*. Tratto da Istitut du monde arabe: <https://www.imarabe.org/fr/missions-fonctionnement/historique>, consultato il 12/03/2024.
- Innocenti P. (2024). *Ritmo cardiaco essenziale per il benessere*. Tratto da Assirem: <https://www.assirem.it/news/ritmo-circadiano-essenziale-per-benessere-e-salute/>, consultato il 23/04/2024.
- Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana. (1976). *LEGGE 30 marzo 1976, n. 373*. Tratto da Normattiva, il portale della legge vigente: <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:legge:1976-03-30;373>, consultato il 28/10/2023.
- Kozlowski, P. (1997). *Unité d'habitation*. Tratto da Fondation Le Corbusier: <https://www.fondationlecorbusier.fr/en/work-architecture/achievements-unite-dhabitation-marseille-france-1945-1952/>, consultato il 10/03/2024.
- LadyBug. (2024). *LadyBug Tools*. Tratto da What is LadyBug?: <https://www.ladybug.tools/ladybug.html>, consultato il 26/11/2024.
- Macedo A. (2007). *MEDIA-TIC*. Tratto da C9 RUIZ GELI: <https://www.ruiz-geli.com/>, consultato il 10/05/2024.

- Miller B. J. (2022). *What Will It Take for Smart Windows to Go Mainstream?* Tratto da smithsonian magazine: <https://www.smithsonianmag.com/innovation/what-will-it-take-for-smart-windows-to-go-mainstream-180980226/>, consultato il 09/06/2024.
- Ministero della Salute. (2024). *Salute.Gov.It*. Tratto da Microclima e benessere termico: <https://www.salute.gov.it/portale/nutrizione/dettaglioContenutiNutrizione.jsp?lingua=italiano&id=4387&area=nutrizione&menu=vuoto>, consultato il 06/08/2024.
- Miren Juaristi D. B. (2024). *Technical Article - From opaque traditional walls to Adaptive Façade Systems: state of play and outlook*. Tratto da BUILD UP - The European portal for energy efficiency and renewable energy in buildings: <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/technical-article-opaque-traditional-walls-adaptive-facade-systems>, consultato il 29/05/2024.
- Museum M. A. (2024). *Burke Brise Soleil*. Tratto da MILWAUKEE ART MUSEUM: <https://mam.org/visit/burke-brise-soleil/>, consultato il 12/03/2024.
- Nouvel J. (2024). *Ateliers Jean Nouvel*. Tratto da Institut du Monde Arabe (IMA): <https://www.jeannouvel.com/projets/institut-du-monde-arabe-ima/>, consultato il 25/04/2024.
- ODYSSEE. (2024). *HEATING CONSUMPTION PER M² AND PER DWELLING*. Tratto da ODYSSEE-MURE: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/households/heating-consumption-per-m2.html>, consultato il 12/03/2024.
- ONU. (2024). *Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all*. Tratto da United Nations, Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development: <https://sdgs.un.org/goals/goal7#overview>, consultato il 11/03/2024.
- Ott P. (2024). *Archi Tonic*. Tratto da Dynamic facade (Kiefer technic showroom): <https://www.architonic.com/en/project/ernst-giselbrecht-partner-dynamic-facade-kiefer-technic-showroom/5100449>, consultato il 29/08/2024.
- Paley M. (2024). *Encyclopedic entry. Yurt*. Tratto da National Geographic: <https://images.nationalgeographic.org/image/upload/v1638890999/EducationHub/photos/putting-up-walls.jpg>, consultato il 10/03/2024.
- Politecnico di Torino. (2024). *Castello del Valentino, Patrimonio dell'Umanità UNESCO*. Tratto da castello del valentino: https://castellodelvalentino.polito.it/?page_id=45, consultato il 15/09/2024.
- Rohde R. A. (2023). *Sunlight*. Tratto da Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>, consultato il 09/11/2023.
- Ruiz-Geli E. (2024). *ProjectsMedia-ICT building CZFB, 22@, Barcelona*. Tratto da Ruiz-Geli: <https://www.ruiz-geli.com/projects/built/media-tic>, consultato il 27/08/2024.
- SRL D. O. (2024). *HD 8901 IGROMETRO-TERMOMETRO A MICROPROCESSORE*. Tratto da scheda tecnica: www.deltaohm.com, consultato il 15/09/2024.
- Studio D. (2024). *Sliding House. A house for all seasons*. Tratto da drmmstudio: <https://drmmstudio.com/project/sliding-house/>, consultato il 12/03/2024.
- Suntutive. (2024). *Suntutive dynamic glass. Technical information*. Tratto da suntutive glass: https://suntutiveglass.com/wp-content/uploads/2019/11/Tech-broch.25112019_PL_New.pdf, consultato il 12/03/2024.

- Tedeschi W. (2023). *Il vetro e la sua trasmittanza termica*. Tratto da *tedeschiserramenti*: <https://www.tedeschiserramenti.it/blog/il-vetro-e-la-sua-trasmittanza-termica>, consultato il 21/11/2024.
- UNEP. (2024). *Sustainable buildings*. Tratto da United Nations Environment Programme: <https://www.unep.org/topics/cities/buildings-and-construction/sustainable-buildings>, consultato il 11/03/2024.
- UNESCO. (1997). *Residences of the Royal House of Savoy*. Tratto da UNESCO World Heritage Convention: <https://whc.unesco.org/uploads/nominations/823bis.pdf>, consultato il 06/11/2024.
- Valentini F. (2024). *Al Bahar Towers, le torri di Abu Dhabi con facciata solare intelligente*. Tratto da Infobuildenergia: <https://www.infobuildenergia.it/progetti/al-bahar-towers-le-torri-di-abu-dhabi-con-facciata-solare-intelligente/>, consultato il 12/03/2024.
- Wikipedia. (2024). *ETFE*. Tratto da Wikipedia, the free encyclopedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/ETFE>, consultato il 27/08/2024.
- Wikipedia. (2024). *Polytetrafluoroethylene*. Tratto da Wikipedia, the free encyclopedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluoroethylene>, consultato il 27/08/2024.
- Wikipedia. (2024). *Thermal comfort*. Tratto da Wikipedia, The Free Encyclopedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_comfort#Adaptive_comfort_model, consultato il 02/11/2024.
- Wikipedia. (2024). *Wikipedia, l'enciclopedia libera*. Tratto da Precipitazione (meteorologia): [https://it.wikipedia.org/wiki/Precipitazione_\(meteorologia\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Precipitazione_(meteorologia)), consultato il 05/11/2024.

4.10 ARTICOLI

- Attia S. F. B. (2015). Adaptive façades system assessment: An initial review. *10th Conference on Advanced Building Skins*, Pagine 275-283.
- Attia S., Bilir S., Safy T., Struck C., Loonen R., & Goia F. (2018). Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive facade systems. *Energy and Buildings. Volume 179*, Pagine 165-182.
- Caldera C., Manni V., & Valzano L. S. (2021). Il progetto biomimetico. Eteronomia ed autoipoiesi nell'integrazione tra tecnologia e biologia. *TECHNE 21*, 112-123.
- Casini M. (2015). *Smart windows for energy efficiency of buildings*. Chicago: International Journal of Civil and Structural Engineering– IJCSE.
- Chiesa G. (2020). La dimensione temporale dai cambiamenti climatici nella progettazione bioclimatica. *TECHNE*, Vol 20, pagine 204-212.
- Clarke J. A. (2015). Integrated Building Performance Simulation: Progress, Prospects and Requirments. *Building and Environment*, 1-13.
- Ferguson S., Siddiqi A., Lewis K., & de Weck O. (2007). *Flexible and Reconfigurable Systems: Nomenclature and Review*. Las Vegas: Proceedings of IDETC/CIE 2007ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference.

- Loonen R. C. (2013). Climate adaptive building shells : state-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 483-493.
- Loonen R. C.-M. (2015). Design for façade adaptability: Towards a unified and systematic characterization. *10th Conference on Advanced Building Skins*, 284-294.
- Murano G. (2016). The new Italian climatic data and their effect in the calculation of the energy performance of buildings. *Energy Procedia*, Vol. 101 pages 153-160.
- Nebuloni A. (2020). Il fattore tempo nel progetto delle architetture adattive. *TECHNE 20*, 98-105.
- Loonen R., Favoino F., Hensen J.L.M. & Overend M. (2017). Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. *Journal of Building Performance Simulation*, 205-223.

4.11 TESTI

- Addington D. M., & Schodek D. L. (2005). *Smart materials and new technologies. For the architecture and design professions*. Oxford : Elsevier Linacre House.
- Butera F. (2014). *Dalla caverna alla casa ecologica. Storia del comfort e dell'energia*. Milano: Edizioni Ambiente.
- Favoino F. R. C. (2018). *Building performance simulation and characterisation of adaptive facades*. Delft: TU Delft Open.
- Favoino F. (2022). *Lecture 02 CLIMATE DATA*. Torino: Politecnico di Torino.
- Gaspari J. (2020). *shells, Climate responsive building envelopes. From facade shading systems to adaptive*. Milano, Italia: Franco Angeli.
- Gevorgian A., Pezzutto S., Zambotti S., Croce S., Filippi O. U., Lollini R., Kranzl L., Müller A. (2021). *European Building Stock Analysis - A country by country descriptive and comparative analysis of the energy performance of buildings*. Bolzano, Italy: Eurac Research.
- Aelenei L., Aelenei D., Romano R., Mazzucchelli E. S., Brzezicki M., Rico-Martinez J. M. (2018). *Case Studies – Adaptive Facade Network*. Delft: TU Delft Open.
- Lynes J. A. (1968). *Principles of Natural Lighting*. Amsterdam - London - New York: ELSEVIER PUBLISHING COMPANY LTD.
- Maturana H. R., & Varela, F. J. (1985). *Auto poiesi e cognizione. La realizzazione del vivente*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- Meehl G. T.(2007). *Chapter 10: Global Climate Projections*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Negroponte N. (1976). *Soft Architecture Machines*. Massachusetts: MIT Press Cambridge.
- Normazione E. I. (1987). *Classificazione del sistema tecnologico - UNI 8290:1987*. Milano: Ente Italiano di Normazione.
- Normazione E. N. (2018). *UNI EN ISO 10077-1:2018*. Milano: Ente Nazionale di Normazione.
- Romano R. (2011). *Smart Skin Envelope Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico*. Firenze: Firenze University Press.

- Rudofsky B. (1964). *Architecture without architects: a short introduction to non-pedigreed architecture*. New York: Doubleday.
- Saeed H. (2022). *On the climatic synergies at the local, regional, and global scales. The impact on the built environment*. Sidney: University of New South Wales.
- Carter T.R., Loonen R.. (2001). *Climate Scenario Development*. Ginebra: IPCC.
- UNI. (10349:2016). *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici, dati climatici*. Milano: Ente Nazionale di Normazione.
- Y. Casone, V. C. (2010). *Calcolo dell'ombreggiamento sull'involucro dell'edificio*. Torino: ENEA, Politecnico di Torino.