

# POLITECNICO DI TORINO

DAD - Dipartimento di Architettura e Design

a.a. 2018/2019

Corso di Laurea Magistrale in  
Architettura per il Progetto Sostenibile



*Progettazione di una facility sperimentale per la valutazione della qualità  
ambientale interna in ambienti ad uso ufficio*

## Relatori

Prof.ssa Valentina Serra

Prof. Fabio Favoino

## Corelatore

Prof. Francesco Causone

## Candidato

Riccardo Baccetti



## ABSTRACT

L'attività di ricerca svolta si pone l'obiettivo di valutare l'utilizzo dei principali parametri di comfort indoor come strumenti progettuali alternativi rispetto alle direttive canoniche di sostenibilità ambientale ed energetica. Uno studio in linea con il crescente interesse a livello mondiale per gli aspetti di human-centered design (HCD) e per lo sviluppo di facility sperimentali atte alla misurazione on-site di parametri ambientali e fisiologici ed allo sviluppo di tecnologie e sistemi costruttivi integrati. Dopo aver analizzato e messo in evidenza le condizioni microclimatiche e soggettive ad oggi considerate come ottimali per il conseguimento del comfort all'interno di ambienti confinati, il workflow metodologico utilizzato per lo sviluppo del progetto di tesi ha dapprima esposto lo stato dell'arte dei principali laboratori di ricerca internazionali per poi passare allo sviluppo progettuale della facility del Politecnico di Torino presso l'Environmental Park. Definite le scelte tecnologiche e costruttive che andranno a configurare il modulo, la struttura è stata testata tramite una serie di simulazioni ed analisi energetiche e di comfort che ne hanno messo in evidenza l'elevata flessibilità sperimentale sia per aspetti di ingegnerizzazione e test di componenti specifici sia per aspetti di analisi microclimatica.

**Indice**

<b>1. Introduzione</b> .....	<b>6</b>
<b>2. La qualità ambientale interna</b> .....	<b>10</b>
2.1 Comfort Termico	
2.1.1 Parametri ambientali	
2.1.2 Disuniformità termiche spaziali	
2.1.3 Risposta fisiologica dell'uomo all'ambiente	
2.1.4 Metodi di valutazione dell'ambiente interno	
2.1.5 Inquadramento normativo	
2.2 Controllo della qualità dell'aria interna	
2.2.1 Parametri di controllo	
2.2.2 Sostanze e sorgenti inquinanti	
2.2.3 Inquadramento normativo	
2.3 Comfort illuminotecnico	
2.3.1 Grandezze fotometriche	
2.3.2 Parametri di controllo	
2.3.3 Inquadramento normativo	
2.4 Comfort acustico	
2.4.1 Le grandezze caratteristiche	
2.4.2 Il clima acustico all'interno degli edifici	
2.4.3 Inquadramento normativo	
<b>3. Experimental Facility. Stato dell'arte.</b> .....	<b>34</b>
3.1 Facility analizzate	
3.2 Caratteristiche generali	
3.2.1 Ubicazione	
3.2.2 Struttura ed involucro esterno	
3.2.3 Dotazione impiantistica	
3.2.4 Sensori	
3.3 Misurazioni e test effettuati	
<b>4. Progettazione HIEQLab</b> .....	<b>40</b>
4.1 Requisiti generali	
4.1.1 Requisiti edilizi	
4.1.2 Sistemi impiantistici	
4.1.3 Metodi di rilevamento - Sensoristica	
4.1.4 Requisiti a confronto	
4.2 Progettazione del laboratorio	
4.2.1 Ubicazione	
4.2.2 Progetto architettonico	
4.2.3 layout interno	
4.2.4 Soluzioni impiantistiche	
4.2.5 Work Breakdown Structure	

4.3 Progetto esecutivo	
4.3.1 <i>Schema strutturale</i>	
4.3.2 <i>Involucro opaco</i>	
4.3.3 <i>Involucro trasparente</i>	
4.3.4 <i>Nodi tecnologici</i>	
<b>5. Analisi preliminari</b> .....	<b>70</b>
5.1 Modellazione	
5.1.1 <i>Software utilizzati</i>	
5.1.2 <i>Approssimazioni e semplificazioni del modello</i>	
5.2 Analisi Preliminari	
5.2.1 <i>Analisi climatiche</i>	
5.2.2 <i>Soleggiamento</i>	
5.2.3 <i>Ombreggiamento</i>	
5.3 Analisi su superfici di misura	
5.3.1 <i>Parete sud</i>	
5.3.2 <i>Parete est</i>	
5.3.3 <i>Copertura orizzontale priva di tettoia curva</i>	
5.3.4 <i>Copertura orizzontale con tettoia curva</i>	
<b>6. Simulazioni energetiche e comfort</b> .....	<b>82</b>
6.1 Modello energetico	
6.2 Indici di valutazione	
6.2.1 <i>Energia Primaria</i>	
6.2.2 <i>Comfort illuminotecnico</i>	
6.3 Configurazioni	
6.3.1 <i>Laboratorio a sala di misura unica</i>	
6.3.2 <i>Laboratorio con doppia sala di misura</i>	
6.4 Schedules di utilizzo	
6.4.1 <i>Schedules di occupazione</i>	
6.4.2 <i>Schedules per apparecchiature elettroniche</i>	
6.4.3 <i>Schedules di ventilazione ed infiltrazione</i>	
6.4.4 <i>Schedules di climatizzazione degli ambienti</i>	
6.4.5 <i>Schedules di illuminamento</i>	
6.5 Analisi dei risultati	
<b>7. Considerazioni finali</b> .....	<b>126</b>
<b>8. Ringraziamenti</b> .....	<b>128</b>
<b>9. Riferimenti</b> .....	<b>130</b>
9.1 <i>Bibliografia</i>	
9.2 <i>Sitografia</i>	
9.3 <i>Appendici</i>	

# 1. INTRODUZIONE

# 1. Dalla progettazione sostenibile alla progettazione a misura d'uomo

La fine del secolo scorso ed il primo decennio di quello attuale sono stati periodi caratterizzati da una forte attenzione della comunità scientifica verso tematiche di sostenibilità ambientale e riduzione dei consumi energetici. Una serie di ricerche volte a fornire delle basi normative condivise a livello mondiale per dar vita ad una risposta concreta verso quella che si va a definire come la sfida più importante dell'umanità, ovvero il cambiamento climatico (**Yvo De Boer, 2008**). Partendo dalle indicazioni della United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) del 1994 e dall'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto del 2005, si sono andati a creare una serie di strumenti normativi che hanno profondamente modificato i meccanismi istituzionali e le politiche climatiche nazionali ed internazionali. Queste disposizioni, oltre a fornire i limiti di concentrazione di gas ad effetto serra per i paesi aderenti, hanno intaccato l'attività edilizia ed i metodi di progettazione, facendo porre particolare attenzione da parte dei professionisti ai meccanismi per la riduzione dei consumi energetici.

Tuttavia, con lo sviluppo di metodi per la valutazione volontaria del livello di sostenibilità dell'edificio (tipo LEED Certification, SBTTool, BREEAM, etc.), anche a livello italiano si è iniziato a lavorare alla stesura di un nuovo documento in grado di regolare e quantificare la sostenibilità energetica degli edifici, portando all'introduzione del Protocollo ITACA (UNI PdR del 2015). Ovvero, un sistema di rating sviluppato da un gruppo interregionale italiano che, tramite la valutazione di determinati indicatori di performance, valuta la qualità ambientale dei fabbricati (**Asdrubali et al., 2019**). Ciò che risulta particolarmente interessante ed innovativo è il fatto che negli ultimi anni, oltre ad analizzare il consumo di risorse ed i carichi ambientali della struttura, si sia iniziato a prendere in considerazione il concetto di comfort e di qualità indoor per la valutazione dell'edificio. L'introduzione di questi parametri, ha permesso di superare definitivamente il concetto generalista di sostenibilità ambientale per dar vita ad un movimento che pone l'utente al centro della progettazione, l'Human-Centred Design (HCD).

Proprio sulla disciplina dell'HCD è stato fondato l'International WELL Building Institute (IWBI) che, dagli inizi del 2014, ha messo le basi per la definizione di quello che può essere considerato il "nuovo paradigma per il supporto ed il miglioramento della salute delle persone attraverso edifici più performanti" (**WELL, 2018**). Uno dei grandi vantaggi di questo standard è che non abbandona il concetto di ricerca volta alla progettazione di edifici green ma ad esso aggiunge, tramite un lavoro di stretta simbiosi con i principali strumenti di valutazione sopracitati, l'attenzione e la cura verso tematiche legate alla persona ed ai suoi bisogni.

La base di partenza è un dato che accomuna la stragrande maggioranza degli individui, ovvero il fatto che le persone spendano circa il 90% della giornata all'interno di edifici, con la conseguenza che quest'ultimi siano i principali responsabili nella

determinazione dello stato di salute, del benessere psicofisico e della produttività degli utenti (WELL, 2018). Il risultato, una serie di strumenti con cui si riescono a valutare dieci aspetti direttamente connessi o correlabili all'Indoor Environmental Quality e al Personal Wellbeing.



Buon livello di qualità dell'aria per tutta la durata del ciclo di vita dell'edificio



Gestione dell'acqua ed accessibilità ad acqua potabile di buona qualità



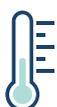
Incoraggiamento verso migliori abitudini alimentari



Benefici da luce naturale e luce artificiale di qualità



Promozione di uno stile di vita attivo



Ottimizzazione dei sistemi di climatizzazione verso le preferenze degli utenti



Ricerca verso parametri acustici funzionali all'attività da svolgere



Ridurre l'esposizione umana a materiali dannosi per la salute



Ottenimento dello stato psicofisico ottimale attraverso strategie integrate



Creazione di comunità inclusive attraverso l'equità sociale e la partecipazione collettiva

Una serie di aspetti che fanno della progettazione HCD una progettazione inclusiva che partendo dal basso, ovvero dagli utenti, si sviluppa attraverso un processo collaborativo in grado di generare non una ma diverse soluzioni (Sugihto, 2016). Tuttavia, se da un punto di vista teorico questa nuova frontiera del design sembra funzionare alla perfezione, in pratica focalizzare la progettazione su una componente soggettiva e fortemente variabile, come lo è il comfort, introduce una complessità che necessita di soluzioni fuori dall'ordinario (Bruno, 2018).

Oggi, solo grazie alla tecnologia abbinata ad un alto livello di flessibilità si riesce a dar vita ad ambienti altamente personalizzabili, in grado di essere modellati dagli stessi utenti a seconda delle loro mutabili necessità durante la giornata. Inoltre, come spiegato da Bruno (2018), con l'inserimento di sensori e tecnologie di visualizzazione real-time dei dati raccolti, gli occupanti riescono ad interagire in maniera sempre più efficace e veloce andando a creare una post-occupancy adaptation di fondamentale importanza in ottica di Machine Learning Technologies e IoT Connectivity. Con molta probabilità, in un futuro non troppo lontano saranno gli stessi dati raccolti sugli edifici a formare la base di partenza per la progettazione andando a conferire un'interpretazione completamente nuova al pensiero che Winston Churchill espose nella prima metà del secolo scorso, "We shape our buildings, and afterwards our buildings shape us".



## 2. LA QUALITA' AMBIENTALE INTERNA

## 2. Il comfort negli ambienti interni

Negli ultimi anni la sensibilizzazione collettiva si è spostata considerevolmente verso tematiche riguardanti le condizioni degli ambienti interni e la loro influenza sulla salute, sulla produttività e sul benessere psicofisico degli utenti (**Heinzerling et al., 2013**). Tra i vari aspetti, questi studi hanno messo in evidenza come un edificio con buoni parametri di IEQ sia in grado di ottenere risultati significativamente migliori riguardo ulteriori due aspetti: il contenimento dei costi di manutenzione ed il risparmio energetico.

Al concetto di IEQ si è soliti associare una serie di scelte progettuali che riguardano principalmente le soluzioni impiantistiche adottate, tuttavia risultati di maggior rilievo possono essere ottenuti solo grazie ad una progettazione integrata che tiene conto anche della configurazione e dell'aspetto degli spazi. Sistemi tecnologici, modalità di funzionamento, programmi di manutenzione, materiali da costruzione e finiture scelte sono proprio gli attori principali che giocano il ruolo di protagonisti per il conseguimento del comfort all'interno degli ambienti.

Considerati questi aspetti, per una valutazione complessiva dell'indoor environment, sono quattro i fattori ambientali che influiscono sulla sensazione di comfort degli utenti e si identificano nel microclima interno, nella concentrazione di inquinanti nell'aria, nella qualità dell'illuminazione e nel clima acustico.

Parallelamente ai fattori ambientali, devono essere aggiunti ulteriori studi relativi all'individuo ed ai suoi bisogni psicofisici. In questo modo si abbandona l'approccio deterministico a favore del concetto di "uomo-ambiente" (**Perretti, 2013**), dove gli utilizzatori degli spazi sono trasformati in soggetti attivi nella gestione del microclima interno. Una trasformazione del concetto di occupante che ha reso necessario l'introduzione di ulteriori fattori che vanno a toccare la sfera comportamentale, culturale, sociale e contestuale dell'individuo (**Brager a De Dear, 1998.a**), giungendo a conclusioni che riducono la rigidità delle condizioni ambientali interne a favore di azioni correttive temporanee e puntuali capaci di migliorare la sensazione di comfort degli utenti.

Nei seguenti paragrafi verranno analizzati i parametri ambientali, come temperatura, umidità relativa, qualità dell'aria, ventilazione, clima acustico ed illuminazione, ma anche i parametri fisiologici, quali attività metabolica, stato di salute e vestiario, in modo da fornire una panoramica completa sulla sensazione di comfort degli occupanti, basata sia su aspetti direttamente misurabili sia su fattori definiti tramite stime o osservazioni pregresse.

## 2.1 Il comfort termico

Il comfort termico è stato definito da Hensen (1991) come uno stato per cui l'utente non è guidato da impulsi correttivi verso l'ambiente che lo circonda, una conclusione in linea a quanto espresso dallo Standard ASHRAE 55 (2004), dove lo stesso risultato viene esplicitato attraverso una condizione mentale secondo la quale un utente esprime soddisfazione riguardo l'ambiente termico intorno a lui. Da recenti sperimentazioni su vari campioni, sono proprio le valutazioni che gli occupanti forniscono sul microclima interno, ovvero le sensazioni di caldo o freddo e di umido o secco, che risultano essere di fondamentale importanza e particolarmente stringenti considerato che sono quelle a cui le persone prestano maggiore attenzione (Huang et al., 2011).

Tuttavia, per effettuare delle osservazioni più complete sul microclima interno negli ambienti confinati, non è possibile basarsi solo su parametri ambientali ma è necessario rifarsi anche alle sensazioni dell'utente ed agli scambi termici che il corpo umano ha con l'ambiente in cui si trova. La necessità di una duplice analisi è ben evidenziata dall'elevata variabilità delle sensazioni provate da persone differenti all'interno di un ambiente con caratteristiche climatiche regolari in ogni sua porzione (Djongyang et al., 2010).

### 2.1.1 Parametri ambientali generali

Come già evidenziato in passato da Hindmarsh e Macpherson (1962) e ribadito da De Dear e Brager (1998.b) e Perretti (2013), i parametri ambientali che vanno a determinare la sensazione provata influenzando il comfort degli occupanti sono quattro, ovvero:

- Temperatura dell'aria;
- Temperatura media radiante delle superfici interne;
- Umidità relativa;
- Velocità dell'aria.

La temperatura dell'aria interna di un ambiente viene fornita da sensori opportunamente schermati, per essere protetti da eventuali scambi radiativi con superfici a temperatura differente, posti nella stanza da osservare. Questo fattore, comunemente chiamato temperatura di set-point, oltre ad essere continuamente rilevato all'interno degli ambienti, tramite l'utilizzo di dispositivi locali (termostati), risulta essere fortemente correlato alle scelte di riscaldamento o climatizzazione effettuate dagli utenti.

La temperatura media radiante è definita come la temperatura di un ambiente virtuale caratterizzato dallo stesso scambio energetico di quello reale, termicamente disomogeneo per la presenza di varie sorgenti di diversa temperatura (Tundo, 2016). Seguendo quanto definito dalle normative vigenti (UNI EN 7726-2002) è importante sottolineare come questo parametro risulti avere tolleranze minori rispetto al parametro precedente, un aspetto che rende questa temperatura molto più critica rispetto a quella

dell'aria. Per rilevare tale grandezza all'interno di ambienti confinati possono essere utilizzate tre procedure, ovvero:

- Misure con il globotermometro nero;
- Metodo della temperatura piana radiante o del radiometro a due sfere.
- Metodo dei fattori di vista.

La prima procedura prevede l'utilizzo del globotermometro che funziona sulla base dello scambio termico per irraggiamento con le sorgenti presenti in ambiente ed inoltre rileva gli scambi convettivi utilizzando velocità dell'aria e temperatura dell'aria. Il sensore è costituito da un rilevatore a forma ellissoidale di circa 15cm di diametro di colore nero (emissività  $\epsilon:0,95$ ) e la temperatura media radiante risulta così calcolata:

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6} \cdot (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (2.1)$$

$t_g$  : temperatura del globotermometro;

$t_a$  : temperatura dell'aria ambiente;

$v_a$  : velocità dell'aria ambiente.

Mentre, per quanto riguarda la procedura della temperatura piana radiante viene utilizzato il radiometro netto, ovvero un sensore costituito da due dischi di rilevazione posti affiancati di cui uno riflettente (per misurare gli scambi convettivi) e l'altro assorbente (per misurare gli scambi per convezione ed irraggiamento). Tale sensore calcola la temperatura piana radiante riferibile al semi-spazio di fronte al disco assorbente facendo la differenza fra le potenze necessarie a mantenere i due dischi ad una data temperatura.

$$T_{pr} = \sqrt[4]{T_s^4 + \frac{(P_{rifl} - P_{ass})}{\sigma \cdot (\epsilon_{ass} - \epsilon_{rifl})}} \quad (2.2)$$

Inoltre, la temperatura media radiante può essere calcolata anche attraverso una procedura che prevede il calcolo della temperatura nelle sei direzioni dello spazio, ovvero sopra-sotto-destra-sinistra-avanti-dietro, ed i relativi fattori di area proiettata per una persona (sia essa seduta, in piedi o sdraiata).

$$T_{mr} = \frac{\sum_{i=1-6} T_{p-i} \cdot A_{p-i}}{\sum_{i=1-6} A_{p-i}} \quad (2.3)$$

Infine, si può calcolare la temperatura media radiante tramite il metodo dei fattori di vista attraverso la seguente formula:

$$\vartheta_{mr} = \left[ \sum_{j=1}^n \left( \theta_{sj}^4 \cdot \frac{F_j}{n} \right) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (2.4)$$

$n$  : numero di superfici;

$\theta_{sj}$  : temperatura assoluta della j-esima superficie [K];

$F_j$  : fattore di vista della j-esima superficie;

$A_j$  : area della j-esima superficie.

Tuttavia, dato che il calcolo di  $F_j$  risulta complesso, in via semplificata si può sostituire la formula (2.4) con la formula (2.3) così da ottenere la media ponderata sulla aree delle temperature superficiali delle superfici che scambiano direttamente con l'ambiente. A tale procedura, bisogna comunque aggiungere gli scambi di calore per convezione (con la temperatura dell'aria  $\theta_a$ ) ed irraggiamento (con la temperatura media radiante  $\theta_{mr}$ ) del corpo umano. Così facendo si ottiene la temperatura operativa o operante  $\theta_{op}$  che, oltre ad essere il parametro rappresentativo del calore scambiato tra l'individuo e l'ambiente è anche la temperatura percepita dalle persone.

$$\vartheta_{op} \cong \frac{\vartheta_{mr} + \vartheta_a}{2} \quad (2.5)$$

Una volta definite tutte le temperature presenti nell'ambiente è necessario calcolare o rilevare l'umidità relativa, o grado igrometrico. Tale valore può essere rilevato attraverso l'utilizzo di strumentazione apposita, ovvero l'igrometro, oppure si può calcolare andando a fare il rapporto fra il valore della pressione parziale di vapor d'acqua che si misura nell'atmosfera ed il valore della pressione di vapor saturo alla stessa temperatura. Infine, l'ultimo parametro ambientale necessario per il calcolo del microclima interno è la velocità dell'aria. Tale grandezza può essere rilevata solo per via strumentale, in particolare devono essere utilizzati anemometri omnidirezionali a "filo caldo" (comunemente costituiti da un elemento riscaldato sferico) basati sul principio che lo scambio termico convettivo tra un elemento caldo e l'aria sia proporzionale alla velocità dell'aria stessa (Perretti, 2013).

### 2.1.2 Disuniformità termiche spaziali

Dopo aver fornito una fotografia generale dell'ambiente interno attraverso i parametri precedentemente analizzati, è opportuno discutere della possibilità che all'interno di alcuni spazi si creino delle situazioni locali con caratteristiche anomale che portano al discomfort degli utenti. Questa condizione di comfort svantaggiosa, che è dovuta principalmente ad una differenza di scambi termici tra l'ambiente ed alcune parti del corpo, può essere ricondotta a queste disuniformità termiche (Perretti, 2013; Lopardo, 2010):

- Gradiente verticale della temperatura dell'aria;
- Asimmetria nella temperatura piana radiante;

- Temperatura del pavimento;
- Disturbi per velocità dell'aria elevata.

La sensazione di discomfort derivante da una stratificazione termica non omogenea dell'aria si verifica in ambienti con un gradiente verticale di temperatura molto accentuato, ovvero in edifici con soluzioni impiantistiche non tradizionali. Il valore limite considerato accettabile porta ad una differenza termica tra caviglie e capo di una persona seduta di circa 3 °C, con un gradiente limite di 1.9 °C/m (Perretti, 2013).

L'asimmetria delle temperature piane radianti è un fenomeno frequente che è di difficile analisi dato la semplificazione di trattare le temperature superficiali delle pareti attraverso una media (vedi paragrafo 2.1.1) e non in maniera individuale. Questo fenomeno si presenta nel momento in cui un utente si trovi nelle immediate vicinanze di una superficie calda o fredda. In questo caso, il corpo umano, che risulta particolarmente sensibile all'asimmetria di radiazione percepita, è soggetto ad una condizione di stress termico e di scambi radiativi non omogenei che comportano una conseguente situazione di discomfort.

Un discorso analogo può essere fatto per la temperatura del pavimento ove siano installate tecnologie di riscaldamento-raffrescamento radianti. Tale parametro, che risulta particolarmente importante in ambito residenziale dove si è più propensi a non utilizzare calzature, deve essere mantenuto ad una temperatura che va dai 18 °C ai 29 °C, con un'attenzione ulteriore che deve essere posta nella finitura superficiale scelta.

Per concludere, i disturbi relativi ad un'eccessiva velocità dell'aria vengono rilevati principalmente su soggetti che svolgono attività sedentaria su porzioni localizzate del corpo, ovvero caviglie e nuca. Tale rischio è stato calcolato tramite la formula:

$$DR = (34 - t_a) \cdot (v_a - 0.55)^{0.62} \cdot (0.37 \cdot v_a \cdot T_u + 3.14) \quad (2.5)$$

*DR* : Draught Rate

$t_a$  : temperatura dell'aria;

$v_a$  : velocità dell'aria;

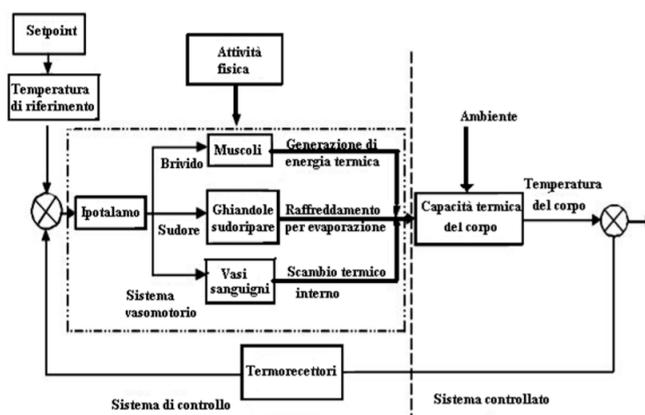
$T_u$  : turbolenza locale.

### 2.1.3 Risposta fisiologica dell'uomo all'ambiente

Il corpo umano, se analizzato dal punto di vista termodinamico, può essere considerato come un sistema in grado di scambiare energia con l'ambiente che lo circonda sotto forma di calore ed energia meccanica (Lopardo, 2010). A tale caratteristica è correlata la necessità da parte del corpo di mantenere una temperatura costante per il nucleo dell'organismo, che si aggira intorno ai 37 °C, attraverso un complesso sistema di termoregolazione fisiologica e comportamentale.

Il primo sistema, schematizzato in Figura 1, è composto da

Figura 1. Schema di termoregolazione fisiologica



una serie di terminazioni nervose (posizionate nelle zone periferiche del corpo) in grado di rilevare il cambiamento e la velocità di variazione della temperatura esterna. Una volta raccolti, tali segnali vengono inviati all'ipotalamo che li elabora e li trasforma in impulsi per l'avviamento dei meccanismi vasomotori necessari al mantenimento dell'isotermia interna. Solo in un secondo momento, nel caso in cui la termoregolazione fisiologica non sia sufficiente, il corpo mette in atto una serie di meccanismi comportamentali, come brividi e sudorazione, per il mantenimento della temperatura interna rispettivamente in ambienti freddi o caldi. Nei successivi paragrafi verranno analizzati i principali parametri fisiologici che influenzano il comfort dell'individuo in ambienti confinati.

### *Bilancio energetico del corpo umano*

Prima di analizzare i parametri fisiologici è necessario descrivere il bilancio termico del corpo umano, che può essere scritto come segue:

$$S = M \pm W \pm E_{res} \pm C_{res} \pm C \pm R \pm E \pm K \quad (2.6)$$

Con:

$S$  : accumulo di energia termica o variazione di energia interna del corpo umano nell'unità di tempo [W];

$M$  : metabolismo energetico [W];

$W$  : potenza meccanica che il corpo umano scambia con l'ambiente [W];

$E_{res}$  : potenza termica scambiata nella respirazione come calore latente [W];

$C_{res}$  : potenza termica scambiata nella respirazione come calore sensibile [W];

$C$  : potenza termica scambiata per convezione [W];

$R$  : potenza termica scambiata per irraggiamento [W];

$E$  : potenza termica scambiata per evaporazione dalla pelle [W];

$K$  : potenza termica scambiata per conduzione [W];

Il metabolismo energetico può essere definito come il quantitativo di energia potenziale chimica, derivante dai cibi e dalle bevande ingerite, che si trasforma in energia termica; tale energia è scambiata con l'ambiente esterno e comporta una diminuzione o un aumento della temperatura corporea, con conseguente sensazione di caldo o freddo (Lopardo, 2010). Inoltre, si è soliti dividere il metabolismo nelle sue tre aliquote principali: il metabolismo basale, il metabolismo di riposo ed il metabolismo di lavoro.

Il parametro, che si esprime in met ( $1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$ ), può essere stimato per via diretta, tramite una procedura complessa che comporta la valutazione del consumo di ossigeno del soggetto in analisi, oppure indirettamente tramite l'utilizzo di tabelle.

Per potenza meccanica si intende l'energia che nell'unità di tempo l'individuo scambia con l'ambiente sotto forma di lavoro. A tale fattore, è necessario aggiungere un parametro di rendimento  $\eta$  (che solitamente oscilla tra valori pari a 0.0 e 0.2) derivante dal rapporto tra la potenza meccanica stessa e il metabolismo energetico.

La potenza termica scambiata durante la respirazione in ambiente può essere divisa in due fattori: una componente scambiata sotto forma di calore latente ed un'altra per calore sensibile. Tale potenza è generata nel momento in cui l'aria dell'ambiente

viene inspirata all'interno dell'organismo. Una volta all'interno del corpo, essa si trova satura di vapore d'acqua e con una temperatura assimilabile a quella corporea, conseguentemente quando viene espirata l'uomo immette in ambiente un'aria con diverse condizioni di entalpia e titolo rispetto a quanto inspirato. Attraverso una serie di studi eseguiti da Fanger negli anni '70, è possibile affermare che tali parametri siano funzione del metabolismo energetico, dell'attività svolta, del grado igrometrico e della temperatura dell'aria.

La potenza termica scambiata per convezione può essere espressa tramite la seguente formula:

$$C = f_{cl} \cdot h_c \cdot A_b (t_{cl} - t_a) \quad (2.7)$$

Con:

$f_{cl}$  : coefficiente d'area d'abbigliamento [-];

$h_c$  : conduttanza termica convettiva unitaria abiti-aria [W/m<sup>2</sup>K];

$t_{cl}$  : temperatura media della superficie esterna del corpo umano vestito [°C];

$t_a$  : temperatura dell'aria [°C];

$A_b$  : area della superficie del corpo nudo [m<sup>2</sup>]

Tale fattore dipende quindi dalla temperatura esterna del corpo umano vestito, dalla temperatura dell'aria, dalla velocità relativa fra uomo ed aria ambiente ed infine dal coefficiente d'area di abbigliamento.

La potenza termica scambiata per irraggiamento tra il corpo umano e l'ambiente è regolata dalla seguente legge:

$$R = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot A_b \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \quad (2.8)$$

Con:

$R$  : potenza termica dispersa dal corpo umano per irraggiamento [W];

$f_{cl}$  : coefficiente d'area d'abbigliamento [-];

$A_b$  : area della superficie efficace del corpo umano [m<sup>2</sup>];

$t_{cl}$  : temperatura media della superficie esterna del corpo umano vestito [°C];

$t_r$  : temperatura media radiante, calcolabile tramite la (2.4) [°C].

Un fattore che dipende quindi dalla temperatura della superficie esterna del corpo vestito, dalla temperatura media radiante e dal coefficiente d'area dell'abbigliamento.

La potenza termica dispersa per evaporazione dalla pelle è la somma di due termini, ovvero la quantità dispersa per diffusione di vapore  $E_d$  e quella dispersa per sudorazione  $E_{sw}$  (Lopardo, 2010). La prima, secondo quanto studiato da Fanger (1970), può essere espressa secondo la seguente formula:

$$E_d = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot A_b (256t_{sk} - 3373 - \phi p_{as}) \quad (2.9)$$

Con:

$A_b$  : area della superficie efficace del corpo umano [m<sup>2</sup>];

$t_{sk}$  : temperatura media della pelle [m<sup>2</sup>];

$p_{as}$  : tensione di vapore dell'acqua alla temperatura dell'aria ambiente [Pa].

Tale termine è quindi funzione del grado igrometrico dell'aria e della temperatura di aria e pelle. Mentre per quanto riguarda la potenza dispersa per sudorazione, si utilizza la seguente legge proposta dallo stesso Fanger:

$$E_{sw} = 0,42[(M - W) - 58,2] \quad (2.10)$$

Con  $M$  e  $W$  che rappresentano rispettivamente il metabolismo energetico e la potenza meccanica scambiata con l'ambiente, espressi in  $W$ .

Infine, la potenza termica dispersa per conduzione deriva dal contatto del corpo umano con i solidi all'interno dell'ambiente, ovvero il contatto tra piedi e pavimento oppure con la sedia se la persona è seduta. Generalmente tale fattore, essendo di difficile valutazione, non viene tenuto in considerazione e può essere trascurato.

### *Meccanismi di termoregolazione*

Come precedentemente accennato, se gli scambi termici tra soggetto ed ambiente non raggiungono una condizione di equilibrio si mettono in moto una serie di meccanismi termoregolatori in grado di mantenere il corpo umano in una condizione di omeotermia interna.

Il primo sistema che entra in funzione è la termoregolazione vasomotoria che interessa il sistema di capillari periferici, i quali, attraverso movimenti di vasocostrizione (per ambienti freddi) o vasodilatazione (per ambienti caldi), controllano l'afflusso di sangue andando a regolare lo scambio termico con l'esterno.

Tale meccanismo è un sistema molto complesso che dipende contemporaneamente dall'ambiente esterno e da impulsi nervosi che regolano gli sfinteri dei vasi sanguigni. Non essendo funzione solo dell'microclima esterno, la termoregolazione vasomotoria può attivare simultaneamente meccanismi opposti in parti diverse del corpo.

Quando tale meccanismo non è sufficiente, entra in funzione la termoregolazione comportamentale, ovvero i brividi in caso di freddo e la sudorazione per il caldo.

Il meccanismo del brivido mette in moto una serie di contrazioni sincrone sui gruppi muscolari che comportano l'aumento del metabolismo energetico e la conseguente produzione di energia termica. Mentre, la sudorazione si divide in tre fasi sequenziali (Alfano et al., 1997) che vanno a creare un sottile film di sudore sulla pelle. Il sudore in parte evapora e raffredda la superficie del corpo sottraendogli una parte di energia termica.

*Parametri fisiologici*

Una volta analizzati i parametri ambientali e il modo in cui il corpo umano scambia potenza termica con l'ambiente, si possono andare a definire i parametri fisiologici che influiscono sullo stato termico dei ogni individuo.

Nel bilancio energetico esposto sono citati diversi parametri che riguarda il soggetto, tuttavia, tramite una serie di relazioni di calcolo ed approssimazioni, è possibile ridurre il numero di queste variabili a due, ovvero il metabolismo ed il livello di abbigliamento.

Alla trattazione del metabolismo energetico del paragrafo precedente è necessario aggiungere una breve spiegazione dei valori che questa variabile può assumere. Il flusso metabolico, espresso in met, può assumere valori compresi tra lo 0.7 ed il

7, corrispondenti rispettivamente ad una persona sdraiata a riposo ed una persona che sta svolgendo attività fisica intensa. Tipicamente, per le analisi su edifici residenziali o ad uso ufficio, vengono utilizzati valori tra 1.2 e 2.0 met che corrispondono ad una persona che sta svolgendo attività leggera seduta o in piedi.

Mentre il livello di isolamento termico dovuto all'abbigliamento è un fattore che va ad esprimere quanto il corpo umano sia isolato da scambi termici, siano essi positivi o negativi, grazie al vestiario (Tugrul Ogulata, 2007). Se si analizzano le tre diverse modalità di scambio del calore, si nota come il vestiario sia in grado di isolare termicamente il corpo umano per tutte le diverse tipologie di scambi, fermo restando che l'aliquota relativa al trasferimento di calore per conduzione viene spesso trascurata. Tale parametro viene solitamente espresso in clo e può assumere valori compresi tra 0.35 e 0.60 per l'estate e valori tra lo 0.80 e 1.20 per l'inverno (Perretti, 2013). La scelta corretta di tale parametro gioca un ruolo fondamentale, infatti minime variazioni di tale valore portano a cambiamenti di importanti nella definizione della temperatura operante di comfort.

<b>Activity</b>	<b>Activity Level W/Person EnergyPlus Schedule Value</b>	<b>Activity Level W/m<sup>2</sup></b>	<b>met*</b>
<i>Resting</i>			
Sleeping	72	40	0.7
Reclining	81	45	0.8
Seated, quiet	108	60	1
Standing, relaxed	126	70	1.2
<i>Walking (on level surface)</i>			
3.2 km/h (0.9 m/s)	207	115	2
4.3 km/h (1.2 m/s)	270	150	2.6
6.4 km/h (1.8 m/s)	396	220	3.8
<i>Office Activities</i>			
Reading, seated	99	55	1
Writing	108	60	1
Typing	117	65	1.1
Filing, seated	126	70	1.2
Filing, standing	144	80	1.4
Walking about	180	100	1.7
Lifting/packing	216	120	2.1
<i>Miscellaneous Occupational Activities</i>			
Cooking	171 to 207	95 to 115	1.6 to 2.0
Housecleaning	207 to 360	115 to 200	2.0 to 3.4
Seated, heavy limb movement	234	130	2.2
Machine work			
sawing (table saw)	189	105	1.8
light (electrical industry)	207 to 252	115 to 140	2.0 to 2.4
heavy	423	235	4
Handling 50 kg bags	423	235	4
Pick and shovel work	423 to 504	235 to 280	4.0 to 4.8
<i>Miscellaneous Leisure Activities</i>			
Dancing, social	252 to 459	140 to 255	2.4 to 4.4
Calisthenics/exercise	315 to 423	175 to 235	3.0 to 4.0

Tabella 1. Valori metabolici tipici delle principali attività

Tabella 2. Valori tipici di clo (Tugrul Ogulata, 2007)

Clothing ensemble	I <sub>cl</sub> , clo	R <sub>cl</sub> , m <sup>2</sup> K/W
<b>MEN</b>		
Cool socks, briefs, shoes, s.s. woven shirt, cool trousers	0.42	0.065
Warm socks, briefs, shoes, s.s. woven shirt, cool trousers	0.42	0.065
Cool socks, briefs, shoes, s.s. cool knit shirt, cool trousers	0.55	0.085
Cool socks, briefs, undershirt, shoes, i.s. woven shirt, cool trousers	0.51	0.079
Cool socks, briefs, undershirt, shoes, s.s. woven shirt, warm jacket, cool trousers	0.73	0.113
Cool socks, briefs, shoes, cool trousers	0.31	0.048
Cool socks, briefs, undershirt, shoes, s.s. woven shirt, warm jacket, warm trousers	0.77	0.119
<b>WOMEN</b>		
Cool dress, pantyhose, bra and panties, shoes	0.21	0.032
Cool s.s. sweater, cool dress, pantyhose, bra and panties, shoes	0.30	0.046
Warm dress, pantyhose, bra and panties, shoes	0.49	0.076
Warm skirt, warm i.s. blouse, pantyhose, bra and panties, shoes	0.41	0.063
Warm i.s. sweater, warm skirt, warm i.s. blouse, pantyhose, bra and panties, shoes	0.64	0.099
Warm i.s. sweater, warm slacks, warm i.s. blouse, pantyhose, bra and panties, shoes	0.77	0.119
Warm i.s. sweater, warm slacks, pantyhose, bra and panties, shoes	0.59	0.091

Per concludere, è possibile andare a creare una sorta di equazione funzionale che va a definire il comfort in base ai parametri ambientali e fisiologici sopracitati. Tale equazione risulta essere:

$$C = f(t_a, t_{mr}, p_a, v_a, M, I_{cl}) \tag{2.11}$$

### 2.1.4 Metodi di valutazione dell'ambiente interno

Una volta analizzati i principali parametri ambientali e fisiologici che influiscono sulla sensazione di comfort termico degli utenti, è necessario introdurre alcuni metodi di valutazione riconosciuti a livello globale.

Dal punto di vista normativo, a livello termico, l'ambiente interno può essere suddiviso in tre diverse categorie, ovvero moderato, severo caldo e severo freddo, ed a seconda della classificazione vi sono diversi metodi di valutazione del comfort. Per gli ambienti moderati viene utilizzato l'indice PMV (Predicted Mean Vote) a cui è correlato il PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), mentre per gli ambienti severi caldi e freddi si usano rispettivamente gli indici WBGT e IREQ.

L'indice PMV, proposto da Fanger nel 1970, può essere utilizzato per andare a valutare il comfort globale negli ambienti moderati. Tuttavia, bisogna tenere in considerazione che, per una valutazione completa della condizione degli occupanti, bisognerà studiare ulteriori quattro parametri di discomfort puntuali, ovvero le disuniformità termiche spiegate nel paragrafo 2.1.2, in modo da ottenere anche il PPD. Il Predicted Mean Vote viene espresso tramite una scala di comfort che può assumere valori tra -3 (freddo) e +3 (caldo) con lo 0 come valore neutro (Figura 2), mentre il Predicted Percentage Dissatisfied è una percentuale che rappresenta l'incidenza di soggetti che reputano l'ambiente non soddisfacente dal punto di vista termico.

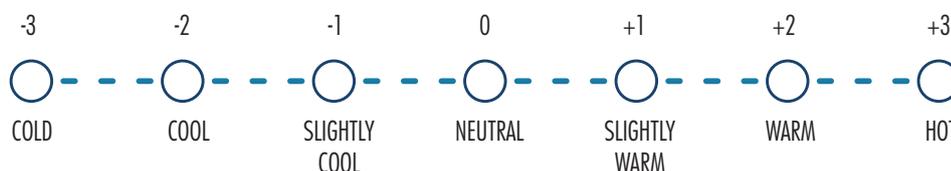


Figura 2. ASHRAE Thermal Sensation Scale (ASHRAE 55-2004)

Le due grandezze possono essere associate tramite la funzione rappresentata in Figura 3 per cui ad ogni valore di PPD corrispondono due valori di PMV opposti rispetto al punto di neutralità termica. Proprio in corrispondenza dello 0, si nota come il PPD assuma comunque un valore fisso pari al 5%.

L'utilizzo e la combinazione di questi parametri ha permesso lo sviluppo di modelli di comfort che possono essere utilizzati per valutare le condizioni microclimatiche interne. I due principali sono il modello di Fanger, basato su evidenze sperimentali, ed il modello adattivo, che si basa su prove pratiche. Come evidenziato da De Dear e Brager (1998), i

modelli devono essere considerati complementari piuttosto che antagonisti, anche se nel primo vengono prese in considerazione i parametri fisiologici degli individui mentre nel secondo no.

L'aspetto innovativo che viene introdotto dal modello adattivo e per cui esso viene preso in considerazione è il fatto che le persone non vengono considerate come "recipienti inerti" alle situazioni di discomfort, ma come soggetti in grado di interagire con l'ambiente per modificare il microclima interno (Yao et al., 2009; Humphreys, 1995).

Questo aspetto di interazione tra il soggetto e l'ambiente introduce tre aspetti soggettivi che negli ultimi anni hanno trasformato lo studio del comfort, ovvero l'adattamento fisiologico, psicologico e comportamentale. La complessa relazione fra ambiente termico e questi tre fattori di adattamento, porta alla definizione di un range di comfort più ampio rispetto alle visioni "statiche" (Yao et al., 2009).

### 2.1.5 Inquadramento Normativo

I principali riferimenti a livello normativo sono la UNI EN ISO 7730 del 2006, che si sofferma sulla valutazione del microclima interno in ambienti moderati, e alle indicazioni dello Standard ASHRAE 55 del 2004, per la ricerca sui fattori ambientali e fisiologici che producono un microclima interno accettabile dagli occupanti.

Entrambe mettono dapprima in evidenza i valori di PMV e PPD che vengono definiti accettabili a seconda della categoria di edificio analizzato, per poi passare all'analisi dei parametri di discomfort termico locale.

Le norme sopracitate non si occupano dei consumi energetici degli edifici che vengono invece trattati dalla UNI EN ISO 52016 e dai Criteri Ambientali Minimi, introdotti con il DM dell'11 Ottobre 2017, per la costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici. Soprattutto con l'introduzione di quest'ultimi, in Italia, si sta cercando di

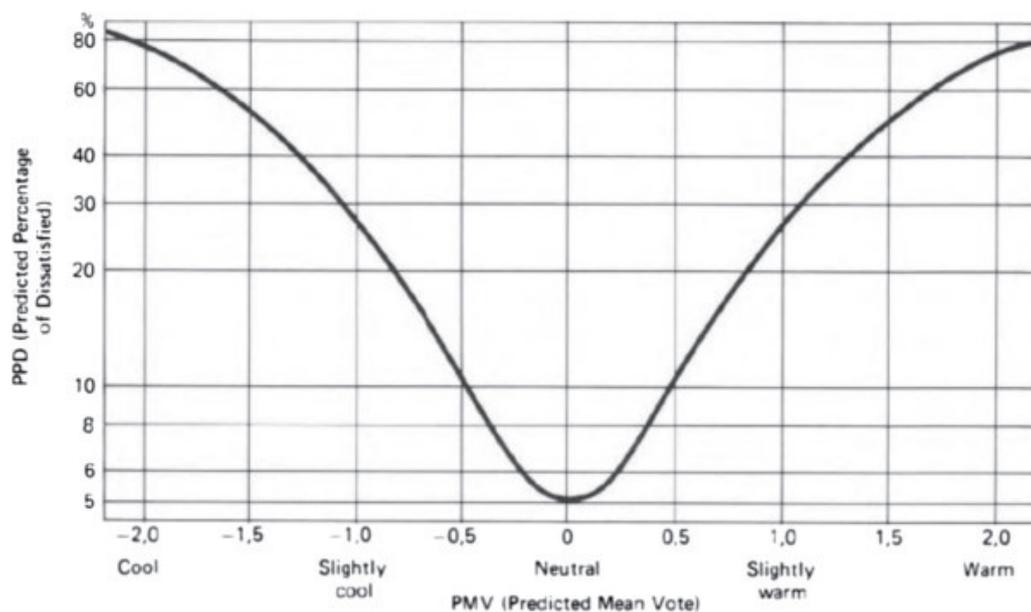


Figura 3. Grafico che mostra la relazione fra PMV e PPD

regolamentare l'attività edilizia introducendo il concetto della valutazione del ciclo di vita dell'edificio, che comprende specifiche indicazioni sui componenti edilizi, sui consumi energetici, sull'edificio ed anche sulla gestione del cantiere e della gara d'appalto.

## 2.2 Controllo della qualità dell'aria interna

I recenti fenomeni di elevato inquinamento atmosferico hanno portato ad una serie di studi in grado di aumentare considerevolmente la sensibilizzazione collettiva, soprattutto nelle sfumature che ne sottolineano i riflessi negativi sulla salute delle persone. Sotto analisi non vi è soltanto la qualità dell'aria esterna, ormai martoriata dalle emissioni di CO<sub>2</sub> e dalle percentuali elevate di particolato, ma anche ed in maggior misura la qualità dell'aria interna (Indoor Air Quality – IAQ). Infatti, con la il tempo passato all'interno degli edifici che oggi giorno può toccare il 90% (Sundell, 2004), questo parametro è diventato il soggetto più importante per lo studio del comfort e delle ripercussioni di quest'ultimo su salute, produttività e considerazione generale degli ambienti da parte degli utenti (Sundell, 1999).

Gli studi riguardanti la qualità dell'aria interna si sono moltiplicati e sono diventati una tematica di ricerca importante principalmente in Europa ed in America, e soprattutto per edifici ad uso uffici. Ed è proprio in strutture con questa destinazione d'uso che gli studi di Maroni et al. (1995) e Fang et al. (2004) hanno evidenziato il verificarsi di una serie di disturbi di salute, riassumibili nella Sick-Building Syndrome (SBS) e riconducibili tra i tanti aspetti anche alla qualità dell'aria. Tale problematica è stata ampiamente analizzata dalla World Health Organization che, dopo aver specificato che solo il 20% degli utenti è colpito da tale disturbo e considera l'ambiente interno di una qualità intollerabile (Fanger, 2006), ha fornito un insieme di sintomi, quali irritazioni ad occhi, naso e gola, fatica mentale, cefalee, nausea, vertigini ed irritazioni della pelle, che possono essere ricondotti alla SBS.

E' importante sottolineare come la valutazione di questa problematica, che è stata rimarcata anche dagli studi sulla connessione fra l'aumento delle allergie ed il peggioramento delle condizioni della qualità dell'aria negli edifici (Fanger, 2006; Perretti, 2013; Sundell, 2004), possa essere basata solo su questionari e conseguentemente sulla valutazione soggettiva degli utenti.

Figura 4. Esempio di questionario per la valutazione della qualità dell'aria, della percezione dell'ambiente e dei sintomi da SBS (Fang et al., 2004)

Acceptability scale	Odour intensity scale	Irritation scale
+1 Clearly acceptable	0 No odour	0 No irritation
0 Just acceptable Just unacceptable	1 Slight odour	1 Slight irritation
0	2 Moderate odour	2 Moderate irritation
0	3 Strong odour	3 Strong irritation
-1 Clearly unacceptable	4 Very strong odour	4 Very strong irritation
	5 Overpowering odour	5 Overpowering irritation

**Right now my environment can be described as follows:**

Too humid	Too dry
Air stuffy	Air fresh
Too dark	Too bright
Too quiet	Too noisy
Office dusty/dirty	Office clean

**Right now I feel as follows:**

Nose blocked	Nose clear
Nose dry	Nose running
Throat dry	Throat not dry
Mouth dry	Mouth not dry
Lips dry	Lips not dry
Skin dry	Skin not dry
Hair dry, brittle	Hair not dry
Nails brittle	Nails supple
Eyes dry	Eyes not dry
Eyes smarting	Eyes not smarting
Eyes aching	Eyes not aching
Eyes feel gritty	Eyes not gritty
Severe headache	No headache
Difficult to think	Head clear
Dizzy	Not dizzy
Feeling bad	Feeling good
Tired	Rested
Difficult to concentrate	Easy to concentrate
Depressed	Positive
Alert	Sleepy

**Completion of tasks requires:**

Slight effort	Strong effort
---------------	---------------

### 2.2.1 Parametri di controllo

Da un punto di vista prettamente ambientale e senza prendere in considerazione le sostanze inquinanti che possono essere presenti negli ambienti (vedi paragrafo 2.2.2), la qualità dell'aria può essere ragionevolmente stimata attraverso l'utilizzo di quattro parametri:

- Temperatura dell'aria;
- Umidità relativa;
- Concentrazione di CO<sub>2</sub>;
- Mancanza di ossigeno.

I primi due parametri di riferimento, ovvero la temperatura di set point degli ambienti (che solitamente oscilla tra i 20-22 °C nel periodo invernale e tra i 24-26 °C nel periodo estivo) ed il tasso di umidità (che dovrebbe attestarsi tra il 40-60%) risultano essere facilmente modificabili grazie all'utilizzo degli impianti normalmente in dotazione negli edifici odierni.

Un discorso più complesso deve essere invece fatto per la concentrazione di CO<sub>2</sub> e la mancanza di ossigeno. Partendo dagli studi di Pettenkofer (**1858**) si può constatare come, già nella metà del XIX secolo, la concentrazione di anidride carbonica venisse considerato un aspetto importante per comprendere la qualità dell'aria in un ambiente ed anche come indicatore della percentuale di sostanze nocive prodotte dalle persone. Prendendo in considerazione le percentuali dei gas che compongono l'aria (ovvero ossigeno 21%, azoto 78%, argon 1% ed anidride carbonica 0.04%) risulta evidente come la qualità di quest'ultima sia definita in funzione di una sostanza che si trova in percentuali molto basse. Inoltre, dato che negli ultimi decenni tale percentuale sta crescendo per via del progressivo aumento dell'inquinamento atmosferico, risulta evidente come la qualità dell'aria interna non dipenda soltanto dalla quantità di persone nell'ambiente e dalla relativa produzione di CO<sub>2</sub> e bioeffluenti (**De Gids and Wouters, 2010**) ma anche dalla qualità dell'aria esterna (**Perretti, 2013**). Negli anni si sono susseguiti una serie di studi che sono andati in controtendenza rispetto a quanto osservato precedentemente, infatti, attraverso una serie di ricerche, si è evidenziato come la sensazione di discomfort negli ambienti sia da imputarsi principalmente al sovraffollamento ed agli odori derivanti dalle emissioni corporee umane piuttosto che alle alte concentrazioni di CO<sub>2</sub>, fermo restando che percentuali superiori all'1% di anidride carbonica (ovvero 10.000 ppm) risultano dannose per la salute dei presenti (**Sundell, 2004; De Gids and Wouters, 2010**).

Per concludere, l'ultimo aspetto, ovvero la mancanza di ossigeno, risulta essere una conseguenza della presenza di un numero elevato di occupanti all'interno degli ambienti. Le persone infatti, durante il processo di respirazione, inspirano aria in modo da introdurre nell'organismo l'ossigeno necessario per la respirazione cellulare ed espirano CO<sub>2</sub> in concentrazioni molto alte (fino al 4%) come prodotto di scarto (**De Gids and Wouters, 2010**). La carenza di ossigeno all'interno del corpo umano viene definita ipossia, un fenomeno che comporta un cambio a livello di metabolismo cellulare con conseguenti sensazioni di debolezza, stanchezza e freddo costante (**Rossi, 2018**).

Escludendo i primi due fattori che vengono gestiti principalmente a livello impiantistico, l'elevata concentrazione di anidride carbonica e la mancanza di ossigeno sono aspetti che possono essere risolti esclusivamente attraverso la ventilazione degli ambienti, sia essa effettuata per via meccanica, naturale o mista. Tale aspetto viene controllato a livello normativo a seconda della destinazione d'uso dell'edificio e viene espresso con un valore di volumi orari (vol/h) di ricambio d'aria necessari al fine di mantenere un certo livello di qualità dell'aria nell'ambiente.

### 2.2.2 Sostanze e sorgenti inquinanti

L'inquinamento dell'aria interna può essere descritto secondo due aspetti: ovvero la tipologia di contaminanti e la tipologia di effetti sulle persone/ambiente. In aggiunta, entrambi vengono divisi rispettivamente in tre e quattro categorie, per i primi si parla di inquinanti gassosi, organici e particolato mentre per i secondi si possono avere odori, sostanze irritanti, sostanze tossiche e danni materiali. Inoltre, è importante sottolineare che la qualità dell'aria degli ambienti varia in funzione della concentrazione di impurità provenienti sia dall'esterno sia dall'interno, con i contaminanti interni prodotti dall'uomo che generalmente hanno un impatto maggiore sul comfort (Perretti, 2013).

Da un punto di vista procedurale è molto complesso andare a valutare quali componenti influiscono sulla qualità dell'aria interna, soprattutto perché l'aria è composta da una miscela di numerosi gas che si possono trovare anche in piccolissime percentuali. Tra questi vi sono il monossido di carbonio (prodotto di combustioni in difetto d'aria), il fumo da tabacco, la formaldeide (solitamente rilasciata da prodotti nuovi in legno pressato), amianto (oggi vietato ma largamente utilizzato in passato come prodotto antincendio), ammoniacca, ozono, radon (gas radioattivo che fuoriesce dal terreno e si disperde nell'ambiente) e la più volte citata anidride carbonica.

Per quanto riguarda la provenienza dei principali inquinanti in edifici ad uso non industriale, le principali sorgenti individuate nel corso di recenti studi sono:

- **Rivestimenti e finiture.** Ci si riferisce a pavimentazioni, rivestimenti murari, colle, prodotti adesivi, vernici ed elementi d'arredo;

- **Materiali usati e funzionamento dell'organismo edificio.** Una progettazione superficiale di alcuni aspetti degli edifici porta ad un drastico peggioramento del comfort interno. Tra le cause principali si possono evidenziare la formazione di muffe, il rilascio di particelle o gas da parte dei materiali da costruzione, la non ermeticità e la scarsa ventilazione;

- **Utenti ed attività svolta negli ambienti.** A livello interno, come precedentemente anticipato, questa fonte risulta essere la più grande generatrice di inquinanti. Si parla infatti di CO<sub>2</sub>, odori, umidità, fumo, composti organici e particolato;

- **Manutenzione e controllo degli impianti tecnologici.** La frequenza della manutenzione sugli impianti tecnologici, specialmente quelli che gestiscono il ricambio d'aria, risulta contribuire in maniera rilevante sulla qualità dell'aria interna, con particolare attenzione verso i filtri di ventilazione (Beko et al., 2006; Clausen, 2004);

	WHO World Health Organization	FI Finland	LT Lithuania	NO Norway	PT Portugal	RO Romania	SI Slovenia
<b>Ammonia</b> (µg/m <sup>3</sup> )	-	20	40	-	-	-	50
<b>Asbestos</b>	-	0 fb/cm	0.1 mg/m <sup>3</sup>	0.1 fb/cm	-	-	-
<b>CO</b> (mg/m <sup>3</sup> )	7 <sup>#2</sup>	8	3	10 <sup>#5</sup>	12.5	6 <sup>#3</sup>	10
<b>CO<sub>2</sub></b> (ppm)	-	1200	-	1000	1000	-	1670
<b>Formaldehide</b> (µg/m <sup>3</sup> )	100	50	10	100 <sup>#3</sup>	100	35 <sup>#3</sup>	100
<b>NO<sub>2</sub></b> (µg/m <sup>3</sup> )	40	-	40	100 <sup>#4</sup>	-	-	-
<b>Ozone</b> (mg/m <sup>3</sup> )	0.1 <sup>#5</sup>	-	0.03	-	0.2	-	0.1
<b>PM<sub>10</sub></b> (µg/m <sup>3</sup> )	20	50	50	-	150	-	100
<b>Radon</b> (Bq/m <sup>3</sup> )	-	200 <sup>#1</sup>	-	100	400	140 <sup>#6</sup>	400
<b>Styrene</b> (µg/m <sup>3</sup> )	-	1	2	-	-	-	-

<sup>#1</sup> annual average, <sup>#2</sup> daily maximum, <sup>#3</sup> 30 min average, <sup>#4</sup> 1 h average, <sup>#5</sup> 8 h average, <sup>#6</sup> instant max, fb – fibre

Figura 5. I limiti indicati da alcune normative europee e dalla WHO per i principali inquinanti degli ambienti.

- **Fattori ambientali esterni.** Comprendono una serie di aspetti che influiscono sulla qualità dell'aria esterna, inclusi umidità, composti organici, anidride carbonica, gas radon e smog.

### **2.2.3 Inquadramento Normativo**

Vi sono molteplici norme che vanno a definire il quadro legislativo sul tema della qualità dell'aria interna. Per quanto riguarda la qualità dell'aria in ambienti confinati ci si rifà alla UNI EN ISO 16000 ed ai criteri progettuali indicati nella UNI EN 15251. In quest'ultima norma, e nel suo aggiornamento ISO 17772-1 del 2017, vengono indicati delle strategie per l'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica.

Considerando le analisi da effettuare sugli inquinanti presenti in ambiente, le normative di riferimento sono la UNI EN ISO 16017, per il campionamento e l'analisi dei composti organici volatili, e la UNI EN 12341 del 2014, per indicazioni sulle strategie di campionamento e valutazione della concentrazione di PM10 e PM2.5.

Infine, devono essere citate ulteriori due normative per la valutazione della ventilazione negli edifici. La prima è la UNI 10339 del 1995, attualmente in fase di revisione, che va a fornire valori per: l'immissione di aria esterna in funzione della destinazione d'uso dei locali, la filtrazione minima dell'aria e la velocità di immissione della stessa. Inoltre, la normativa individua anche i parametri ed i tassi di concentrazione limite di alcuni inquinanti.

La seconda è la UNI EN 15242 che, una volta identificate le portate di ventilazione negli edifici tramite la 10339, va a esporre nel dettaglio i metodi di calcolo per le portate d'aria.

## 2.3 Comfort illuminotecnico

Le caratteristiche illuminotecniche degli spazi giocano un ruolo di fondamentale importanza nel comfort e nella qualità degli ambienti. Affinché gli occupanti possano definire uno spazio ben illuminato gli devono essere garantiti tre requisiti di luce fondamentali, ovvero:

- Luce necessaria per muoversi in sicurezza all'interno degli spazi;
- Luce adeguata per lo svolgimento delle varie attività;
- Luce per assicurare il soddisfacimento dei bisogni di carattere fisiologici e psicologici.

Prima della metà del XX secolo, tutti questi aspetti dovevano essere garantiti solo grazie alla luce naturale mentre, negli anni successivi e soprattutto negli ultimi 20 anni, l'avvento e lo sviluppo tecnologico di sistemi di illuminazione artificiali hanno trasformato la percezione degli spazi e risolto la quasi totalità dei bisogni illuminotecnici degli occupanti (**Edwards e Torcellini, 2002**). Oggi infatti, un progetto illuminotecnico soddisfacente si rifà a sette semplici linee guida riassunte in *Figura 6*.

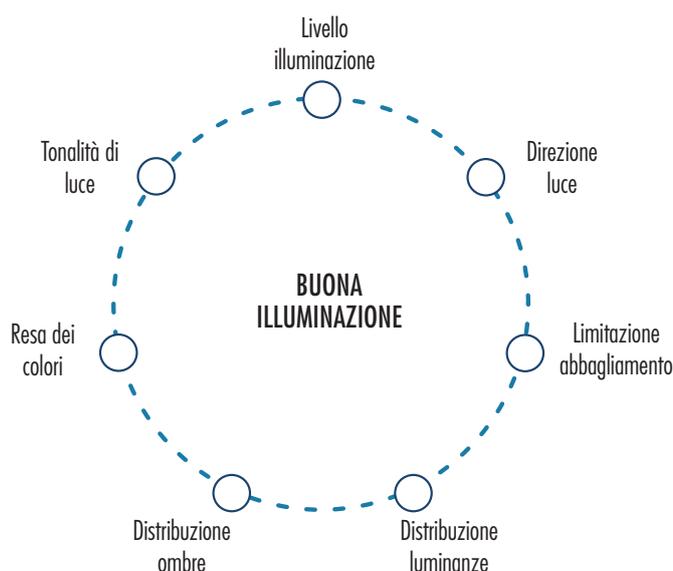


Figura 6. Gli aspetti principali del progetto illuminotecnico (Carletti C., 2008)

La luce viene considerata, dal punto di vista fisico, una radiazione elettromagnetica che può variare nel tempo e nello spazio. Dato che solo una parte di questa radiazione è percepita sotto forma di luce dall'occhio, in particolare si tratta del range di lunghezze d'onda, detto spettro luminoso, che va dai 380 ai 780 nm (*Figura 7*), è importante analizzare come risponde il sistema visivo umano quando sollecitato.

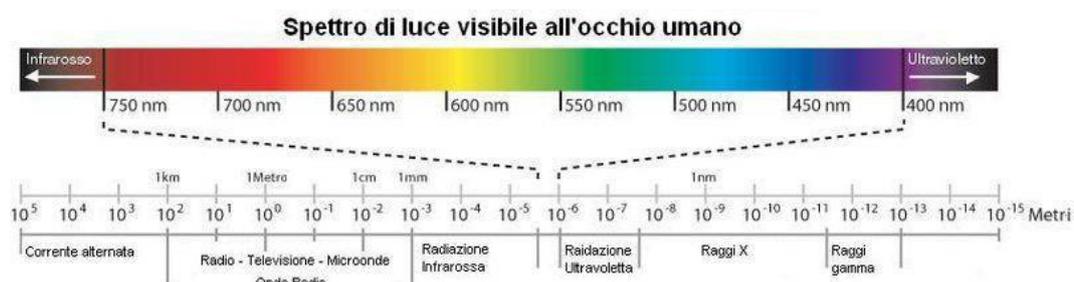


Figura 7. Lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica con esplicitazione dello spettro di luce visibile

In primo luogo si può notare che l'occhio può essere comparato ad una macchina fotografica capace di distinguere i colori, aggiustare la messa a fuoco degli oggetti a seconda della loro distanza e regolare il flusso luminoso incidente (**Fordergemeinschaft Gutes Licht**).

Inoltre si deve aggiungere che, per quantità e caratteristiche dei ricettori presenti all'interno dell'occhio, le persone sono molto più sensibili a lunghezze d'onda intorno ai 555 nm, ovvero per tonalità di colore sul giallo-verde. Per studiare tale fenomeno è stata introdotta una curva di sensibilità (*Figura 8*), sia per visione fotopica che scotopica, che restituisce un valore di sensibilità spettrale a seconda delle diverse lunghezze d'onda. Alla sensibilità cromatica si aggiunge la capacità di adattamento per ambienti bui o luminosi. L'occhio infatti ha bisogno di circa 30 minuti per adattarsi ad ambienti privi di luce mentre impiega solo qualche secondo per situazioni molto luminose. Un quadro generale utile per evidenziare la sensibilità del sistema visivo umano ad una moltitudine di fattori che modificano i parametri di comfort illuminotecnico degli utenti.

Un ulteriore aspetto che merita di essere analizzato è il rapporto fra luce naturale e luce artificiale. La prima non è soltanto preferita dalla maggior parte delle persone ma è utilizzata come punto di riferimento per valutare tutte le altre luci (**Franta e Anstead, 1994**), un aspetto dovuto al fatto che il bilanciamento spettrale della luce solare è particolarmente efficace nel range di colori fra il blu ed il verde. Inoltre, agli aspetti prettamente illuminotecnici, vanno sommati una serie di fattori complementari, legati alla salute psicologica, al metabolismo ed ai processi biologici, con i quali la luce naturale risulta di fondamentale importanza per il corpo umano (**Hathaway et al., 1992**).

La comparazione illuminotecnica tra la luce artificiale e la luce naturale è stata possibile solo grazie all'introduzione sul mercato di luci LED o fluorescenti a spettro completo. Prima dell'utilizzo di questi apparecchi, le luci artificiali avevano una concentrazione dello spettro nel range tra il giallo ed il rosso con una completa assenza del blu (**Liberman, 1991**), con un effetto di illuminamento estremamente difforme rispetto a quello solare.

### 2.3.1 Grandezze fotometriche

La luce può essere descritta attraverso quattro grandezze fotometriche, ovvero il flusso luminoso, l'intensità luminosa, l'illuminamento e la luminanza.

Il flusso luminoso si definisce come la quantità di luce che una sorgente emette nello spazio e viene misurato in lumen (lm). L'intensità luminosa è la quantità di luce emessa da una certa sorgente in una direzione e si esprime in candele (cd).

Mentre illuminamento e luminanza sono grandezze leggermente differenti che fanno

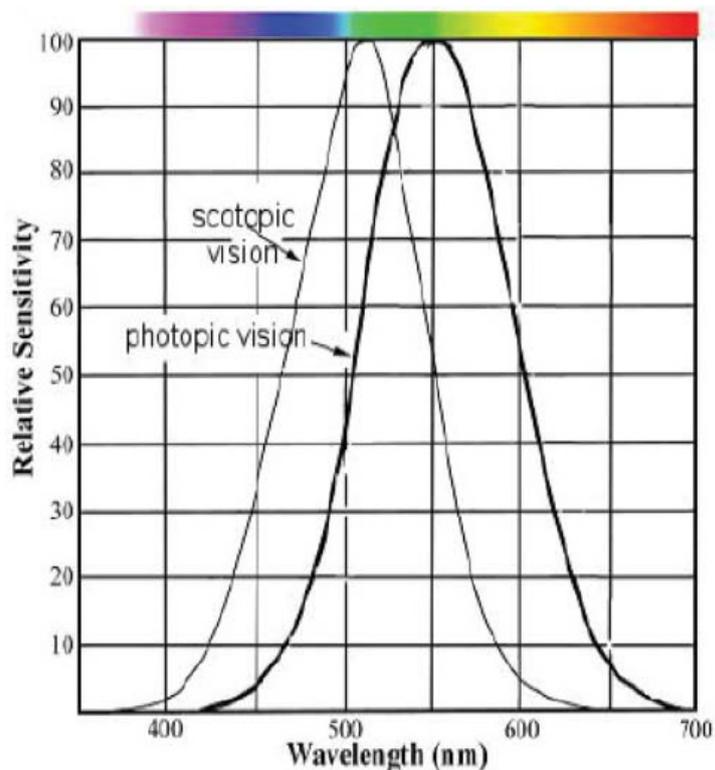


Figura 8. Curve di sensibilità spettrale per visione fotopica e scotopica

riferimento rispettivamente alla quantità di luce che colpisce una superficie, espressa in lux (ovvero  $\text{lm}/\text{m}^2$ ), ed alla quantità di luce che colpisce l'occhio dell'osservatore, partendo da una sorgente o da una superficie, si esprime in  $\text{cd}/\text{m}^2$ .

### 2.3.2 Parametri di controllo

Un progetto illuminotecnico, sia dal punto di vista della qualità che della quantità di luce, artificiale o naturale, non può essere valutato in maniera univoca. Questo aspetto è dovuto al fatto che, una volta soddisfatti i requisiti minimi da normativa, sono cliente e progettista a definire le necessità dello spazio e conseguentemente la distribuzione e la tipologia di fonti luminose.

Tuttavia, il comfort illuminotecnico può essere conseguito sulla base di sei aspetti principali, che sono:

- Disponibilità di luce diurna;
- Distribuzione delle luminanze;
- Illuminamento medio mantenuto;
- Resa cromatica;
- Calore apparente della luce;
- Fenomeni di abbagliamento.

Uno dei primi aspetti a cui bisogna porre particolare attenzione, non tanto da un punto di vista illuminotecnico ma per gli aspetti fisiologici e psicologici sopra elencati, è la quantità di luce naturale che penetra attraverso le porzioni vetrate.

Per tale aspetto si fa riferimento al Fattore medio di Luce Diurna (FLDm) che è una percentuale definita come il rapporto tra l'illuminamento misurato in un punto dell'ambiente interno e l'illuminamento misurato all'esterno, su una superficie orizzontale esposta alla volta celeste e priva di qualsiasi ostruzione, con situazione di cielo coperto.

Tale parametro viene indicato attraverso valori percentuali che variano a seconda delle destinazioni d'uso degli ambienti, per gli edifici residenziale è il 2%.

Il FLDm può essere calcolato sia attraverso l'utilizzo di software di modellazione sia per via analitica attraverso la seguente formula:

$$FLDm = \frac{t \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \psi}{S \cdot (1 - r_m)} \quad (2.12)$$

Con:

$t$  : Coefficiente di trasparenza del vetro [-];

$A$  : Area della superficie trasparente della finestra [ $\text{m}^2$ ];

$\varepsilon$  : Fattore finestra, inteso come rapporto tra illuminamento della finestra e radianza del cielo [-];

$\psi$  : Coefficiente che tiene conto dell'arretramento del piano della finestra rispetto al filo esterno della facciata [-];

$S$  : Area delle superfici interne [ $\text{m}^2$ ];

$r_m$  : Coefficiente medio di riflessione luminosa delle superfici interne, comprensivo delle finestre [-].

Il fattore è quindi funzione della tipologia di serramento adottato, sia per la parte trasparente sia per la dimensione del telaio, del colore delle superfici interne e di una serie di parametri prettamente progettuali o di contesto, ovvero rispettivamente come è stata installata la finestra e le ostruzioni eventualmente presenti nelle vicinanze.

Una volta determinato la quantità di luce naturale presente all'interno dell'ambiente, è necessario andare ad analizzare la luce artificiale prodotta dai corpi illuminanti attraverso diversi parametri **(Menduto, 2015)**.

La distribuzione delle luminanze all'interno del campo visivo è un parametro di fondamentale importanza per evitare fenomeni di affaticamento visivo, che possono essere portati da continui processi di adattamento dell'occhio a superfici con luminanze differenti. Tale aspetto viene valutato attraverso l'utilizzo di software di modellazione illuminotecnica (tipo Dialux) ed è solitamente risolto attraverso una distribuzione uniforme delle sorgenti luminose all'interno dell'ambiente, ed anche da una corretta valutazione delle riflessioni delle superfici.

Il fattore che viene regolato a livello normativo per controllare l'uniformità della luce è l'illuminamento medio mantenuto ( $E_m$ ) espresso in Lux, ovvero il valore di illuminamento al di sotto del quale una specifica superficie non può mai scendere. Tale parametro, oltre a definire il livello minimo di luce che deve essere assicurato sulla superficie oggetto del compito visivo, stabilisce la necessità di prevedere una fascia circostante a tale area con livelli di illuminamento simili rispetto a quella di lavoro, in modo da non creare fenomeni di affaticamento. I lux necessari a seconda della destinazione d'uso e dell'attività da svolgersi sono regolati da tabelle apposite **(UNI EN 12464)**.

Per la verifica su strutture esistenti, l'illuminamento viene rilevato attraverso il posizionamento di fotometri sul piano di lavoro, che può essere orizzontale, verticale o inclinato, mentre, da un punto di vista progettuale, possono essere utilizzati software specifici oppure il metodo del flusso totale per definire il numero e la tipologia di apparecchi da installare. La resa cromatica viene definita come la capacità di una sorgente luminosa di restituire fedelmente i colori rispetto ad una sorgente di riferimento, che solitamente si identifica nella luce naturale. Viene espressa con l'indice di resa cromatica CRI, con 100 che è il valore migliore in assoluto. E' buona pratica verificare che, nel caso in cui siano installate sorgenti con rese cromatiche inferiori a 80, i colori di sicurezza siano riconoscibili da parte degli utenti **(Zumtobel, 2017)**.

Alla resa cromatica si è soliti affiancare la temperatura di colore della luce. Tale parametro, espresso in Kelvin (K), va a classificare le sorgenti luminose in tre categorie:

- *Luce calda*. Per valori fino a 3300 K;
- *Luce neutra*. Per valori compresi fra 3300 e 5300 K;
- *Luce fredda*. Per valori oltre i 5300 K.

L'ultimo aspetto che deve essere tenuto in considerazione è la valutazione di fattori di abbagliamento dovuti all'illuminazione naturale o all'illuminazione artificiale. Per valutare tale parametro si ricorre al metodo unificato UGR - Unified Glare Rating, che si ottiene tramite la seguente formula **(UNI 10380 del 1994)**:

$$UGR = 8 \log \left( \frac{0.25}{L_b} \sum \frac{L^2 \cdot \omega}{p^2} \right) \quad (2.12)$$

Con:

$L_b$  : luminanza di sfondo calcolata come illuminamento verticale indiretto al livello dell'occhio dell'osservatore (ovvero  $L_b = E_{ind} / \pi$ ) [cd/m<sup>2</sup>];

$L$  : luminanza delle parti luminose di ogni singolo apparecchio di illuminazione nella direzione dell'occhio dell'osservatore [cd/m<sup>2</sup>];

$\omega$  : angolo solido delle parti luminose di ogni singolo apparecchio di illuminazione nella direzione dell'occhio dell'osservatore [sr - steradiani];

$p$  : indice di posizione di Guth di ogni singolo apparecchio.

L'UGR dipende quindi dalla posizione degli apparecchi illuminanti, dalle caratteristiche dimensionali dell'ambiente, dalla luminosità delle superfici all'interno del campo visivo ed infine dal punto di osservazione degli utenti.

I valori limite di abbagliamento sono definiti all'interno di tabelle nella UNI EN 12464 e variano a seconda della delle attività e delle mansioni visive da svolgere nell'ambiente (Zumtobel, 2017).

### 2.3.3 Inquadramento Normativo

Dal punto di vista normativo, il controllo della luce negli ambienti interni è regolato sia per quanto riguarda la luce naturale sia per la luce artificiale. Come già precedentemente accennato, le normative in questione sono necessario per assicurare il corretto svolgimento delle attività, il soddisfacimento dei parametri fisiologici e psicologici ed infine il movimento in sicurezza degli occupanti.

Con queste dovute premesse, la quantità di luce naturale da assicurare per le varie destinazioni d'uso degli edifici è regolata tramite la UNI EN 12665 del 2018, che si occupa anche di identificare i principali requisiti illuminotecnici degli ambienti. Tuttavia, risulta degna di nota, soprattutto dal punto di vista dell'analisi della luce naturale, la normativa danese CEN/TC 169/WG 11 che va ad analizzare tutti i fattori da tenere in considerazione ed i metodi di calcolo da utilizzare durante la progettazione degli spazi. A livello nazionale, viene ancora utilizzato il DM del 05/07/1975 art.5 e successivi, per l'identificazione dei valori limite e del metodo calcolo del FLDm.

La luce artificiale, oltre ad essere regolata nella 12665 per le sue caratteristiche generali, è stata normata attraverso la UNI EN 12464 sempre del 2011 per quanto riguarda l'illuminazione nei luoghi di lavoro. Tra gli obiettivi principali della normativa vi sono l'identificazione dei livelli di illuminamento sul piano di lavoro e sulle zone immediatamente circostanti, la distribuzione delle luminanze e la regolazione degli aspetti del colore, ovvero tonalità di luce e temperature di colore consigliate.

Tuttavia, i normatori hanno pensato anche a dare alcune indicazioni su sistemi in grado di aumentare l'efficienza energetica ed anche sulla direzione che la luce artificiale deve avere negli ambienti, in modo da evitare fenomeni di abbagliamento sugli occupanti.

## 2.4 Comfort acustico

Spesso si tende a semplificare il comfort ambientale solo attraverso le adeguate condizioni termo-igrometriche e di qualità dell'aria, tuttavia gli utenti possono percepire una sensazione negativa dello spazio anche per una progettazione scorretta dal punto di vista illuminotecnico (vedi paragrafo 2.3) ed acustico.

L'acustica è quella disciplina che studia come il suono, sotto forma di perturbazione avente carattere oscillatorio, venga generato da una sorgente (potenza sonora), si propaghi attraverso un mezzo elastico (intensità sonora) per essere infine ricevuto da un ascoltatore (pressione sonora).

In ambienti confinati, il comfort acustico, definito come una condizione per cui l'utente non sia disturbato dalla presenza di altri suoni/rumori e non subisca danni all'apparato uditivo, può essere raggiunto esclusivamente attraverso una progettazione attenta sia per gli aspetti di fonoisolamento che di fonoassorbimento. Il primo prende in considerazione le strategie necessarie ad impedire che i rumori prodotti dalle fonti esterne penetrino all'interno dell'ambiente in esame. Mentre il secondo, che ha il compito di migliorare le proprietà acustiche della stanza andando ad assorbire alcune frequenze provenienti dalle fonti interne in modo tale da ridurre l'effetto di riverbero acustico (Serra, 2015).

### 2.4.1 Le grandezze caratteristiche

Fisicamente il suono può essere espresso secondo tre caratteristiche, ovvero l'altezza, l'intensità ed il timbro. La prima descrive l'elevazione di un suono dovuta alla rapidità delle vibrazioni che lo producono, aspetto che consente di distinguere i suoni acuti da quelli gravi; l'intensità è la grandezza che permette di percepire i suoni deboli da quelli forti e fisicamente si esprime come il flusso di energia che, nell'unità di tempo, attraversa una superficie di area unitaria disposta perpendicolarmente alla direzione di propagazione; infine, il timbro delinea la qualità del suono ed è funzione della forma d'onda dello stesso, tra le altre cose permette di distinguere la sorgente di emissione di un determinato suono. Caratterizzata la natura fisica del suono, risulta necessario esplicitare le dinamiche e le motivazioni che hanno portato la comunità scientifica alla trasformazione di un certo valore di pressione [Pa] in un "livello di pressione sonora" [dB].

Tra le principali cause vi è l'ampia gamma di valori operativi che la pressione sonora assume

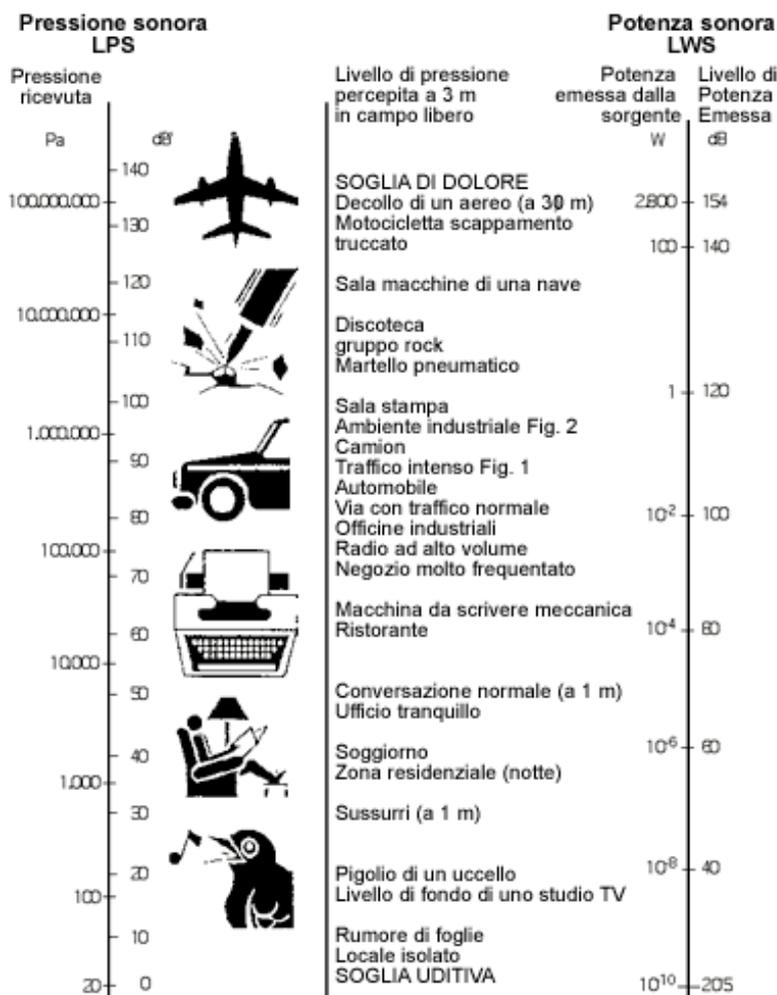


Figura 9. Tabella di riferimento per i diversi livelli di pressione sonora, comprendente il raffronto fra l'espressione in Pascal ed in dB

per esprimere le variabili acustiche. Come si può notare in *Figura 9*, per passare dalla soglia di udibilità alla soglia del dolore la pressione sonora espressa in Pascal varia di diversi ordini di grandezza, ciò comporterebbe una difficile rappresentazione di tali valori che invece vengono riallineati su scala logaritmica in modo tale da ridistribuirne la dispersione. Tale scala va a definire il Livello di Pressione Sonora [dB] e si ottiene dalla formula:

$$L_{Pa} = 10 \log(p/p_o)^2 \quad (2.13)$$

Dove:

$P_a$  è il valore efficace della pressione sonora [Pa];

$p_o$  è il valore efficace della pressione di riferimento, pari a 20  $\mu$ Pa.

Una volta identificato il livello di pressione sonora, bisogna evidenziare che la percezione del suono da parte del sistema uditivo umano non è costante ma varia a seconda della frequenza del suono stesso. In *Figura 10*, si può notare come l'orecchio umano sia tendenzialmente più sensibile alle frequenze medio-alte (più precisamente dai 2.000 ai 5.000 Hz) piuttosto che alle basse.

Inoltre, parallelamente all'analisi dell'intensità, va specificato che il suono presente negli ambienti, dal punto di vista fisico, viene considerato rumore. Il rumore ha la caratteristica di essere composto da un insieme di suoni a diverse frequenze ed intensità che per essere analizzati devono essere scomposti in bande di ottava o terze di ottava, a seconda del grado di dettaglio necessario. Questa scomposizione permette la definizione del livello sonoro globale lineare [dB]:

$$L_{LIN} = 10 \cdot \log \left( 10^{\frac{L_{125}}{10}} + 10^{\frac{L_{250}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{4000}}{10}} \right) \quad (2.14)$$

Tale valore può essere ulteriormente perfezionato andando a ponderarlo secondo ognuna delle frequenze analizzate, ovvero utilizzando la curva A del livello di un suono complesso. Un'operazione che permette di ottenere il livello sonoro globale ponderato A [dB<sub>A</sub>]:

$$L_{POND} = 10 \cdot \log \left( 10^{\frac{L_{125}^*}{10}} + 10^{\frac{L_{250}^*}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{4000}^*}{10}} \right) \quad (2.15)$$

### 2.4.2 Il clima acustico all'interno degli edifici

Da un punto di vista pratico, i suoni che vanno a caratterizzare il clima acustico negli ambienti confinati possono essere divisi in suoni operativi, ovvero legati alle inevitabili attività svolte all'interno degli spazi in esame, ed suoni indesiderati, provocati da attività secondarie interne o da fenomeni esterni su cui i presenti non hanno controllo diretto. Proprio quest'ultime possono essere identificate nel traffico, nelle attività produttive ed in diverse fonti di origine antropica (Perretti, 2013).

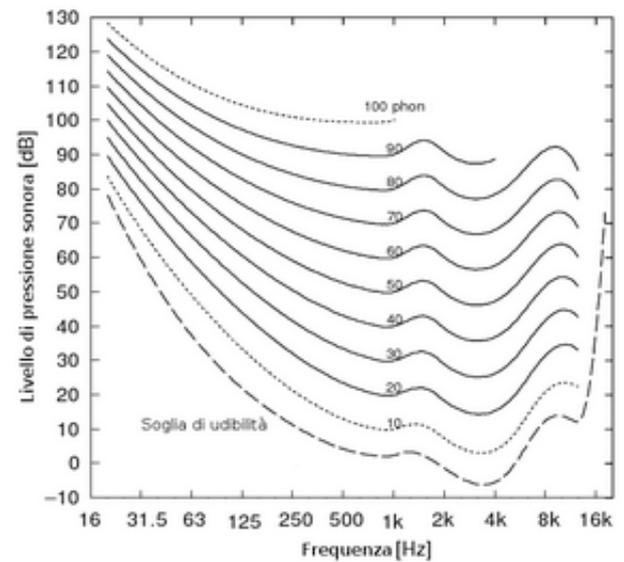


Figura 10. Audiogramma Normale ISO (o di Fletcher e Munson) che rappresenta le curve isofoniche, ovvero aventi uguale intensità soggettiva, per un suono puro in campo libero [phon]

Operativamente e progettualmente possono essere apportate solo misure mitigative per i suoni operativi. Ovvero, soluzioni che prevedono una o più di queste tre azioni:

- Isolamento della sorgente;
- Allontanamento della sorgente dall'ambiente sensibile;
- Isolamento dell'ascoltatore.

Un discorso completamente diverso e separato deve essere fatto per i suoni indesiderati provenienti dall'esterno o dall'interno. I primi sono facilmente schermabili grazie ad una corretta progettazione dell'isolamento acustico degli elementi di confine, mentre i secondi, che solitamente sono diffusi e di origine antropica, possono creare numerosi problemi dato la loro difficile mitigazione e l'impossibilità di isolarli in spazi confinati.

### **2.4.3 Inquadramento Normativo**

Per la progettazione acustica degli edifici la norma di riferimento è la UNI EN ISO 12354 che si occupa principalmente di fonoisolamento e fonoassorbimento, ma anche della corretta risoluzione di determinati nodi costruttivi.

Il testo si divide in sei parti che valutano rispettivamente l'isolamento dal rumore trasmesso per via aerea tra ambienti, l'isolamento acustico al calpestio, l'isolamento acustico o la differenza di livello di pressione sonora di una facciata o di un'altra superficie esterna, la trasmissione del rumore dall'interno all'esterno, il rumore degli impianti tecnici (trattati anche nella UNI EN ISO 16032) ed infine la qualità acustica degli ambienti interni (UNI EN ISO 3382).

Alle norme sopracitate si devono aggiungere ulteriori leggi, introdotte per la corretta posa di sistemi costruttivi quali serramenti tramite la UNI 11296, per evitare problematiche di trasmissione dei rumori, e pavimentazioni galleggianti con la UNI 11516, per ridurre i rumori da calpestio.

Il quadro normativo nazionale ed internazionale sta subendo numerose modifiche ed aggiornamenti da parte di diversi gruppi di studio, per tale motivo, il panorama dell'acustica edilizia può essere considerato in evoluzione costante.

### 3. EXPERIMENTAL FACILITY - Stato dell'Arte

### 3. Experimental facility - Stato dell'arte

Da un punto di vista teorico e normativo, lo studio dei parametri di IEQ ha potuto raggiungere un tale livello di approfondimento anche grazie allo sviluppo di spazi dedicati all'esecuzione di test specifici sui diversi parametri di controllo.

Prendendo in considerazione l'ultimo decennio, si può notare come tali spazi, solitamente definiti testbed o facility, si siano moltiplicati a livello globale in modo da fornire dei laboratori fortemente specializzati sia per sperimentazioni teoriche che per applicazione pratiche. In aggiunta, la grande versatilità di cui queste strutture sono dotate ha permesso a tutti i soggetti interessati, soprattutto Università ed aziende del settore, di concretizzare diversi studi attraverso applicazioni strumentali specifiche.

Nei paragrafi successivi verranno evidenziate le caratteristiche principali delle strutture più utilizzate a livello mondiale, in modo tale da fornire una panoramica generale dello stato dell'arte delle facility sperimentali utilizzate in materia di IEQ.

#### 3.1 Facility analizzate

Per un'analisi completa ed esaustiva dei principali laboratori che sono/sono stati tra i più attivi ed utilizzati a livello mondiale si sono analizzate 12 facility, tra cui:

- Flexlab - Facility for Low Energy eXperiments in buildings (Berkeley-USA);
- MoWiTT - Mobile Window Thermal Test facility (USA);
- AFT - Advanced Facade Testbeds (Berkeley-USA);
- The Cube (Aalborg-DEN);
- MATELab - Mobile Adaptive Technologies Experimental Lab (Cambridge-ENG);
- Energy Flex House (Taastrup-DEN);
- CEA-INES Experimental Houses facility (Chambery-FRA);
- CEA-INES FACADE Tools facility (Chambery-FRA);
- CEA-INES PASSYS Test Cells (Chambery-FRA);
- VERU - Modular Test Facility for Energy and Indoor Environments (Holzkirchen-GER);
- KUBIK - Intelligent Energy Building (ESP);
- SENSELab (Delft-NED).

ID	LABORATORIO	TEAM	UBICAZIONE	TIPO UBICAZIONE	POSIZIONE	LARGHEZZA (m)	PROFONDITA' (m)	ALTEZZA (m)	AREA (mq)	VOLUME (mc)	AMBIENTE	SUP. OPACA (mq)	SUP. TRASPARENTE (mq)	ORIENTAMENTO	RUOTABILE
1	FlexLab	LBNL	Berkeley (USA)	Suburbanc	Misto	12.20	9.20	4.60	112.24	516.30	Divisibile	13.06	15.00	Sud-Ovest	Si
2	MoWITT (1985-2000)	LBNL	-	-	Outdoor	3.00	2.40	2.40	7.20	17.28	Cella unica	-	-	-	Si
3	Advanced Facade Testbed	LBNL	Berkeley (USA)	Extraurbanc	Misto	3.05	4.57	3.35	13.94	46.69	Cella unica	-	10.22	-	Si
4	The Cube	DCE	Aalborg (DAN)	Extraurbanc	Outdoor	6.00	6.00	6.00	36.00	216.00	Cella unica	16.63	19.37	Sud	No
5	MATELab	gFT	Cambridge (UK)	Extraurbanc	Outdoor	4.50	6.50	3.00	29.25	87.75	Divisibile	40.62	25.38	Sud	No
6	Energy Flex House	DTI	Taastrup (DAN)	Extraurbanc	Outdoor	-	-	-	432.00	-	Divisibile	-	-	-	No
7	INCAS	INES	Le Bourget du Lac (FRA)	Extraurbanc	Outdoor	-	-	-	330.00	-	Cella unica	-	-	-	No
8	FACT	INES	Le Bourget du Lac (FRA)	Extraurbanc	Outdoor	7.80	9.80	8.34	76.44	637.51	Divisibile	-	30.00	-	No
9	PASSY	INES	Le Bourget du Lac (FRA)	Extraurbanc	Outdoor	3.00	6.00	3.30	18.00	59.40	Cella unica	10.8	-	Sud	Si
10	VERU	IBP	Holzkirchen (GER)	Extraurbanc	Misto	12.00	12.00	-	144.00	-	Divisibile	-	72.00	-	No
11	KUBIK	Tecnalia	Bilbao (ESP)	Extraurbanc	Outdoor	10.00	10.00	10.00	100.00	1000.00	Divisibile	-	-	-	No
12	SenseLat	TU/e Delft	Delft (NED)	Urbano	Indoor	10.75	9.15	4.70	98.36	462.30	Divisibile	153.06	34.00	-	No

LEGENDA	
Dati verificati	AAA
Dati ipotizzati	AAA

Tabella 3. Confronto caratteristiche generali facility

A completamento di questo paragrafo si allegano in appendice [Appendix A] le schede specifiche e le tabelle di confronto dei laboratori sopracitati, analizzati mettendone in evidenza cinque caratteristiche principali, ovvero:

- **Applicazioni.** Test ed utilizzi principali della facility;
- **Caratteristiche di layout.** Dimensioni e disposizione spaziale degli ambienti in relazione alla tipologia di utilizzo ed al contesto;
- **Caratteristiche d'involucro.** Principali caratteristiche degli elementi architettonici d'involucro opaco e trasparenti installati;
- **Caratteristiche impiantistiche.** Tipologia e caratteristiche dei principali sistemi tecnologici, tra cui impianto di riscaldamento/raffrescamento, ventilazione illuminazione;
- **Caratteristiche dei sensori.** Sistemi di rilevazione interni ed esterni utilizzati a seconda dei test da effettuare.

## 3.2 Caratteristiche generali

### 3.2.1 Ubicazione

La grande maggioranza delle facility attualmente attive sono gestite da gruppi di ricerca universitari. Per questo motivo, sembrerebbe logico ipotizzare il posizionamento del laboratorio nelle immediate vicinanze del campus universitario, oppure all'interno degli stessi edifici tramite soluzioni di tipo box in a box. Tuttavia, osservando la localizzazione delle varie testbed, si nota come la quasi totalità delle strutture sia installata in ambienti extraurbani.

Tale ubicazione è dettata da una serie di requisiti fondamentali, primo fra tutti la necessità di posizionare la struttura in ambienti liberi su tutte le esposizioni e soprattutto in luoghi privi di ostruzioni di qualsivoglia natura. Inoltre, la localizzazione in ambienti poco o per nulla urbanizzati riduce i problemi legati all'inquinamento atmosferico, per la valutazione della qualità dell'aria interna, ed all'aumento delle temperature localizzato, per ambienti urbani con elevato tasso di cementificazione.

Figura 11-12. Due diverse tipologie di ubicazioni INCAS (FRA) e SenseLab (NED)



### 3.2.2 Struttura ed involucro esterno

Per una corretta progettazione della struttura portante, l'intelaiatura delle facility sperimentali necessita di essere progettata con due accorgimenti, ovvero la rapidità di montaggio/smontaggio e la modularità. Questi aspetti sono di fondamentale importanza per dare alla struttura le giuste caratteristiche di flessibilità e versatilità in grado di farla adattare velocemente, tramite interventi poco invasivi, mirati ed economici, alle modifiche funzionali richieste dai diversi team di ricerca.

Per questo motivo, le facility sono realizzate tramite intelaiature strutturali regolari, a base quadrata o rettangolare, ad uno o più piani fuori terra. Il materiale delle strutture in elevazione è solitamente l'acciaio o il legno, che viene ancorato a platee di fondazione in calcestruzzo armato. Tale configurazione, oltre a fornire grande stabilità, conferisce al laboratorio la possibilità di modificarne rapidamente la fisionomia, interna ed esterna, senza necessariamente intaccare lo scheletro strutturale.

Altro aspetto di fondamentale importanza, che va a sommarsi all'adattabilità interna e di layout, è la possibilità di sostituire i principali elementi di chiusura esterna, ovvero serramenti e pareti. Questo requisito, fortemente legato alla modularità strutturale ed ai sistemi tecnologici adottati, fornisce ulteriori livelli di versatilità ai laboratori, dandogli la possibilità di cambiarne completamente la configurazione e le caratteristiche dell'involucro esterno a seconda dei test da eseguire.



Figura 13. Telaio strutturale e pannelli di chiusura FACT (FRA)

### 3.2.3 Dotazione impiantistica

Dal punto di vista impiantistico le facility possono essere dotate di una grande varietà di sistemi tecnologici per il controllo di tutte le variabili di comfort interno, produzione ed efficientamento energetico.

Tutte le strutture sono dotate di impianti di climatizzazione e riscaldamento, che sfruttando tecnologie ad acqua o ad aria (ovvero pannelli radianti o ventilconvettori), per il controllo della temperatura interna. Mentre, il controllo sui ricambi d'aria, ove presente, è affidato a sistemi di ventilazione meccanica oppure in rari casi è ottenuto tramite ventilazione naturale.

In aggiunta, molte strutture spesso presentano installati sistemi di illuminazione artificiale per lo studio del comfort illuminotecnico ed anche tecnologie removibili per il controllo solare, interne o esterne.



Figura 14. Dotazione impiantistica base FlexLab (USA)

Queste dotazioni comuni molte volte vengono integrate con ulteriori impianti, quali sistemi di diffusione audio, sistemi per la produzione di acqua calda sanitaria, tecnologie per la produzione di energia elettrica, ecc., in grado di ampliare il controllo su parametri specifici e la gamma di misurazioni effettuabili all'interno del laboratorio.

### 3.2.4 Sensoristica

I rilevatori sono sicuramente tra i componenti più importanti delle facility sperimentali e possono essere classificati in base al loro punto di installazione, ovvero all'interno della test room oppure all'esterno del laboratorio.

All'interno del laboratorio la sensoristica principale è costituita da una serie di rilevatori in grado di registrare diverse tipologie di temperature (tra cui la temperatura dell'aria, la stratificazione verticale delle temperature, le temperature delle superfici, ecc.), le caratteristiche dell'aria interna tramite una combinazione di vari fattori, l'umidità ed i livelli di illuminamento. Inoltre, è altrettanto comune l'installazione di sensori per la rilevazione del comfort acustico, della presenza di occupanti ed anche strumenti per il monitoraggio dei consumi energetici della struttura.

Per quanto riguarda i sensori esterni, è molto

comune l'installazione di stazioni meteorologiche complete nelle immediate vicinanze della facility, così da poter rilevare una grande moltitudine di dati relativi alle condizioni climatiche ed all'esposizione solare nei vari momenti della giornata. In aggiunta, per alcune tipologie di studi condotti dai vari team di ricerca si è reso necessario l'installazione di strumenti per il rilevamento delle temperature superficiali esterne, del flusso termico attraverso gli elementi di chiusura esterna e delle precipitazioni atmosferiche.



Figura 15. Sensori installati presso il modulo sperimentale dell'Energy Flex House (DEN)



Figura 16. Calibrazione sensori presso il FlexLab (USA)

### 3.3 Misurazioni e test effettuati

Se si guarda ai laboratori da un punto di vista prettamente sperimentale, risulta necessario classificarli in base al loro periodo di costruzione. Infatti, è evidente che per le prime facility, costruite tra la fine degli anni '90 e gli inizi del 2000, la progettazione fosse incentrata nell'esecuzione di un test specifico, con una conseguente bassa flessibilità della struttura nell'accogliere altre tipologie di test.

Un trend che è stato superato negli ultimi anni attraverso la realizzazione di laboratori moderni e flessibili, in grado di adattarsi velocemente a qualsiasi tipologia di bisogno per l'esecuzione del test. Inoltre, una conseguenza diretta di tale flessibilità sperimentale è la sopravvivenza e l'utilizzo continuativo della struttura. Tale aspetto dà ancora più importanza ad una corretta progettazione preliminare in grado di evitare l'obsolescenza tecnologica e funzionale che, nel tempo, comporterebbe una rapida dismissione del laboratorio e la necessità di costruirne uno nuovo per test di diversa natura.

Fatte queste doverose premesse, all'interno delle facility vengono svolti principalmente test sui parametri di IEQ, analisi su elementi di chiusura (trasparenti o opachi), studi per nuove tecnologie di riscaldamento-raffrescamento e osservazioni su sistemi per la produzione di energia tramite fonti rinnovabili e non. Inoltre, in alcuni laboratori, gli spazi vengono utilizzati da persone reali così da osservare l'interazione fra l'utente e ambiente ed anche per lo studio di arredi ergonomici.

Inoltre, negli ultimi anni, con lo sviluppo sempre maggiore di software per la modellazione energetica, alcuni di questi laboratori sono stati usati come strumenti per la validazione scientifica di programmi informatici in grado di effettuare simulazioni energetiche complesse.



Comfort



Componenti



Soluzioni  
impiantistiche



Produzione  
energia



Interazione  
utente



Software

## 4. PROGETTAZIONE H-IEQLab

### 3. Health - Indoor Environmental Quality Lab (H-IEQLab)

Con le principali Università ed i grandi centri di ricerca mondiali che si sono dotati di facility sofisticate, anche il Politecnico di Torino ha iniziato la progettazione e le consultazioni con le possibili aziende esecutrici per la costruzione di un laboratorio sperimentale (H-IEQ Lab) utilizzabile per lo studio di diversi fattori legati alla salute ed al comfort interno.

Nel paragrafi successivi verranno analizzati i principali requisiti identificati a priori da docenti e personale interessato nello svolgimento di test all'interno della struttura, ma anche le soluzioni architettoniche, edilizie, impiantistiche e di misurazione adottate.

#### 4.1 Requisiti generali

Come precedentemente accennato il principale scopo sperimentale del laboratorio è quello di fornire una testbed dove poter effettuare studi riguardanti la salute degli occupanti ed i parametri di IEQ, ovvero di comfort termico, visivo, acustico ed il controllo sui parametri di qualità dell'aria interna.

Tuttavia, a questo scopo fondamentale possono essere aggiunti ulteriori due aspetti che hanno portato alla necessità di costruire una facility di questo tipo. Il primo per condurre studi su sistemi di interazione e gestione coordinata tra gli elementi d'involucro e gli impianti di illuminazione e climatizzazione. Mentre il secondo per sperimentazioni su ipotesi di definizione avanzata dell'ambiente costruito per il comfort.

Ai requisiti di carattere sperimentale devono essere aggiunte ulteriori caratteristiche funzionali e costruttive in grado di fornire allo spazio un elevato grado di adattabilità e flessibilità funzionale. Per questi motivi, il laboratorio è stato strutturato sulla base di tre ambienti, con accesso indipendente, in grado di ospitare una sala delle misurazioni (divisibile in due ambienti speculari), una control room per il monitoraggio, anche in real-time, dei dati raccolti ed infine un ambiente per gli impianti.

Dal punto di vista costruttivo invece, la facility è stata progettata sulla base di un sistema a telaio a secco in legno, formato da montanti ad intervalli regolari e da orizzontamenti in pannelli Crosslam. Con particolari accorgimenti, che comportano l'inserimento di travi di bordo superiori ed inferiori, tale sistema strutturale permette la realizzazione di strutture modulari con elementi d'involucro verticali facilmente sostituibili.

#### 4.1.1 Requisiti edilizi

Se i requisiti generali rispecchiano la volontà di creare un ambiente con un elevato livello di flessibilità ed in grado di poter essere sfruttato per condurre una moltitudine di test. Sotto il punto di vista edilizio, i requisiti prestazionali possono essere riassunti all'interno di queste categorie:

- Dimensionali
- Funzionali
- Strutturali e di supporto
- Termici
- Tenuta all'aria
- Acustici
- Illuminotecnici
- Materiale

L'identificazione dei requisiti dimensionali, funzionali e strutturali è da collegarsi alla progettazione delle aperture sui vari orientamenti. Si vanno così a definire non solo l'estensione dei serramenti ma anche la scansione delle specchiature che li compongono e la possibilità di quest'ultimi di essere aperti (in toto o parzialmente) o no.

Dal punto di vista termico, i requisiti prestazionali richiesti sono dei valori limite di trasmittanza e la risoluzione dei ponti termici, attraverso l'isolamento esterno. La trasmittanza media richiesta per l'involucro è pari a  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  con valori specifici per:

- Pavimento	$0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Chiusure opache	$0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Chiusure trasparenti	$1.40 \text{ W/m}^2\text{K}$ (con $U_g$ : $1.10 \text{ W/m}^2\text{K}$ )
- Doppia pelle vetrata	$1.00 \text{ W/m}^2\text{K}$ (con $U_g$ : $0.70 \text{ W/m}^2\text{K}$ )
- Porte	$1.00 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Chiusura orizzontale superiore	$0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$

Inoltre, sono state date delle specifiche anche per il fattore solare  $g$  dei serramenti pari a  $0.55$  e, in caso di installazione, anche i dispositivi di controllo solare dovranno avere specifiche caratteristiche in relazione alla tipologia di installazione, ossia schermature interne, esterne o in intercapedine.

Il requisito di tenuta all'aria dell'involucro esterno è stato fissato su un valore fisso, sia per le chiusure opache che per quelle trasparenti, pari a  $0.30 \text{ Vol/h}$  o  $3 \text{ l/sm}^2$ , mentre per la partizione interna mobile il valore è stato imposto a  $0.50 \text{ Vol/h}$  o  $5 \text{ l/sm}^2$ .

Infine, i requisiti prestazionali a livello acustico hanno portato alla definizione del potere fonoisolante minimo dei divisori e delle chiusure, pari a:

- Pavimento	54 dB
- Chiusure opache	65 dB
- Chiusure trasparenti	45 dB
- Doppia pelle vetrata	45 dB
- Porte	45 dB
- Chiusura orizzontale superiore	60 dB
- Partizione interna mobile	65 dB

Un altro parametro acustico a cui è stata posta particolare attenzione è l'attenuazione dei livelli di rumore di calpestio, con un valore fissato pari a 25 dB, per isolare acusticamente l'ambiente di misura rispetto alle vibrazioni provenienti dagli impianti in intercapedine. A completamento di tale aspetto, sono state fornite indicazioni per la riduzione delle vibrazioni provenienti dal terreno, attraverso la desolidarizzazione dei plinti.

#### 4.1.2 Sistemi impiantistici

Il mantenimento di determinate condizioni termoigrometriche e di comfort interno è una necessità di fondamentale importanza per poter condurre i test all'interno della facility. Per tale motivo, sono stati studiati e definiti numerosi requisiti impiantistici che hanno il compito di fornire una struttura in grado di saper far fronte positivamente ai bisogni sperimentali e di flessibilità funzionale dei team di ricerca.

I requisiti proposti si vanno a sommare a quelli edilizi in modo da caratterizzare i sistemi tecnologici, ovvero gli impianti di climatizzazione, ventilazione, energia elettrica ed illuminazione, attraverso la potenza generata, il funzionamento e la struttura di supporto. Il sistema di climatizzazione e ventilazione degli ambienti di misura, ovvero l'impianto HVAC, è stato pensato sia per il funzionamento attraverso sistemi ad acqua che con sistemi ad aria. Nel primo caso si sfruttano tecnologie a pannelli radianti, posti a soffitto o a pavimento, e travi calde/fredde, mentre nel secondo caso l'emissione è gestita attraverso travi radianti attive con immissione di aria attraverso plenum posti al di sopra della postazione di lavoro o sul perimetro. Rimane importante sottolineare come in entrambi i casi sia stato espressamente richiesto un sistema di regolazione indipendente della portata d'aria o d'acqua, in modo da gestirne la potenza complessiva. In aggiunta, gli impianti dovranno essere dotati di valvole di intercettazione e raccordi svitabili per permettere modifiche celeri ed economiche dei sistemi di emissione.

Infine, l'impianto HVAC dovrà essere dotato di scambiatore di calore, gruppo frigo ed una serie di accumulatori inerziali a fini di stabilizzatori.

Per quanto riguarda l'impianto elettrico e di illuminazione, i requisiti sono sicuramente poco stringenti ed invasivi rispetto a quanto precedentemente indicato per la climatizzazione degli spazi. Infatti, è stata solo definita la necessità di avere a disposizione binari e canaline elettrificate all'interno del controsoffitto per poter provvedere all'installazione degli apparecchi illuminanti necessari.

#### **4.1.3 Metodi di rilevamento – Sensoristica**

Un discorso analogo e parallelo, rispetto a quanto espresso per i requisiti dei sistemi impiantistici, può essere fatto per i metodi di rilevamento e la sensoristica necessaria per la raccolta dei dati.

A livello preliminare, ciò che viene richiesto alla facility è di essere completamente flessibile ed equipaggiabile con varie tipologie di sensori in grado di rilevare e mappare il grado di comfort termico, di qualità dell'aria, illuminotecnico, acustico e di interazione con l'occupante. Solo con una corretta predisposizione della componente di rilevazione si ottiene una struttura ready to use in grado di essere velocemente preparata per la conduzione dei vari test.

#### **4.1.4 Requisiti a confronto**

Per concludere quest'analisi preliminare sulle caratteristiche del laboratorio si allegano in appendice [Appendix B] alcune tabelle che riassumo e mettono in evidenza i requisiti di partenza dell'HIEQLab per poi metterli a confronto con lo stato dell'arte delle facility precedentemente analizzate.

## 4.2 Progettazione del laboratorio

### 4.2.1 Ubicazione

Il laboratorio HIEQLab verrà posizionato nella zona nord di Torino presso l'Environmental Park (Via Livorno n. 60) in un'area pianeggiante alle coordinate 45.0870, 7.6740.

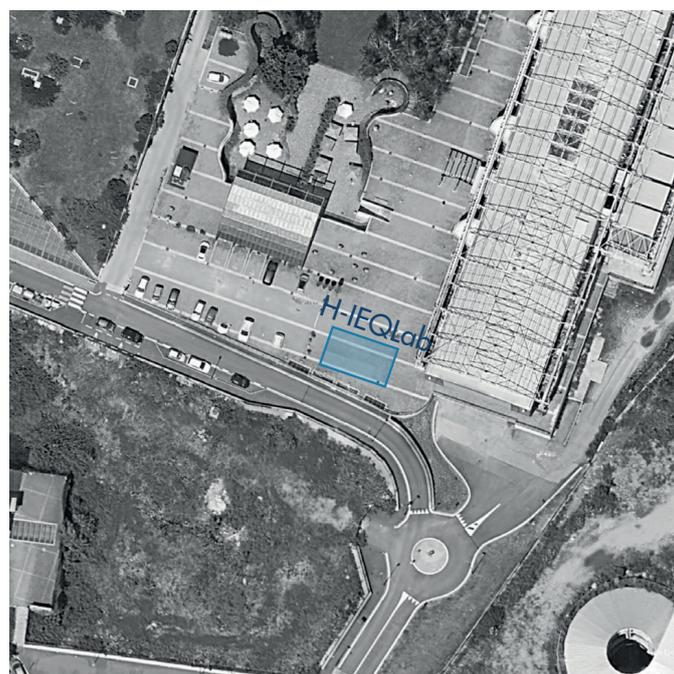
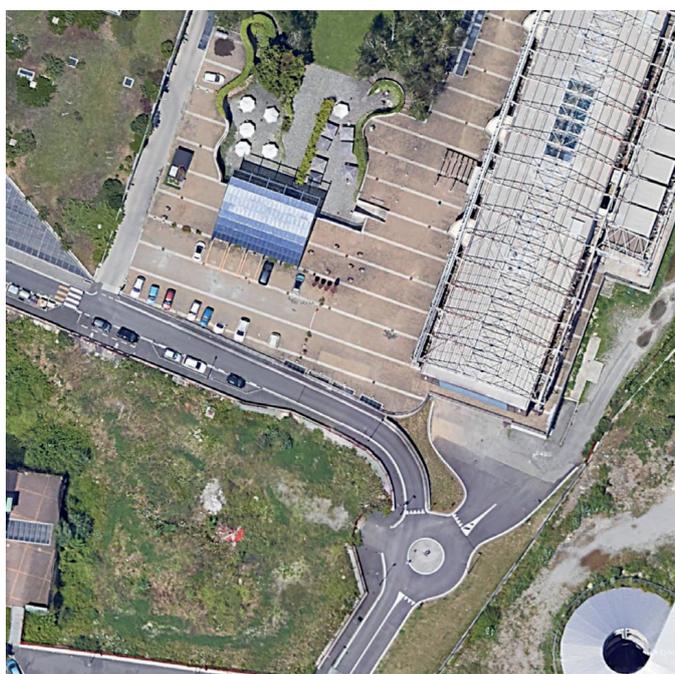
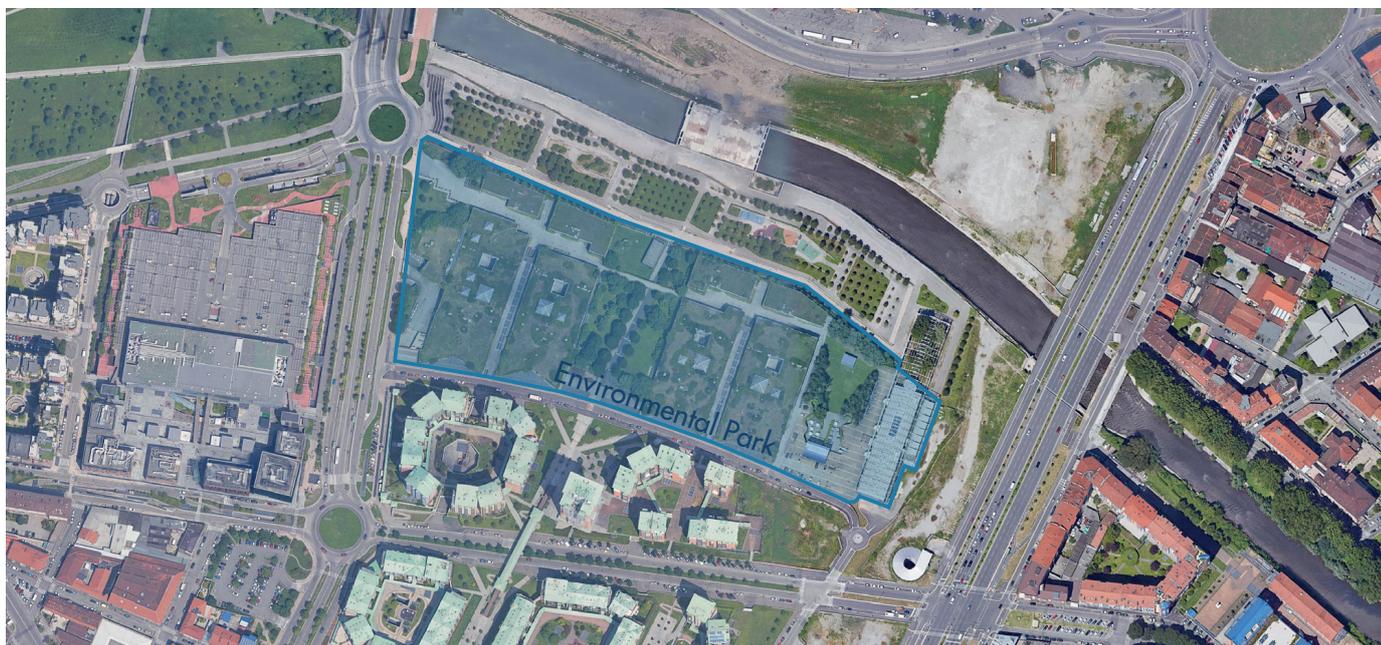


Figura 17. Viste satellitari dell'ubicazione del laboratorio

### 4.2.2 Progetto architettonico

Il volume della facility si sviluppa da un impronta rettangolare di base 7.0x13.0 metri per un'altezza di 4.5 metri. A questo ingombro vpp è necessario aggiungere una struttura di copertura curva che incrementa l'ingombro totale su piano orizzontale fino a 8.30x13.60 metri.

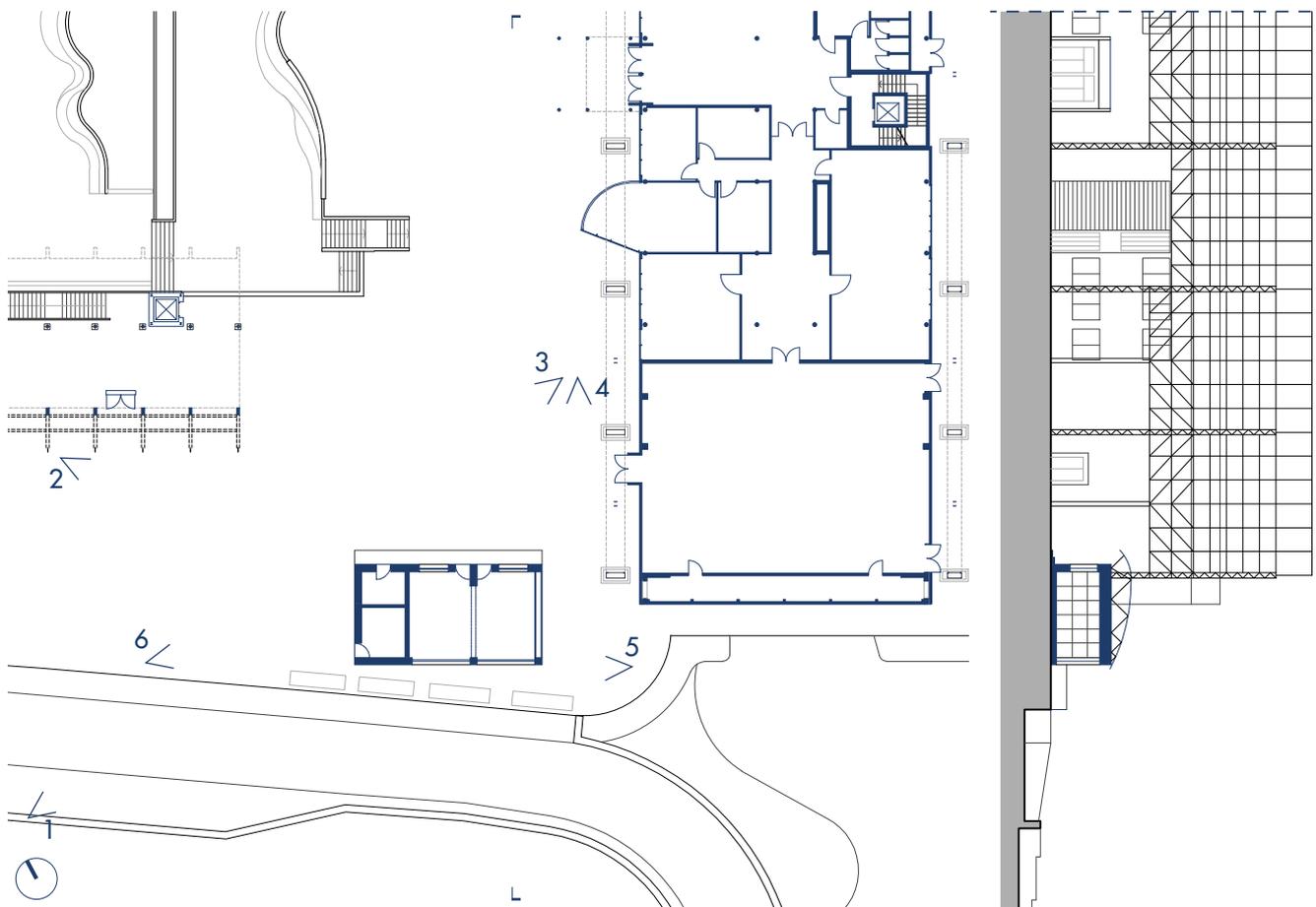


Figura 18. Attacco a terra e sezione territoriale (scala 1:500) con immagini di contesto



La progettazione architettonica del volume ha seguito fedelmente quanto richiesto dal punto di vista prestazionale. La facility è stata configurata su tre ambienti in modo da ospitare una sala delle misurazioni, che può essere divisa in due ambienti aventi le stesse caratteristiche dimensionali ma differenti per esposizioni ed elementi d'involucro, un ambiente per il monitoraggio real-time ed lo storage dei dati raccolti ed un ultimo spazio riservato alle apparecchiature ed agli impianti.

L'ambiente di misura è configurato con la chiusura verticale sud che ospita due superfici vetrate di grandi dimensioni (4.0x3.0m) e la chiusura ad est realizzata tramite doppia pelle vetrata avente dimensioni 6.0x3.0m con intercapedine da 0.50 metri. Per quanto riguarda le chiusure verticali rimanenti, a nord si trovano le due porte necessarie per accedere alla sala e due superfici vetrate di medie dimensioni (2.0x1.90m ognuna) mentre ad ovest la parete è confinante con la control room e la sala degli impianti, quest'ultime accessibili rispettivamente da una porta posta su lato ovest ed una su lato nord. Inoltre, per rispettare i requisiti minimi da normativa, la chiusura verticale ovest ospita una finestra di aereazione rettangolare (0.70x1.90m) in corrispondenza del locale impianti.

La struttura è rialzata da terra tramite un basamento di circa 0.40m che consente il passaggio delle dorsali impiantistiche e l'installazione, su pavimento flottante, delle serpentine o dei pannelli radianti. Un discorso analogo può essere fatto per il controsoffitto della struttura, costituito dalla chiusura orizzontale con intradosso a 3.50m e controsoffitto, che porta l'altezza utile del laboratorio a 3.0m, in grado di ospitare le dorsali impiantistiche, le apparecchiature tecnologiche per l'immissione di aria in ambiente ed eventualmente i pannelli radianti.

Con funzione di copertura è stata posizionata una sorta di tettoia curva, realizzata tramite pannelli prefiniti e supportata da quattro travi reticolari lineari, che ha il compito di schermare la chiusura orizzontale superiore della facility dalla radiazione solare.

Per concludere, la definizione architettonica dell'HIEQLab non può che essere guidata dai requisiti prestazionali e dalle necessità sperimentali in grado di massimizzare la funzionalità e l'economicità della struttura. Motivazioni che portano ad un volume semplice, sia dal punto di vista dimensionale che materico, e come accennato ready to be use.

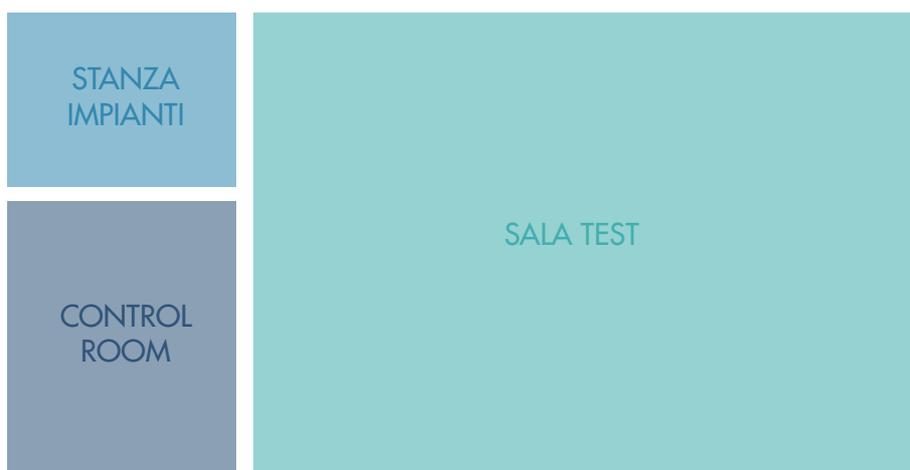
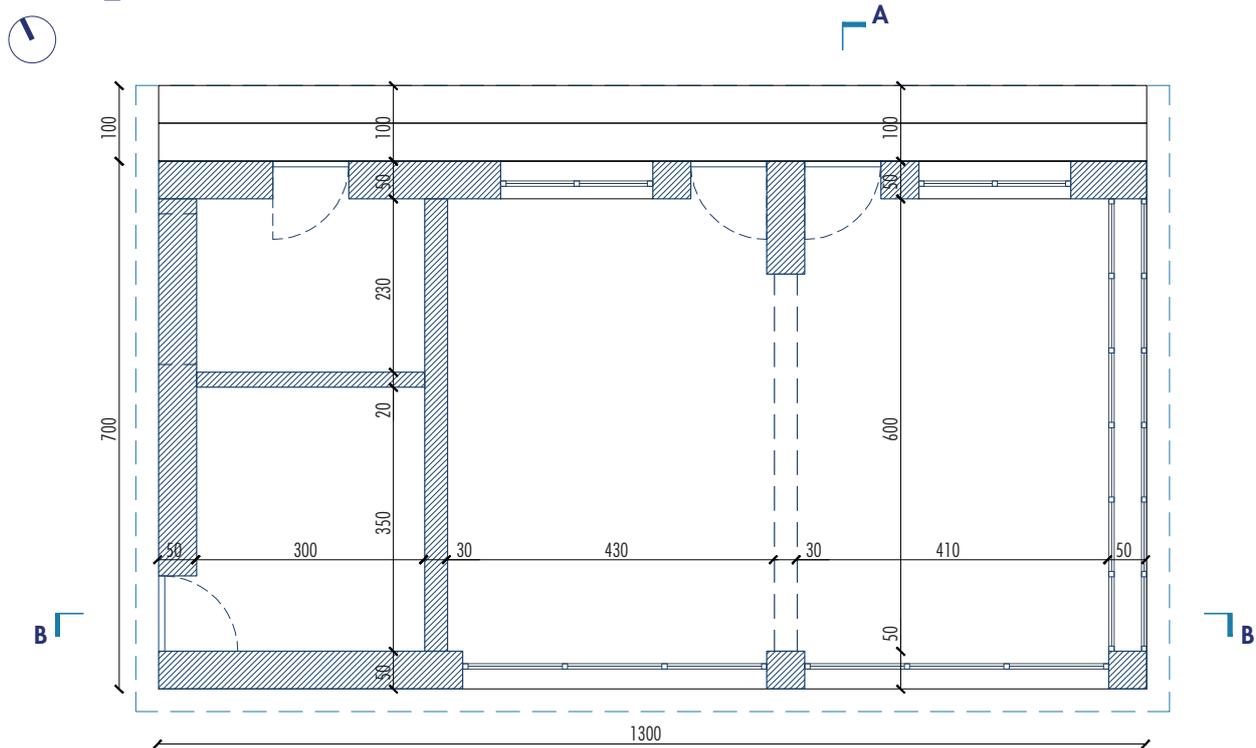
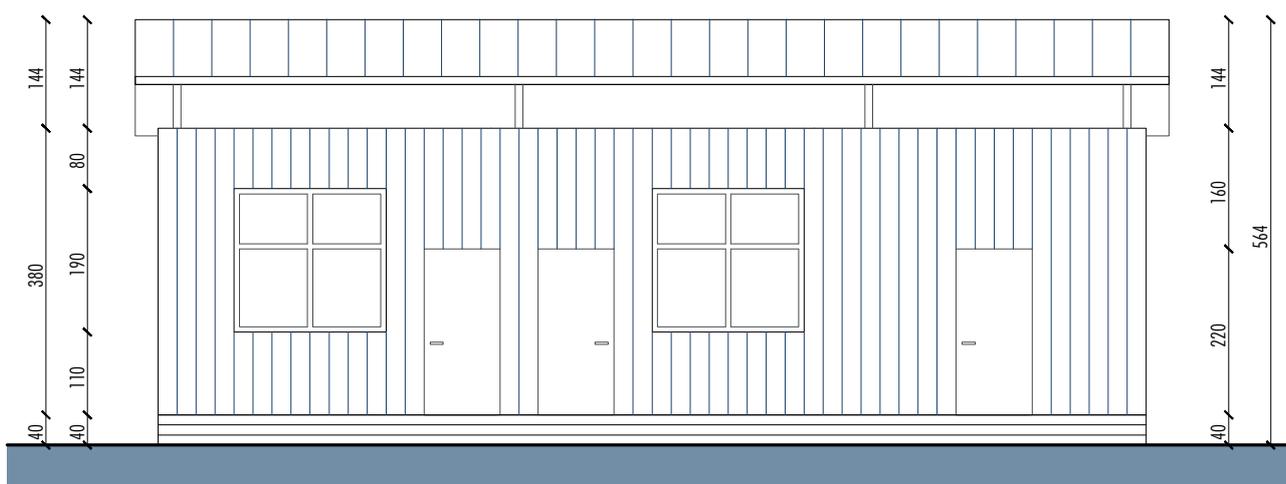


Figura 19. Schema compositivo funzionale del laboratorio

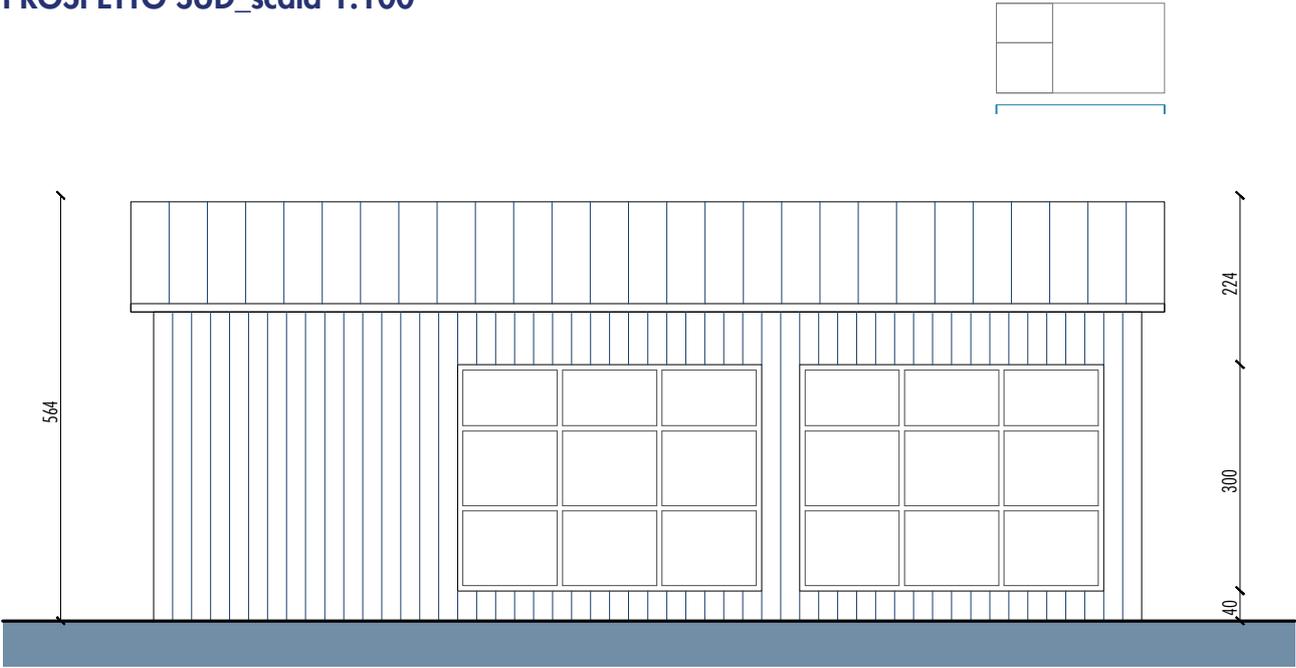
PIANTA\_scala 1:100



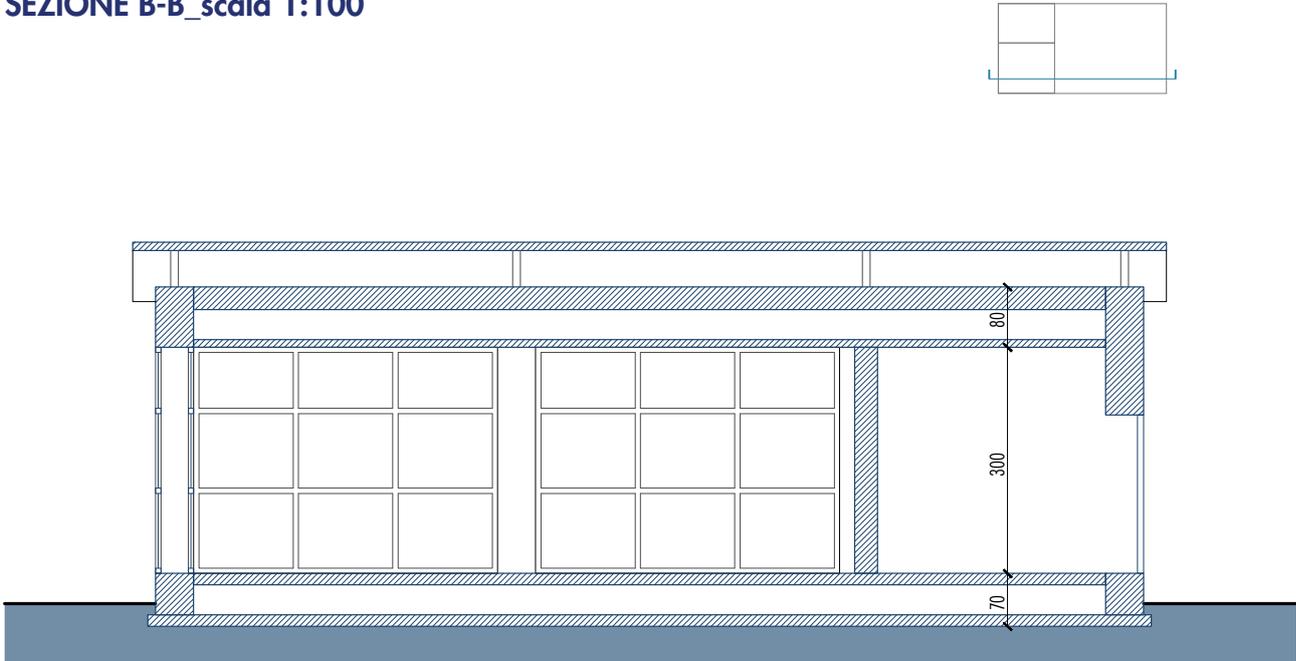
PROSPETTO NORD\_scala 1:100



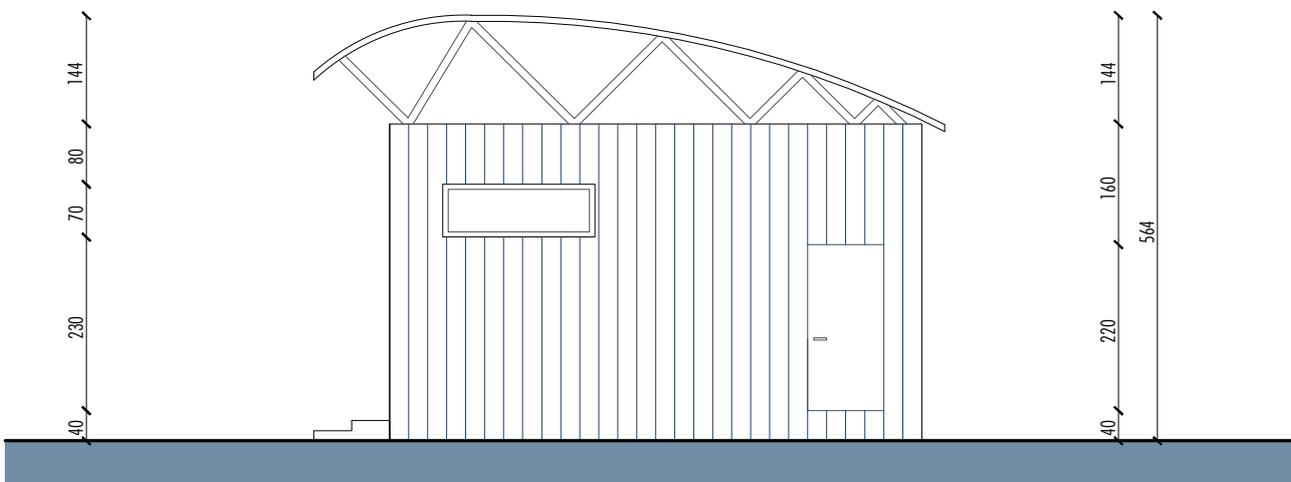
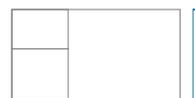
**PROSPETTO SUD\_scala 1:100**



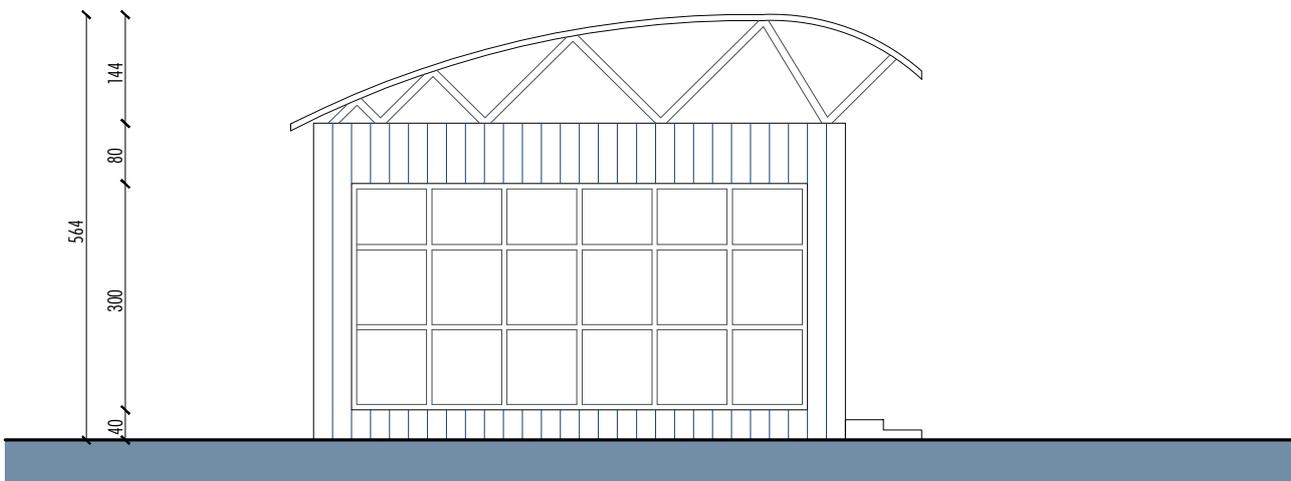
**SEZIONE B-B\_scala 1:100**



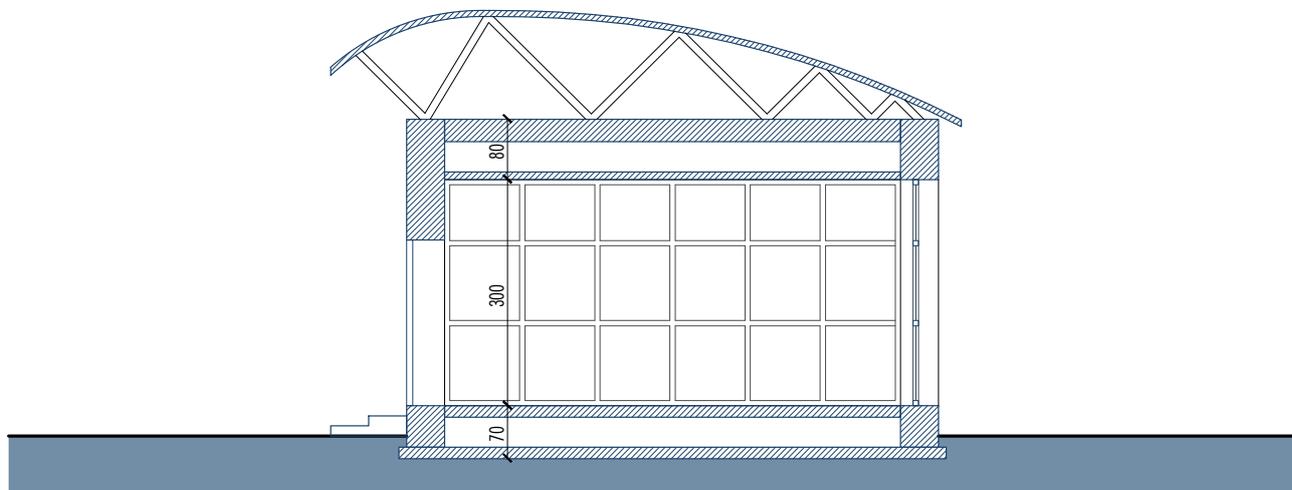
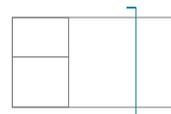
### PROSPETTO EST\_scala 1:100



### PROSPETTO OVEST\_scala 1:100



**SEZIONE A-A\_scala 1:100**

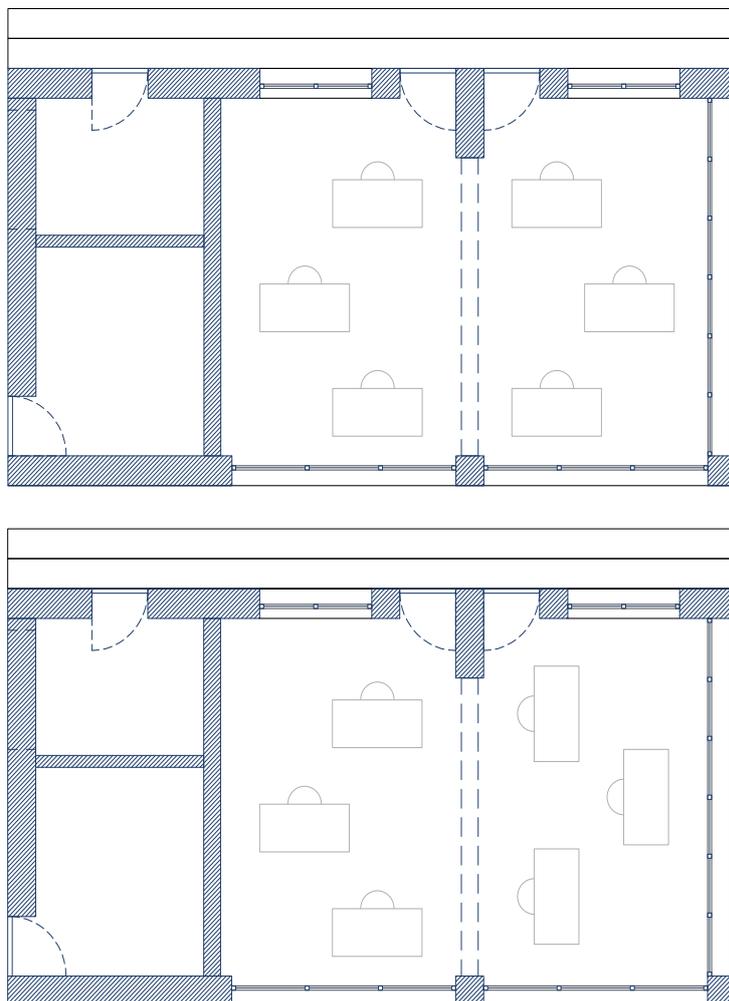


**4.2.3 Layout interno**

La configurazione interna del laboratorio è stata progettata per simulare un ambiente adibito ad ufficio. Ipotizzando che la sala dei test possa essere utilizzata sia come ambiente unico sia divisa in due spazi identici, i layout corrispondenti possono essere ragionevolmente pensati per poter ospitare fino ad un massimo di sei postazioni lavorative variamente disposte. La postazione lavorativa è da intendersi formata da una scrivania di dimensioni standard (circa 80x160cm) accompagnata da una seduta e vari dispositivi, come computer fisso, laptop privato ed una stampante (per ogni postazione o comune nell'ambiente).

In Figura 20, si possono notare alcuni layout con scrivanie che affacciano rispettivamente verso la parete sud o verso la doppia pelle vetrata della parete est.

Figura 20. Disposizione interna



#### 4.2.4 Soluzioni impiantistiche

##### *Impianto elettrico*

Per quanto riguarda l'impianto elettrico, la distribuzione delle dorsali è funzionale all'installazione di corpi illuminanti a soffitto e schermature automatiche (interne o esterne). Tuttavia, nell'ottica di prevedere la giusta flessibilità sperimentale ed eventuali usi alternativi della struttura che comportino la presenza di occupanti all'interno, l'ambiente dei test può essere equipaggiato con:

- Gruppi prese al di sotto delle postazioni di lavoro (prese forza e prese dati);
- Prese di servizio nell'ambiente;
- Ulteriore apparecchiatura di illuminamento da scrivania (task lighting).

Naturalmente, la presenza o l'assenza di occupanti all'interno degli ambienti comporta una serie di accorgimenti da adottare per fare in modo che, senza utenti, la struttura si "accenda-spenga" (non solo a livello di luci ma anche per schermature ed ulteriori sistemi) in maniera del tutto automatica. Mentre, se la volontà è quella di avere feedback rispetto all'utilizzo degli spazi da parte delle persone e l'interazione fra quest'ultime e gli impianti, si possono progettare sistemi più tradizionali che gli occupanti gestiscono secondo le loro necessità.

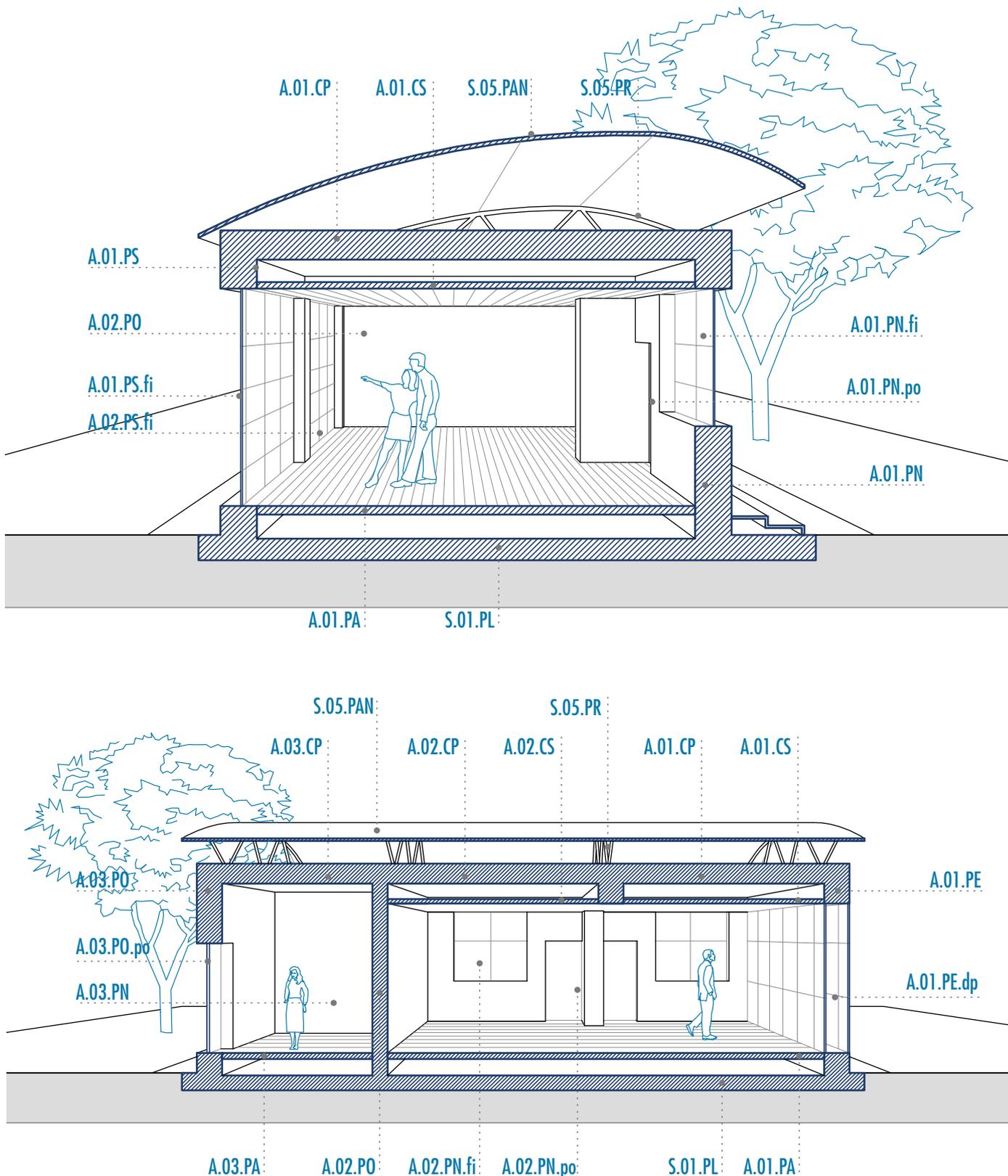
##### *Impianto HVAC*

Come anticipato nel paragrafo dei requisiti impiantistici, il laboratorio è strutturato in modo tale da permettere la climatizzazione ed il riscaldamento degli ambienti sia tramite sistemi ad acqua che tramite sistemi ad aria. Tuttavia, come configurazione iniziale, l'HIEQLab è stato configurato tramite l'utilizzo di un sistema classico di pannelli radianti installati a pavimento, con suddivisione per zone, e collegati ad una pompa di calore. A questi pannelli, in grado di gestire sia il caldo che il freddo e che possono essere posizionati anche a parete o a soffitto a seconda delle necessità, si va ad accoppiare un sistema di ventilazione meccanica controllata in modo da controllare i volumi di ricambio d'aria in ambiente. Tale impianto è gestito da macchine specifiche con immissione tramite plenum di mandata a soffitto situati al di sopra delle postazioni di lavoro.

### 4.2.5 Work Breakdown Structure

Per rendere i passaggi successivi univoci e di facile lettura è stata redatta la Work Breakdown Structure della facility [Appendix C], suddivisa per componenti architettonici, componenti strutturali, sistemi impiantistici e sensoristica. Qui di seguito se ne propone un estratto, in modo da contestualizzare le principali stringhe alfanumeriche proposte con i rispettivi componenti che verranno successivamente analizzati.

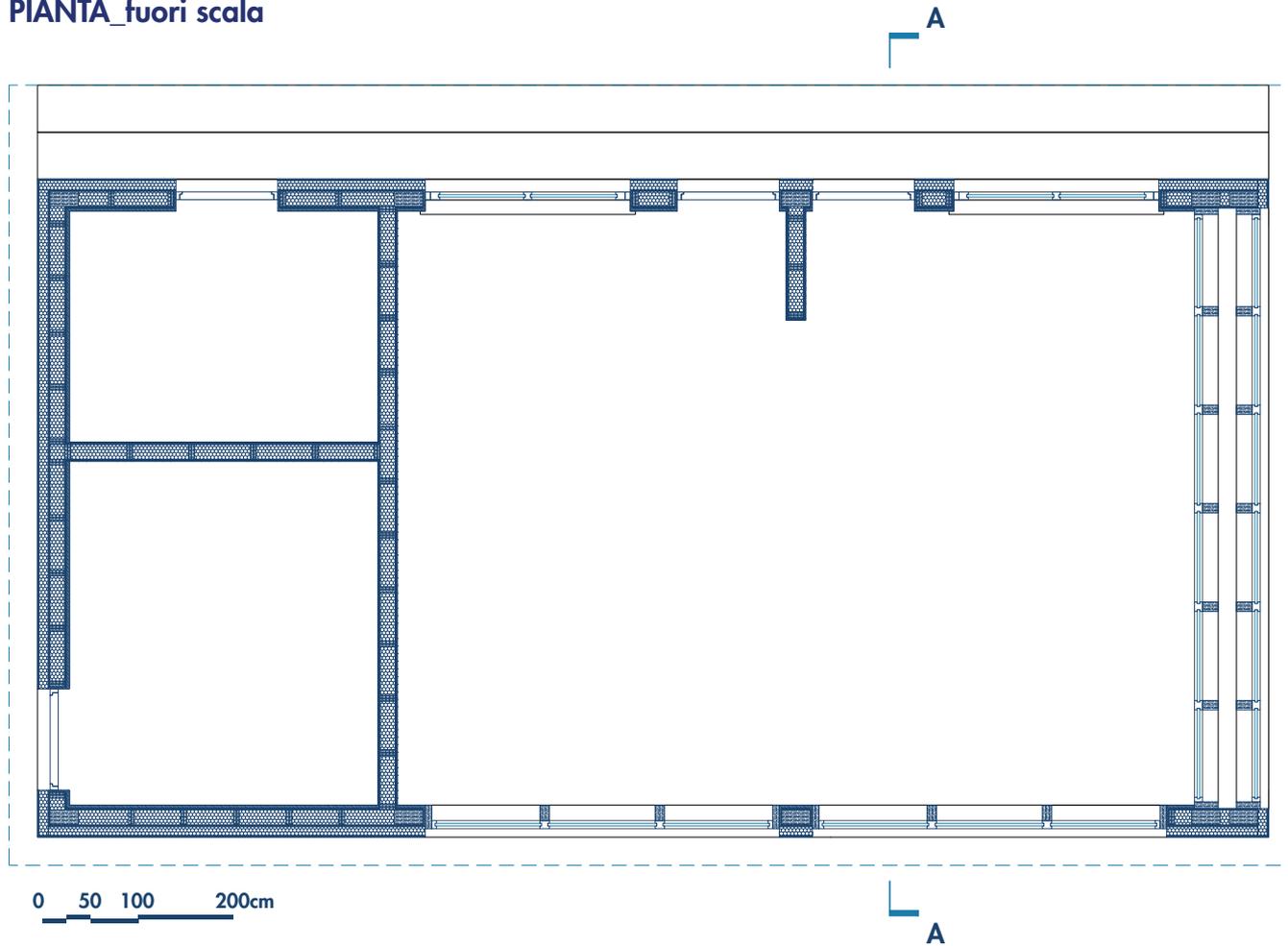
Figura 21-22. WBS contestualizzata



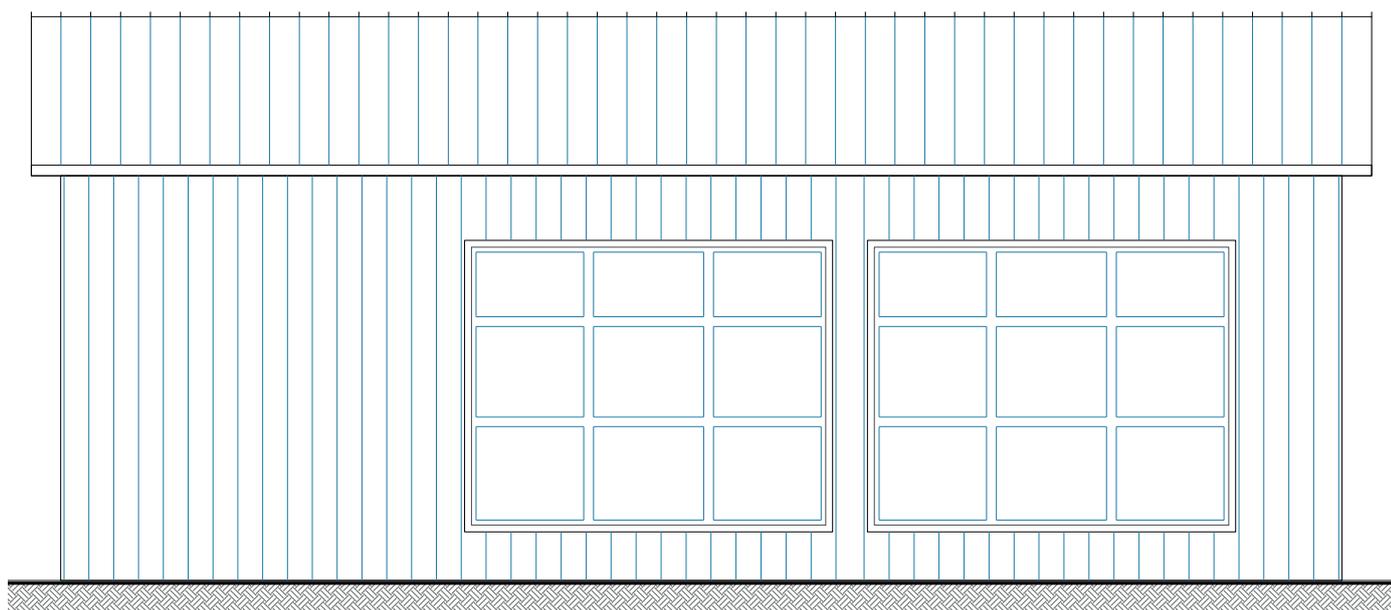
### 4.3 Progetto esecutivo

Definite le caratteristiche dimensionali ed architettoniche dell'HIEQLab si è passati alla redazione del progetto esecutivo della facility. Tale passaggio ha stabilito le soluzioni tecnologiche adottate, per i vari componenti del laboratorio, che successivamente saranno integrate nella modellazione per le simulazioni energetiche e di comfort.

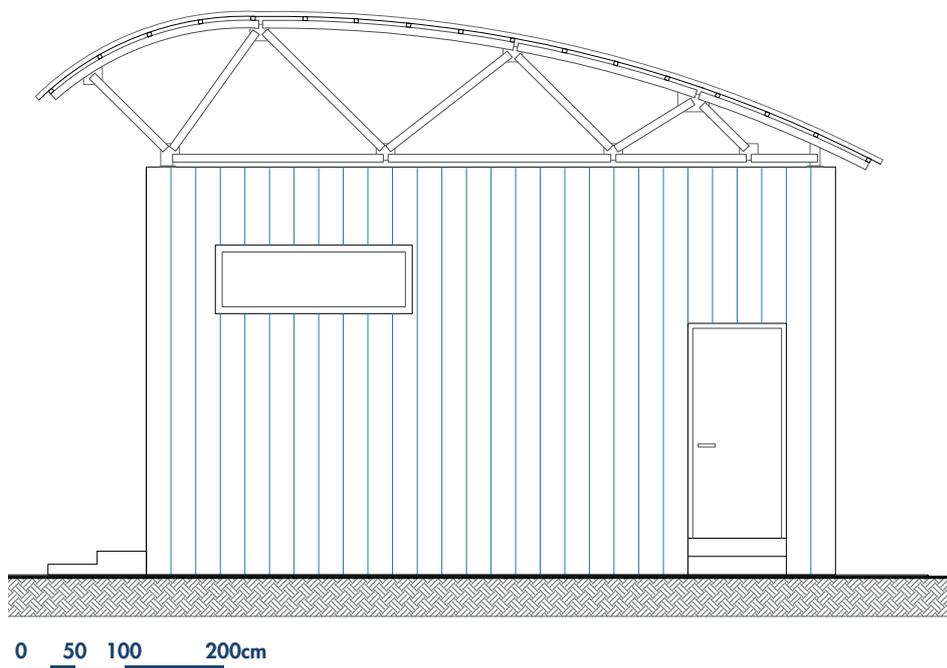
#### PIANTA\_fuori scala



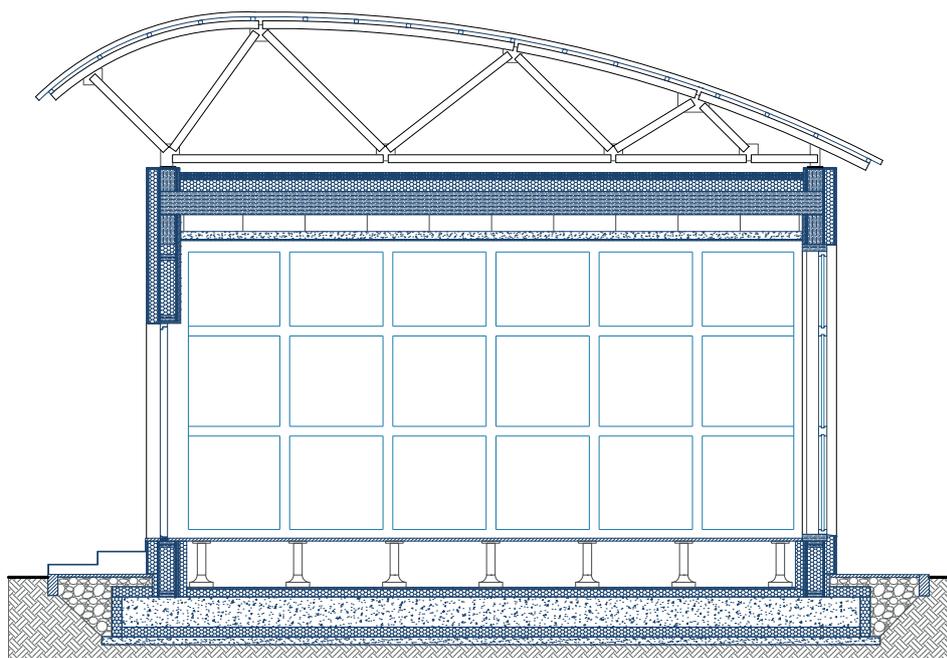
#### PROSPETTO SUD\_fuori scala



## PROSPETTO OVEST\_fuori scala



## SEZIONE A-A\_fuori scala



### 4.3.1 Schema strutturale

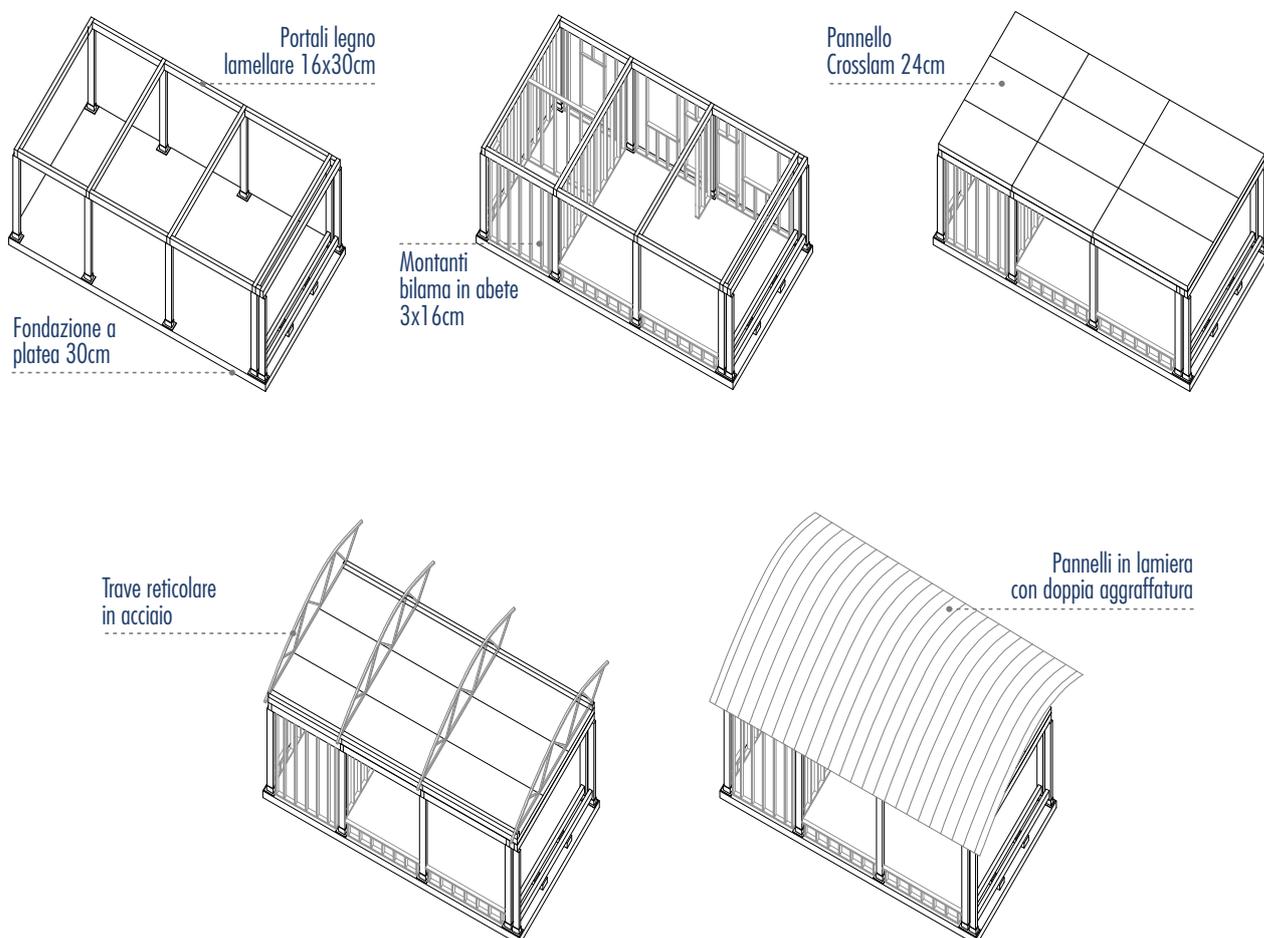
Il laboratorio è stato progettato su una platea di fondazione in calcestruzzo armato dello spessore di 30cm su cui si ancora, tramite piastre metalliche, uno scheletro strutturale realizzato in portali iperstatici in legno lamellare. La configurazione secondo questo schema statico ha permesso di ridurre al minimo gli ingombri strutturali all'interno e nelle pareti perimetrali della facility, in modo da realizzare grandi superfici vetrate, sulla parete sud ed est, e di liberare la struttura da elementi di controvento che avrebbero fortemente intaccato la flessibilità e l'adattabilità della stessa a future configurazioni.

I portali in legno sono stati predimensionati qualitativamente secondo la campata di maggiore lunghezza, ovvero la luce nord-sud pari a circa 650cm, in modo da ottenere una sezione resistente di forma rettangolare pari a 16x30cm.

Per quanto riguarda lo strato portante delle strutture di chiusura verticale è stato realizzato tramite montanti accoppiati in abete, aventi sezione 3x16cm ciascuno, ancorati alla platea di fondazione alla base ed ai traversi dei portali lignei in sommità. Mentre, per la struttura di solaio si è optato per elementi in Crosslam secondo la luce minore, ovvero seguendo l'orditura est-ovest, ottenendo pannelli di spessore 24cm.

A completamento della struttura, quattro travi reticolari formate da profilati ad L asimmetrici accoppiati, appoggiate su travi di bordo est-ovest, sorreggono la copertura curva in pannelli metallici a doppia aggraffatura che ha la duplice funzione di protegge la facility dagli agenti atmosferici e di ridurre la radiazione solare incidente sulla copertura orizzontale sottostante.

Figura 23. Schematizzazione dell'intelaiatura strutturale della facility



### 4.3.2 Involucro opaco

Chiusura orizzontale inferiore - Solaio controterra

**1. Pavimento galleggiante su piedini** s:3cm

Densità	1800 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla diffusione del vapore	85
Calore specifico	800 J/kgK
Conducibilità termica	0.400 W/m <sup>2</sup> K

**2. Barriera al vapore Intello Plus** s:0.4cm

Densità	550 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla diffusione del vapore	1357
Calore specifico	1000 J/kgK
Conducibilità termica	0.170 W/m <sup>2</sup> K

**3. OSB/3** s:1.5cm

Densità	660 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla diffusione del vapore	240
Calore specifico	2000 J/kgK
Conducibilità termica	0.130 W/m <sup>2</sup> K

**4. Fibra di legno NaturaTherm** s:8cm

Densità	110 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla diffusione del vapore	5
Calore specifico	2400 J/kgK
Conducibilità termica	0.038 W/m <sup>2</sup> K

**5. Platea CA** s:30cm

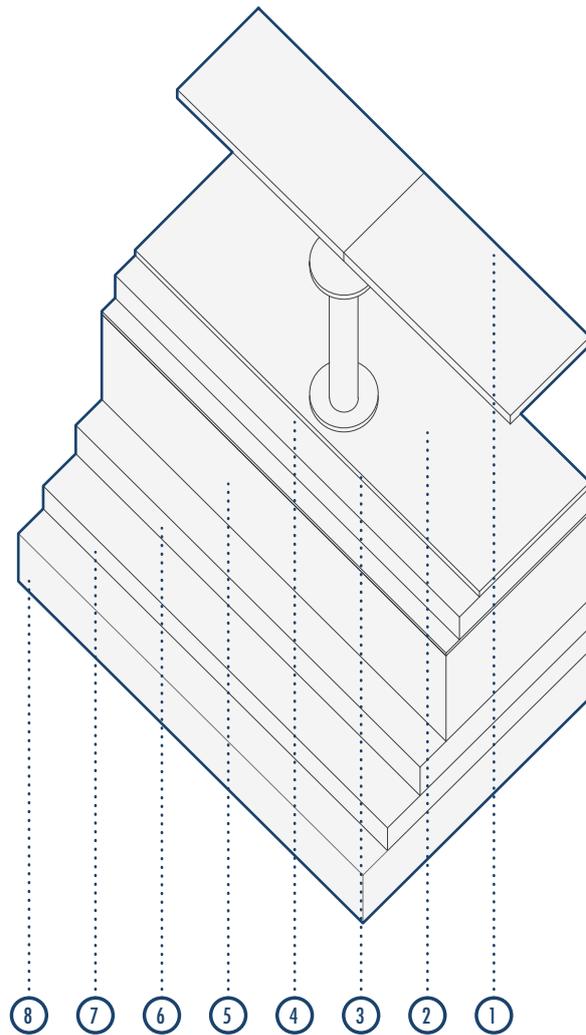
Densità	2400 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla diffusione del vapore	69
Calore specifico	880 J/kgK
Conducibilità termica	1.910 W/m <sup>2</sup> K

**6. Polistirene XFOAM 700** s:10cm

Densità	35 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla diffusione del vapore	192
Calore specifico	1450 J/kgK
Conducibilità termica	0.036 W/m <sup>2</sup> K

**7. Magrone di cemento** s:8cm

Densità	2100 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla diffusione del vapore	69
Calore specifico	880 J/kgK
Conducibilità termica	1.910 W/m <sup>2</sup> K



**TRASMITTANZA COMPONENTE 0.182 W/m<sup>2</sup>K**

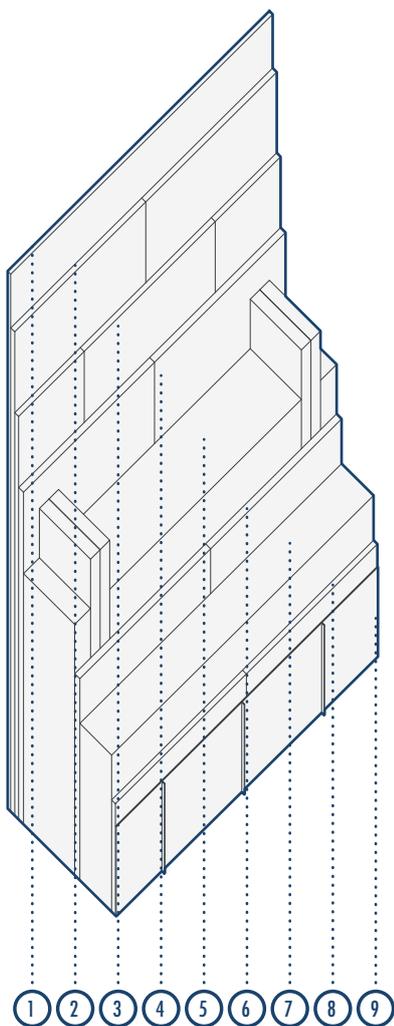
Tipo di componente Chiusura orizzontale inferiore

Stratigrafia (int-est)	s [cm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	μ [-]	c [J/kg°C]	λ [W/m°C]	R [m <sup>2</sup> C/W]	opz. λ→R
Strato liminare interno						0.17	
I Pavimentazione	3.0	1800	85	800	0.400		
II Intello plus	0.4	550	1327	1000	0.170		
III OSB/3	1.5	660	240	2000	0.130		
IV NaturaTherm	8.0	110	5	2400	0.038		
V Platea CA	30.0	2400	69	880	1.910		
VI X-FOAM 700	10.0	35	192	1450	0.036		
VII Magrone	8.0	2100	69	880	1.910		
VIII							
IX							
X							
Strato liminare esterno						0.04	

Parametro	Modulo	Sfasamento
Ammetenza termica interna (Y <sub>i</sub> )	3.215 W/(m <sup>2</sup> K)	2.68 h
Ammetenza termica esterna (Y <sub>ee</sub> )	9.182 W/(m <sup>2</sup> K)	3.89 h
Trasmittanza termica periodica (Y <sub>e</sub> )	0.001 W/(m <sup>2</sup> K)	5.21 h
Capacità termica areica interna (κ <sub>i</sub> )	44.2 kJ/(m <sup>2</sup> K)	
Capacità termica areica esterna (κ <sub>e</sub> )	126.2 kJ/(m <sup>2</sup> K)	
Resistenza termica (R)	5.506 (m <sup>2</sup> K)/W	
Trasmittanza termica (U)	0.182 W/(m <sup>2</sup> K)	
Fattore di attenuazione (f)	0.007	
Spessore (s)	60.9 cm	
Massa superficiale (m)	966 kg/m <sup>2</sup>	
Sfasamento (φ)	18.79 h	

LEGENDA	
s	= spessore
ρ	= massa volumica
μ	= fattore di resistenza al vapore
c	= calore specifico
λ	= conducibilità termica
R	= resistenza termica

Chiusura verticale - Parete esterna



**TRASMITTANZA COMPONENTE** **0.142** **W/m²K**

- 1. **Intonaco** s: 1 cm  
 Densità 1300 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 10  
 Calore specifico 900 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.600 W/m²K
- 2. **3. Lastra Fibrogesso** s: 1.25 cm  
 Densità 1180 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 10  
 Calore specifico 790 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.320 W/m²K
- 3. **OSB/3** s: 1.5 cm  
 Densità 660 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 240  
 Calore specifico 2000 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.130 W/m²K
- 4. **5. Struttura portante** s: 16 cm  
 Montanti in abete  
 Densità 660 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 240  
 Calore specifico 2000 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.130 W/m²K  
 Fibra di legno NaturaTherm  
 Densità 110 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 5  
 Calore specifico 2400 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.038 W/m²K
- 5. **Pannello DWD Protect** s: 1.6 cm  
 Densità 565 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 11  
 Calore specifico 2100 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.090 W/m²K
- 6. **7. Sughero pressato Corkpan** s: 10 cm  
 Densità 120 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 20  
 Calore specifico 1900 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.039 W/m²K
- 7. **OSB/3** s: 1.2 cm
- 8. **9. Lamiera con doppia aggraffatura** s: 0.4 cm

Tipo di componente Chiusura verticale

Stratigrafia (int-est)	s [cm]	ρ [kg/m³]	μ [-]	c [J/kg°C]	λ [W/m°C]	R [m²C/W]	opz. λ → R
Strato liminare interno						0.13	
I Intonaco Int	1.0	1300	10	900	0.600		
II Fibrogesso	2.5	1180	10	790	0.320		
III OSB/3	1.5	660	240	2000	0.130		
IV Struttura	16.0	136	10	2311	0.042		
V DWD Protect	1.6	565	11	2100	0.090		
VI Corkpan	10.0	120	20	1900	0.039		
VII OSB/3	1.2	660	240	2000	0.130		
VIII							
IX							
X							
Strato liminare esterno						0.04	

Parametro	Modulo	Sfasamento
Ammetenza termica interna (Y <sub>ti</sub> )	3.201 W/(m²K)	3.09 h
Ammetenza termica esterna (Y <sub>te</sub> )	1.649 W/(m²K)	4.29 h
Trasmittanza termica periodica (Y <sub>pe</sub> )	<b>0.010 W/(m²K)</b>	5.90 h
Capacità termica areica interna (κ <sub>i</sub> )	43.9 kJ/(m²K)	
Capacità termica areica esterna (κ <sub>e</sub> )	22.5 kJ/(m²K)	
Resistenza termica (R)	7.024 (m²K)/W	
Trasmittanza termica (U)	<b>0.142 W/(m²K)</b>	
Fattore di attenuazione (f)	<b>0.068</b>	

Spessore (s)	33.8 cm	
Massa superficiale (m)	103 kg/m²	
Sfasamento (φ)	18.10 h	

LEGENDA
s = spessore
ρ = massa volumica
μ = fattore di resistenza al vapore
c = calore specifico
λ = conducibilità termica
R = resistenza termica

Partizione interna - Parete divisoria

1. 5. Intonaco

s: 1 cm

Densità	1300 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla diffusione del vapore	10
Calore specifico	900 J/kgK
Conducibilità termica	0.600 W/m <sup>2</sup> K

2. 4. Lastra Fibrogesso

s: 1.25 cm

Densità	1180 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla diffusione del vapore	10
Calore specifico	790 J/kgK
Conducibilità termica	0.320 W/m <sup>2</sup> K

5. Struttura portante

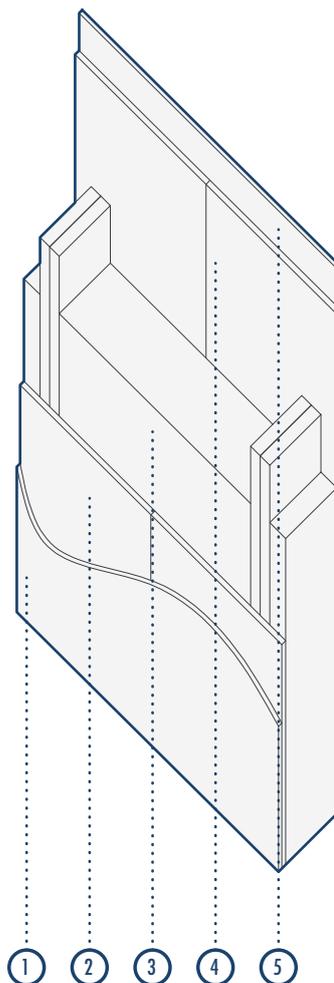
s: 16 cm

Montanti in abete

Densità	660 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla diffusione del vapore	240
Calore specifico	2000 J/kgK
Conducibilità termica	0.130 W/m <sup>2</sup> K

Fibra di legno NaturaTherm

Densità	110 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla diffusione del vapore	5
Calore specifico	2400 J/kgK
Conducibilità termica	0.038 W/m <sup>2</sup> K



**TRASMITTANZA COMPONENTE** **0.239**  
**W/m<sup>2</sup>K**

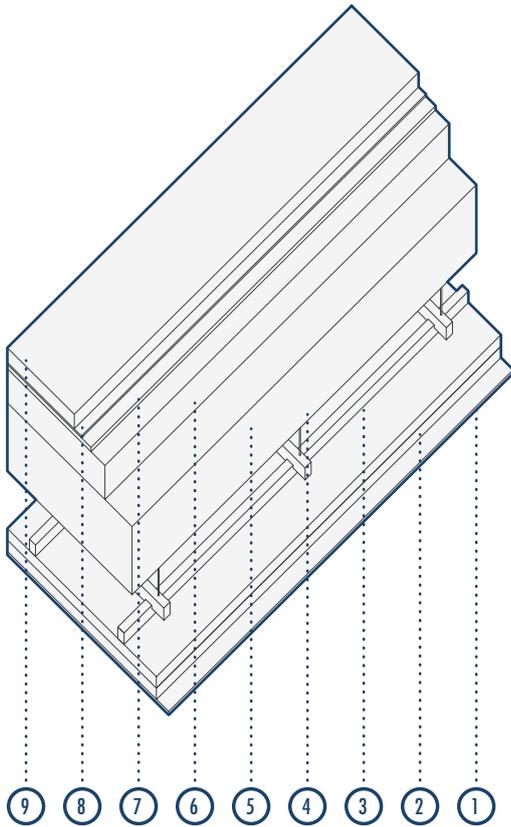
Tipo di componente | Partizione verticale

Stratigrafia (int-est)	s [cm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	μ [-]	c [J/kg°C]	λ [W/m°C]	R [m <sup>2</sup> C/W]	opz. λ→R
Strato liminare interno						0.13	
I Intonaco	1.0	1300	10	900	0.600		
II Fibrogesso	1.3	1180	10	790	0.320		
III Struttura	16.0	136	10	2311	0.042		
IV Fibrogesso	1.3	1180	10	790	0.320		
V Intonaco	1.0	1300	10	900	0.600		
VI							
VII							
VIII							
IX							
X							
Strato liminare esterno						0.13	

Parametro	Modulo	Sfasamento
Ammettenza termica interna (Y <sub>i</sub> )	2.121 W/(m <sup>2</sup> K)	3.75 h
Ammettenza termica esterna (Y <sub>se</sub> )	2.121 W/(m <sup>2</sup> K)	3.75 h
Trasmittanza termica periodica (Y <sub>p</sub> )	0.100 W/(m <sup>2</sup> K)	-9.65 h
Capacità termica areica interna (s <sub>i</sub> )	30.4 kJ/(m <sup>2</sup> K)	
Capacità termica areica esterna (s <sub>e</sub> )	30.4 kJ/(m <sup>2</sup> K)	
Resistenza termica (R)	4.181 (m <sup>2</sup> K)/W	
Trasmittanza termica (U)	0.239 W/(m <sup>2</sup> K)	
Fattore di attenuazione (f)	0.417	
Spessore (s)	20.5 cm	
Massa superficiale (m)	77 kg/m <sup>2</sup>	
Sfasamento (φ)	9.65 h	

LEGENDA	
s	= spessore
ρ	= massa volumica
μ	= fattore di resistenza al vapore
c	= calore specifico
λ	= conducibilità termica
R	= resistenza termica

Chiusura orizzontale superiore - Solaio di copertura



**TRASMITTANZA COMPONENTE** **0.152** **W/m²K**

1. **Lastra Fibrogesso** s: 1.25cm  
 Densità 1180 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 10  
 Calore specifico 790 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.320 W/m²K
2. **Pannello radiante con XPS** s: 9cm  
 Densità 30 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 192  
 Calore specifico 1250 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.036 W/m²K
3. **Doppia orditura di supporto controsoffitto**
4. **Pannello Crosslam** s: 9cm  
 Densità 495 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 50  
 Calore specifico 2000 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.130 W/m²K
5. **Barriera al vapore Intello Plus** s: 0.4cm  
 Densità 550 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 1357  
 Calore specifico 1000 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.170 W/m²K
6. **Fibra di legno NaturaTherm** s: 12cm  
 Densità 110 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 5  
 Calore specifico 2400 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.038 W/m²K
7. **OSB/3** s: 1.5cm  
 Densità 660 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 240  
 Calore specifico 2000 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.130 W/m²K
8. **Impermeabilizzante StamisolPack 500** s: 0.7cm  
 Densità 714 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 1357  
 Calore specifico 1000 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.170 W/m²K
9. **Ghiaia protezione** s: 5cm  
 Densità 714 kg/m³  
 Resistenza alla diffusione del vapore 1357  
 Calore specifico 1000 J/kgK  
 Conducibilità termica 0.170 W/m²K

Tipo di componente		Chiusura orizzontale su spazi esterni					
Stratigrafia (int-est)	s [cm]	ρ [kg/m³]	μ [-]	c [J/kg°C]	λ [W/m°C]	R [m²C/W]	opz. λ → R
Strato liminare interno						0.17	
I Fibrogesso	1.3	1180	10	790	0.320		
II XPS	4.0	30	192	1250	0.036		
III Crosslam	24.0	495	50	2000	0.130		
IV Intello plus	0.4	550	1327	1000	0.170		
V NaturaTherm	12.0	120	3	2400	0.038		
VI OSB/3	1.5	660	240	2000	0.130		
VII Stamisol Pack 500	0.7	714	1357	1000	0.170		
VIII Ghiaia	5.0	2500	1	840	2.400		
IX							
X							
Strato liminare esterno						0.04	

Parametro	Modulo	Sfasamento
Ammetenza termica interna (Y <sub>it</sub> )	1.076 W/(m²K)	3.01 h
Ammetenza termica esterna (Y <sub>ee</sub> )	8.473 W/(m²K)	4.03 h
Trasmittanza termica periodica (Y <sub>w</sub> )	<b>0.001 W/(m²K)</b>	-1.73 h
Capacità termica areica interna (κ <sub>i</sub> )	<b>14.8 kJ/(m²K)</b>	
Capacità termica areica esterna (κ <sub>e</sub> )	116.5 kJ/(m²K)	
Resistenza termica (R)	6.565 (m²K)/W	
Trasmittanza termica (U)	<b>0.152 W/(m²K)</b>	
Fattore di attenuazione (f)	<b>0.007</b>	
Spessore (s)	<b>48.9 cm</b>	
Massa superficiale (m)	<b>291 kg/m²</b>	
Sfasamento (φ)	<b>1.73 h</b>	

LEGENDA
s = spessore
ρ = massa volumica
μ = fattore di resistenza al vapore
c = calore specifico
λ = conducibilità termica
R = resistenza termica

### 4.3.3 Involucro trasparente

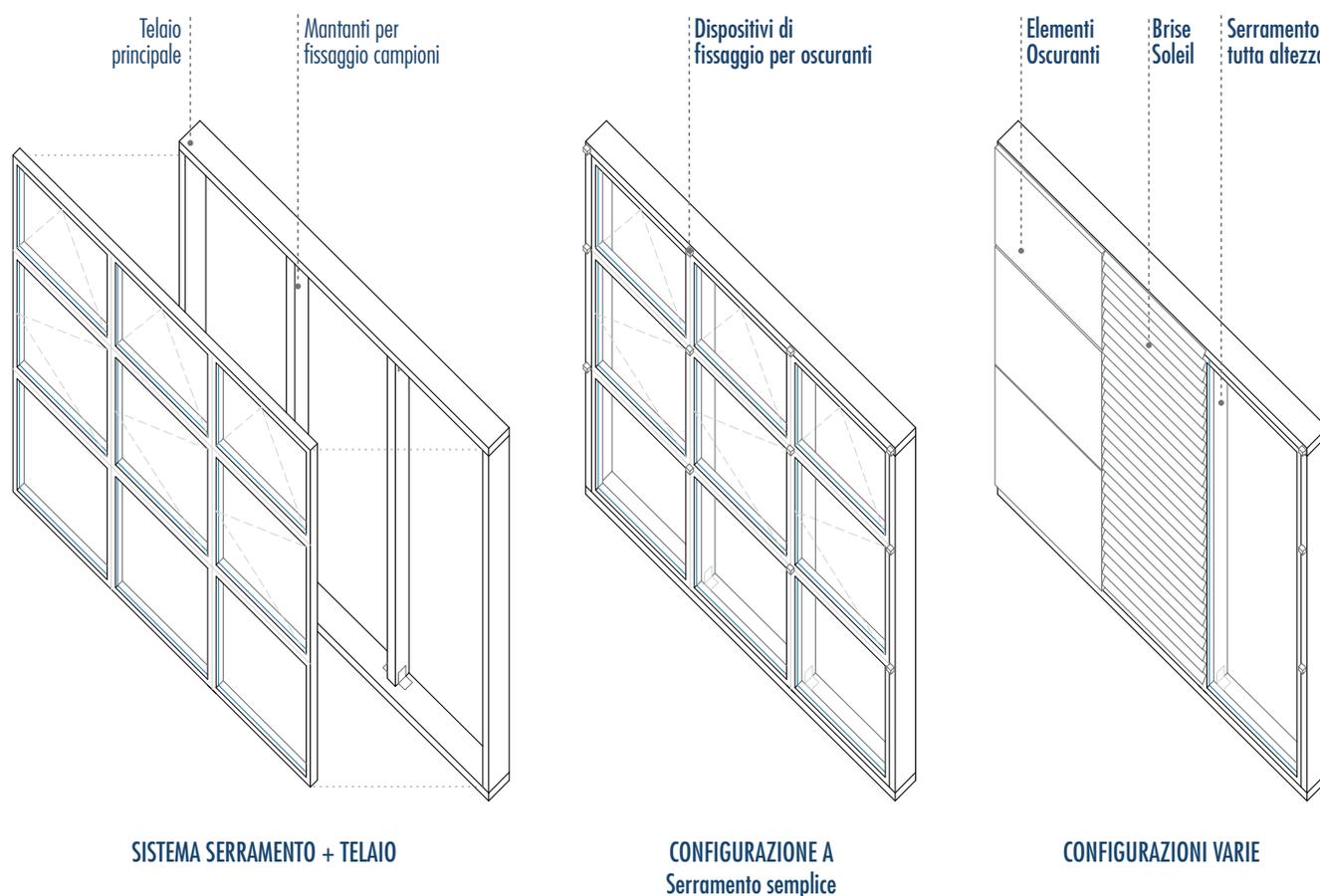
E' evidente come l'involucro opaco appena analizzato costituisca solo una piccola percentuale dei sistemi di chiusura verticale utilizzati nella facility. Infatti, le pareti perimetrali dell'ambiente di misura sono state pensate per ospitare importanti superfici vetrate facilmente sostituibili in modo da poter effettuare test su diversi componenti.

Per quanto riguarda i serramenti esposti a sud, la soluzione tecnologica scelta per assolvere questo compito è stata realizzata tramite l'installazione di un controtelaio in legno, fissato ai portali strutturali della facility. Tale struttura è in grado di fornire la giusta cornice di posa e di fissaggio per svariate tipologie di sistemi di facciata e, in una delle possibili configurazioni iniziali, è stata completata con due montanti verticali ulteriori utili per una migliore posa dei campioni e per dividere il serramento in tre fasce che possono essere trattate indipendentemente. Questa tripartizione verticale, è stata ripetuta anche come scansione sulla linea orizzontale in modo da realizzare tre bande, di cui la più bassa fissa, quella centrale apribile con un sistema a battente verso l'interno e quella in sommità anch'essa apribile con sistema vasistas.

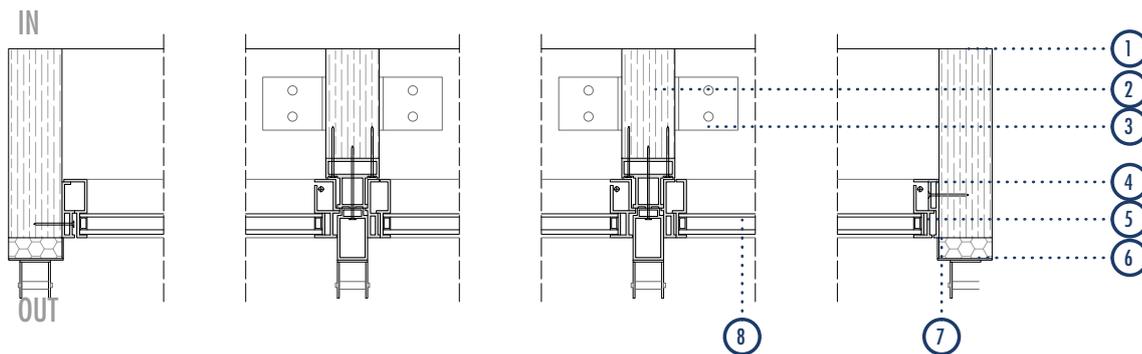
Tale soluzione tecnologica è stata replicata anche per la doppia pelle ad est in modo da creare un sistema formato da due superfici vetrate fissate a telai completamente indipendenti, con sistemi oscuranti e tende per il controllo solare posizionabili in intercapedine.

Per concludere, sul filo esterno dei serramenti sono stati installati dei dispositivi a "maniglia" per l'installazione manuale di pannelli completamente oscuranti.

Figura 24. Schema di posa del serramento tipo



Serramento Sud - scala 1:10



- 1. Telaio principale 7x25cm
- 2. Montanti fissaggio campioni 7x12cm
- 3. Angolari metallici di fissaggio
- 4. Telaio fisso in alluminio
- 5. Telaio mobile con cerniera a scomparsa
- 6. Supporto pannelli oscuranti
- 7. Coprifilo in lamiera metallica

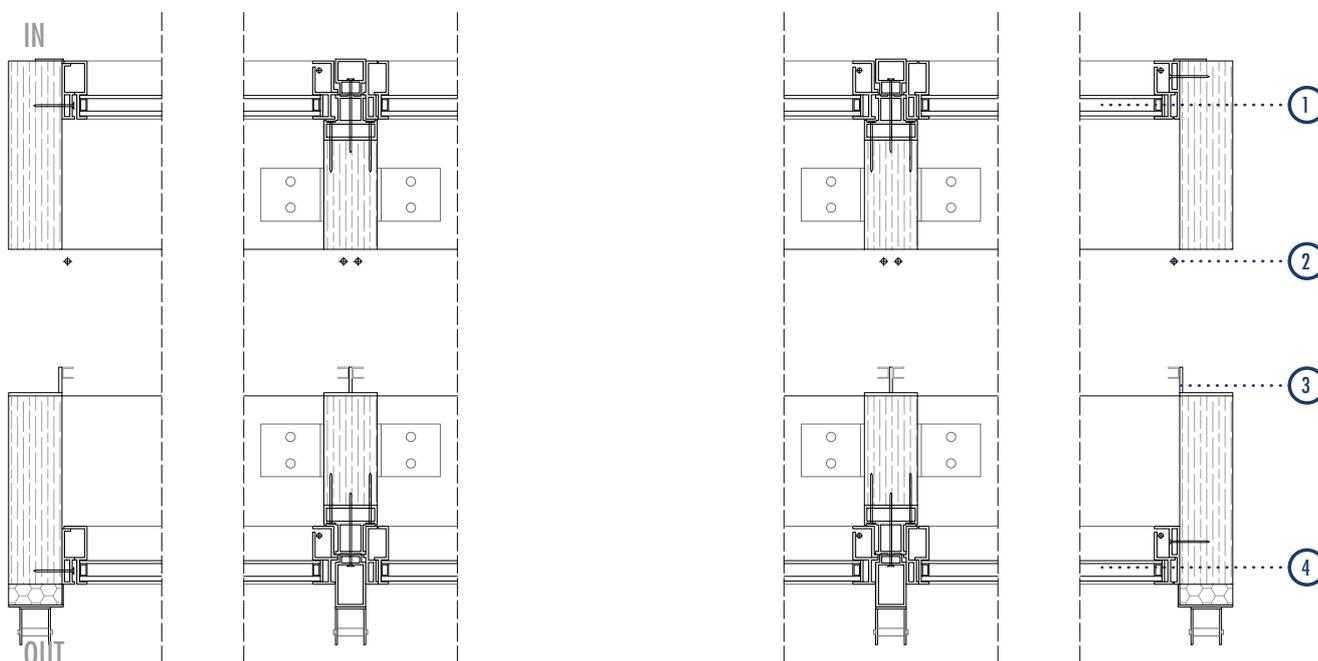
8. Doppio vetro Ipasol 7037

Ug	1 W/m <sup>2</sup> K
Tv	0.70
g	0.37
Ra	0.96

**TRASMITTANZA SERRAMENTO**  
**FATTORE SOLARE**

**U<sub>w</sub> : 1.40 W/m<sup>2</sup>K**  
**g: 0.37**

Doppia pelle Est - scala 1:10



1. 4. Doppio vetro Ipasol 7037

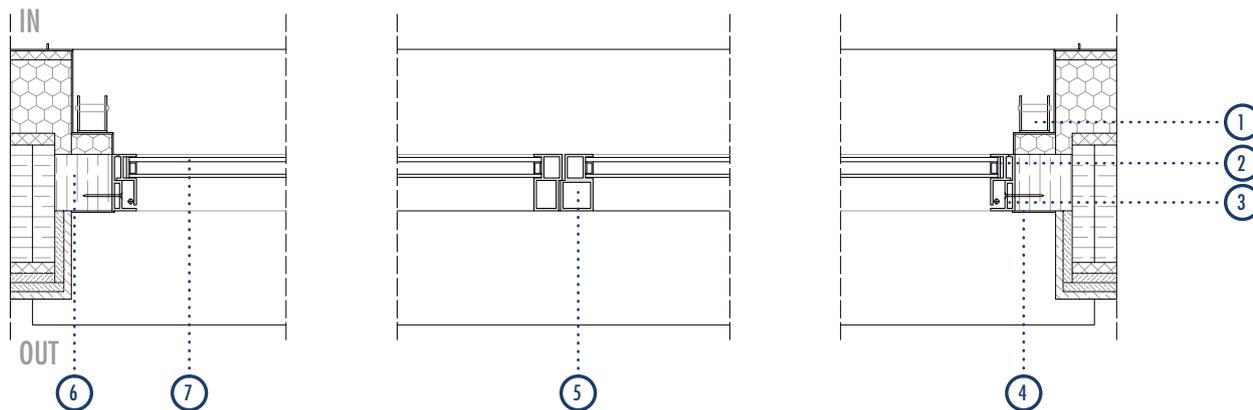
Ug	1 W/m <sup>2</sup> K
Tv	0.70
g	0.37
Ra	0.96

- 2. Cavi tendi tenda
- 3. Guide laterali cortina oscurante

**TRASMITTANZA SERRAMENTO**  
**FATTORE SOLARE**

**U<sub>w</sub> : 1.00 W/m<sup>2</sup>K**  
**g: 0.35**

Serramento Nord - scala 1:10



1. Supporto pannelli oscuranti
2. Telaio mobile con cerniera a scomparsa
3. Telaio fisso in alluminio
4. Coprifilo in lamiera metallica
5. Anta battente
6. Telaio di fissaggio

7. Doppio vetro Ipasol 7037

U <sub>g</sub>	1 W/m <sup>2</sup> K
T <sub>v</sub>	0.70
g	0.37
R <sub>a</sub>	0.96

**TRASMITTANZA SERRAMENTO**

**U<sub>w</sub>: 1.40 W/m<sup>2</sup>K**

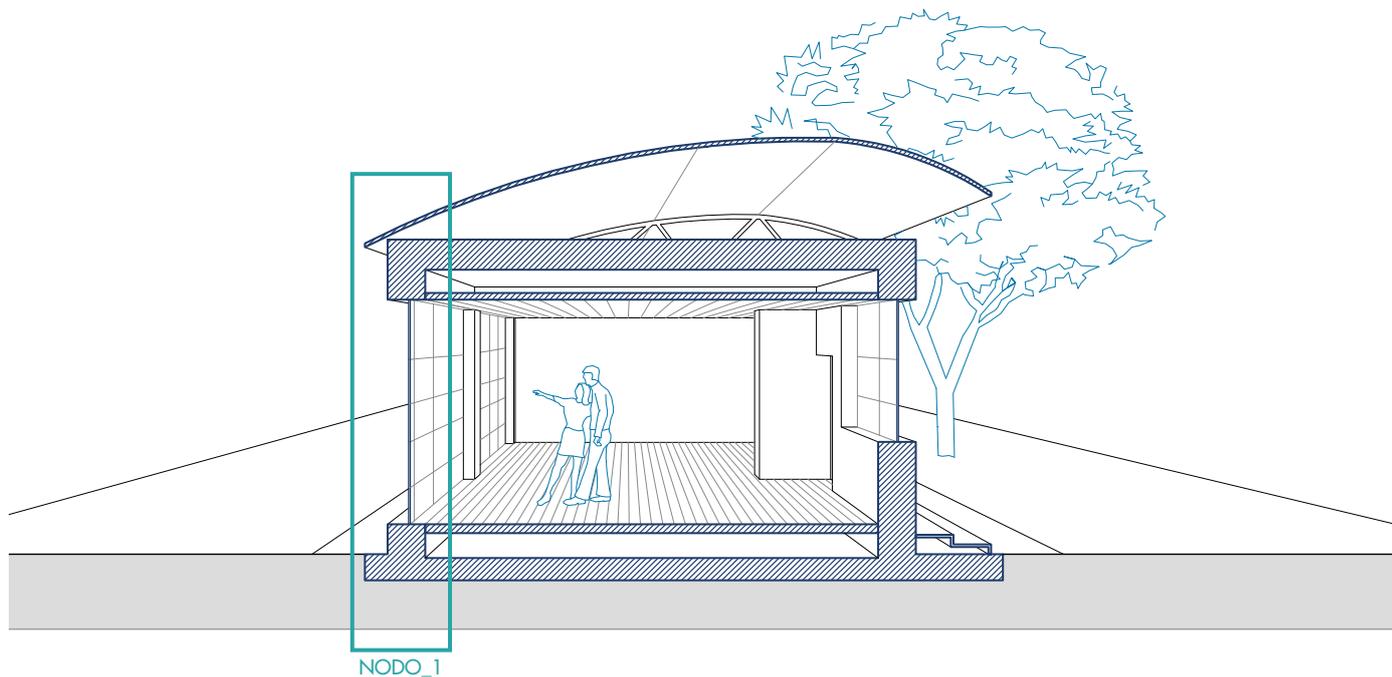
**FATTORE SOLARE**

**g: 0.37**

#### 4.3.4 Nodi Tecnologici

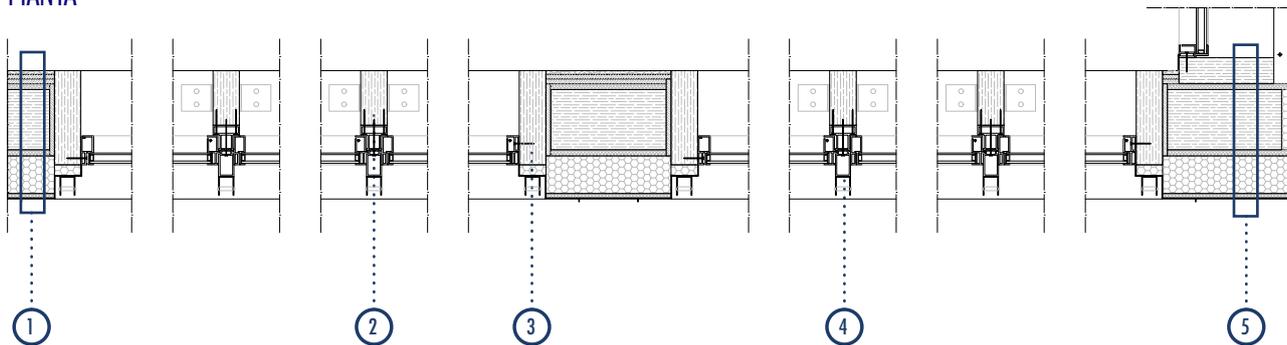
Nel seguente paragrafo vengono analizzati i principali nodi tecnologici che vanno a caratterizzare la struttura.

In ordine viene risolto il sistema di chiusura verticale della parete esposta a sud (Nodo\_1) e della doppia pelle ad est (Nodo\_2) ed infine l'intersezione fra parete perimetrale e parete divisoria interna che divide il laboratorio dalla control room e dalla stanza degli impianti (Nodo\_3).

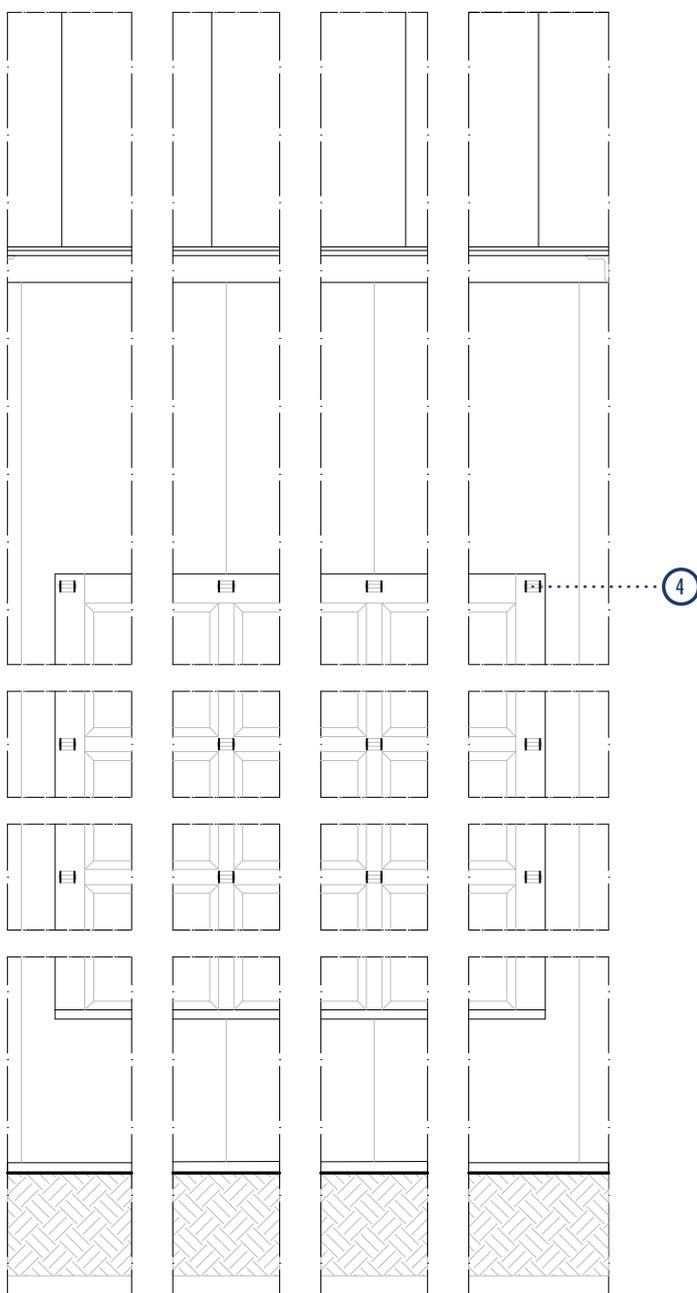


Nodo\_1 - scala 1:20

PIANTA

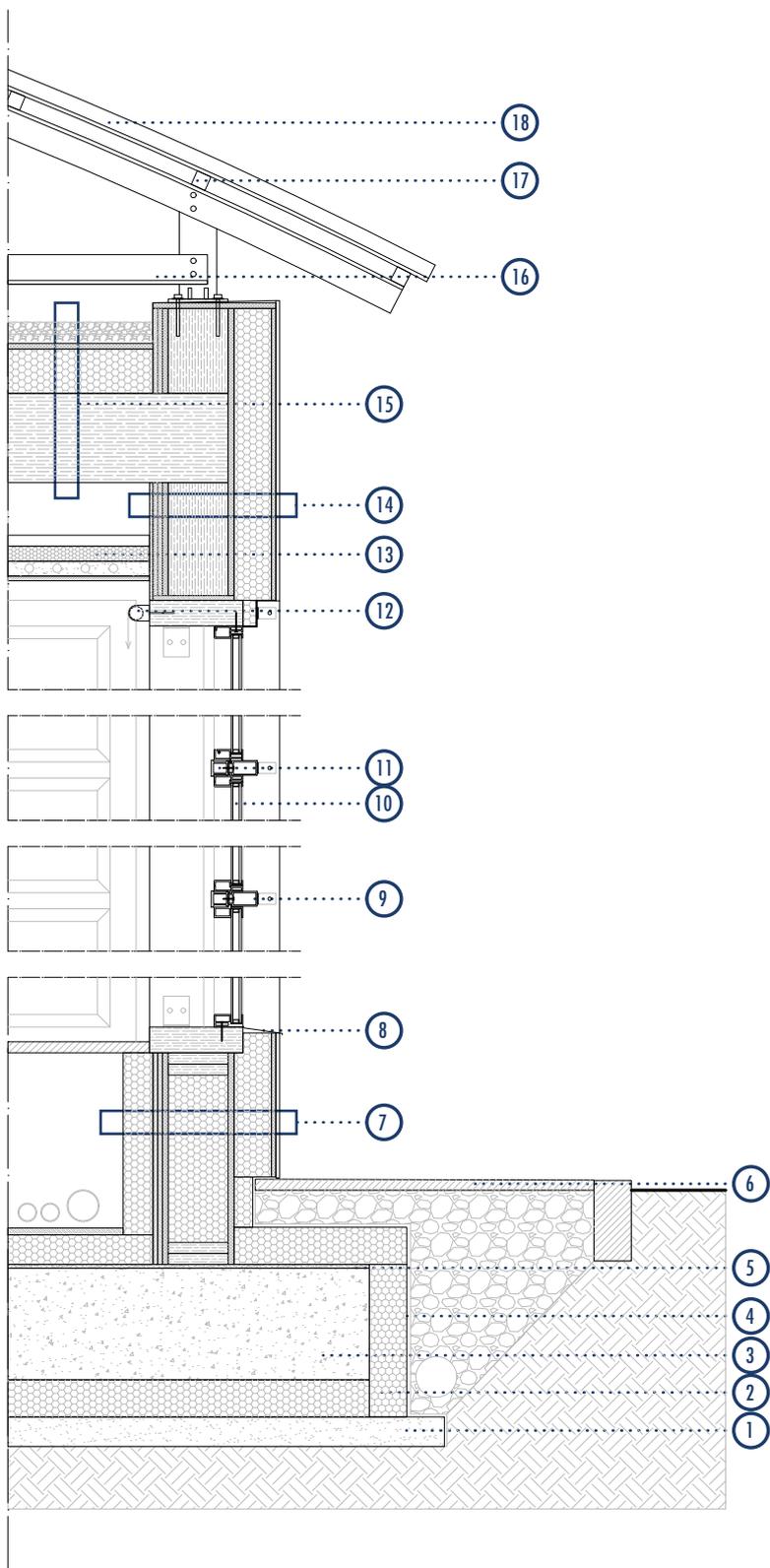


PROSPETTO

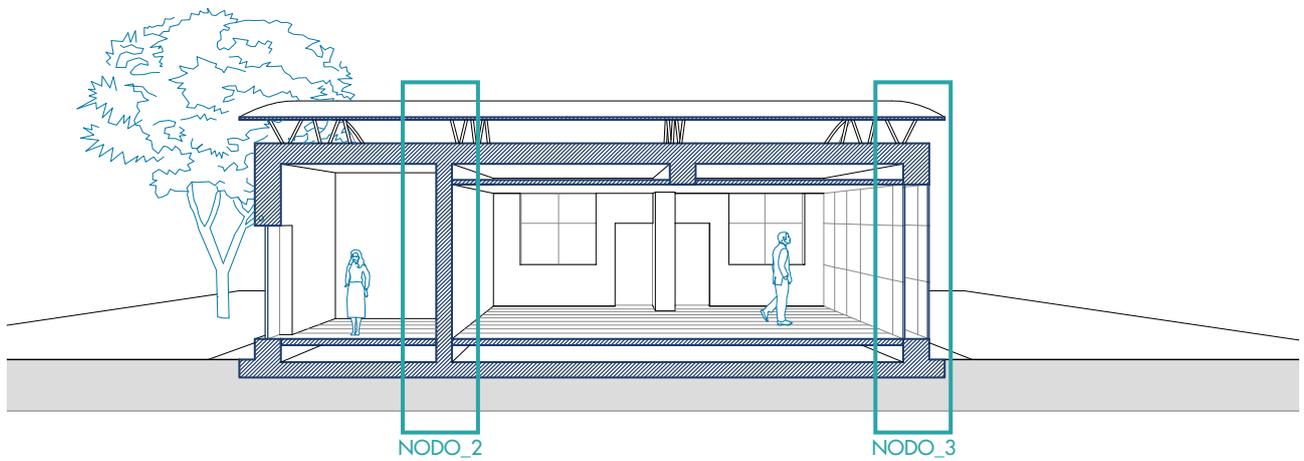


1. Rivestimento in lamiera metallica  
OSB di supporto 1.2cm  
Isolante sughero pressato Corkpan 10cm  
Pannello DWD Protect 1.6cm  
Portale strutturale in legno lamellare 16x30cm  
OSB di supporto 1.5cm  
Doppia lastra fibrogesso 2.5cm  
Finitura interna 1cm
2. Montanti posa campioni 7x14cm
3. Telaio posa serramenti 7x25cm
4. Supporti pannelli oscuranti esterni
5. Rivestimento in lamiera metallica  
OSB di supporto 1.2cm  
Isolante sughero pressato Corkpan 10cm  
Pannello DWD Protect 1.6cm  
Portale strutturale in legno lamellare 16x30cm  
OSB di supporto 1.5cm  
Telaio posa serramenti 7x25cm

SEZIONE

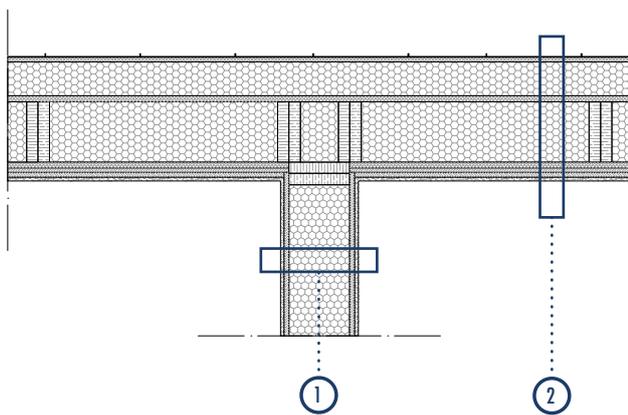


1. Strato di magrone 8cm
2. Isolante X-FOAM 700 10cm
3. Platea di fondazione 30cm
4. Strato impermeabilizzante Stamisol Pack 500 0.7cm
5. Strato di regolarizzazione 1cm
6. Pavimentazione esterna 3cm
7. Rivestimento lamiera metallica con OSB di supporto 2cm  
 Isolante sughero pressato Corkpan 10cm  
 Pannello DWD Protect 1.6cm  
 Montanti bilama in abete 3x16cm  
 Fibra di legno Naturatherm 16cm  
 Pannello OSB 1.5cm  
 Doppio pannello fibrogesso 2.5cm  
 Fibra di legno Naturatherm 10cm
8. Copertina metallica
9. Supporti pannelli oscuranti esterni
10. Doppio vetro Ipsol 7037 6-16-4
11. Traverso scatolare in alluminio
12. Tenda interna
13. Pannello radiante con XPS 4cm
14. Rivestimento lamiera metallica con OSB di supporto 2cm  
 Isolante sughero pressato Corkpan 10cm  
 Pannello DWD Protect 1.6cm  
 Portale legno lamellare 16x30cm  
 Pannello OSB 1.5cm  
 Doppio pannello fibrogesso 2.5cm  
 Finitura interna 1cm
15. Strato protettivo ghiaia 5cm  
 Strato impermeabilizzante Stamisol Pack 500 0.7cm  
 Pannello OSB 1.5cm  
 Isolante fibra di legno NaturaTherm 12cm  
 Barriera al vapore Intello Plus 0.4cm  
 Struttura portante CROSSLAM 24cm
16. Corrente inferiore trave reticolare
17. Travetti di ripartizione in legno 4x4cm
18. Pannelli in lamiera metallica



Nodo\_2 - scala 1:20

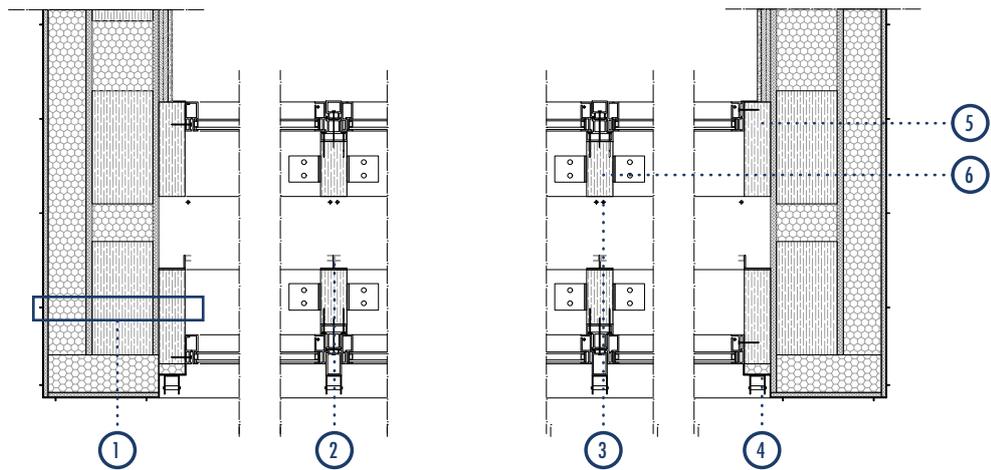
PIANTA



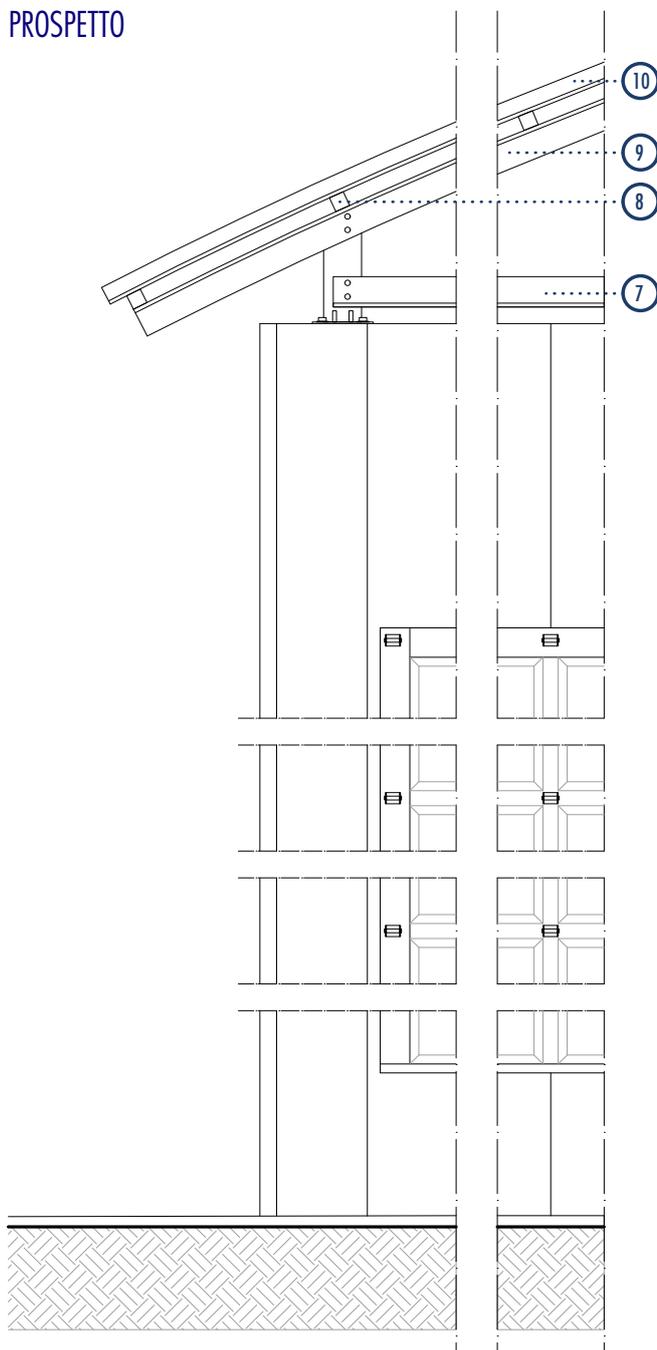
1. Intonaco 1cm  
 Lastra singola Fibrogesso 1.25cm  
 Montanti bilama in abete 3x16cm  
 Isolante fibra di legno NaturaTherm 16cm  
 Lastra singola Fibrogesso 1.25cm  
 Intonaco 1cm
2. Rivestimento in lamiera metallica con OSB di supporto 2cm  
 Isolante sughero pressato Corkpan 10cm  
 Pannello DWD Protect 1.6cm  
 Montanti bilama in abete 3x16cm  
 Isolante fibra di legno NaturaTherm 16cm  
 Pannello OSB 1.5cm  
 Doppio pannello fibrogesso 2.5cm  
 Intonaco interno 1cm

Nodo\_3 - scala 1:20

PIANTA



PROSPETTO



1. Rivestimento in lamiera metallica  
OSB di supporto 1.2cm  
Isolante sughero pressato Corkpan 10cm  
Pannello DWD Protect 1.6cm  
Portale strutturale in legno lamellare 16x30cm  
OSB di supporto 1.5cm  
Telaio serramenti 7x25cm
2. Guide laterali per cortine oscuranti in intercapedine
3. Cavi tendi tenda
4. Supporti pannelli oscuranti esterni
5. Telaio posa serramenti 7x25cm
6. Montanti posa campioni 7x14cm
7. Corrente inferiore trave reticolare
8. Travetti di ripartizione in legno 4x4cm
9. Corrente superiore trave reticolare
10. Pannelli in lamiera metallica

## SEZIONE

1. Strato di magrone 8cm
2. Isolante X-FOAM 700 10cm
3. Platea di fondazione 30cm
4. Strato impermeabilizzante Stamisol Pack 500 0.7cm
5. Strato di regolarizzazione 1cm
6. Pavimentazione esterna 3cm
7. Rivestimento lamiera metallica con OSB di supporto 2cm  
Isolante sughero pressato Corkpan 10cm  
Pannello DWD Protect 1.6cm  
Doppio portale legno lamellare 16x30cm con interposto  
isolante in fibra di legno  
Pannello OSB 1.5cm  
Doppio pannello fibrogesso 2.5cm  
Fibra di legno Naturatherm 10cm
8. Copertina metallica
9. Supporti pannelli oscuranti esterni
10. Doppia pelle vetrata
11. Sistema tenda controllo solare e  
cortina oscurante
12. Pannello radiante con XPS 4cm
13. Rivestimento lamiera metallica con OSB di supporto 2cm  
Isolante sughero pressato Corkpan 10cm  
Pannello DWD Protect 1.6cm  
Doppio portale legno lamellare 16x30cm con interposto  
isolante in fibra di legno  
Pannello OSB 1.5cm  
Doppio pannello fibrogesso 2.5cm  
Fibra di legno Naturatherm 10cm
14. Strato protettivo ghiaia 5cm  
Strato impermeabilizzante Stamisol Pack 500 0.7cm  
Pannello OSB 1.5cm  
Isolante fibra di legno NaturaTherm 12cm  
Barriera al vapore Intello Plus 0.4cm  
Struttura portante CROSSLAM 24cm
15. Trave di bordo in legno lamellare  
16x22cm
16. Copertina metallica
17. Corrente inferiore trave reticolare
18. Travetti di ripartizione in legno  
4x4cm
19. Pannelli in lamiera metallica
20. Pannelli in lamiera metallica

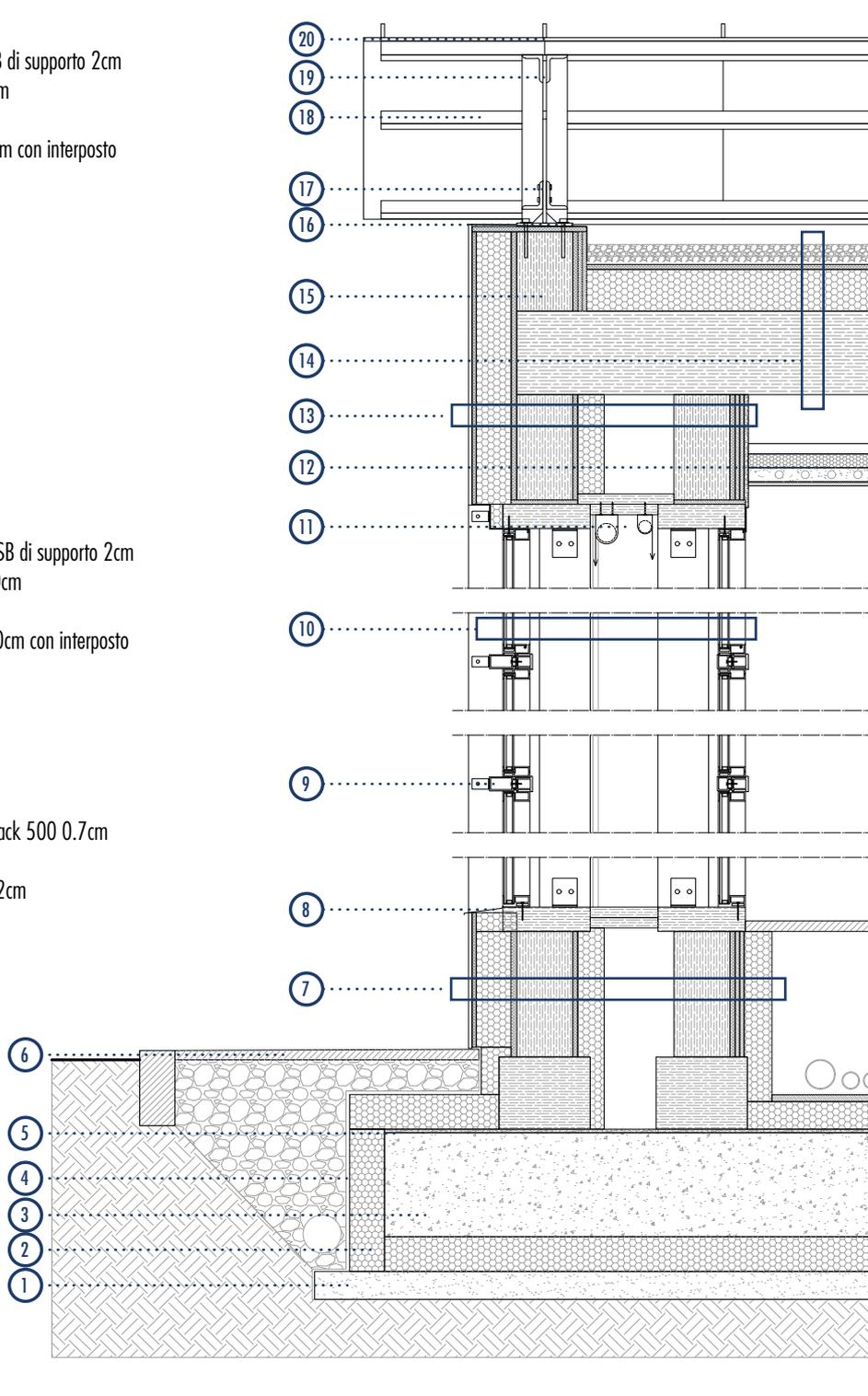


Figura 25. Vista esterna del laboratorio

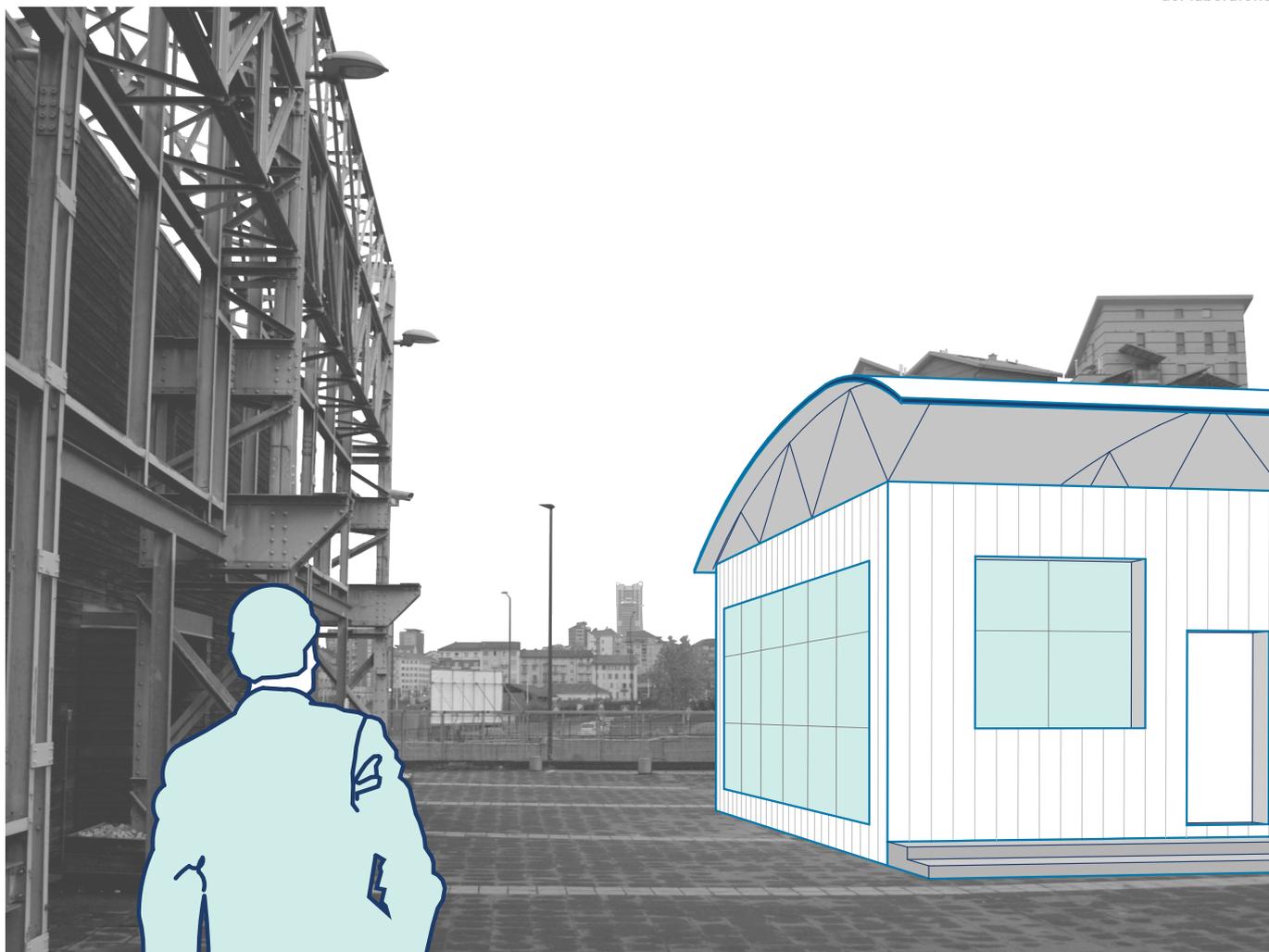


Figura 26. Vista interna della stanza di misura



## 5. ANALISI PRELIMINARI

## 5. Analisi climatiche e simulazioni preliminari

In aggiunta agli studi ed alla progettazione di carattere architettonico-esecutiva per l'HIEQLab, sono state svolte alcune analisi di carattere preliminare in modo da testare il funzionamento del laboratorio e come quest'ultimo sia in grado di rispondere alle sollecitazioni climatiche anche in relazione al contesto che lo circonda.

Per meglio comprendere i successivi paragrafi, sono necessarie alcune precisazioni. Le simulazioni effettuate rispecchiano un progetto non ancora completamente definito e contengono una serie di approssimazioni nella realizzazione del modello simulativo. Tuttavia, anche un approccio di questo tipo ha permesso di ottenere risultati verosimilmente accettabili anche se intaccati da una serie di imprecisioni che di volta in volta, a seconda delle osservazioni da effettuare, dovranno essere analizzate ed in alcuni casi corrette. In particolare, le approssimazioni hanno un impatto praticamente nullo sulle analisi di contesto, sulle simulazioni climatiche e di daylight, mentre risultano più importanti per la definizione del modello energetico e per le analisi ad esso correlate che verranno analizzate nel prossimo capitolo.

### 5.1 Modellazione

#### 5.1.1 Software utilizzati

Definita la disposizione spaziale degli ambienti e le soluzioni tecnologiche adottate come possibile configurazione iniziale del laboratorio, lo stesso è stato modellato tridimensionalmente ed inserito nel contesto di riferimento tramite l'applicativo Rhinoceros. Una volta realizzato il modello, si è trattato di continuare la modellazione andando a definire una serie di parametri ulteriori all'interno del software parametrico Grasshopper. Tale approfondimento, possibile grazie ad il plugin Ladybug, ha permesso di portare a termine alcune analisi climatiche preliminari, quali la valutazione della radiazione solare incidente sulle principali superfici di misura e l'ombreggiamento.



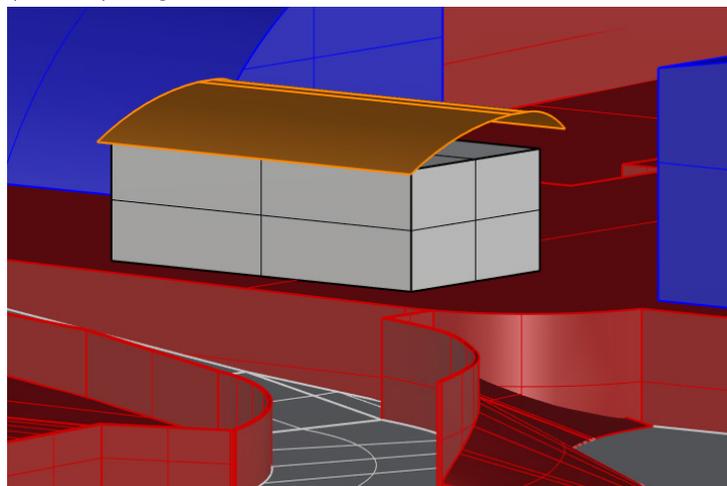
Figura 27. Schema dei software utilizzati

### 5.1.2 Approssimazioni e semplificazioni del modello

Come anticipato, le simulazioni sopracitate sono state realizzate sulla base di due modelli differenti, uno semplificato, utilizzato per le analisi sulla radiazione solare e sull'ombreggiamento, ed uno dettagliato, per le simulazioni energetiche di illuminamento che verranno affrontate nel prossimo capitolo.

Le semplificazioni del modello utilizzato per le simulazioni climatiche (Figura 28) sono relative alla conformazione del laboratorio. Infatti, per queste tipologie di analisi, è stato sufficiente modellare la facility come un semplice box chiuso trattando le pareti come semplici superfici senza andare a modellare ulteriormente la presenza o meno di aperture. Questo ha permesso di valutare sia in maniera qualitativa che quantitativa la condizione di soleggiamento/ombreggiamento delle diverse superfici di misura (principalmente parete sud ed est) senza legarsi ad una configurazione architettonica prestabilita e lasciando una serie di dati utilizzabili anche per schemi di facciata differenti.

Figura 28. Modello semplificato utilizzato per le analisi climatiche



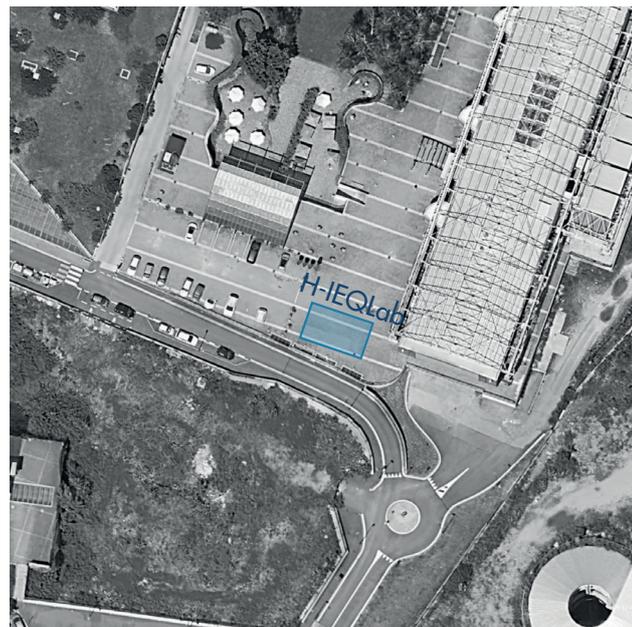
## 5.2 Analisi preliminari

### 5.2.1 Ubicazione del laboratorio

Come precedentemente indicato, il laboratorio sarà ubicato presso l'Environmental Park di Torino, alle coordinate 45.0870, 7.6740. Un posizionamento che comporta la valutazione sulla base di 1192 giorni di riscaldamento e 452 giorni di raffreddamento.

Figura 29. Ubicazione del laboratorio

Posizione	Latitudine	Longitudine	HDD	CDD
Torino (ITA) - EnviPark	45.0870 °	7.6740 °	1192gg	452gg



### 5.2.2 Analisi climatiche

Le analisi preliminari sono partite dall'osservazione delle variazioni climatiche nell'arco dell'anno, in particolar modo per quanto riguarda la temperatura dell'aria e l'umidità, sulla base dei dati climatici raccolti nel 2005 dalla stazione meteorologica installata presso l'aeroporto di Caselle Torinese.

La prima analisi (Figura 30) riporta l'andamento delle temperature su base oraria e mostra come i principali picchi di temperatura si registrino nei mesi di Giugno, Luglio ed Agosto con valori che, anche nelle ore notturne, non scendono al di sotto dei 17 °C.

Se si va a correlare l'andamento delle temperature con l'umidità relativa (Figura 31), si può notare come, escluse le ore notturne dove l'umidità è alta se confrontata rispetto al resto della giornata, i mesi invernali, ovvero fra Novembre e Febbraio, sono il periodo dove si presentano il maggior numero di picchi di umidità che corrispondono ai periodi con la presenza di maggiori precipitazioni atmosferiche, mentre nei mesi estivi e tra Marzo ed Aprile il valore di umidità può raggiungere valori anche molto bassi fino a toccare percentuali inferiori al 15%.

Figura 30. Andamento delle temperature

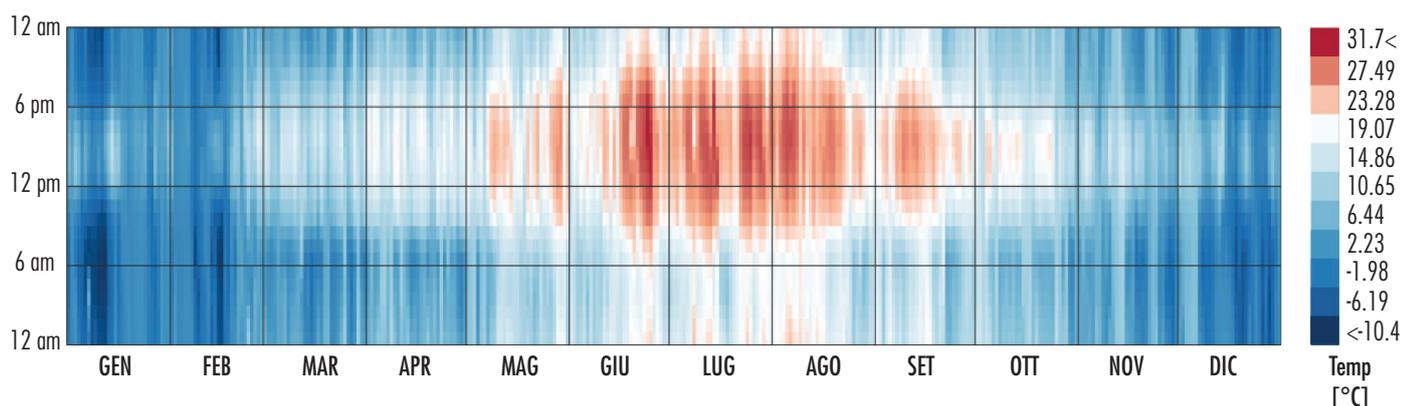
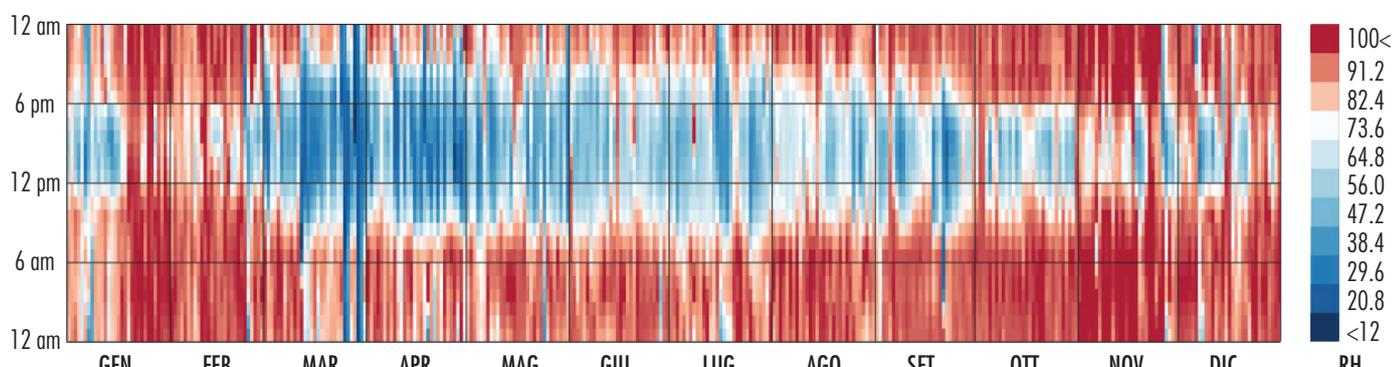


Figura 31. Andamento dell'umidità relativa



### 5.2.3 Soleggiamento

Completate le osservazioni sui dati climatici, quest'ultimi sono stati messi in relazione con il soleggiamento ed il percorso solare. Il grafico risultante mostra la posizione e l'altezza del sole nella volta celeste con le diverse temperature registrate per i mesi di Giugno, Settembre e Dicembre.

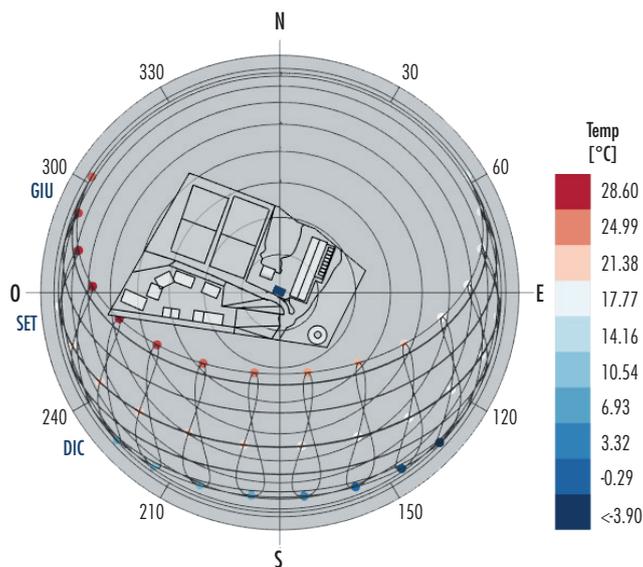
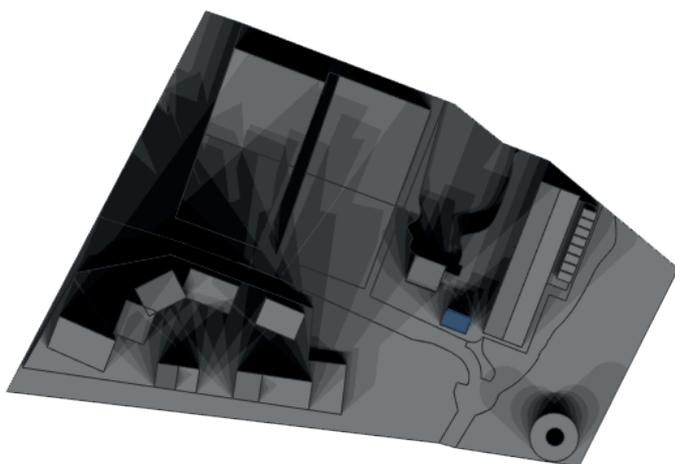


Figura 32. Percorso solare con andamento delle temperature

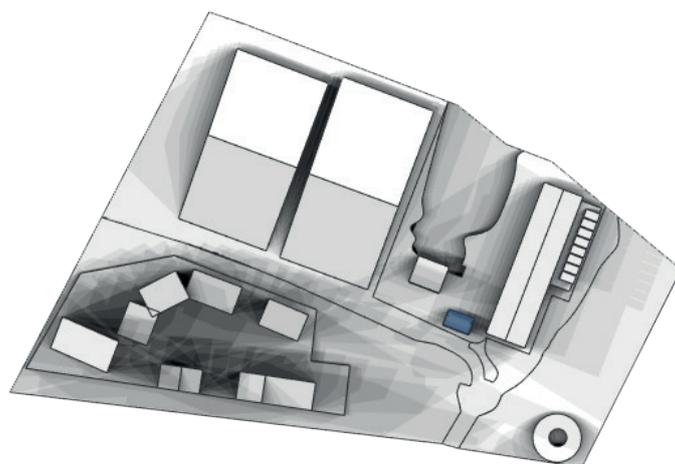
### 5.2.4 Ombreggiamento

A conclusione di queste analisi preliminari sono stati svolti alcuni studi solari in modo da meglio comprendere l'incidenza delle ombre portate dal contesto al laboratorio in determinati giorni dell'anno, in particolare i due solstizi (22 Dicembre e 21 Giugno) ed i due equinozi (20 Marzo e 21 Settembre).

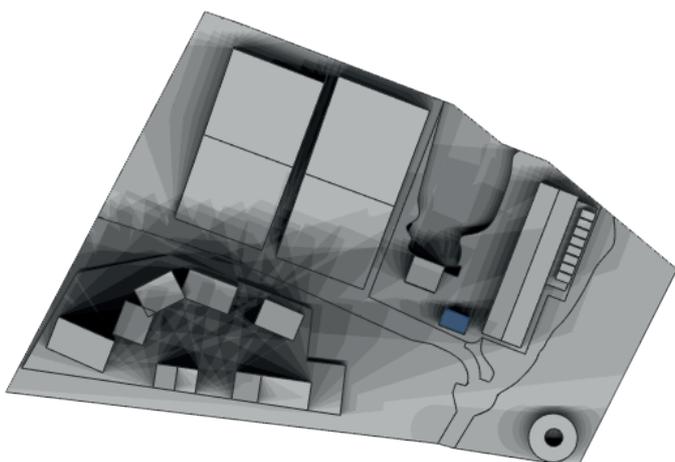
Figura 33. Studi solari



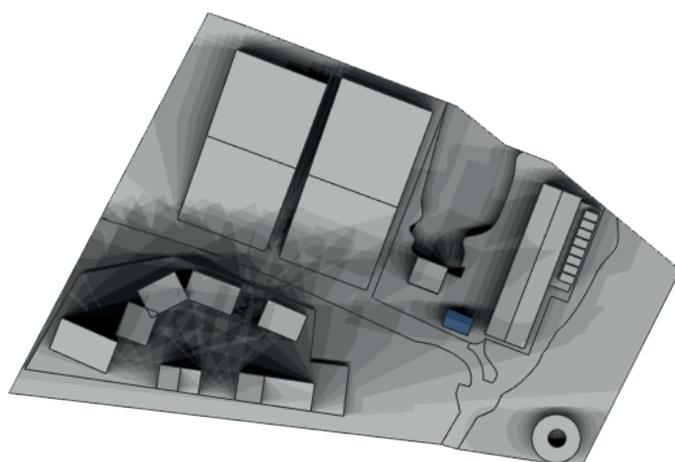
Solstizio d'inverno\_22 Dicembre



Solstizio d'estate\_21 Giugno



Equinozio di primavera\_22 Dicembre



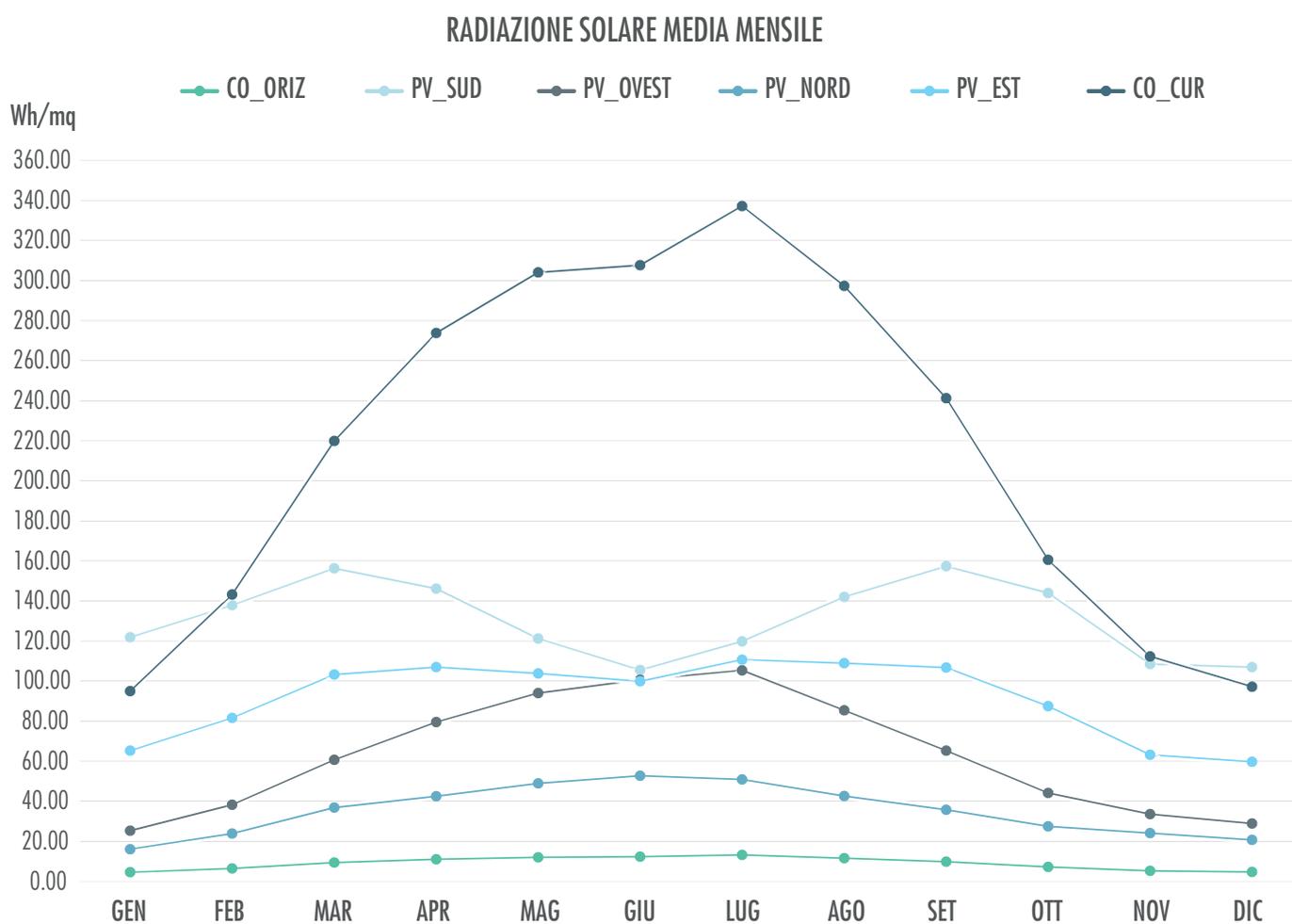
Equinozio d'autunno\_22 Dicembre

### 5.3 Osservazioni su superfici di misura

Una volta effettuate le osservazioni di carattere generale riguardanti i principali aspetti climatici ed il soleggiamento dell'area dove sarà installato il laboratorio, sono state svolte ulteriori analisi sui medesimi aspetti ma con un'attenzione particolare verso gli elementi di chiusura esterna della facility. Tutte le superfici sono state analizzate per giungere ad un determinato valore di radiazione media mensile incidente (Wh/m<sup>2</sup>) mentre un'attenzione ulteriore è stata posta verso quelle che si configurano come le principali superfici di misura, ovvero la parete a sud, la parete ospitante la doppia pelle ad est ed infine la chiusura orizzontale superiore (in presenza ed assenza di copertura curva), che sono state analizzate non solo su base quantitativa ma anche a livello qualitativo rispetto alla presenza di ombre ed alle radiazioni incidenti.

Figura 34. Tabella e grafico di andamento della radiazione media oraria mensile incidente sulle diverse superfici

SUPERFICI	RADIAZIONE SOLARE MEDIA MENSILE (Wh/mq)											
	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
CO_ORIZ	4.50	6.48	9.36	11.03	12.03	12.40	13.23	11.61	9.87	7.24	5.31	4.70
PV_SUD	121.86	137.91	156.33	146.21	121.26	105.53	119.83	142.06	157.38	143.97	108.55	106.98
PV_OVEST	25.29	38.28	60.72	79.50	93.98	100.71	105.38	85.44	65.29	44.09	33.61	28.85
PV_NORD	16.07	23.83	36.87	42.54	48.95	52.74	50.94	42.64	35.71	27.43	24.13	20.75
PV_EST	65.25	81.59	103.26	107.03	103.86	99.94	110.73	108.92	106.80	87.43	63.17	59.68
CO_CUR	95.00	143.28	219.92	273.81	304.05	307.68	337.26	297.38	241.26	160.52	112.27	97.20



Partendo dalla radiazione media mensile oraria incidente su ognuna delle superfici (Figura 34) si può notare come la copertura curva (CO\_CUR) e la parete sud (PV\_SUD) siano le superfici che ricevono maggiore radiazione solare nell'arco dell'anno, con dei picchi importanti che possono raggiungere i 330 Wh/m<sup>2</sup> nel mese di Luglio per la CO\_CUR e i 160 Wh/m<sup>2</sup> nel mese di Settembre per la PV\_SUD.

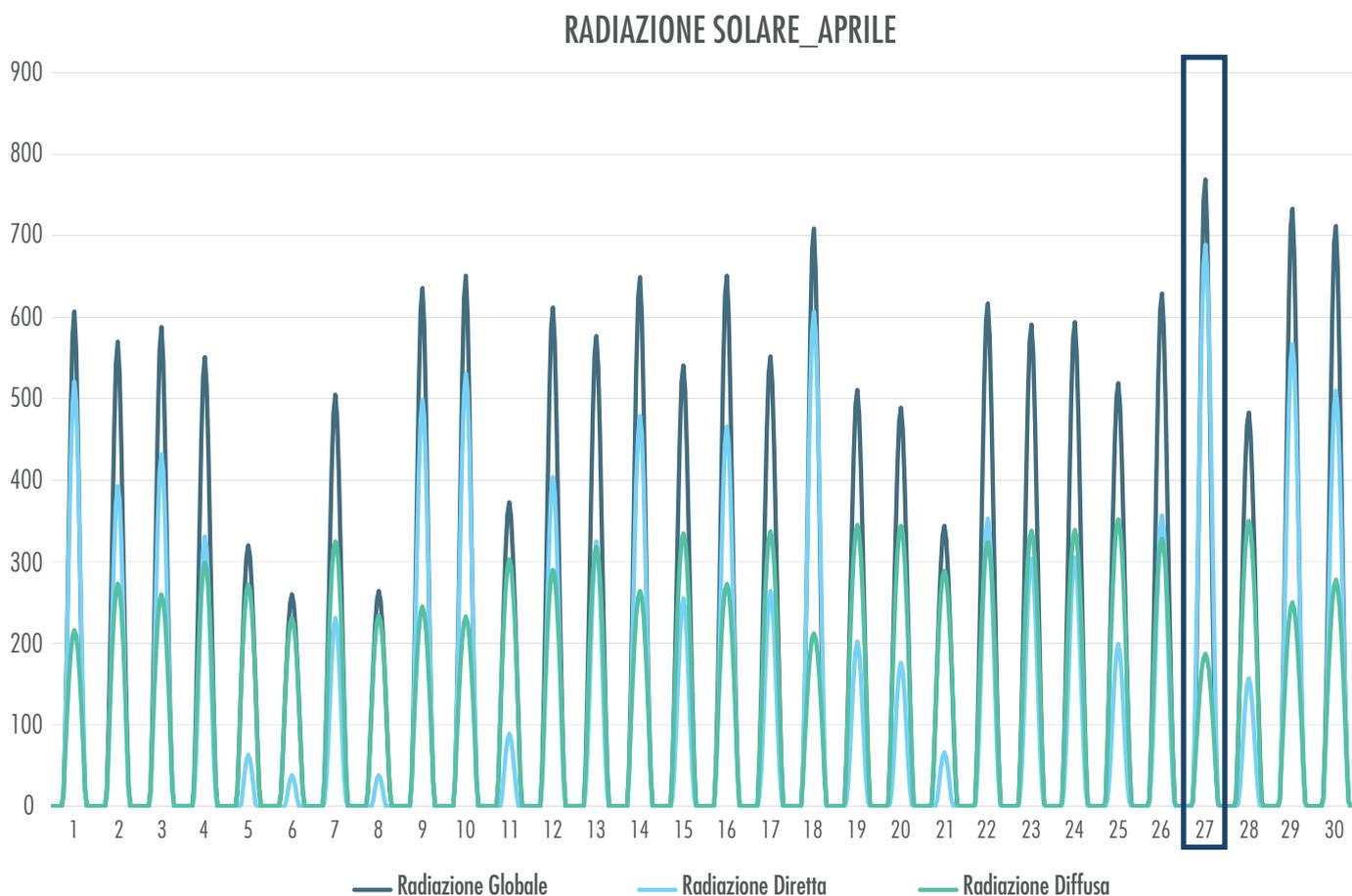
Risulta inoltre interessante notare come la radiazione incidente sulle superfici esposte ad est ed ovest (PV\_EST e PV\_OVEST) abbia un andamento simile con la parete ad est che, su base annua, risulta più colpita dalla radiazione solare.

Per contro, parete nord e copertura orizzontale (PV\_NORD e CO\_ORIZ) sono le superfici che ricevono meno radiazione in assoluto, con valori che possono arrivare al di sotto dei 5 Wh/m<sup>2</sup> per i mesi invernali per la CO\_ORIZ.

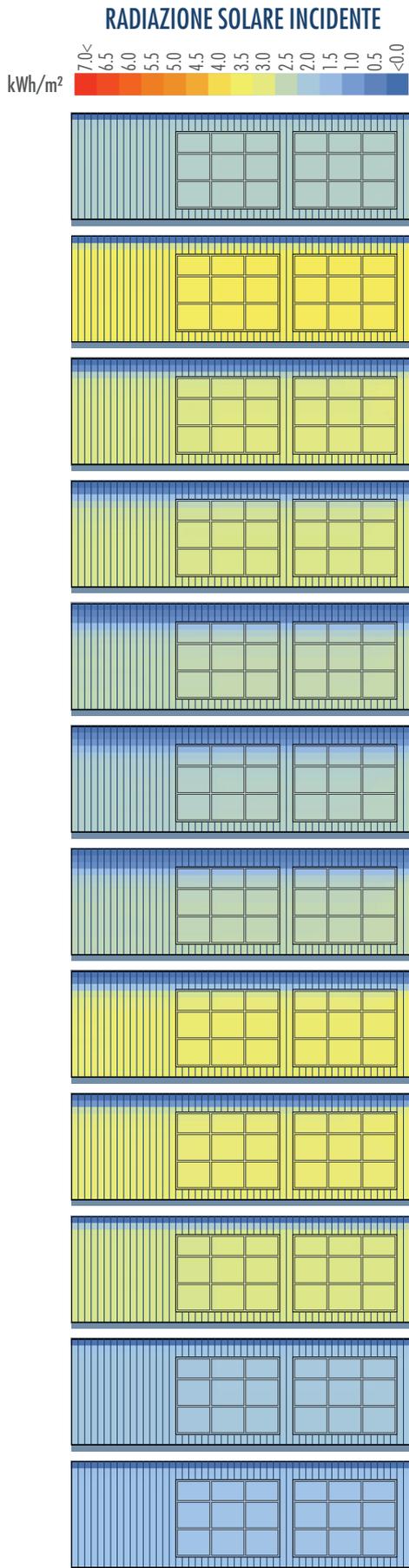
Prima di passare all'analisi particolareggiata delle principali superfici di misura, è necessario introdurre il metodo che è stato utilizzato per la scelta del giorno in grado di rappresentare in maniera significativa la condizione di soleggiamento/ombreggiamento dell'elemento sotto analisi.

Per la selezione del giorno durante il quale effettuare le analisi ci si è basati sui dati climatici precedentemente utilizzati, in modo da prendere in considerazione il primo giorno di cielo limpido (clear sky) della seconda metà del mese (Figura 35). I 12 giorni ottenuti sono stato utilizzati per l'esecuzione delle analisi giornaliere che hanno prodotto delle mappe di radiazione solare incidente e di ombreggiamento, sovrapponibili ai prospetti di facciata in modo da ottenere delle immagini di funzionamento della stessa nei vari periodi dell'anno.

Figura 35. Esempio di selezione del giorno di clear sky per il mese di Aprile



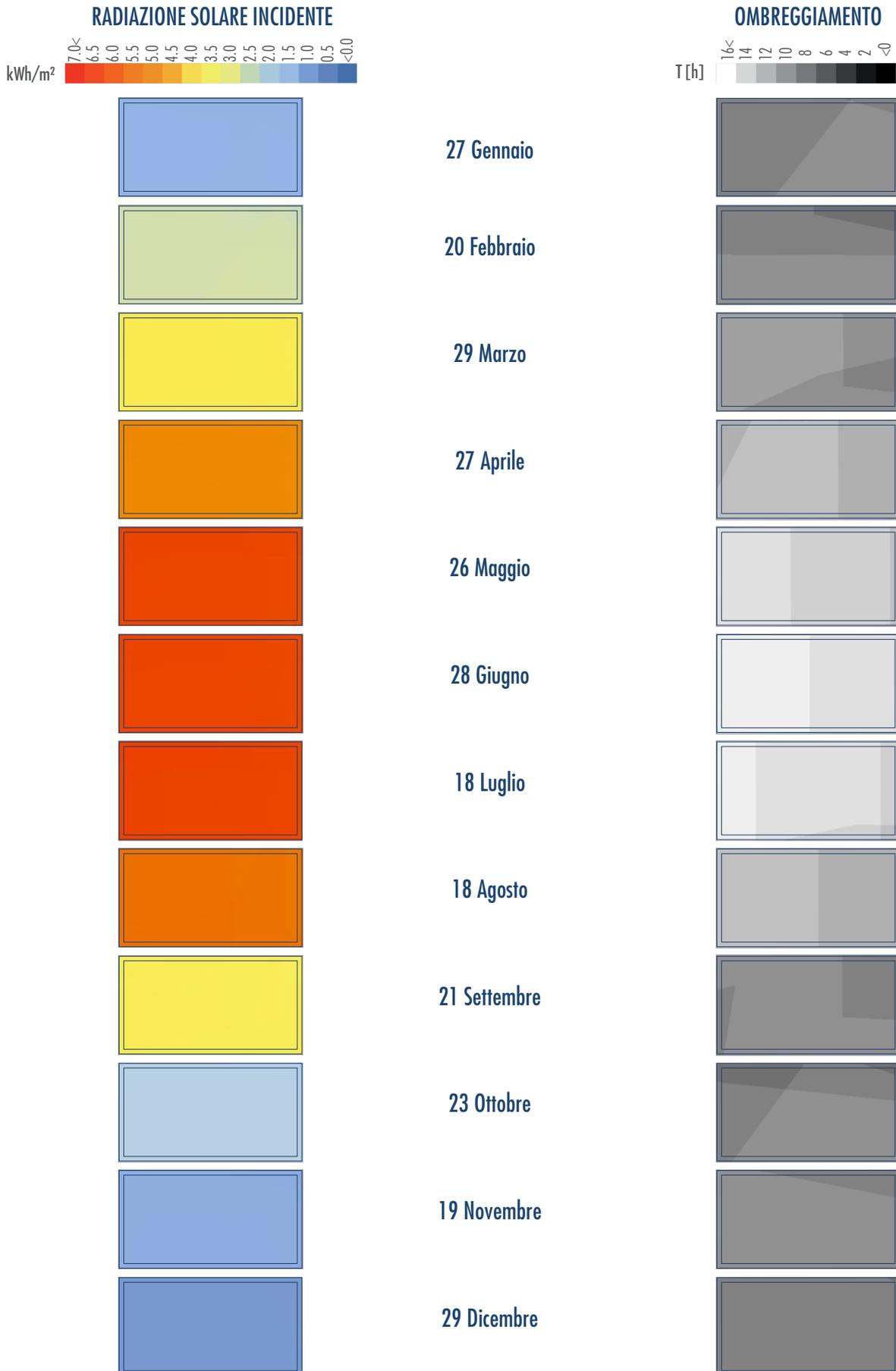
5.3.1 Parete Sud



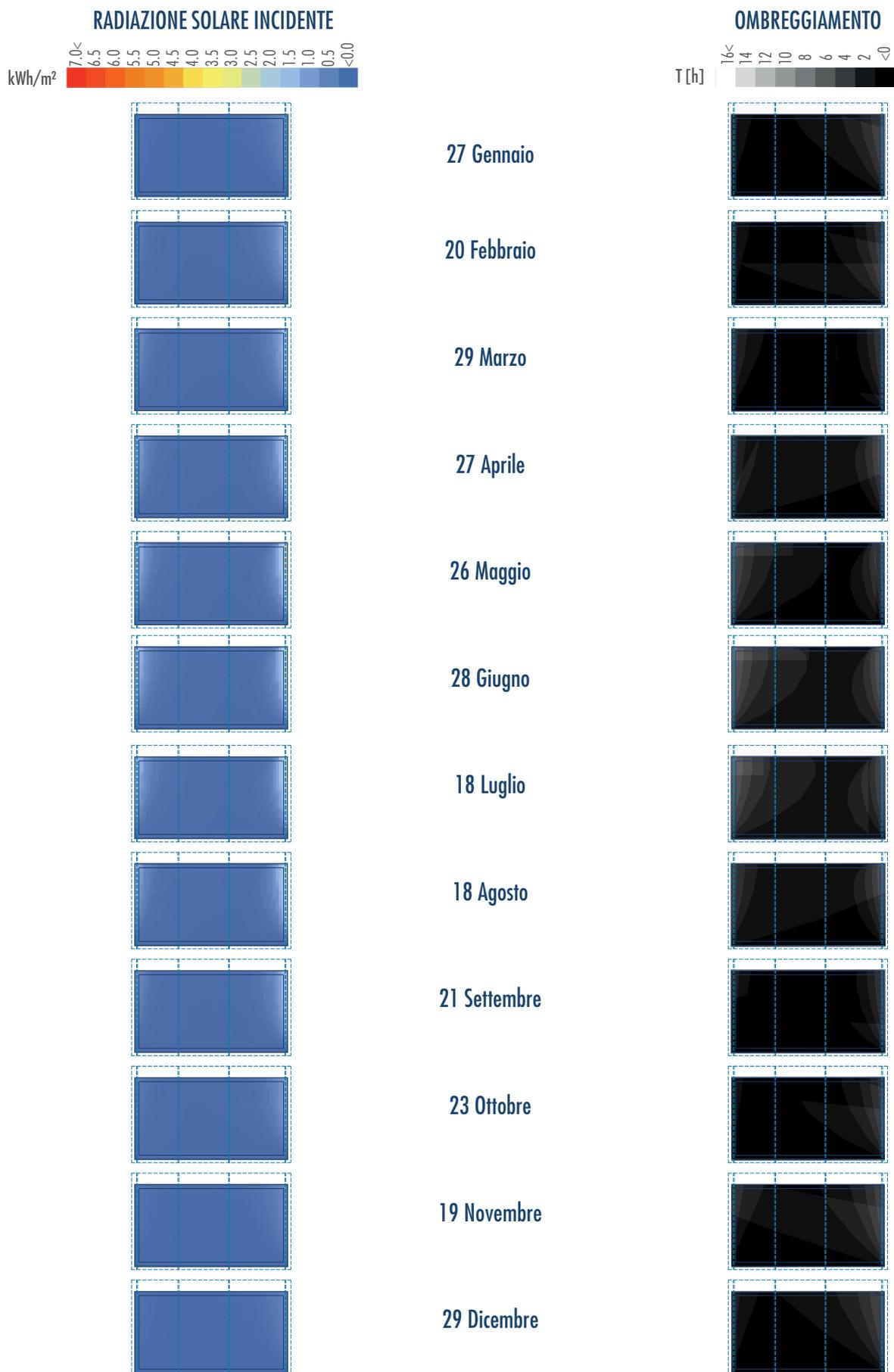
5.3.2 Parete Est



5.3.3 Copertura orizzontale priva di tettoia curva



5.3.4 Copertura orizzontale con tettoia curva





## 6. SIMULAZIONI ENERGETICHE E DI COMFORT

## 6. Simulazioni energetiche e di comfort

Una volta analizzati i parametri ambientali e le caratteristiche di contesto che vanno ad influire sulla facility, l'attenzione è stata rivolta verso tematiche riguardanti il consumo energetico della struttura ed alcuni aspetti di comfort. Una serie di osservazioni, eseguite sulla base di numerose ipotesi di configurazione possibili per il laboratorio, che hanno permesso di definire un ampio punto di partenza utilizzabile come base comune per una moltitudine di studi futuri.

### 6.1 Modello energetico

Per eseguire le simulazioni di carattere energetico è stato utilizzato, sempre all'interno del software di progettazione parametrica Grasshopper, un software dedicato per simulazioni ed analisi termiche, ovvero Energy Plus. Mentre per quanto riguarda le simulazioni di comfort, sempre all'interno della stessa piattaforma parametrica, è stato utilizzato Daysim, un plugin in grado di effettuare simulazioni relative al comfort illuminotecnico all'interno degli ambienti, così da fornire una serie di risultati relativi a numerosi indici dinamici.

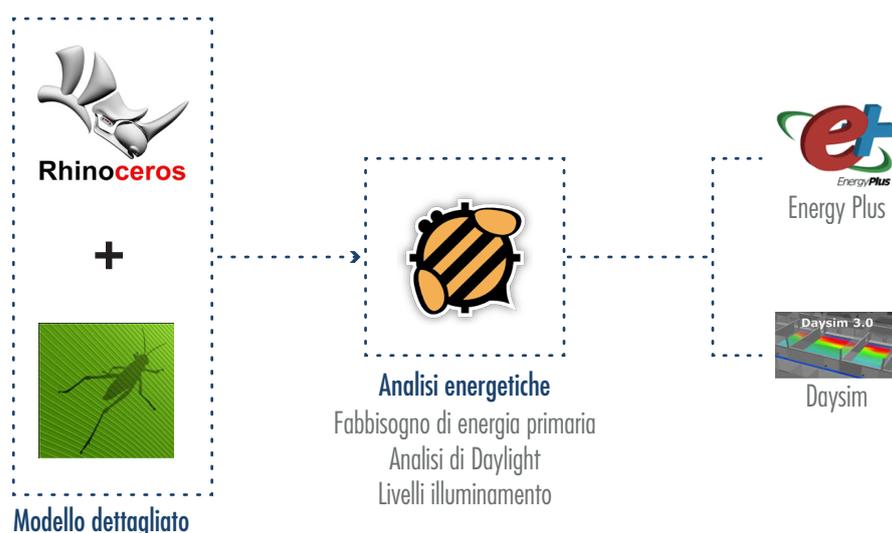


Figura 35. Schema dei software utilizzati

Per la realizzazione di tali simulazioni, è stato realizzato un modello più dettagliato rispetto a quanto utilizzato per le analisi di carattere climatico-preliminari. Inoltre, per tale modello (Figura 36), sono state apportate delle approssimazioni che possono essere divise in due categorie:

- *Di modello.* Vi sono due principali approssimazioni nella modellazione tridimensionale del laboratorio. La prima è che non sono stati modellati gli spessori effettivi di pareti e serramenti ma questi dati, insieme con le caratteristiche stratigrafiche e materiche degli soluzioni tecnologiche adottate, sono stati inseriti in un secondo momento attraverso Grasshopper ed Honeybee. La seconda è la modellazione della doppia pelle ad est, quest'ultima è stata trattata come una semplice superficie e non come due superfici con intercapedine;

- *Di simulazione.* Per le simulazioni energetiche, control room e stanza impianti sono state trattate come un ambiente unico aventi le medesime schedules di occupazione ed utilizzo del laboratorio. Il tramezzo che separa le due zone termiche è stato considerato adiabatico. Infine, i ponti termici, che non sono stati valutati a livello puntuale, sono stati tuttavia tenuti in considerazione andando ad aumentare del 15% la trasmittanza dell'involucro opaco.

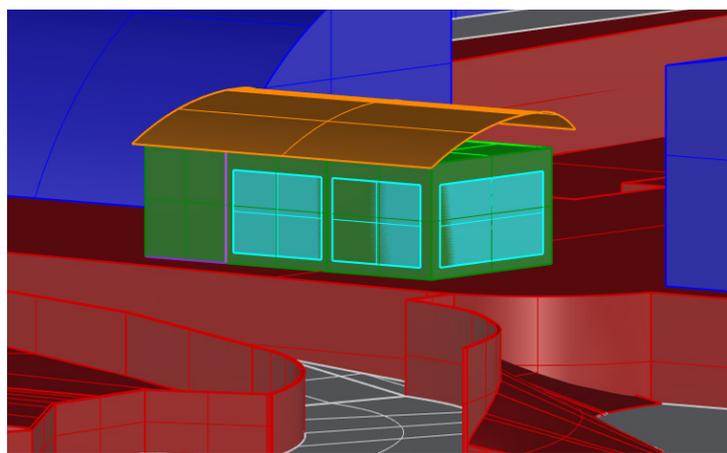


Figura 36. Modello dettagliato utilizzato per le simulazioni energetiche e di comfort

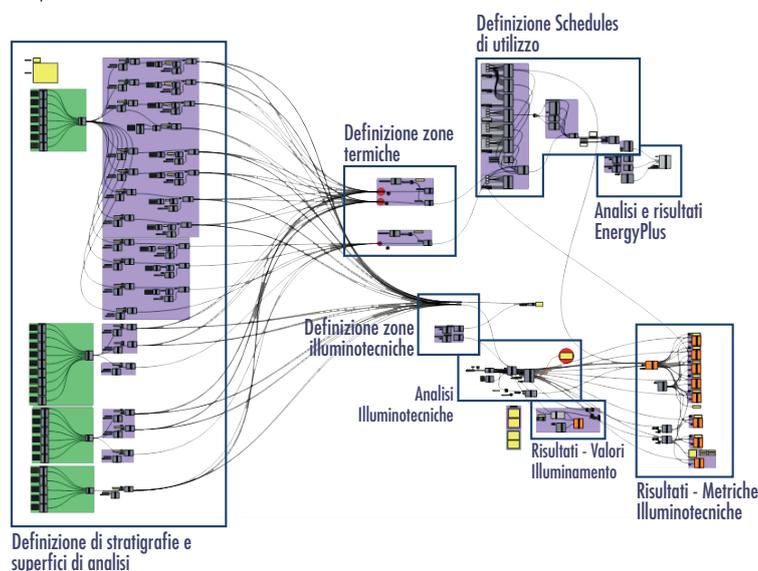


Figura 37. Modello Grasshopper del Laboratorio con sala unica di misura

## 6.2 Indici di valutazione

### 6.2.1 Energia Primaria - EP

Il primo indice di valutazione che necessita di essere analizzato è il quantitativo di energia primaria ( $EP_{GL}$ ), espressa in  $kWh/m^2y$ , necessaria per la climatizzazione ( $EP_C$ ), il riscaldamento ( $EP_H$ ) e l'illuminazione ( $EP_L$ ) della facility, normalmente sarebbe necessario tener conto anche dell'energia necessaria per la produzione di acqua calda sanitaria ( $EP_{DHW}$ ) ma nel caso sotto analisi il quantitativo è trascurabile.

$$EP_{GL} = EP_H + EP_C + EP_L \quad (6.1)$$

Ogni singolo fattore va a definire il quantitativo di energia che deve essere fornito all'impianto in questione, riferito all'unità di superficie o di volume lordo, tendendo in considerazione i rendimenti di emissione, regolazione e distribuzione (pari complessivamente al 90%) ed il fattore di conversione in energia primaria (Primary Energy Factor – PEF) che per Torino vale 0.41.

In aggiunta a questo fabbisogno energetico, che è funzione dei diversi carichi che agiscono sulla struttura rispetto all'intero anno solare, le simulazioni sono servite per definire le potenze di picco richieste dagli impianti per far fronte rispettivamente ai periodi più caldi, più freddi o meno luminosi. Valori che, se confrontati con i frattili del 96% e del 99%, permettono di fare un predimensionamento della potenza dell'impianto da installare.

### 6.2.2 Comfort illuminotecnico

Dal punto di vista illuminotecnico gli indici di valutazione degli ambienti che sono stati analizzati sono quattro, ovvero Daylight Autonomy (DA), Continuous Daylight Autonomy ( $DA_{CON}$ ), Useful Daylight Autonomy (UDI) ed infine Spatial Daylight Autonomy (sDA).

#### *Daylight Autonomy - DA*

Questo fattore dinamico rappresenta la percentuale di tempo, durante il periodo di occupazione, per cui un determinato punto all'interno dello spazio è sopra un certo livello di illuminazione, nel caso in questione 500 lux. Questa metrica è stata introdotta nel 1989 dall'Association Suisse des Electriciens e migliorato da Christoph Reinhart nei primi anni del 2000.

#### *Continuous Daylight Autonomy - $DA_{CON}$*

A completamento di quanto definito dal precedente indicide, è stato introdotto il Continuous Daylight Autonomy, ovvero una metrica che, partendo da quanto osservato dal DA, va a sommare delle percentuali per ogni punto analizzato che si trova ad un livello di illuminamento inferiore al valore di threshold ma diverso da 0. Questo credito parziale fornito a determinati punti comporta che il  $DA_{CON}$  sia sempre superiore al DA.

#### *Useful Daylight Autonomy - UDI*

Un ulteriore metrica analizzata è la Useful Daylight Autonomy, ovvero una metrica introdotta da Mardaljevic and Nabil (2005) (2011), che su base annua va ad identificare la percentuale di tempo, durante il periodo di occupazione, per cui il livello di illuminazione naturale orizzontale sul piano di lavoro è inferiore, superiore o all'interno di un determinato range, nel caso in analisi 100-3000 lux.

Tuttavia, tale classificazione può essere meglio spiegata come segue:

- $UDI_{<100}$  definito *fell-short* che identifica un contributo troppo basso per far fronte al comfort visivo;
- $UDI_{100-3000}$  definito *achieved* (che a sua volta può essere diviso nella componente *autonomous*  $UDI_{100-300}$  e nella componente *supplementary*  $UDI_{300-3000}$ ) che comporta un livello di illuminamento accettabile per lo svolgimento del compito visivo;
- $UDI_{>3000}$  definito *exceeded* correlato spesso a fenomeni di abbagliamento.

#### *Spatial Daylight Autonomy - sDA*

Infine, la Spatial Daylight Autonomy è la metrica meno restrittiva delle precedenti e si va ad identificare nel valore percentuale di punti analizzati che ricevono almeno 50 lux per il 50% del tempo su base annua e sempre considerando il periodo di occupazione.

## 6.3 Configurazioni

### 6.3.1 Laboratorio a sala di misura unica

La prima macrocategoria di laboratorio studiata è stata la sala di misura unica (dimensioni nette 8.40x6.32m per 3m di altezza), che a sua volta può essere suddivisa in quattro configurazioni differenti. Questa divisione ulteriore è dovuta ad una serie di combinazioni che analizzano la presenza o meno della tettoia di copertura curva e di un sistema di oscuramento della doppia pelle ad est.

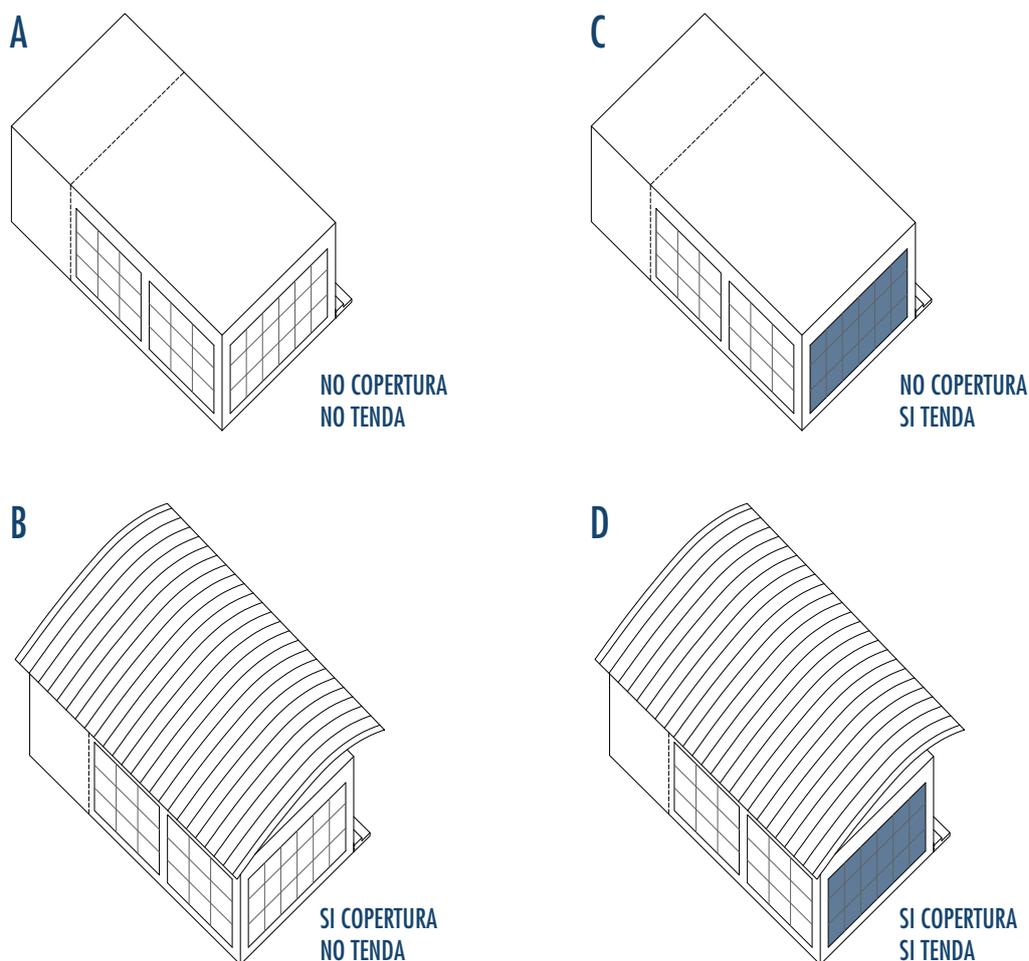


Figura 38. Configurazioni per laboratorio a cella di misura unica.

#### *Involucro opaco*

Come indicato nel paragrafo 4.3.2, i valori di trasmittanza dell'involucro opaco possono essere riassunti come segue:

Tabella 4. Caratteristiche termiche dell'involucro opaco

ELEMENTO	TRASMITTANZA [W/m <sup>2</sup> K]	MASSA FRONTALE [kg/m <sup>2</sup> ]	CAPACITA' TERMICA INTERNA [kJ/m <sup>2</sup> K]	CAPACITA' TERMICA ESTERNA [kJ/m <sup>2</sup> K]
<i>Elementi di chiusura orizzontale superiore</i>	0.152	291	14.8	116.5
<i>Elementi di chiusura verticale</i>	0.142	103	43.9	22.5
<i>Elementi di chiusura orizzontale inferiore</i>	0.182	966	44.2	126.2

Tuttavia, come precedentemente accennato, per ottenere il valore di trasmittanza effettivamente inserito all'interno del modello energetico bisogna considerare tali valori aumentati del 15% in modo da tenere in considerazione la presenza dei ponti termici. Date le caratteristiche di finitura interne, sono stati definiti i coefficienti di riflessione luminosa rispettivamente pari a:

Tabella 5. Valore di riflessione delle superfici interna

ELEMENTO	RIFLESSIONE [-]
<i>Pareti</i>	0.60
<i>Soffitto</i>	0.70
<i>Pavimento</i>	0.30

#### *Involucro trasparente*

Come indicato nel paragrafo 4.3.3, la scelta dei serramenti può essere riassunta come segue:

Tabella 6. Caratteristiche dei serramenti installati

ELEMENTO	TRASMITTANZA SERRAMENTO [W/m <sup>2</sup> K]	TRASMISSIONE LUMINOSA [-]	FATTORE FINESTRA [-]
<i>Serramenti SUD e NORD</i>	1.40	0.70	0.37
<i>Doppia pelle EST</i>	1.00	0.50	0.35

### 6.3.1 Laboratorio a sala di misura unica

Mantenendo le medesime caratteristiche di involucro sopracitate, sia per la parte opaca che per la parte trasparente, la seconda configurazione considera la divisione della sala di misura in due ambienti identici aventi le medesime dimensioni (4.20x6.32m per 3m di altezza). In aggiunta, per facilitare il confronto fra i diversi casi studio, sono state riprodotte le stesse considerazioni fatte per la presenza o meno della copertura, per entrambi gli spazi, e per l'utilizzo di un elemento completamente oscurante per la doppia pelle, che a laboratori divisa va ad influenzare solo ed esclusivamente il laboratorio posto ad est.

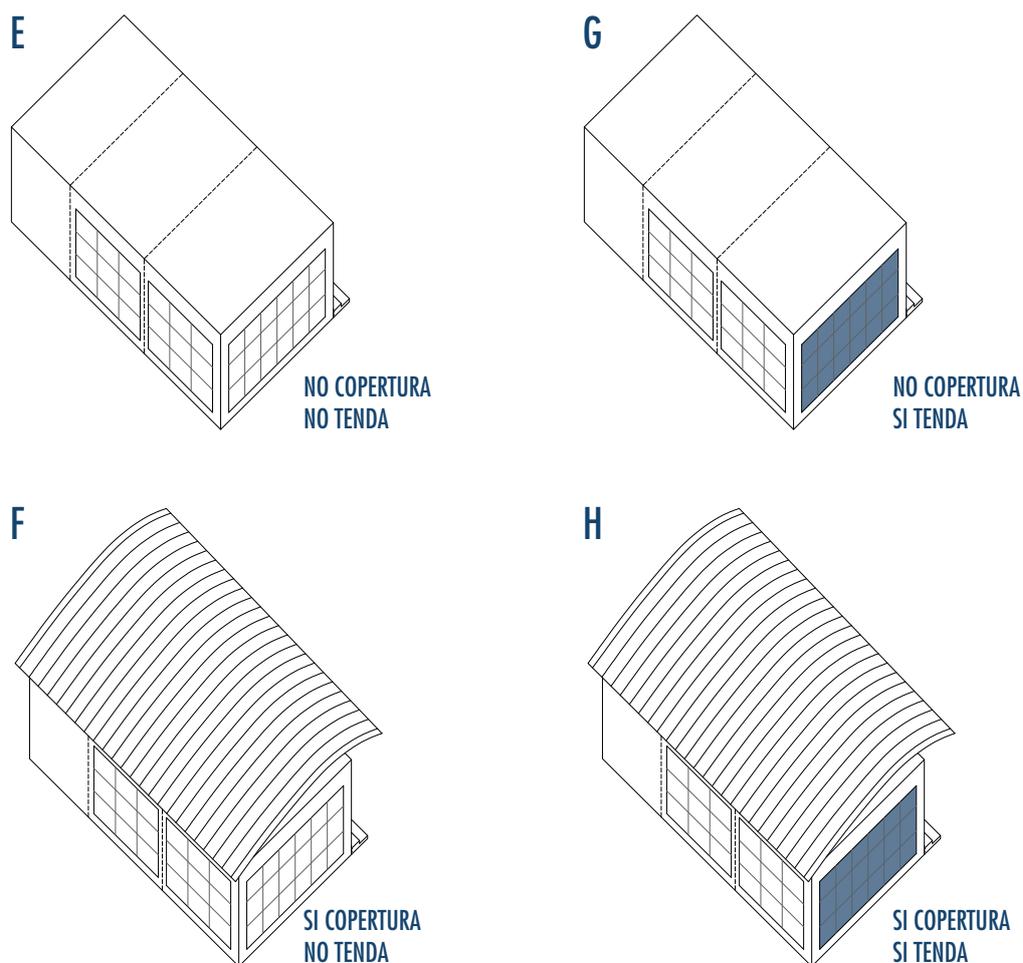


Figura 39. Configurazioni per laboratorio a cella di misura doppia.

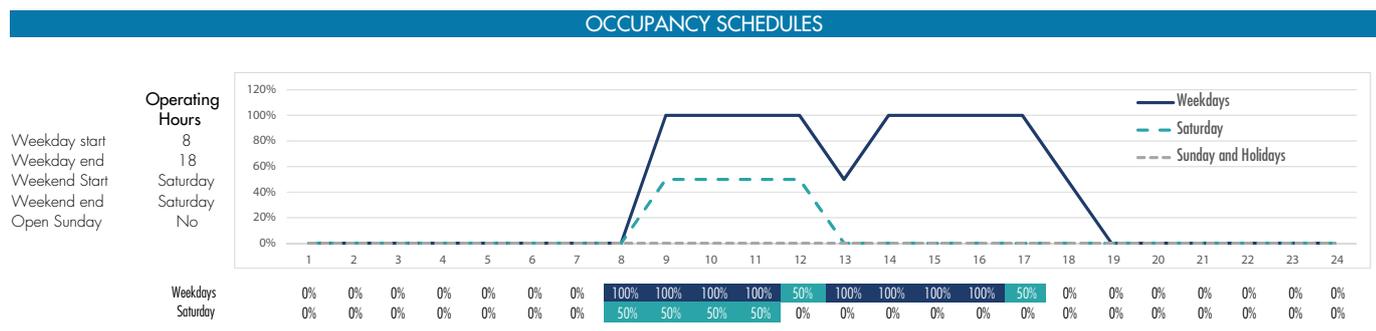
## 6.4 Schedules

### 6.4.1 Schedules di occupazione

Una volta definita la volontà di testare il laboratorio come spazio ad uso ufficio, per la definizione del periodo di occupazione della facility si sono utilizzate le direttive proposte dallo standard ASHRAE 90.1 del 2007. Secondo quanto indicato, il laboratorio deve essere considerato completamente occupato dal lunedì al venerdì per la fascia oraria che va dalle ore 8.00 alle ore 18.00 con due momenti, rispettivamente dalle 12.00 alle 13.00 e dalle 17.00 alle 18.00, dove invece viene considerato occupato solo per metà. Per il sabato invece, considerato come giorno lavorativo, il laboratorio viene trattato come occupato per metà della sua capacità solo per la prima parte della giornata, ovvero dalle 8.00 alle 12.00. La domenica, come giorno festivo, il laboratorio

viene trattato come spazio non occupato. In Figura 39 è mostrata la schedules su base settimanale con i relativi valori di occupazione ed utilizzo per ogni ora.

Figura 40. Schedules di occupazione



#### 6.4.2 Schedules per apparecchiature elettroniche

In linea con quanto precedentemente indicato per l'occupazione, le attrezzature elettroniche sono state considerate come accese solo nelle fasce orarie di occupazione e secondo le stesse proporzioni di presenza rispetto agli orari ed al giorno della settimana precedentemente indicati. Il carico considerato è stato abbastanza basso, pari a 6 W/m<sup>2</sup>, che corrisponde all'utilizzo di un laptop per ognuna delle sei postazione di lavoro.

#### 6.4.3 Schedules di ventilazione ed infiltrazione

Per quanto riguarda i valori di ventilazione degli ambienti sono stati impostati secondo quanto indicato dalla norma CEN/TR 16789-2 del 2017. In tale testo, fissati i periodi di occupazione tramite la schedules apposita, la ventilazione per ambienti ad uso ufficio di II categoria di comfort (ovvero per spazi con un normale aspettativa di qualità dell'aria) vi sono due valori da prendere in considerazione, una ventilazione espressa sulla base della superficie dell'ambiente ed una ventilazione sulla base degli occupanti. La ventilazione a seconda dell'area è fissata per un quantitativo di 0.7 l/s m<sup>2</sup> (0.0007 m<sup>3</sup>/s m<sup>2</sup>) mentre la ventilazione specifica per persona è pari a 7 l/s (0.007 m<sup>3</sup>/s). Infine, date le caratteristiche tecnologiche dell'edificio, è stato preso in considerazione un valore costante di infiltrazione d'aria pari a 0.00015 m<sup>3</sup>/s m<sup>2</sup> di facciata, che corrisponde ad un valore intermedio per un edificio avente tenuta all'aria molto alta ed un edificio standard.

#### 6.4.4 Schedules di climatizzazione degli ambienti

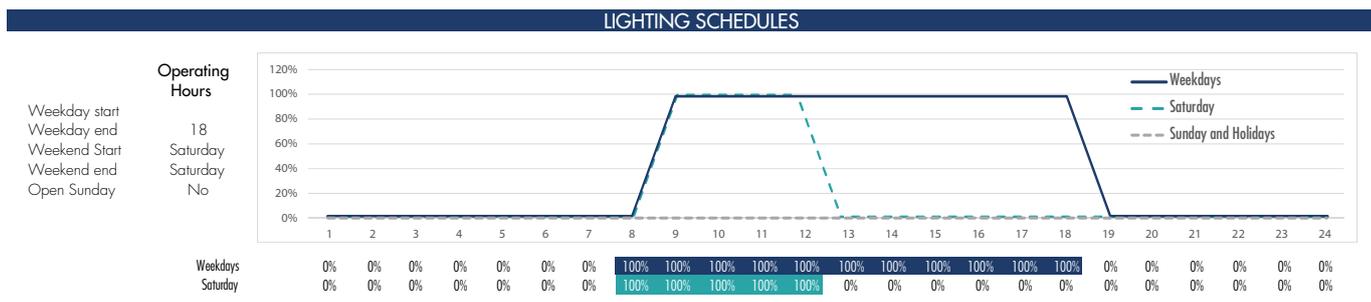
Sia il sistema di climatizzazione che di riscaldamento sono gestiti sulla base della schedules di occupazione in modo tale che gli impianti siano in funzione solo nel momento in cui l'ambiente è occupato. Tuttavia, sono state fissate delle temperature di setback, sia per il periodo estivo (40 °C) che per quello invernale (12 °C), in modo tale che l'impianto entri in funzione nel momento in cui la temperatura interna sia più bassa/alta rispetto al limite fissato.

### 6.4.5 Schedules di illuminamento

Per concludere, il programma di accensione dell'impianto di illuminazione del laboratorio è basato sull'occupazione degli ambienti con una leggera modifica. Se infatti nella schedules dell'occupazione vi sono degli orari dove si considerano gli spazi come occupati per metà, gli stessi periodi temporali non si trasformano in momenti dove solo il 50% delle luci in ambiente sono attive ma vengono considerati tutti i corpi illuminanti accesi.

Secondo quanto riportato nella CEN/TR 16789-1, queste lampade sono state ipotizzate come sistemi a led con una densità di installazione pari a 7 W/m<sup>2</sup>.

Figura 41. Schedules per l'illuminazione dei locali



### 6.5 Analisi dei risultati

Nei successivi paragrafi, attraverso delle schede specifiche, verranno esposti ed analizzati i risultati ottenuti per le otto diverse configurazioni sopracitate che, per facilità di lettura, vengono riproposte attraverso il seguente elenco:

**CONF\_A:** Laboratorio a sala unica senza copertura e senza elemento oscurante ad est;

**CONF\_B:** Laboratorio a sala unica con copertura e senza elemento oscurante ad est;

**CONF\_C:** Laboratorio a sala unica senza copertura e con elemento oscurante ad est;

**CONF\_D:** Laboratorio a sala unica con copertura ed elemento oscurante ad est.

**CONF\_E:** Laboratorio con sala doppia senza copertura e senza elemento oscurante ad est;

**CONF\_F:** Laboratorio con sala doppia con copertura e senza elemento oscurante ad est;

**CONF\_G:** Laboratorio con sala doppia senza copertura e con elemento oscurante ad est;

**CONF\_H:** Laboratorio con sala doppia con copertura ed elemento oscurante ad est.

### 6.5.1 Configurazione A

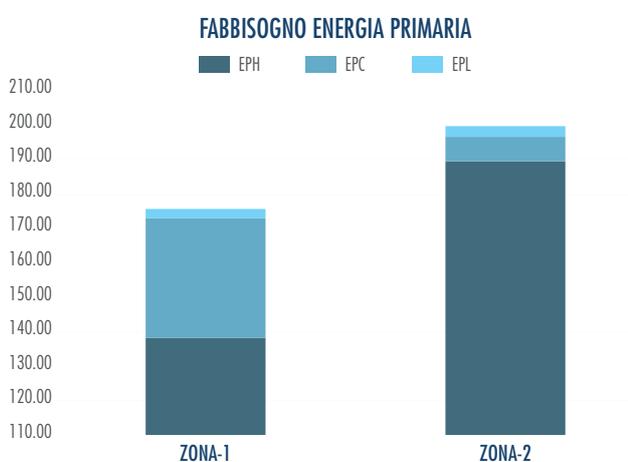
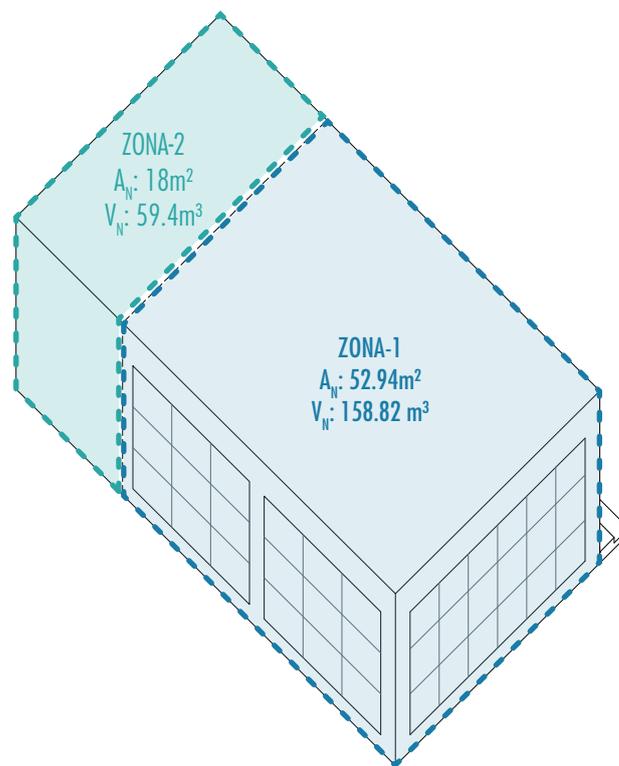
#### SIMULAZIONI ENERGETICHE

##### Zona\_1 - Laboratorio di Misura

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 138.38 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 34.68 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.69 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

##### Zona\_2 - Contro Room + Stanza Impianti

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 189.57 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 7.08 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 3.10 \text{ kWh/m}^2\text{y}$



**ENERGIA PRIMARIA GLOBALE CONFIGURAZIONE - A** **181.85 kWh/m²K**

POTENZA DI PICCO

$$Q_{MAX,H} = 28.21 \text{ kW}$$

$$Q_{MAX,C} = 10.85 \text{ kW}$$

FRATTILE 99%

$$Q_{99\%,H} = 17.17 \text{ kW}$$

$$Q_{99\%,C} = 5.20 \text{ kW}$$

FRATTILE 96%

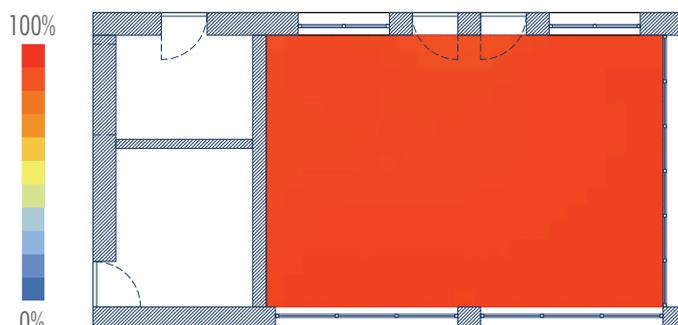
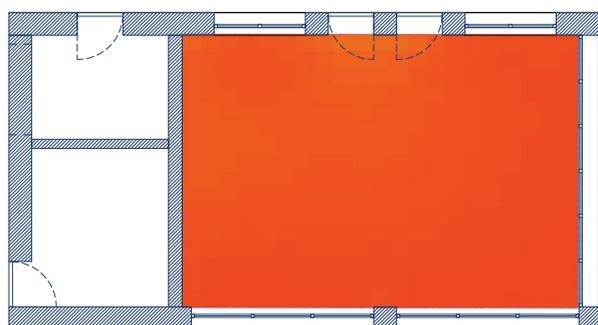
$$Q_{96\%,H} = 11.34 \text{ kW}$$

$$Q_{96\%,C} = 1.37 \text{ kW}$$

#### ANALISI DAYLIGHT

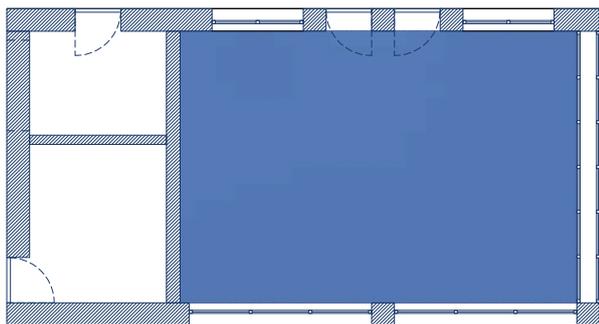
DAYLIGHT AUTONOMY - DA  
90.97

CONTINUOUS DAYLIGHT AUTONOMY - DA<sub>CON</sub>  
94.63



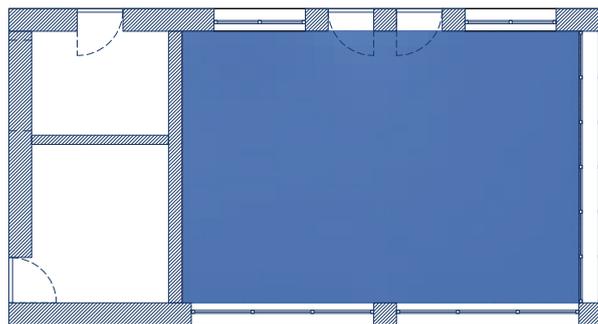
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub><100</sub>: 3.32



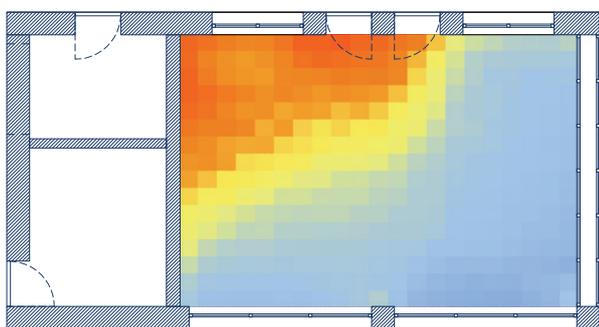
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>100-300</sub>: 1.87



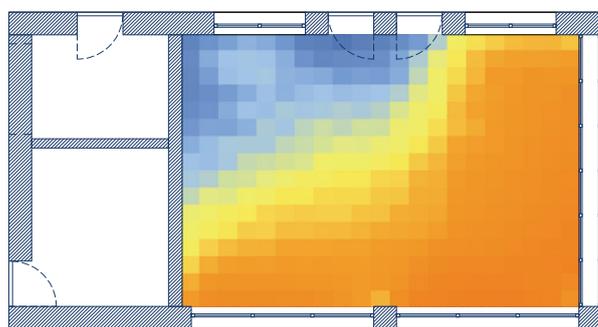
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>300-3000</sub>: 41.56



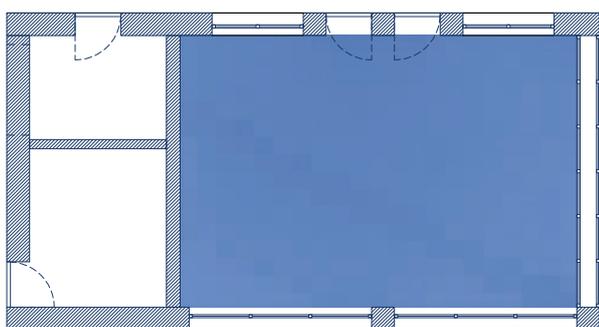
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>>3000</sub>: 52.87

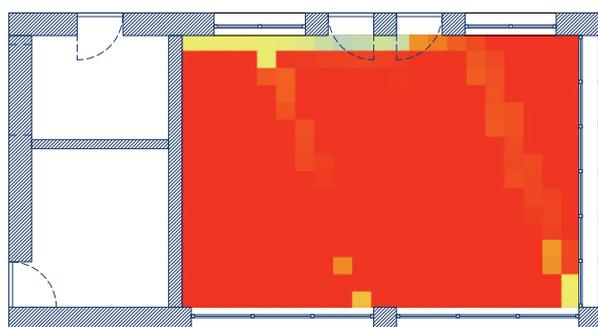


ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorni clear sky

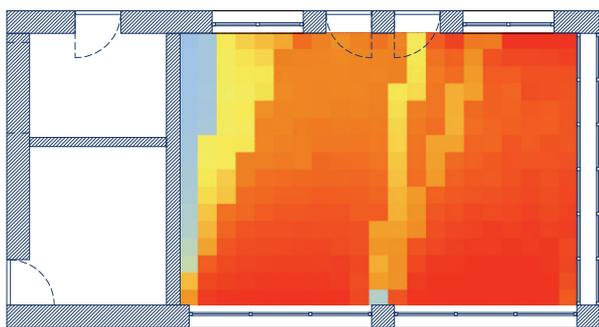
29 Dicembre\_ore 9.00



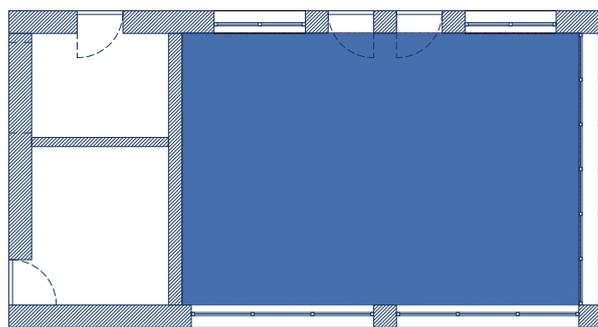
29 Dicembre\_ore 12.00



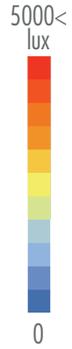
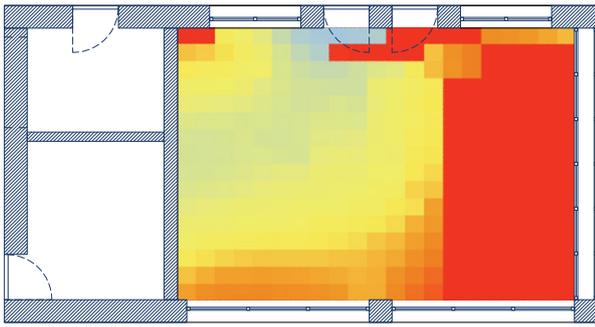
29 Dicembre\_ore 15.00



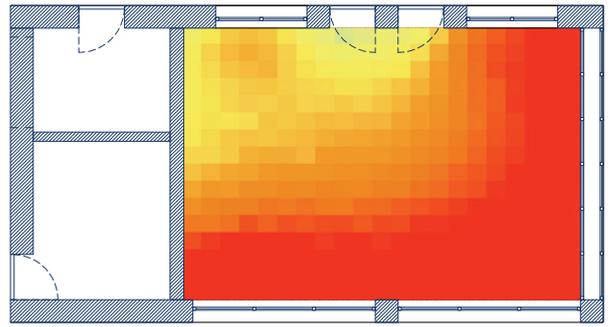
29 Dicembre\_ore 18.00



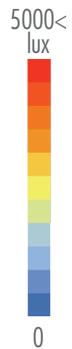
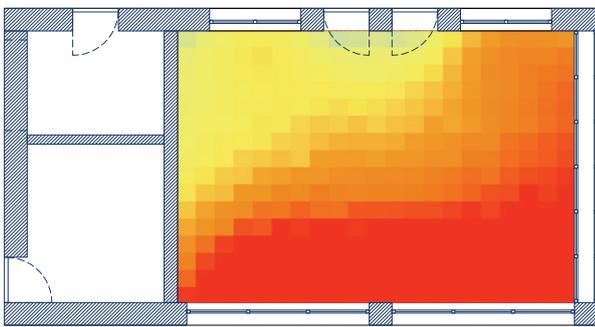
28 Giugno\_ore 9.00



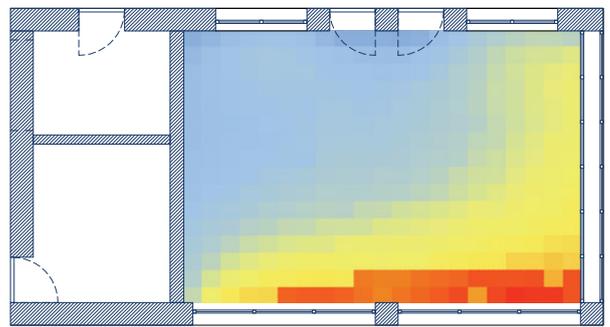
28 Giugno\_ore 12.00



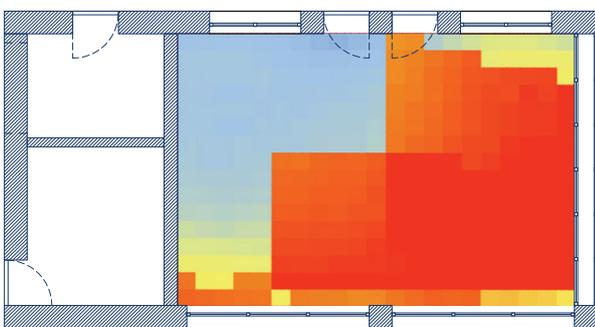
28 Giugno\_ore 15.00



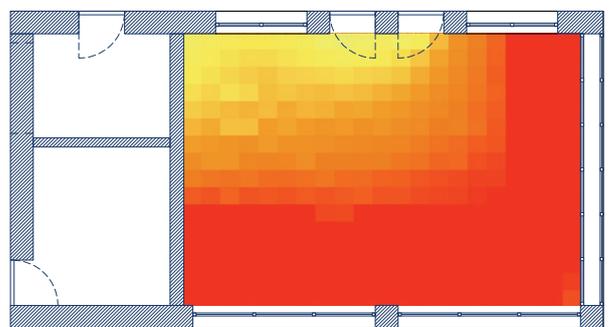
28 Giugno\_ore 18.00



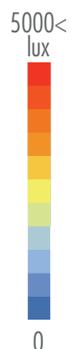
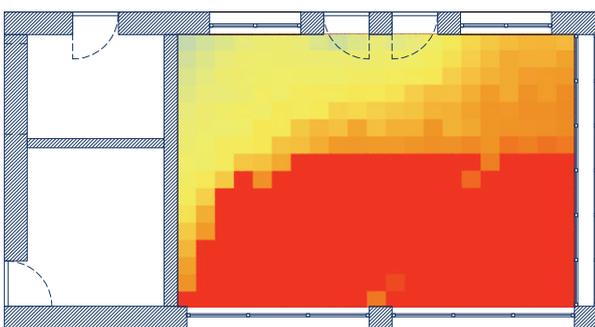
21 Settembre\_ore 9.00



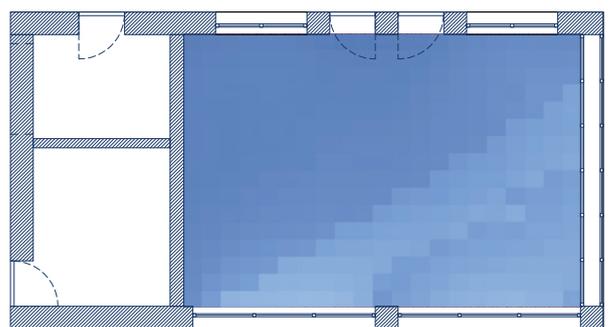
21 Settembre\_ore 12.00



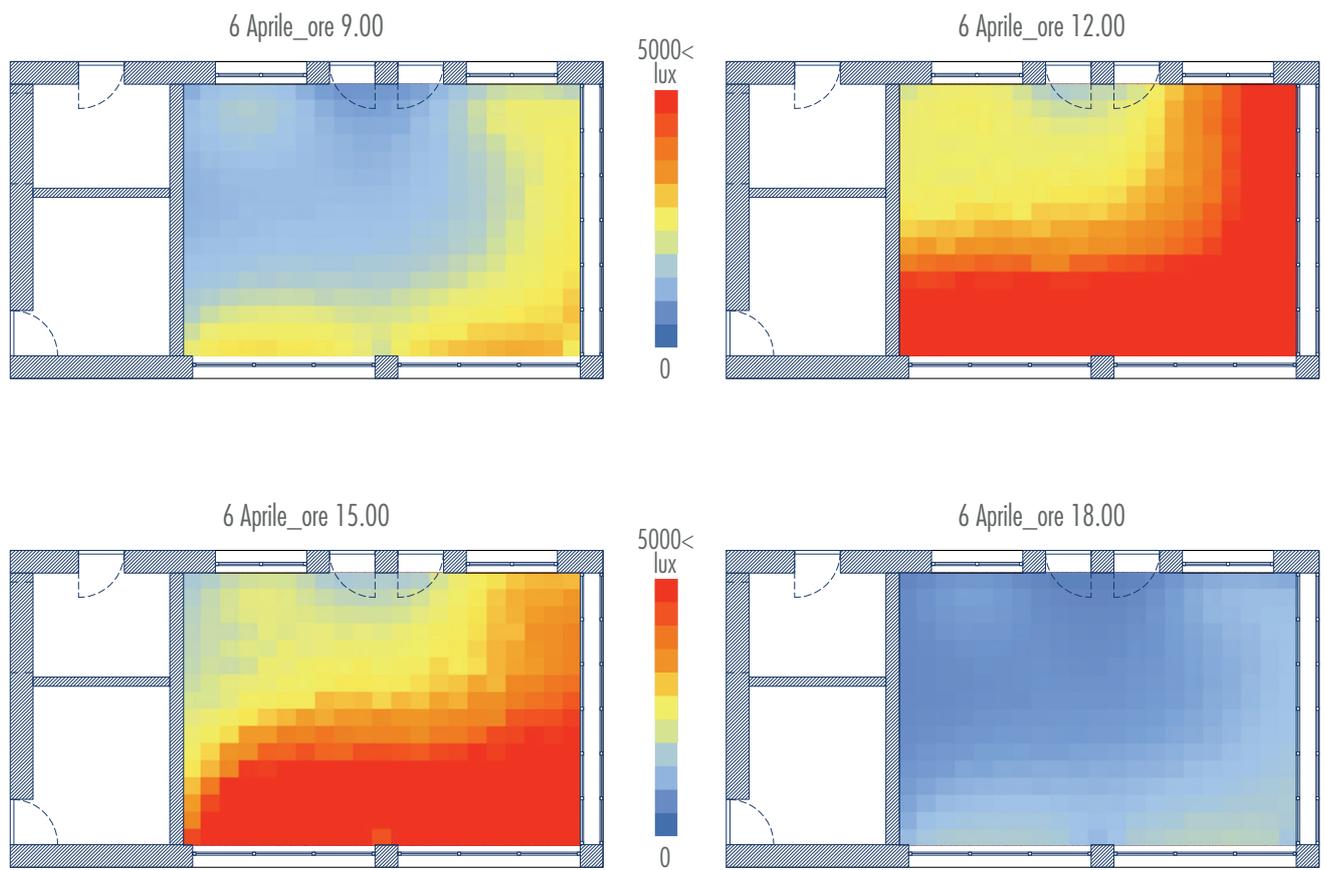
21 Settembre\_ore 15.00



21 Settembre\_ore 18.00



**ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorno cielo coperto**



### 6.5.2 Configurazione B

#### SIMULAZIONI ENERGETICHE

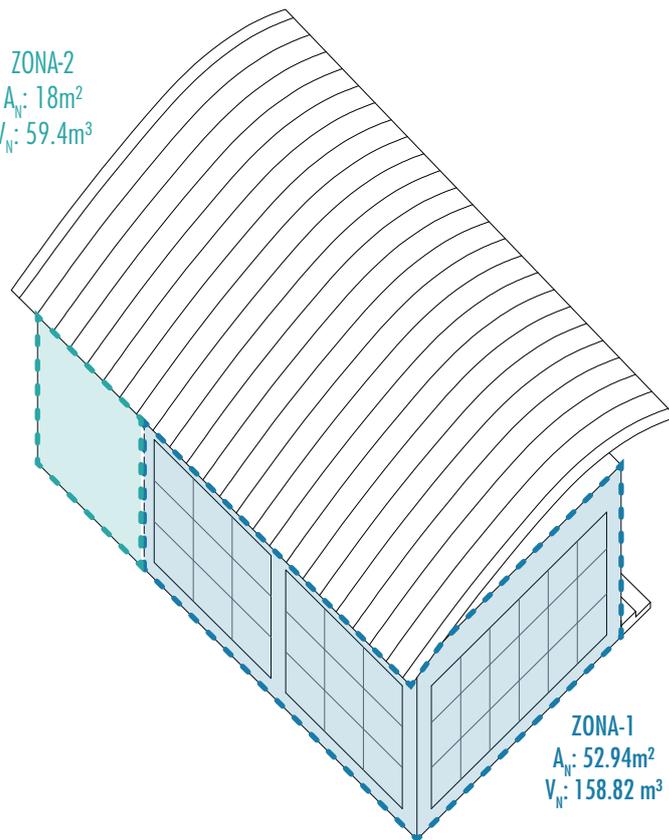
##### Zona\_1 - Laboratorio di Misura

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 137.78 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 28.29 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.79 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

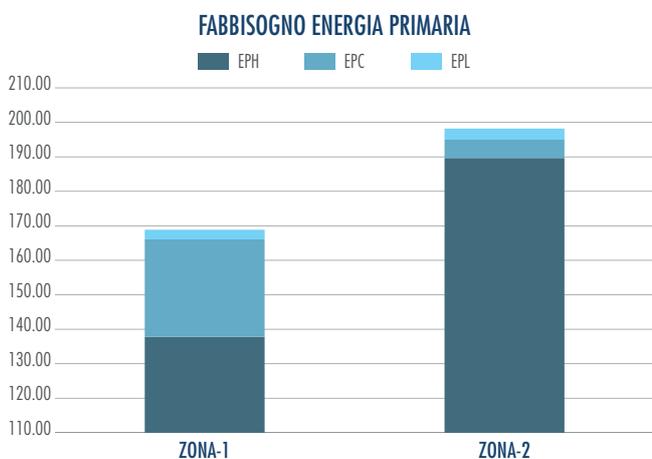
##### Zona\_2 - Contro Room + Stanza Impianti

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 189.66 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 5.29 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 3.22 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

ZONA-2  
 $A_N: 18\text{m}^2$   
 $V_N: 59.4\text{m}^3$



ZONA-1  
 $A_N: 52.94\text{m}^2$   
 $V_N: 158.82 \text{ m}^3$



**ENERGIA PRIMARIA GLOBALE CONFIGURAZIONE - B** **176.30 kWh/m²K**

POTENZA DI PICCO

$$Q_{MAX,H} = 27.64 \text{ kW}$$

$$Q_{MAX,C} = 9.88 \text{ kW}$$

FRATTILE 99%

$$Q_{99\%,H} = 16.96 \text{ kW}$$

$$Q_{99\%,C} = 4.30 \text{ kW}$$

FRATTILE 96%

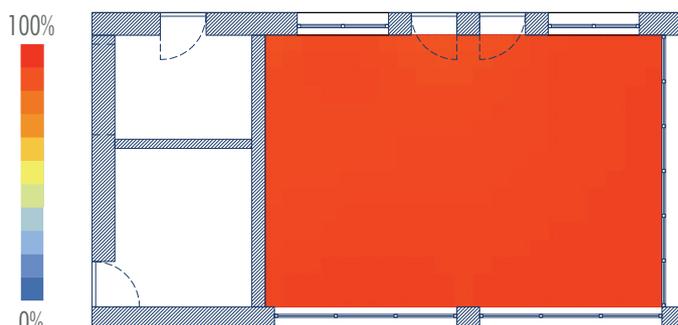
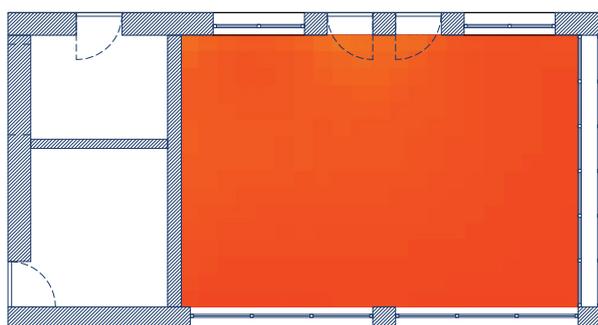
$$Q_{96\%,H} = 11.28 \text{ kW}$$

$$Q_{96\%,C} = 1.02 \text{ kW}$$

#### ANALISI DAYLIGHT

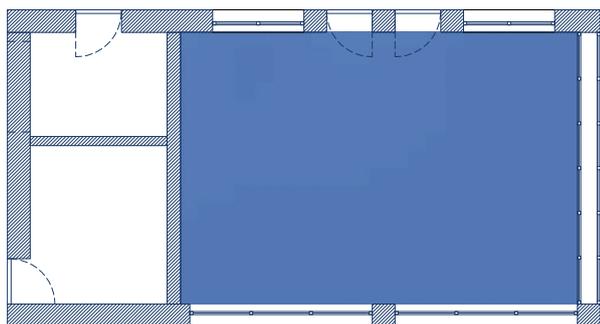
DAYLIGHT AUTONOMY - DA  
**90.63**

CONTINUOUS DAYLIGHT AUTONOMY - DA<sub>CON</sub>  
**94.47**



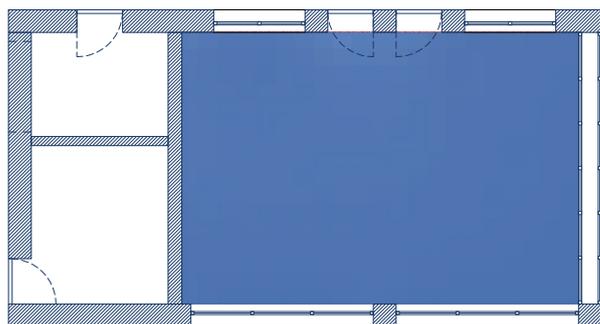
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub><100</sub>: 3.38



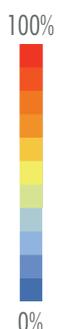
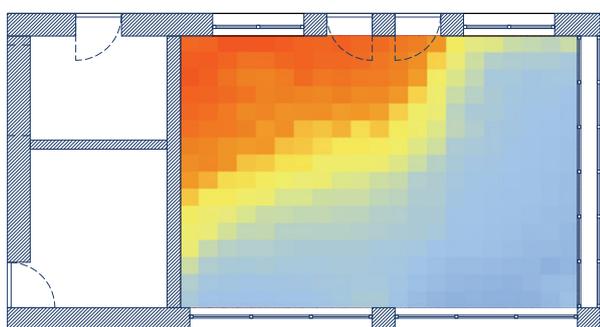
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>100-300</sub>: 1.98



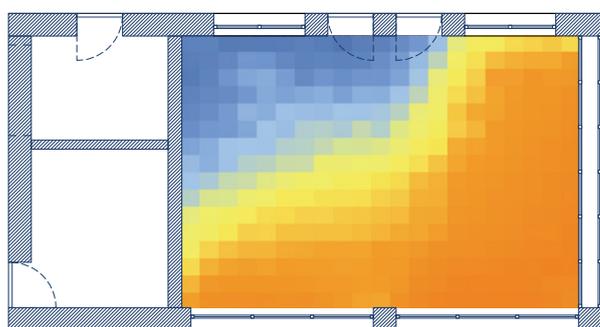
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>300-3000</sub>: 43.56



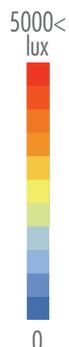
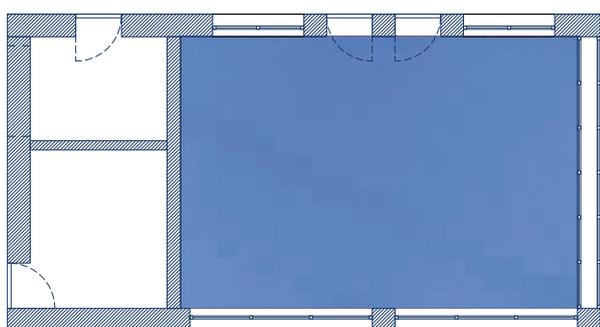
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>>3000</sub>: 50.72

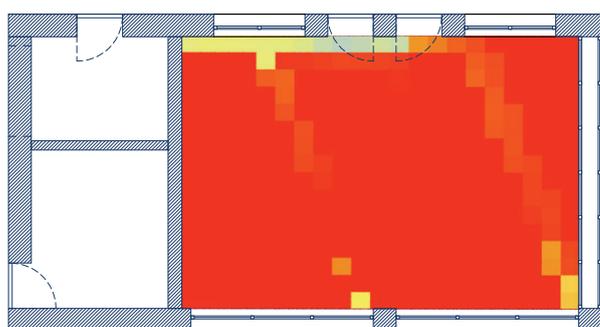


ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorni clear sky

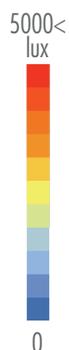
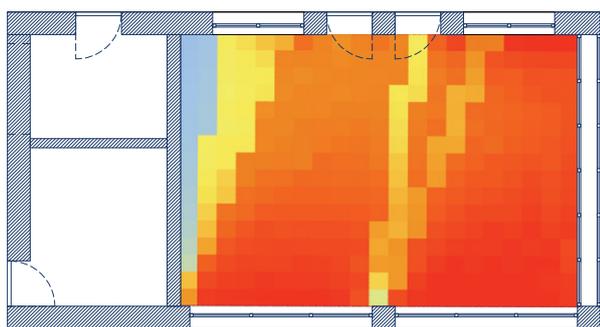
29 Dicembre\_ore 9.00



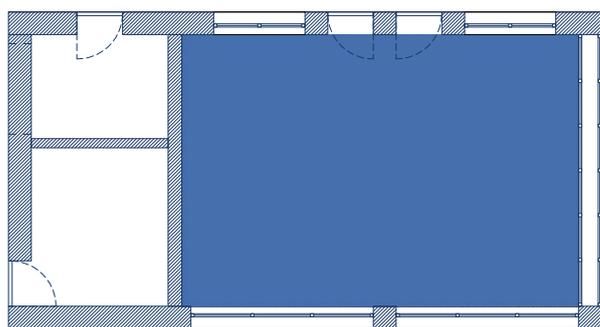
29 Dicembre\_ore 12.00



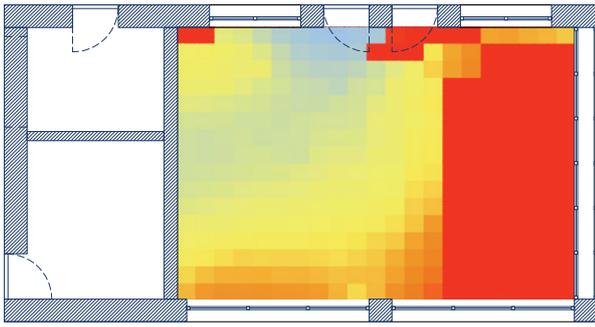
29 Dicembre\_ore 15.00



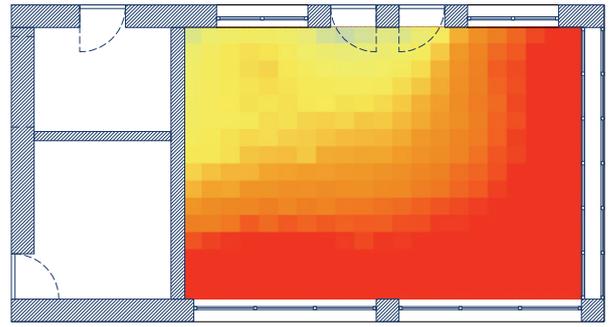
29 Dicembre\_ore 18.00



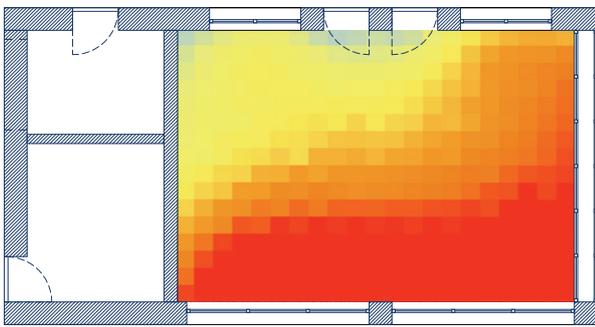
28 Giugno\_ore 9.00



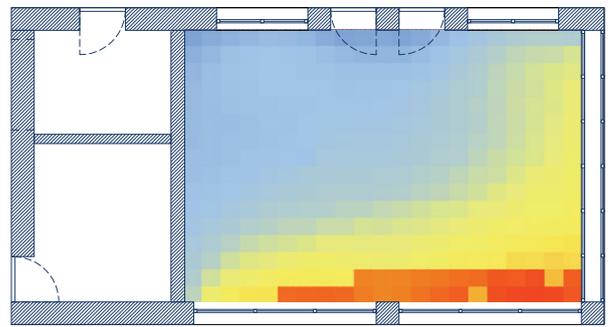
28 Giugno\_ore 12.00



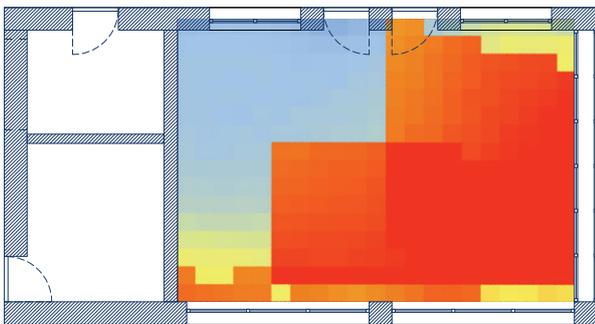
28 Giugno\_ore 15.00



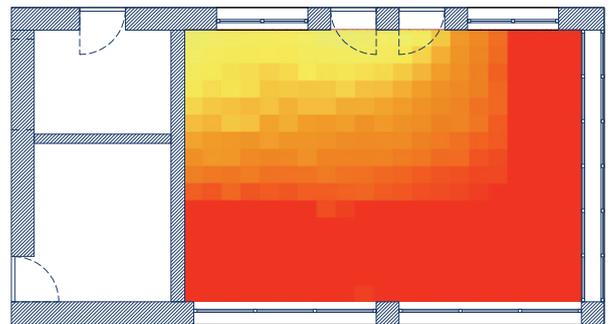
28 Giugno\_ore 18.00



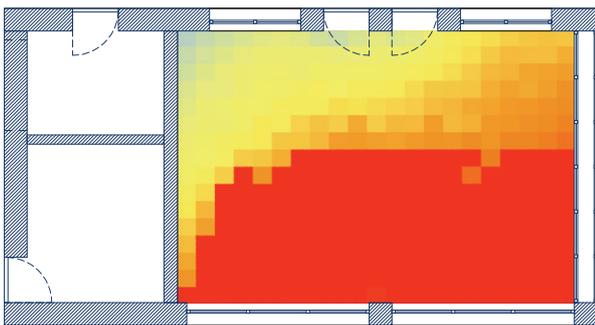
21 Settembre\_ore 9.00



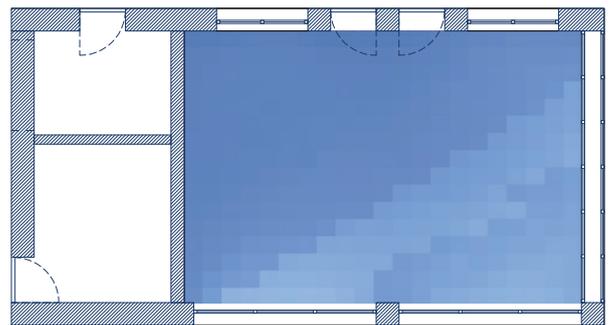
21 Settembre\_ore 12.00



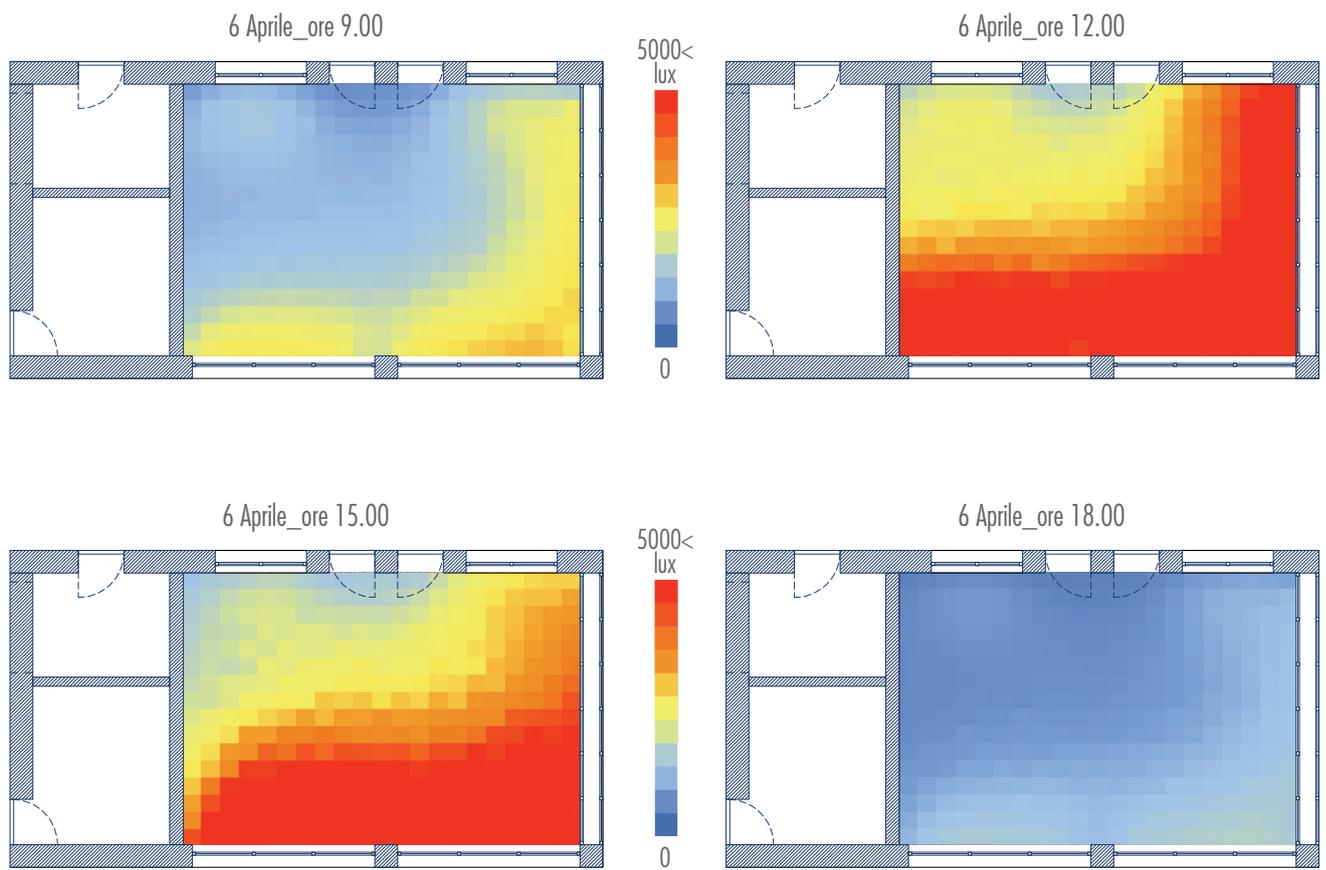
21 Settembre\_ore 15.00



21 Settembre\_ore 18.00



**ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorno cielo coperto**



### 6.5.3 Configurazione C

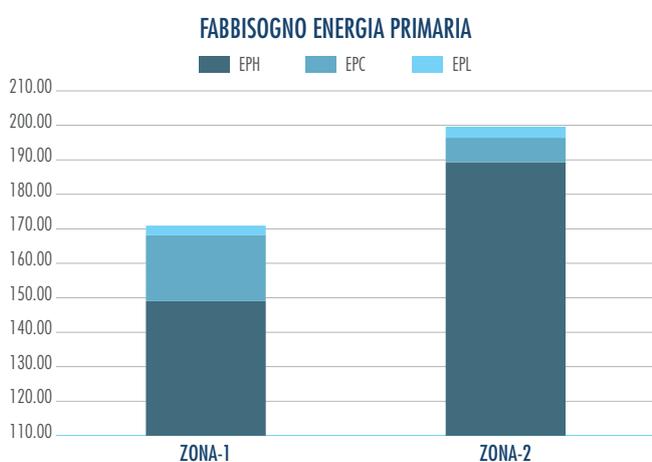
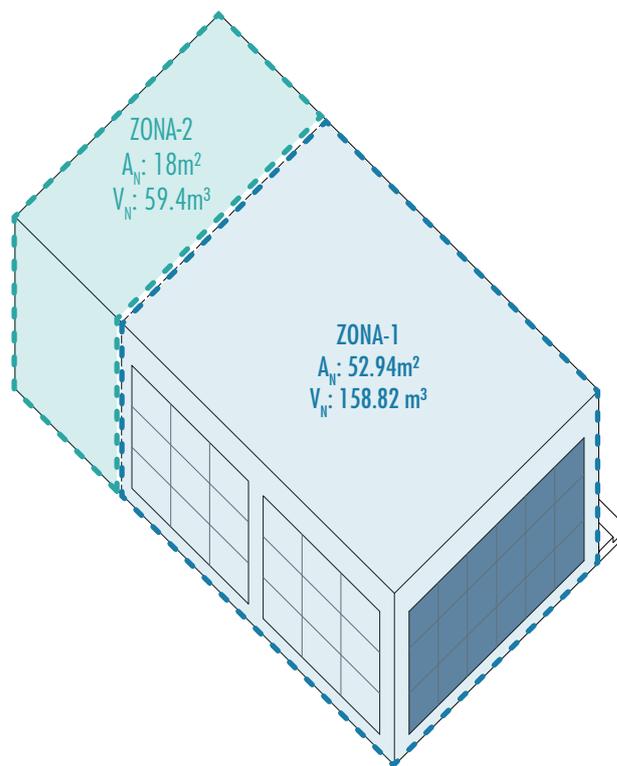
#### SIMULAZIONI ENERGETICHE

##### Zona\_1 - Laboratorio di Misura

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 149.05 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 19.07 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.80 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

##### Zona\_2 - Contro Room + Stanza Impianti

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 189.31 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 7.08 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 3.23 \text{ kWh/m}^2\text{y}$



**ENERGIA PRIMARIA GLOBALE CONFIGURAZIONE - C** **178.20 kWh/m²K**

POTENZA DI PICCO

$$Q_{MAX,H} = 28.21 \text{ kW}$$

$$Q_{MAX,C} = 8.26 \text{ kW}$$

FRATTILE 99%

$$Q_{99\%,H} = 17.45 \text{ kW}$$

$$Q_{99\%,C} = 3.41 \text{ kW}$$

FRATTILE 96%

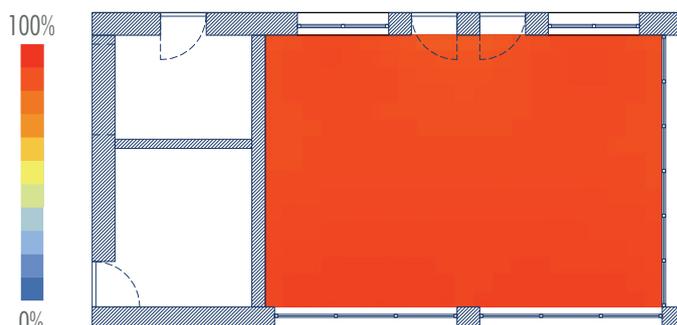
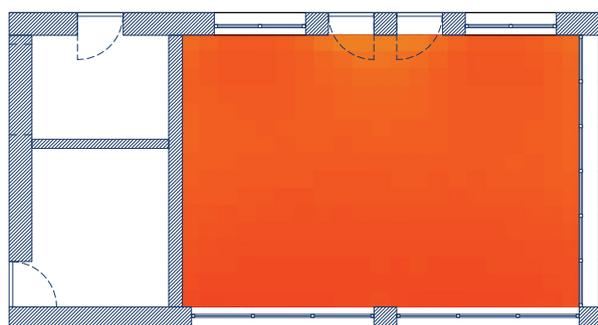
$$Q_{96\%,H} = 11.65 \text{ kW}$$

$$Q_{96\%,C} = 0.49 \text{ kW}$$

#### ANALISI DAYLIGHT

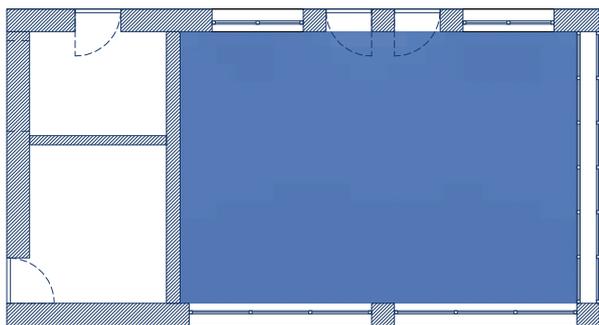
DAYLIGHT AUTONOMY - DA  
88.82

CONTINUOUS DAYLIGHT AUTONOMY - DA<sub>CON</sub>  
93.50



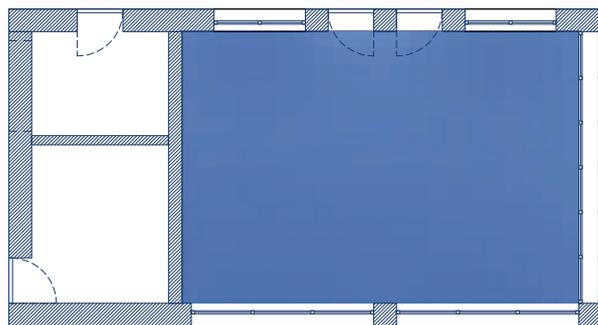
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub><100</sub>: 3.64



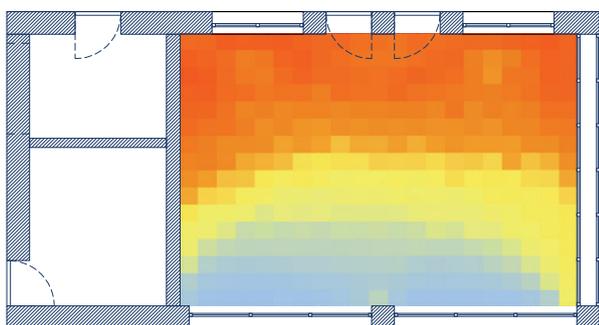
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>100-300</sub>: 3.22



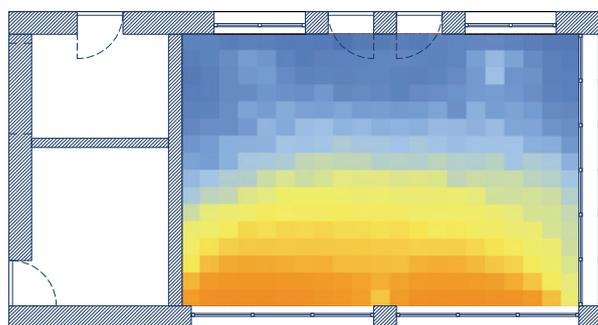
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>300-3000</sub>: 58.79



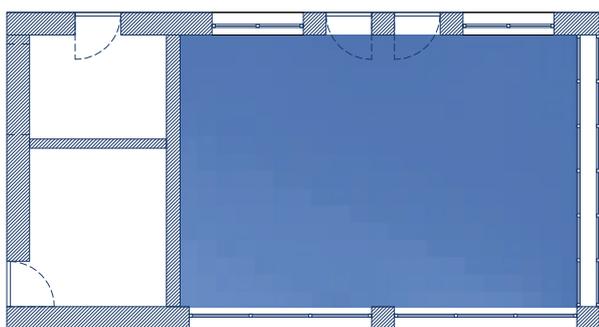
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>>3000</sub>: 33.91

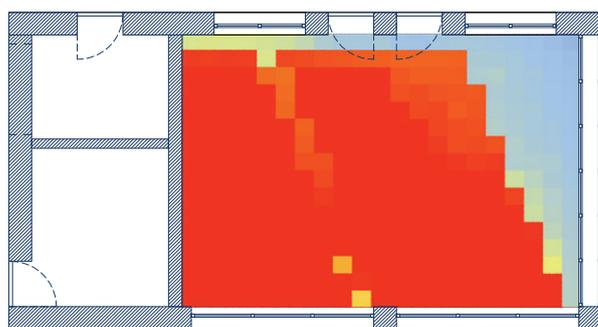


ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorni clear sky

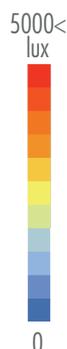
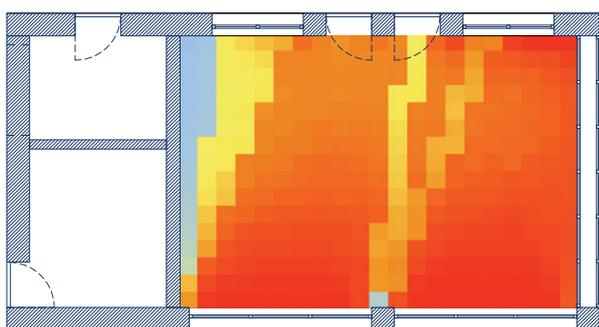
29 Dicembre\_ore 9.00



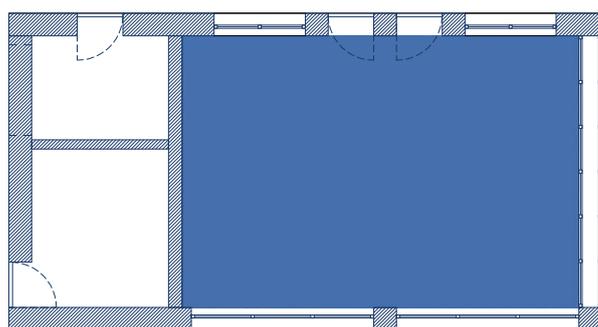
29 Dicembre\_ore 12.00



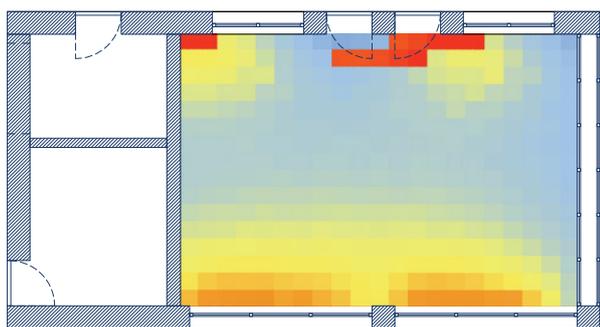
29 Dicembre\_ore 15.00



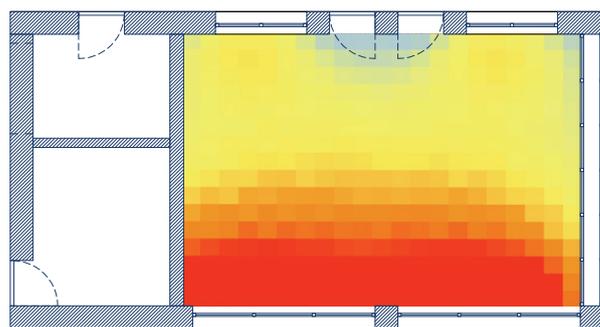
29 Dicembre\_ore 18.00



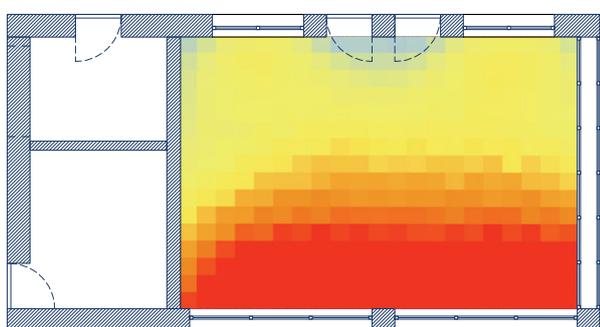
28 Giugno\_ore 9.00



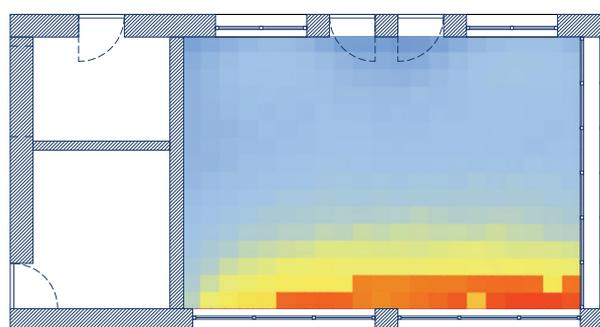
28 Giugno\_ore 12.00



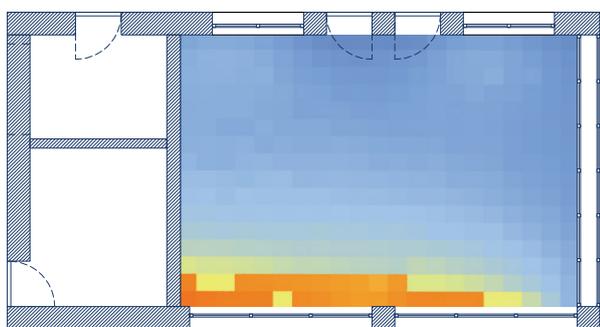
28 Giugno\_ore 15.00



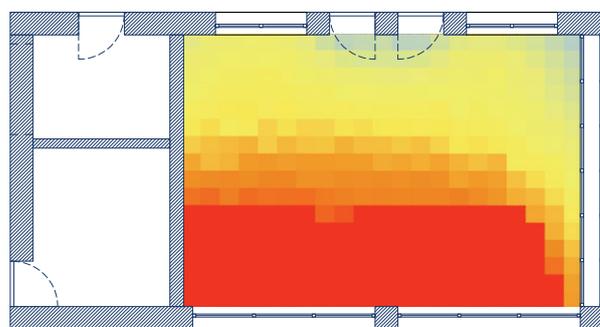
28 Giugno\_ore 18.00



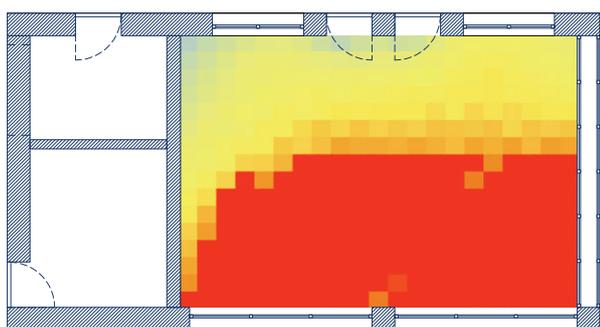
21 Settembre\_ore 9.00



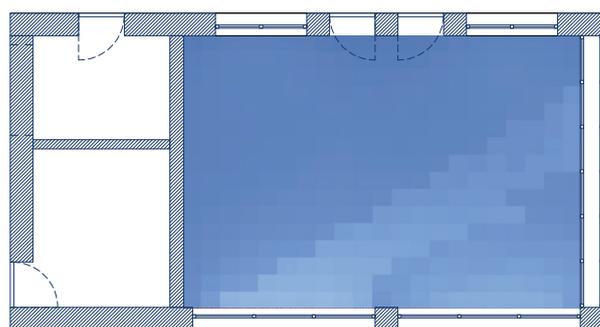
21 Settembre\_ore 12.00



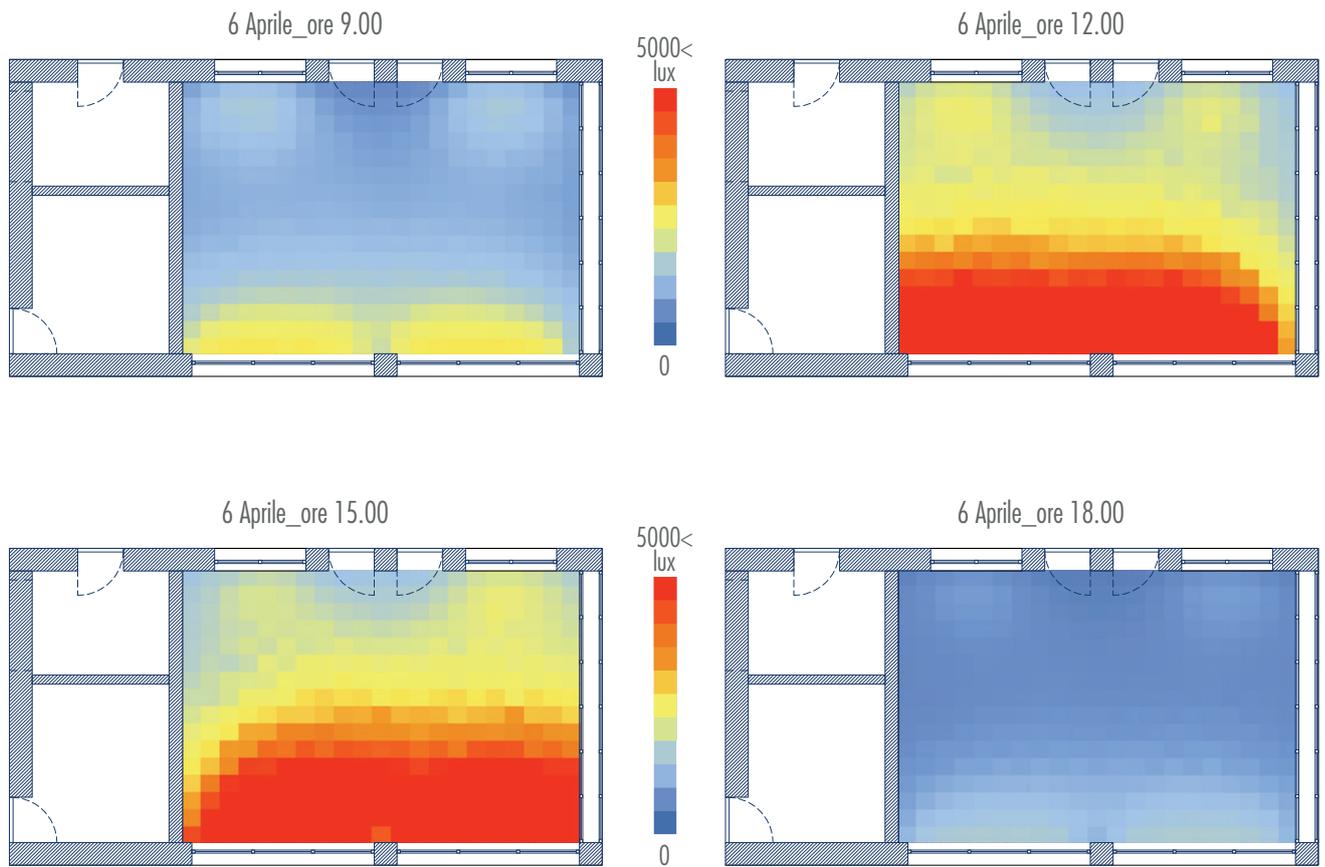
21 Settembre\_ore 15.00



21 Settembre\_ore 18.00



**ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorno cielo coperto**



### 6.5.4 Configurazione D

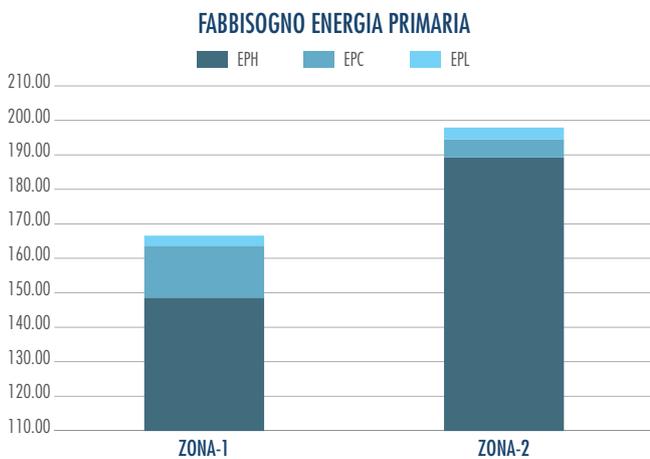
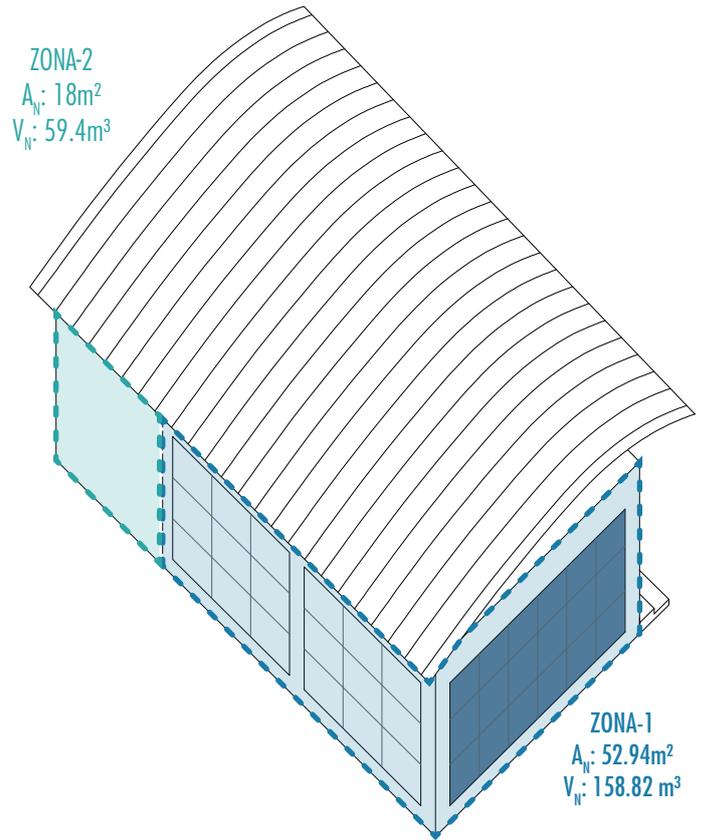
#### SIMULAZIONI ENERGETICHE

##### Zona\_1 - Laboratorio di Misura

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 148.67 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 15.04 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.93 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

##### Zona\_2 - Contro Room + Stanza Impianti

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 189.30 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 5.29 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 3.38 \text{ kWh/m}^2\text{y}$



**ENERGIA PRIMARIA GLOBALE CONFIGURAZIONE - D** **174.59 kWh/m²K**

POTENZA DI PICCO

$$Q_{MAX,H} = 25.95 \text{ kW}$$

$$Q_{MAX,C} = 7.17 \text{ kW}$$

FRATTILE 99%

$$Q_{99\%,H} = 17.19 \text{ kW}$$

$$Q_{99\%,C} = 2.93 \text{ kW}$$

FRATTILE 96%

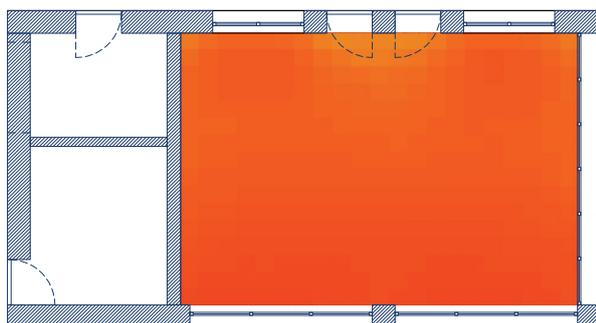
$$Q_{96\%,H} = 11.52 \text{ kW}$$

$$Q_{96\%,C} = 0.21 \text{ kW}$$

#### ANALISI DAYLIGHT

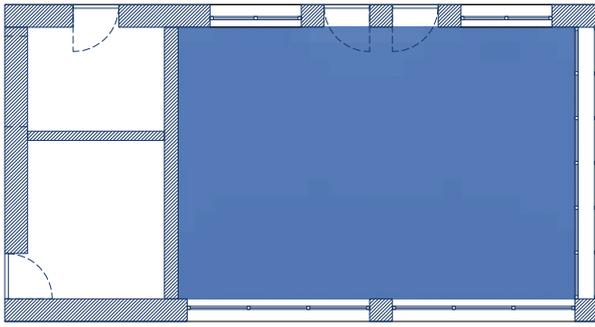
DAYLIGHT AUTONOMY - DA  
88.34

CONTINUOUS DAYLIGHT AUTONOMY - DA<sub>CON</sub>  
93.29



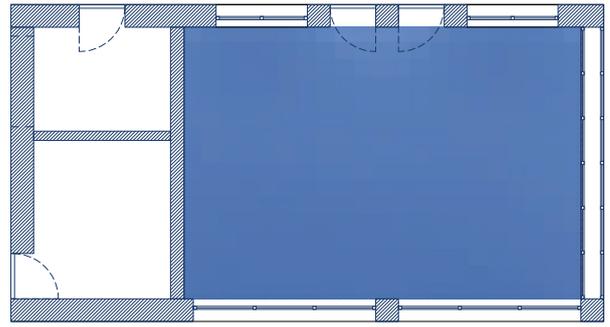
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub><100</sub>: 3.72



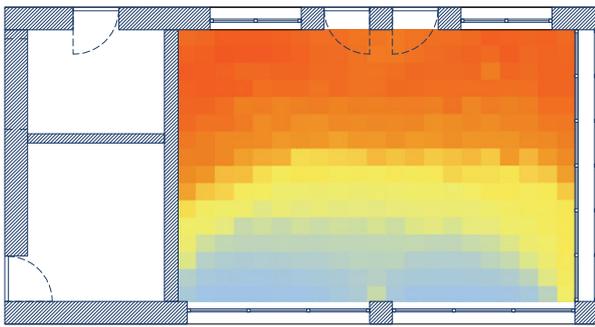
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>100-300</sub>: 3.42



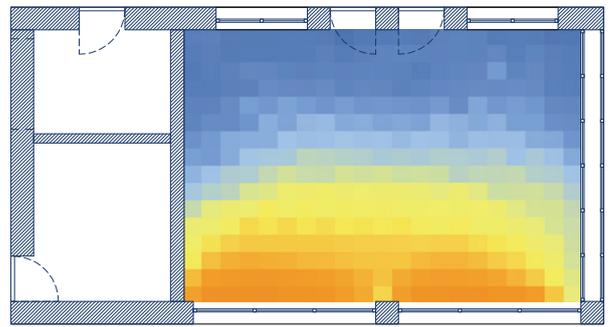
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>300-3000</sub>: 59.99



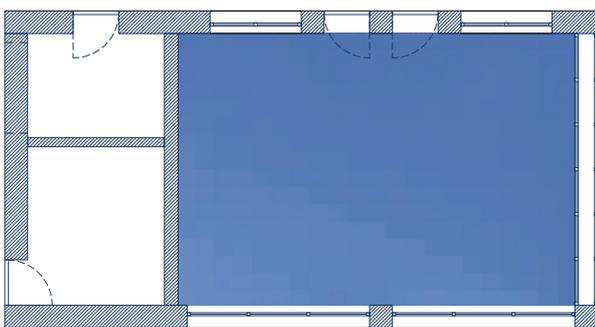
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>>3000</sub>: 32.42

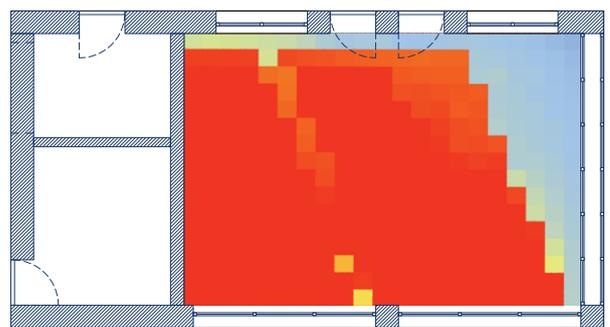


ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorni clear sky

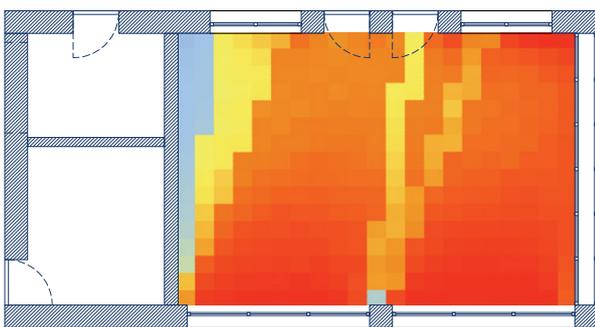
29 Dicembre\_ore 9.00



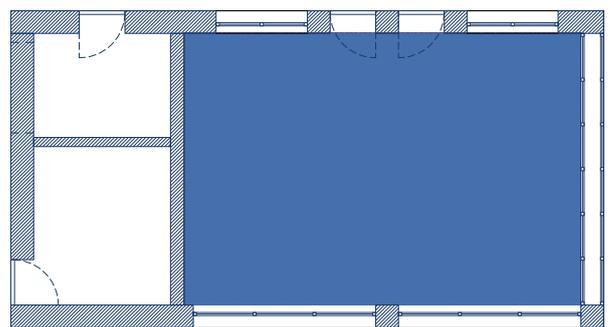
29 Dicembre\_ore 12.00



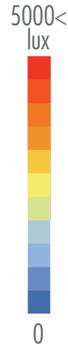
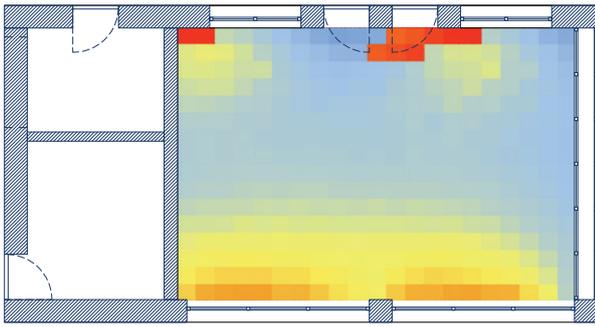
29 Dicembre\_ore 15.00



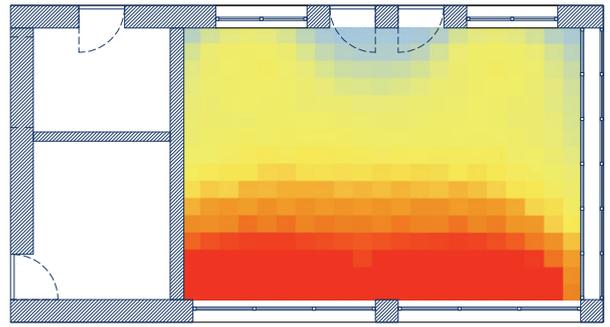
29 Dicembre\_ore 18.00



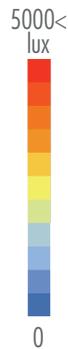
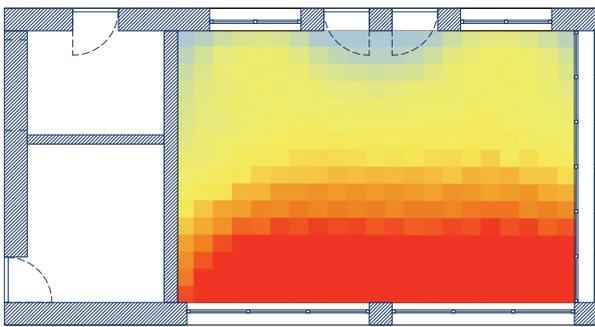
28 Giugno\_ore 9.00



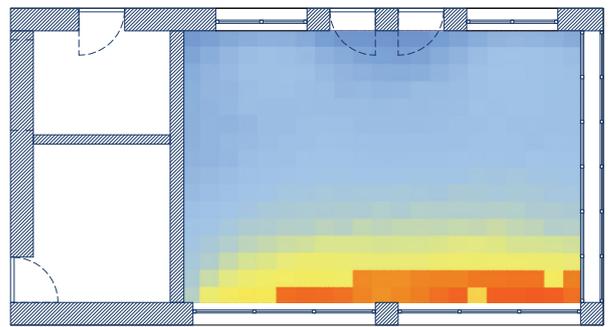
28 Giugno\_ore 12.00



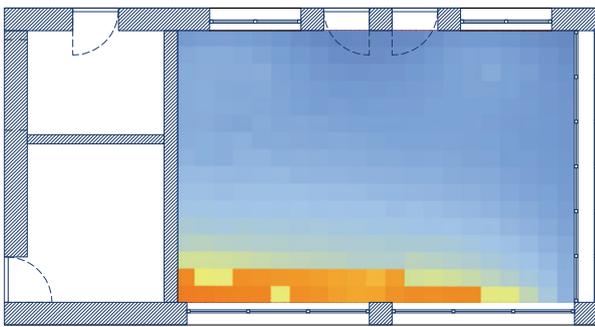
28 Giugno\_ore 15.00



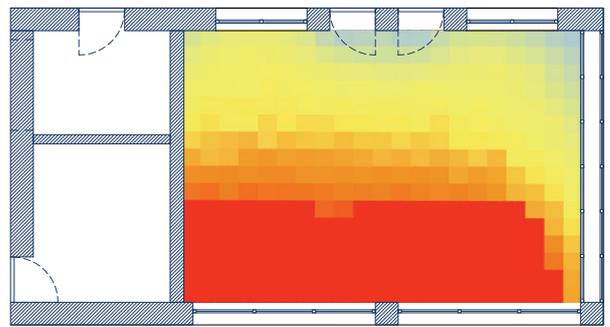
28 Giugno\_ore 18.00



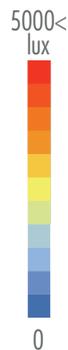
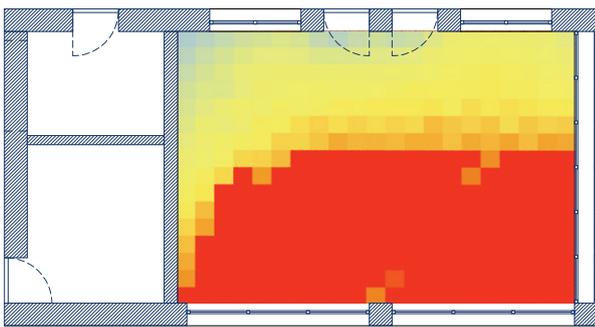
21 Settembre\_ore 9.00



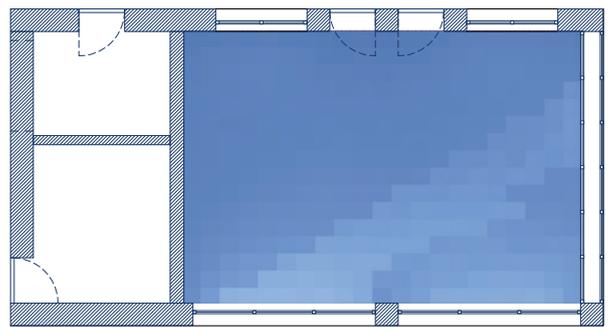
21 Settembre\_ore 12.00



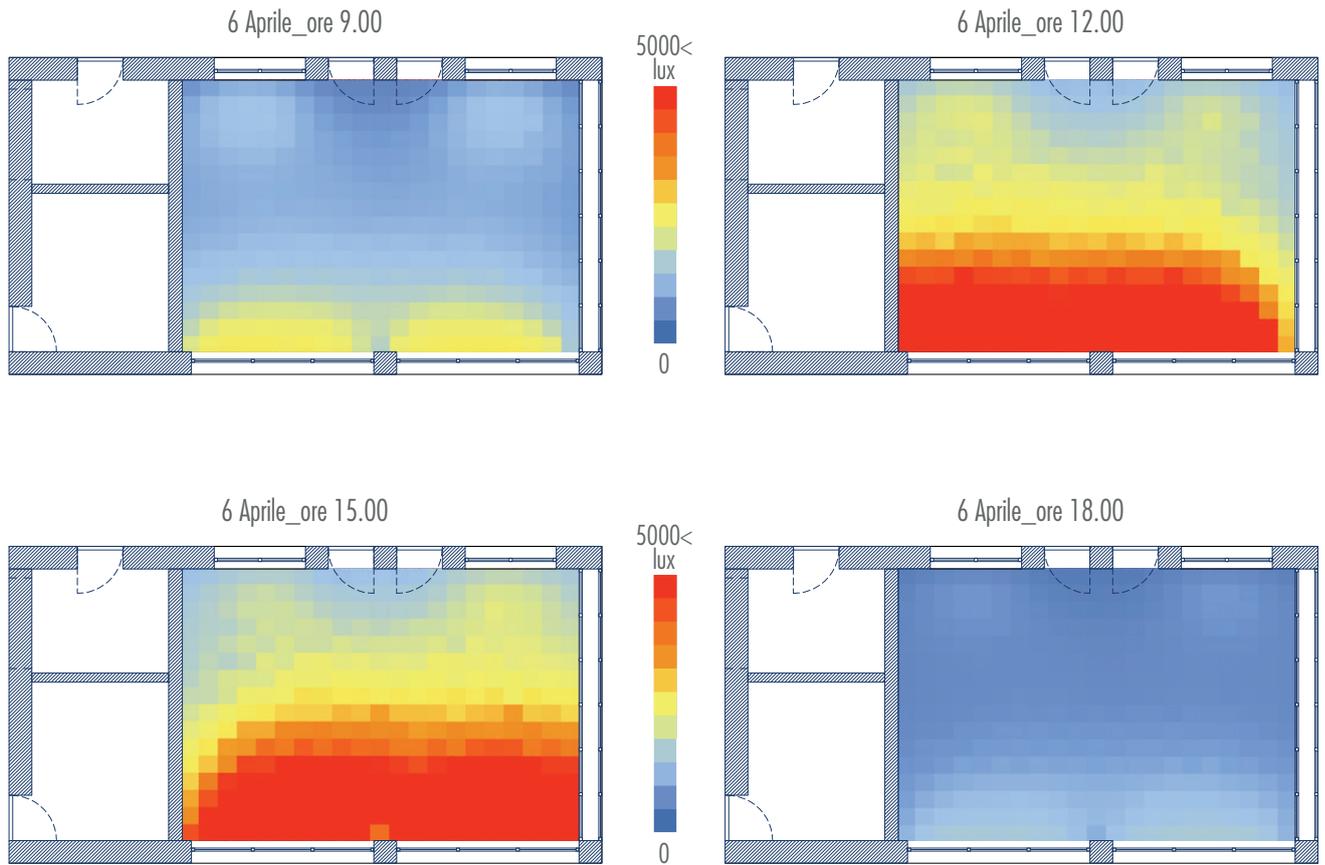
21 Settembre\_ore 15.00



21 Settembre\_ore 18.00

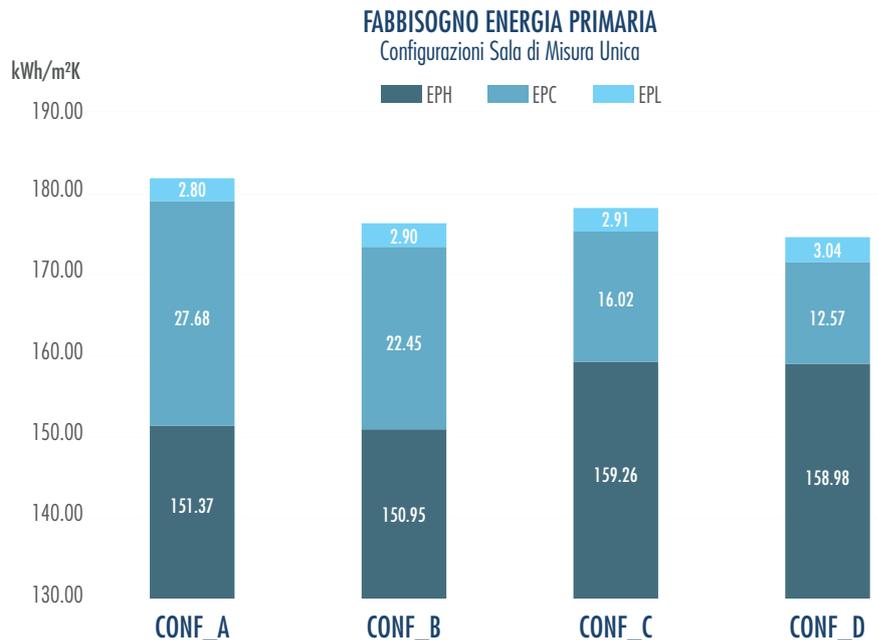


**ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorno cielo coperto**



*Fabbisogno di energia primaria*

Mettendo a confronto i risultati ottenuti per le prime quattro configurazioni, si può notare come con l’inserimento della tettoia curva, che va a schermare buona parte della radiazione solare incidente sulla copertura orizzontale della facility, vi sia una considerevole diminuzione dei consumi energetici per la climatizzazione estiva ed un leggero aumento per i consumi di riscaldamento. Inoltre, risulta evidente che, date le dimensioni e gli aggetti della tettoia, essa non va ad influire in maniera rilevante sul quantitativo di energia necessaria per l’illuminazione del laboratorio. Ulteriori ragionamenti possono essere dedotti dall’introduzione del sistema completamente oscurante per la doppia pelle ad est. L’utilizzo di questo componente comporta una drastica diminuzione degli apporti solari gratuiti nelle prime ore del giorno e ne consegue un importante aumento del fabbisogno

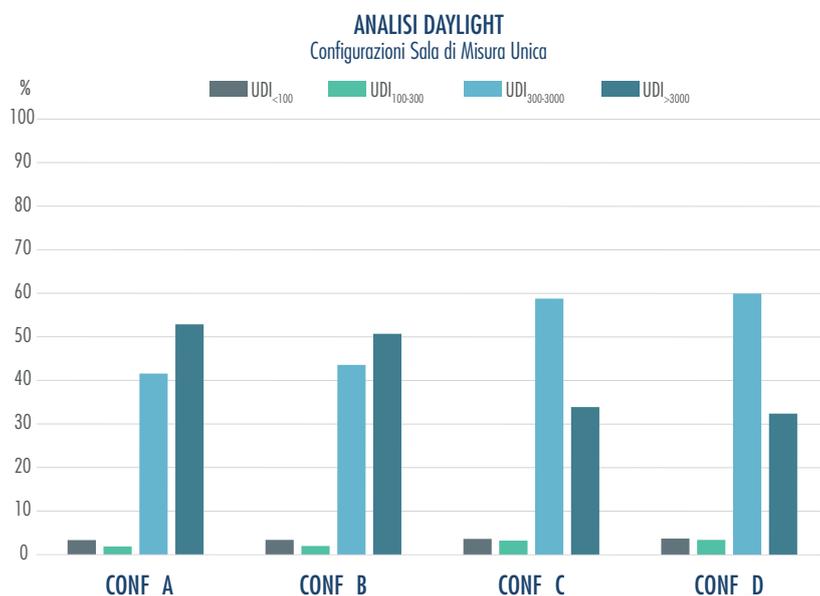
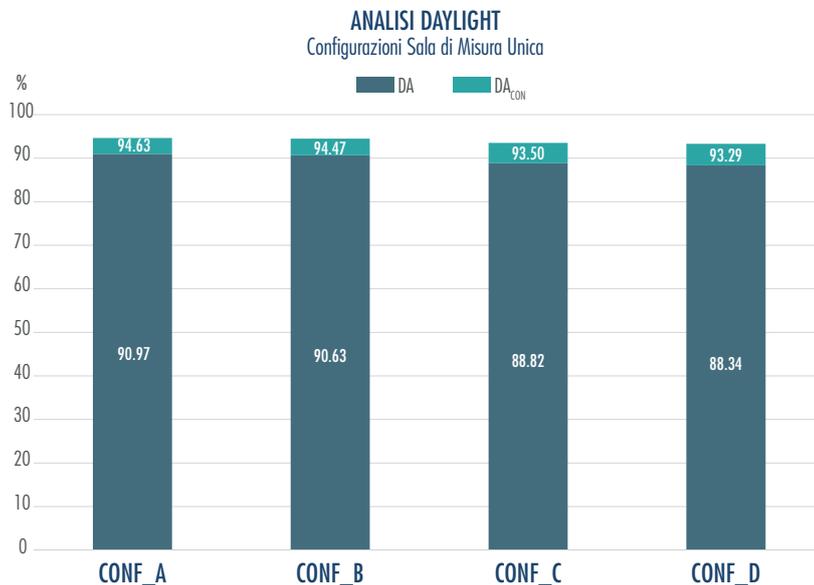


energetico per il riscaldamento invernale. Tuttavia, tale sistema, accoppiato con la tettoia di copertura, va a definire una configurazione (CONF\_D) in grado di ridurre in maniera considerevole il fabbisogno di energia globale della struttura, dovuto soprattutto alla riduzione dei consumi per il raffrescamento.

### Analisi Daylight

Dall'analisi illuminotecnica dell'ambiente di misura, si ottengono due dati molto interessanti. Come anticipato anche dal punto di vista energetico, la tettoia di copertura ha un'influenza minima sulla quantità di luce entrante, aspetto riscontrabile sia tramite le analisi di DA e  $DA_{CON}$  che tramite le diverse classi di UDI.

L'altro aspetto di fondamentale importanza è la funzionalità del sistema oscurante. Risulta infatti particolarmente evidente come la modellazione di questo sistema abbia comportato una notevole diminuzione nella quantità di daylight entrante, con un conseguente aumento della percentuale di tempo in cui il piano di lavoro si trova in una condizione di illuminamento tra i 300 ed i 3000 lux ed una diminuzione della classe superiore ai 3000 lux.



	CONF_A	CONF_B	CONF_C	CONF_D
$UDI_{<100}$	3.32	3.38	3.64	3.72
$UDI_{100-300}$	1.87	1.98	3.22	3.42
$UDI_{300-3000}$	41.56	43.56	58.79	59.99
$UDI_{>3000}$	52.87	50.72	33.91	32.42

### 6.5.5 Configurazione E

#### SIMULAZIONI ENERGETICHE

##### Zona\_1 - Laboratorio di Misura EST

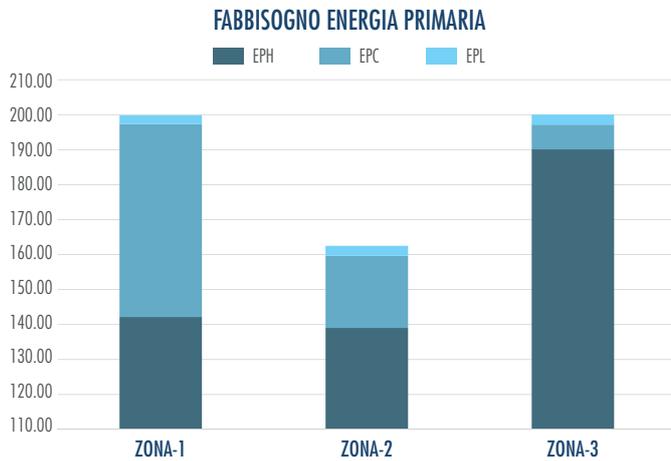
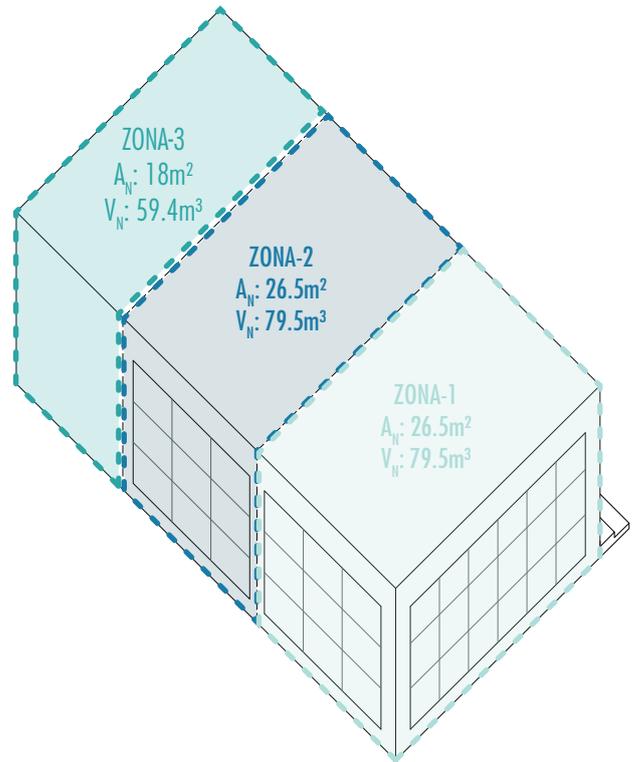
Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 142.17 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 55.14 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.52 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

##### Zona\_2 - Laboratorio di Misura OVEST

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 139.05 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 20.60 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.84 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

##### Zona\_3 - Contro Room + Stanza Impianti

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 190.07 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 7.08 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.86 \text{ kWh/m}^2\text{y}$



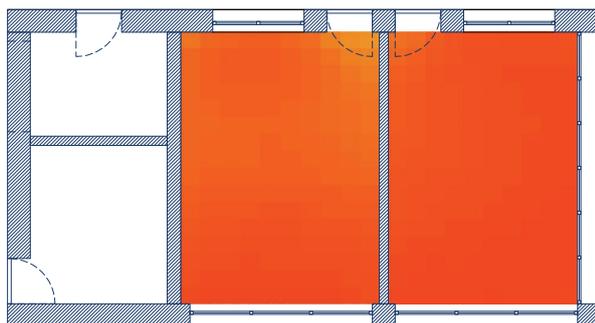
**ENERGIA PRIMARIA GLOBALE CONFIGURAZIONE - E** **187.44 kWh/m²K**

POTENZA DI PICCO	FRATTILE 99%	FRATTILE 96%
$Q_{MAX,H} = 28.12 \text{ kW}$	$Q_{99\%,H} = 17.51 \text{ kW}$	$Q_{96\%,H} = 11.52 \text{ kW}$
$Q_{MAX,C} = 11.39 \text{ kW}$	$Q_{99\%,C} = 5.50 \text{ kW}$	$Q_{96\%,C} = 1.52 \text{ kW}$

#### ANALISI DAYLIGHT

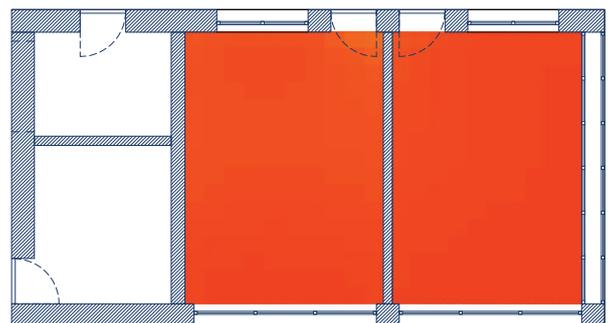
DAYLIGHT AUTONOMY - DA

87.49      91.91



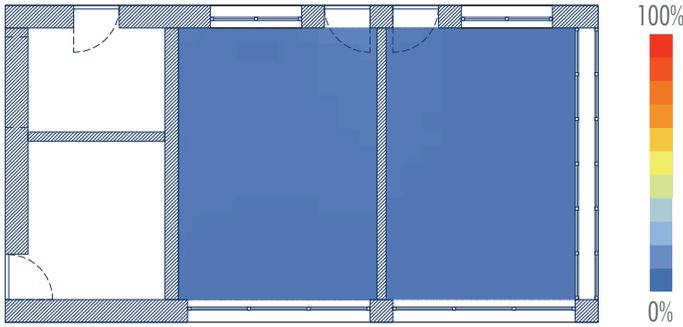
CONTINUOUS DAYLIGHT AUTONOMY - DA<sub>CON</sub>

92.83      95.02



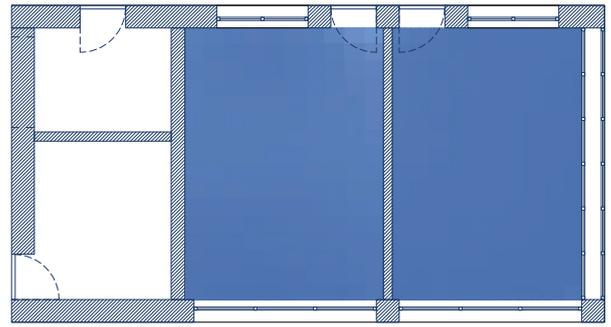
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub><100°</sub>: 3.81      UDI<sub><100°</sub>: 3.16



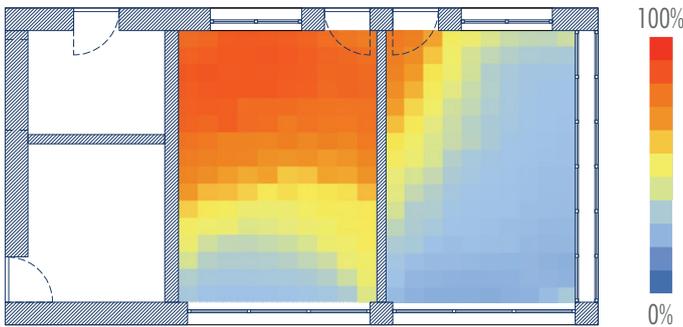
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>100-300°</sub>: 3.77      UDI<sub>100-300°</sub>: 1.63



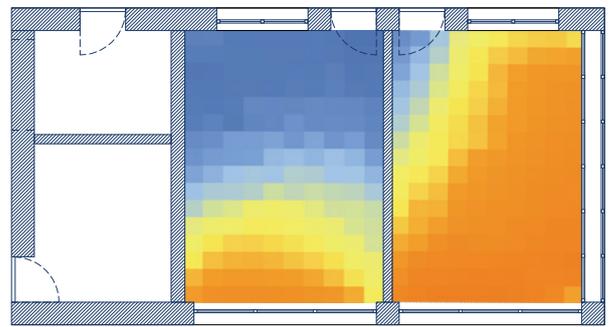
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>300-3000°</sub>: 63.91      UDI<sub>300-3000°</sub>: 32.17



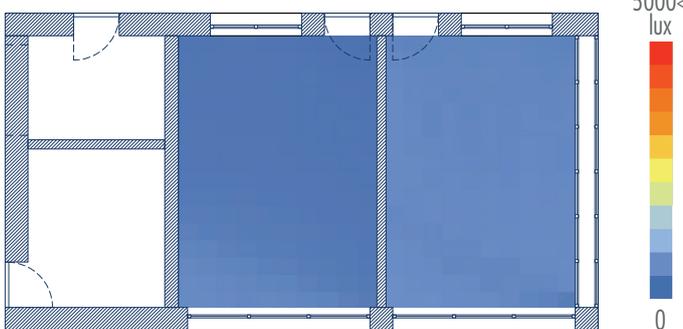
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>>3000°</sub>: 28.02      UDI<sub>>3000°</sub>: 62.68

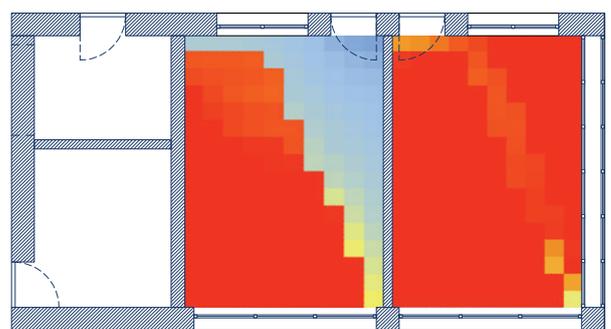


ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorni clear sky

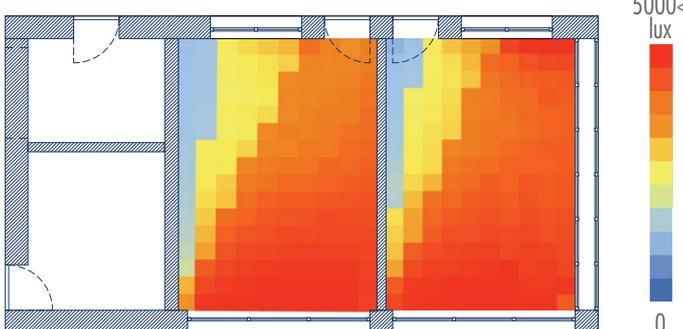
29 Dicembre\_ore 9.00



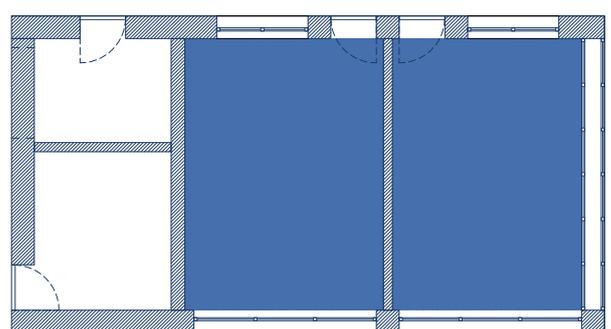
29 Dicembre\_ore 12.00



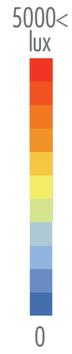
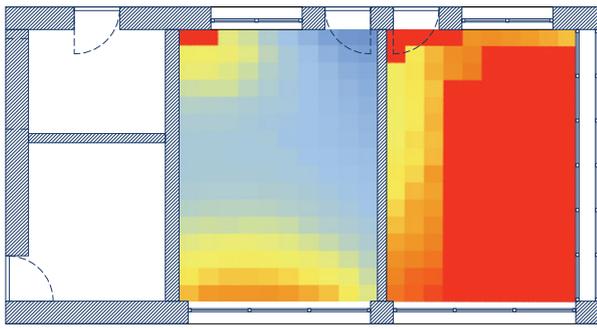
29 Dicembre\_ore 15.00



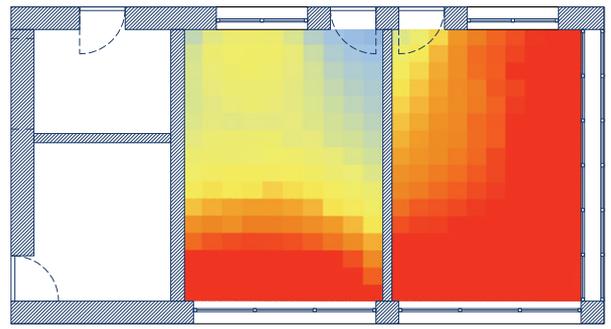
29 Dicembre\_ore 18.00



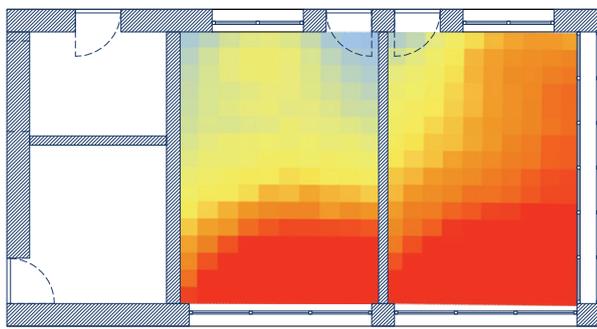
28 Giugno\_ore 9.00



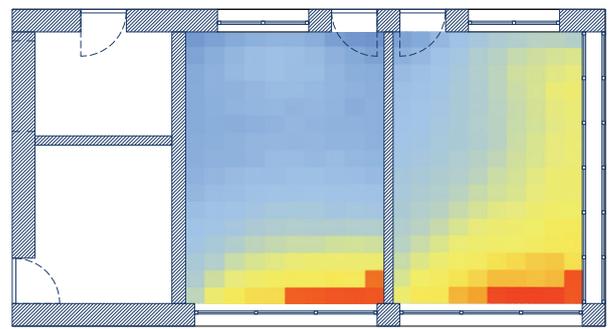
28 Giugno\_ore 12.00



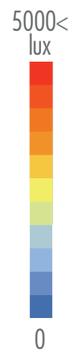
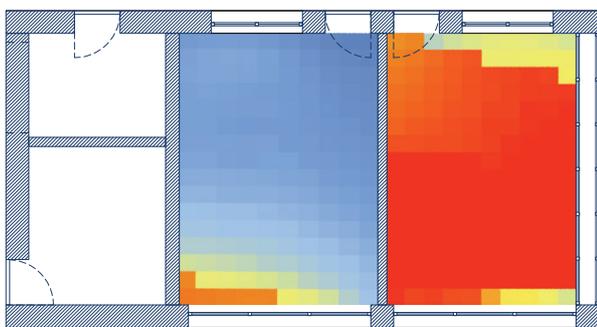
28 Giugno\_ore 15.00



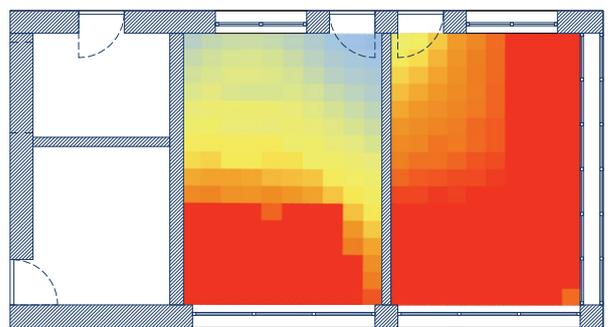
28 Giugno\_ore 18.00



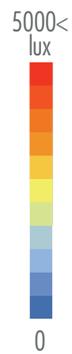
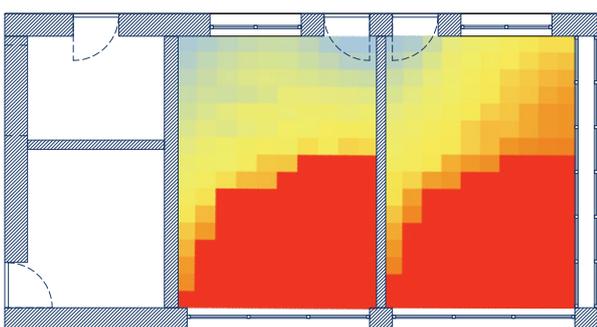
21 Settembre\_ore 9.00



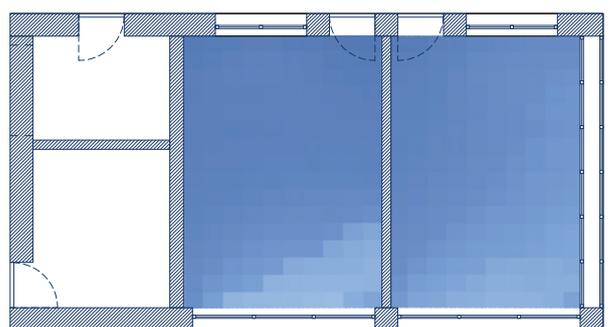
21 Settembre\_ore 12.00



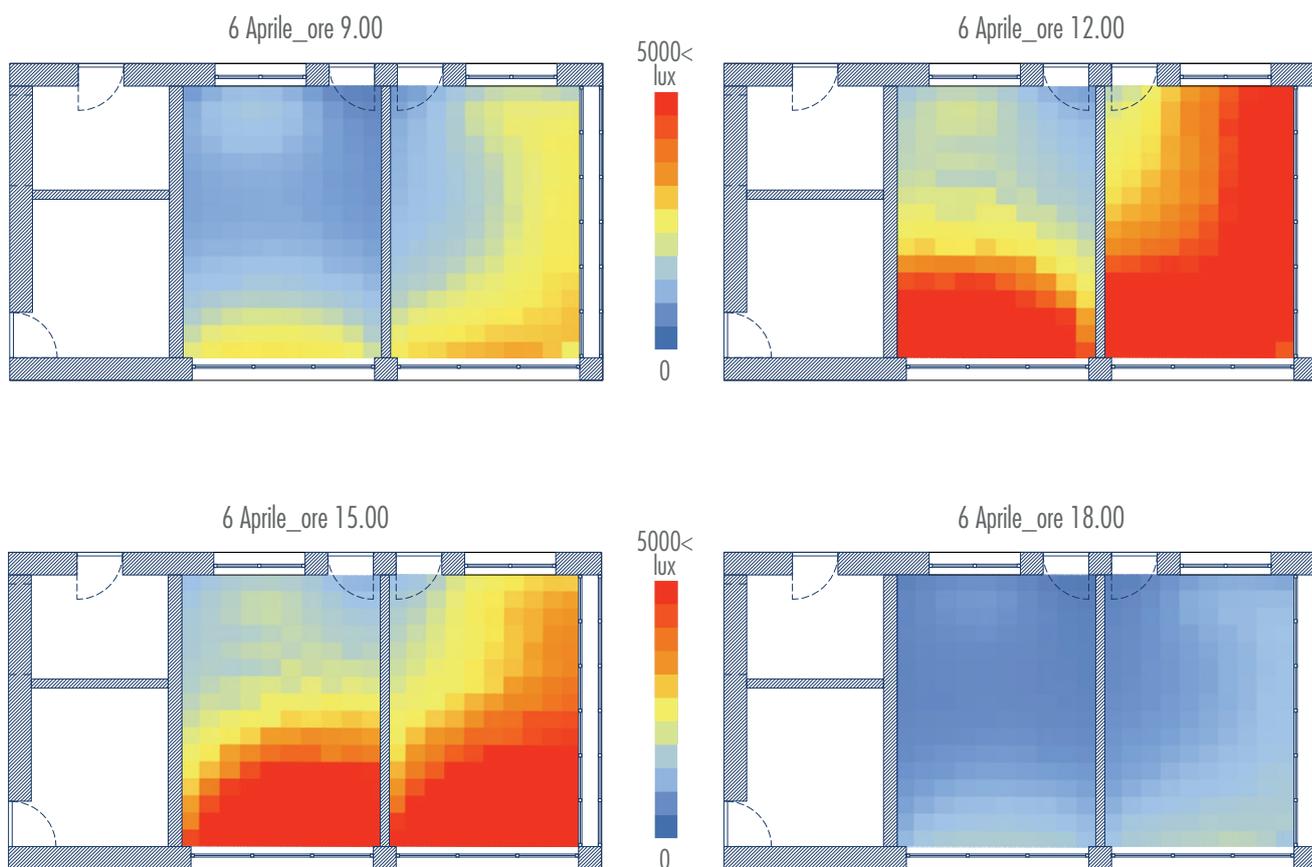
21 Settembre\_ore 15.00



21 Settembre\_ore 18.00



### ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorno cielo coperto



### 6.5.6 Configurazione F

#### SIMULAZIONI ENERGETICHE

##### Zona\_1 - Laboratorio di Misura EST

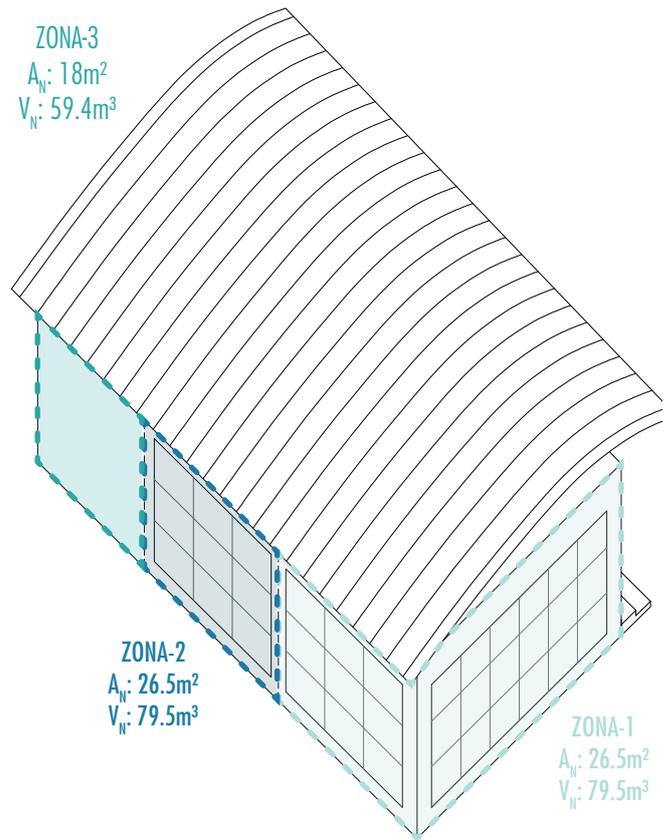
Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 141.48 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 47.25 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.54 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

##### Zona\_2 - Laboratorio di Misura OVEST

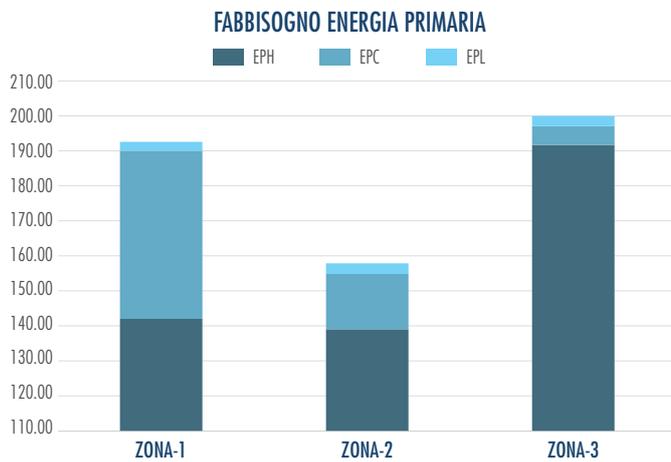
Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 138.54 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 15.53 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 3.02 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

##### Zona\_3 - Contro Room + Stanza Impianti

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 190.36 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 5.29 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.88 \text{ kWh/m}^2\text{y}$



**ENERGIA PRIMARIA GLOBALE CONFIGURAZIONE - F** **181.54 kWh/m²K**



POTENZA DI PICCO

$$Q_{MAX,H} = 27.53 \text{ kW}$$

$$Q_{MAX,C} = 10.29 \text{ kW}$$

FRATTILE 99%

$$Q_{99\%,H} = 17.25 \text{ kW}$$

$$Q_{99\%,C} = 4.74 \text{ kW}$$

FRATTILE 96%

$$Q_{96\%,H} = 11.41 \text{ kW}$$

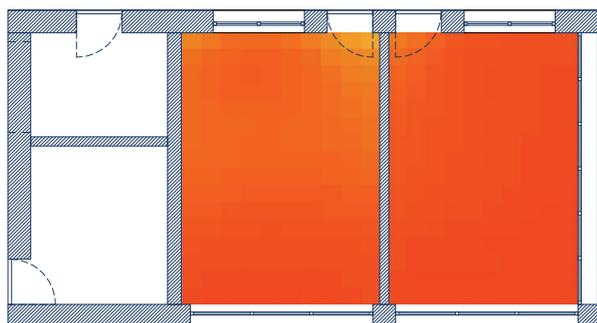
$$Q_{96\%,C} = 1.13 \text{ kW}$$

#### ANALISI DAYLIGHT

DAYLIGHT AUTONOMY - DA

86.76

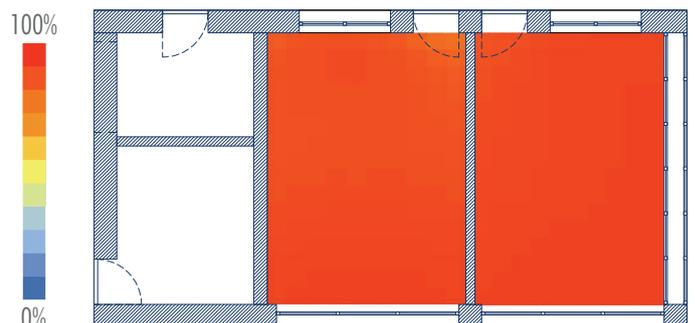
91.64



CONTINUOUS DAYLIGHT AUTONOMY - DA<sub>CON</sub>

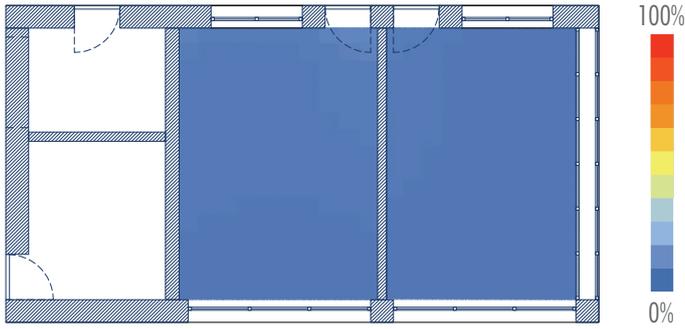
92.53

94.93



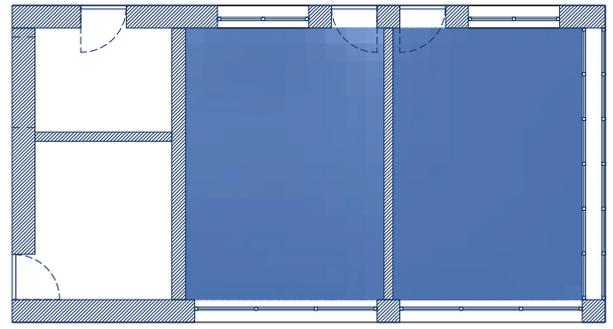
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub><100°</sub>: 3.92      UDI<sub><100°</sub>: 3.19



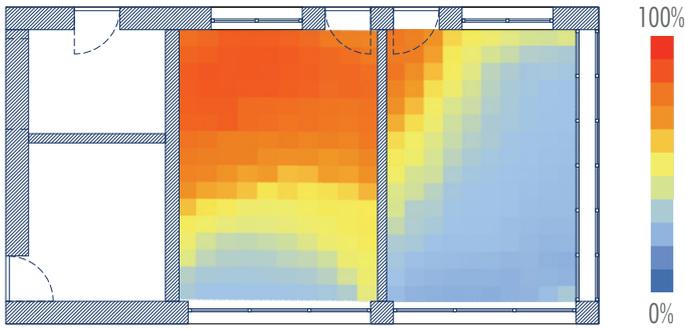
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>100-300°</sub>: 4.03      UDI<sub>100-300°</sub>: 1.69



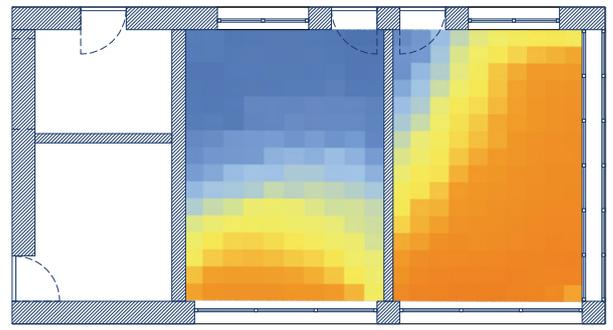
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>300-3000°</sub>: 64.30      UDI<sub>300-3000°</sub>: 33.45



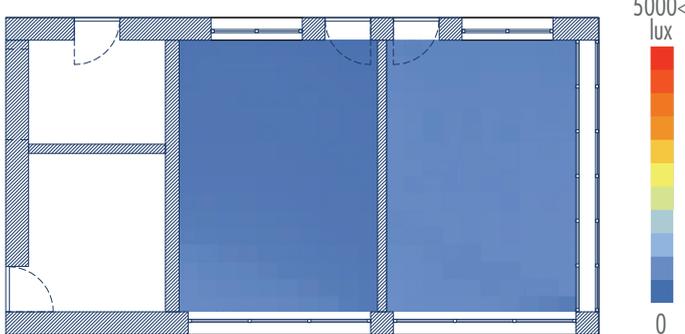
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>>3000°</sub>: 27.24      UDI<sub>>3000°</sub>: 61.30

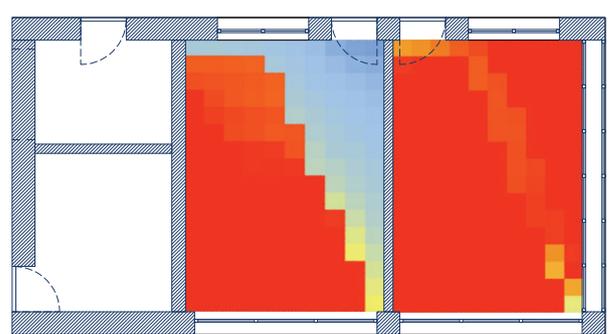


ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorni clear sky

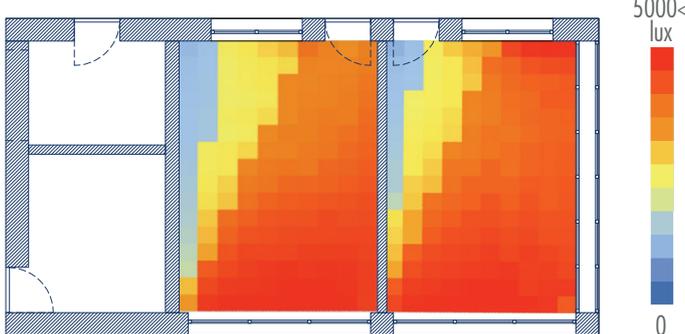
29 Dicembre\_ore 9.00



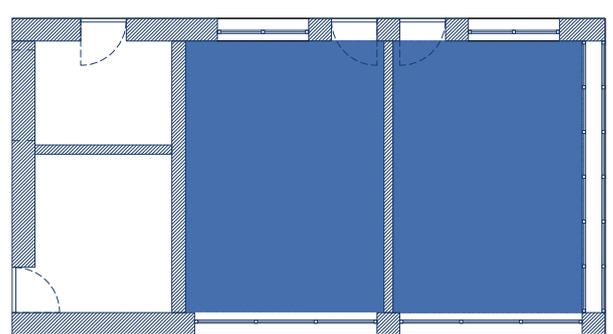
29 Dicembre\_ore 12.00



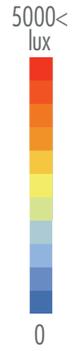
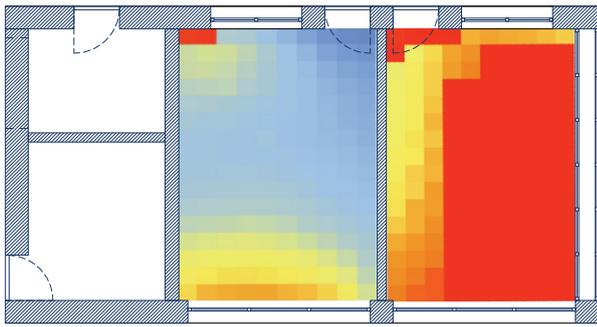
29 Dicembre\_ore 15.00



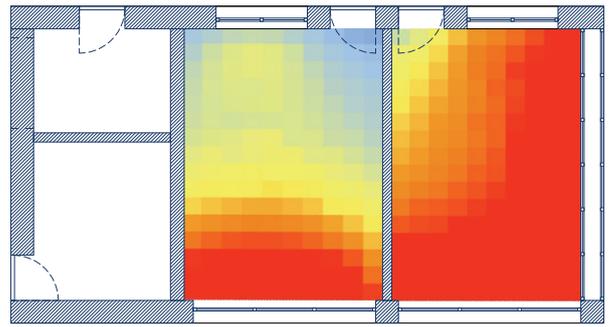
29 Dicembre\_ore 18.00



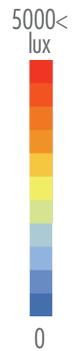
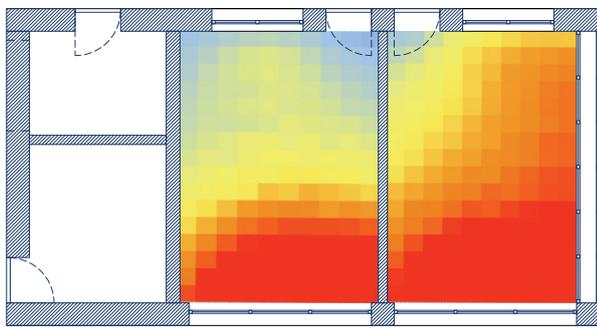
28 Giugno\_ore 9.00



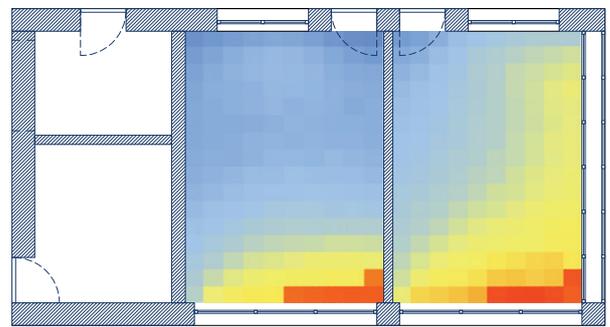
28 Giugno\_ore 12.00



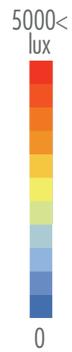
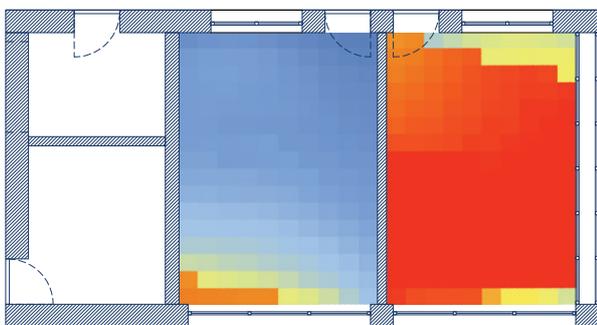
28 Giugno\_ore 15.00



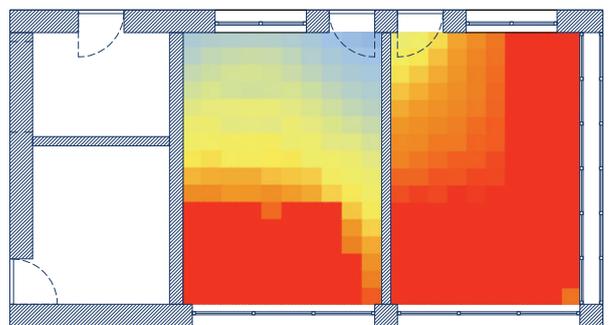
28 Giugno\_ore 18.00



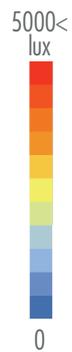
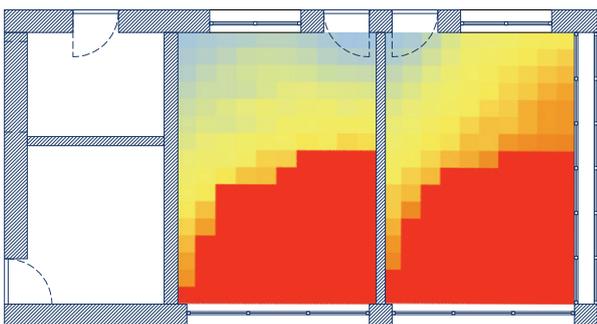
21 Settembre\_ore 9.00



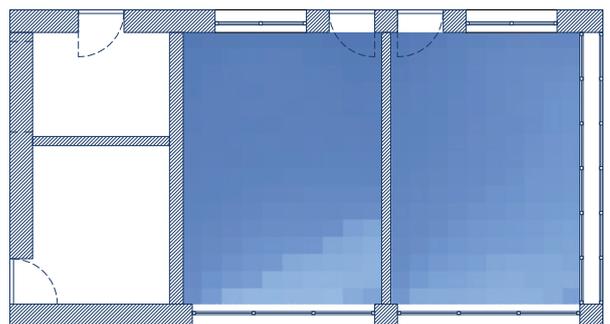
21 Settembre\_ore 12.00



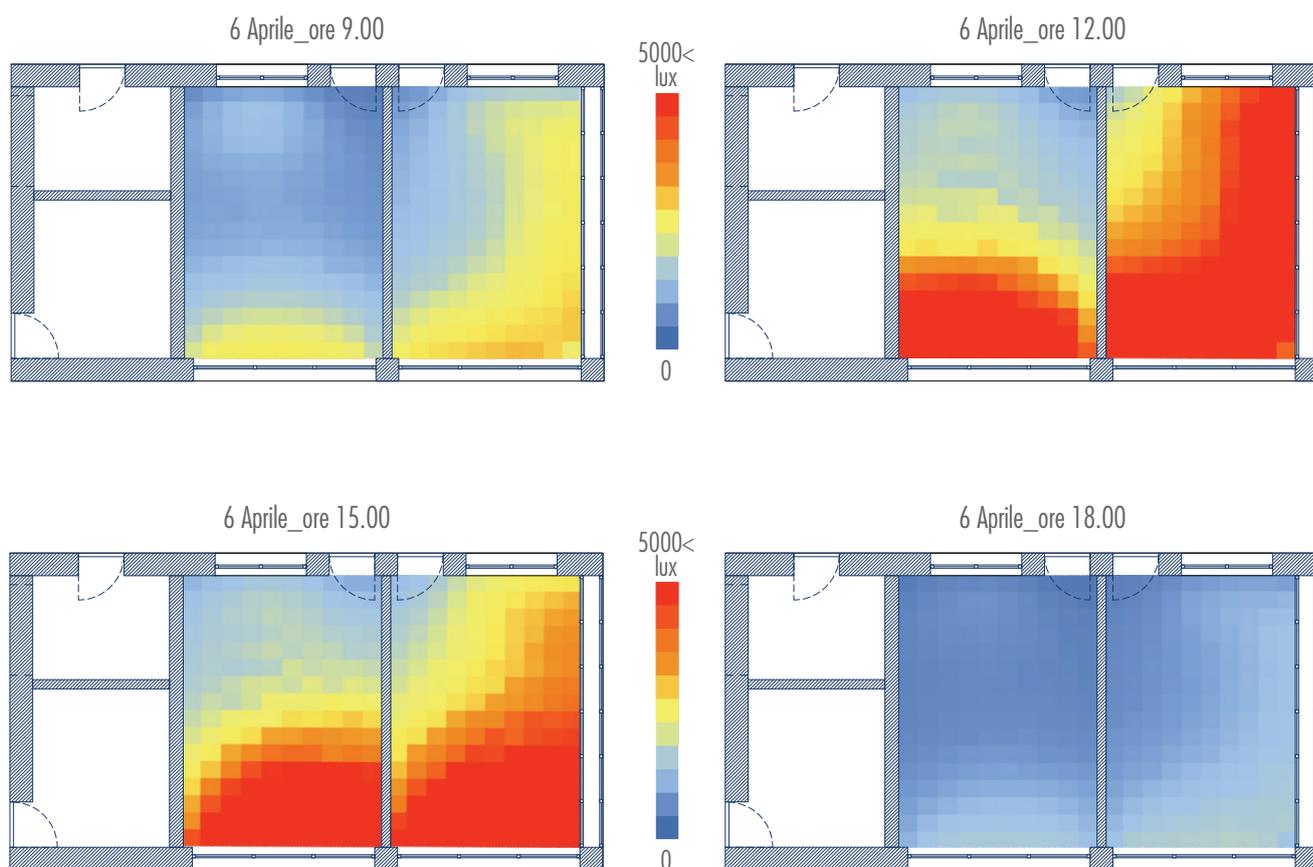
21 Settembre\_ore 15.00



21 Settembre\_ore 18.00



### ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorno cielo coperto



### 6.5.7 Configurazione G

#### SIMULAZIONI ENERGETICHE

##### Zona\_1 - Laboratorio di Misura EST

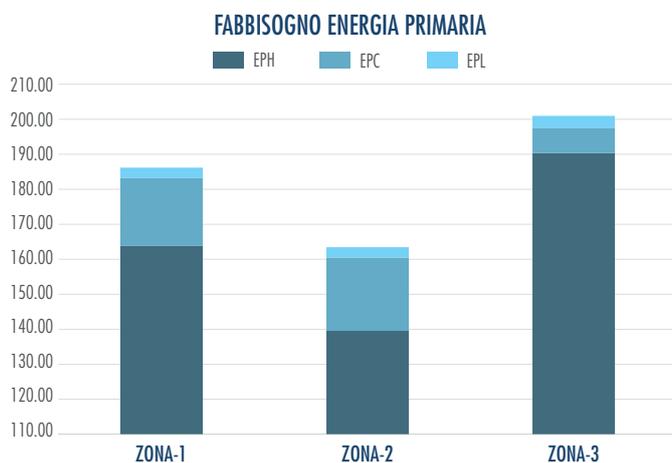
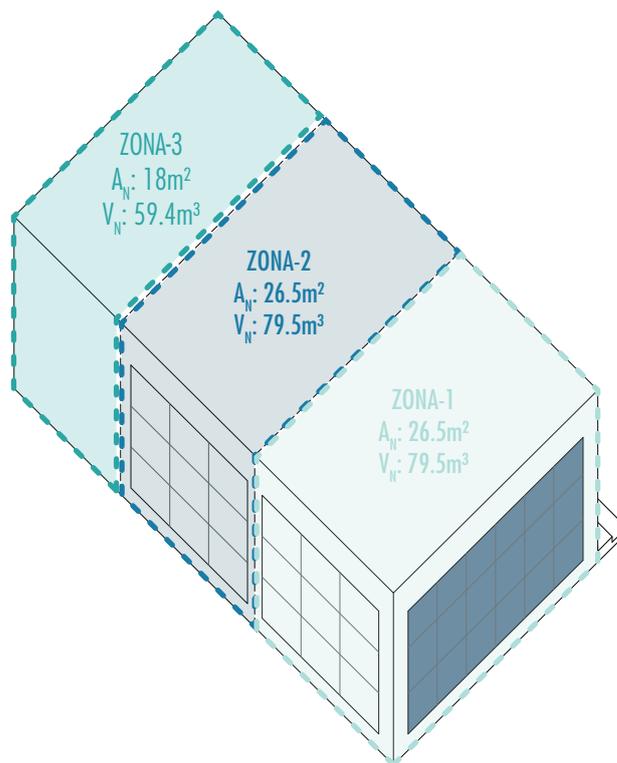
Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 162.93 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 19.07 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.93 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

##### Zona\_2 - Laboratorio di Misura OVEST

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 139.05 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 20.60 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.84 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

##### Zona\_3 - Contro Room + Stanza Impianti

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 190.07 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 7.08 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.86 \text{ kWh/m}^2\text{y}$



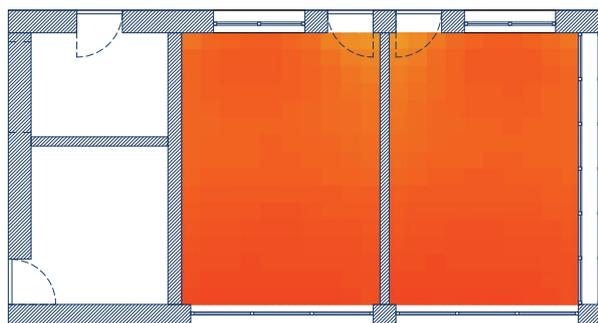
**ENERGIA PRIMARIA GLOBALE CONFIGURAZIONE - G** **182.48 kWh/m²K**

POTENZA DI PICCO	FRATTILE 99%	FRATTILE 96%
$Q_{MAX,H} = 28.21 \text{ kW}$	$Q_{99\%,H} = 17.66 \text{ kW}$	$Q_{96\%,H} = 11.78 \text{ kW}$
$Q_{MAX,C} = 8.76 \text{ kW}$	$Q_{99\%,C} = 3.50 \text{ kW}$	$Q_{96\%,C} = 0.52 \text{ kW}$

#### ANALISI DAYLIGHT

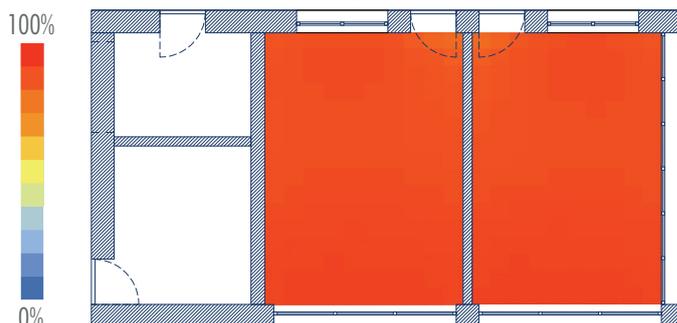
DAYLIGHT AUTONOMY - DA

87.49      87.56



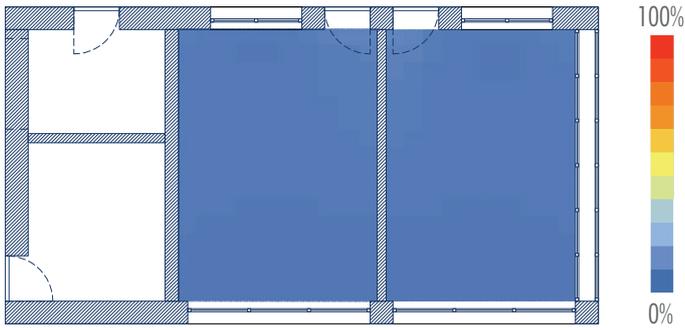
CONTINUOUS DAYLIGHT AUTONOMY - DA<sub>CON</sub>

92.83      92.88



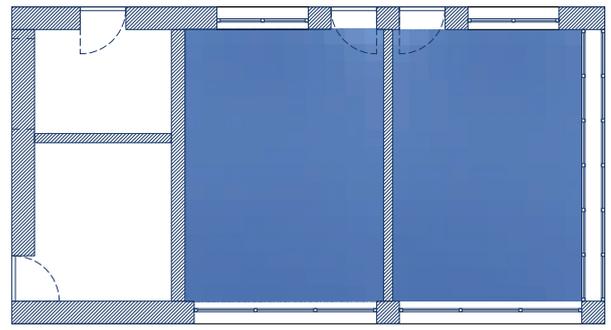
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub><100°</sub>: 3.81      UDI<sub><100°</sub>: 3.81



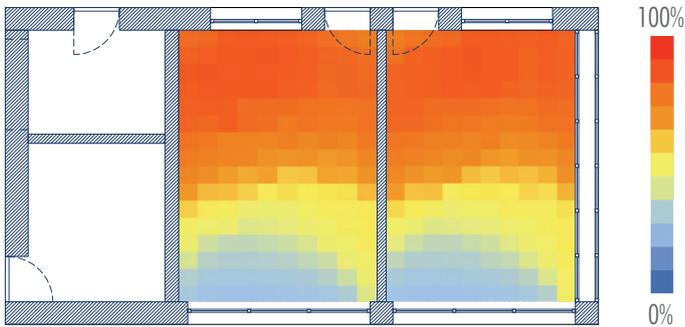
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>100-300°</sub>: 3.77      UDI<sub>100-300°</sub>: 3.74



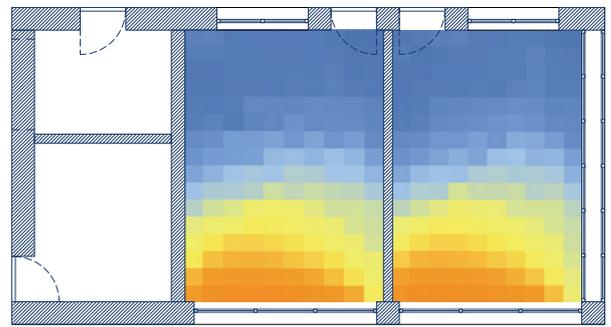
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>300-3000°</sub>: 63.91      UDI<sub>300-3000°</sub>: 63.87



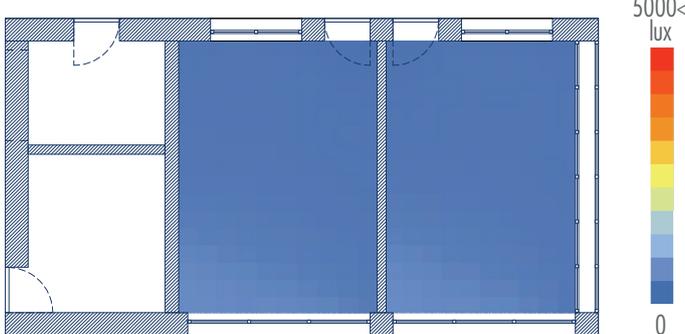
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>>3000°</sub>: 28.02      UDI<sub>>3000°</sub>: 28.11

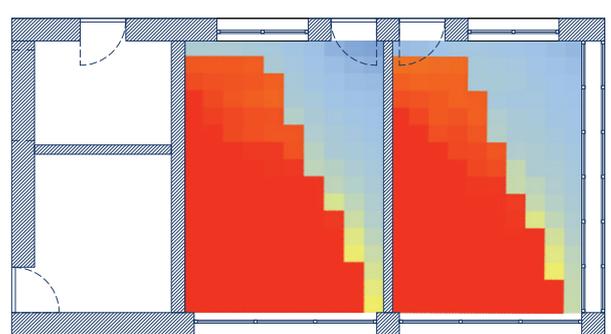


ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorni clear sky

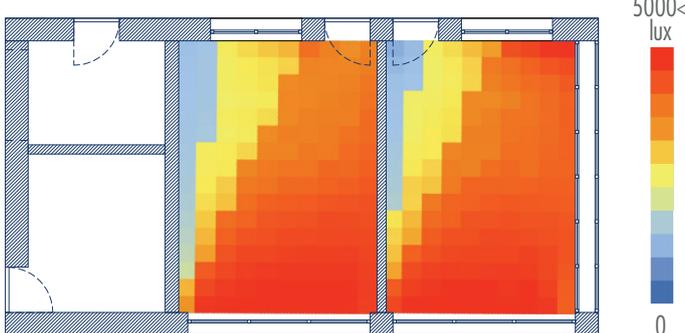
29 Dicembre\_ore 9.00



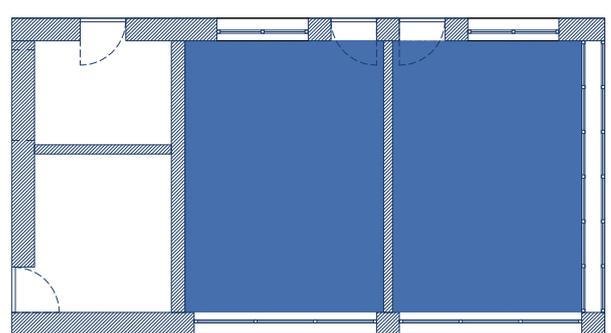
29 Dicembre\_ore 12.00



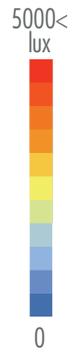
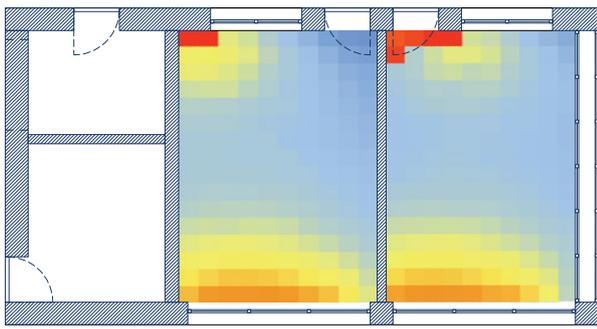
29 Dicembre\_ore 15.00



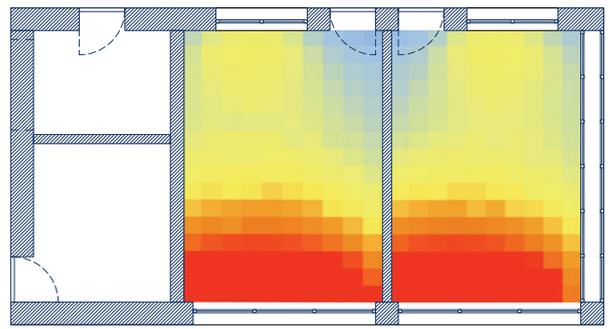
29 Dicembre\_ore 18.00



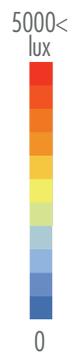
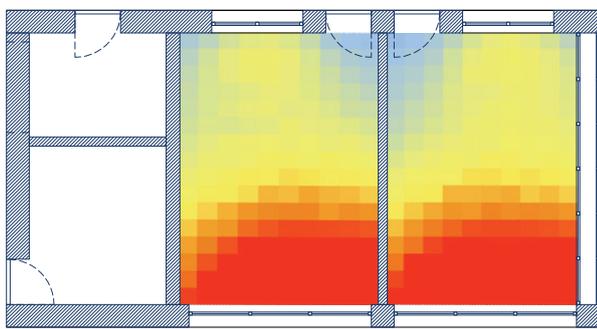
28 Giugno\_ore 9.00



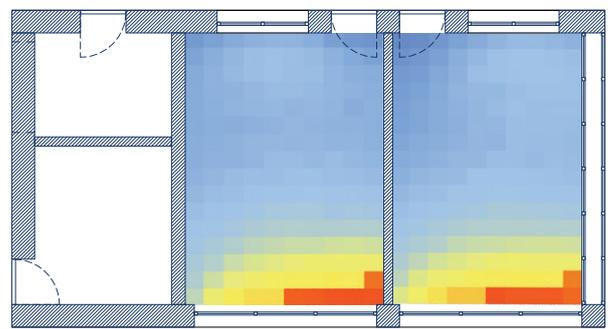
28 Giugno\_ore 12.00



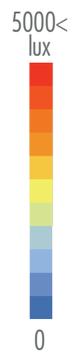
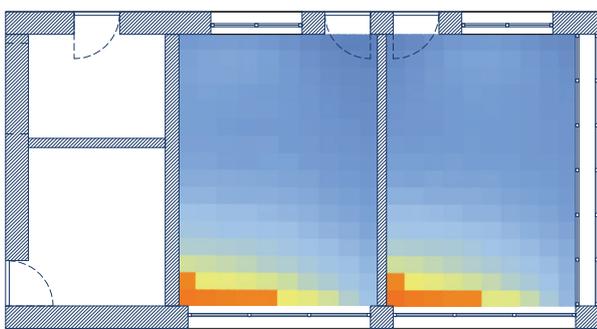
28 Giugno\_ore 15.00



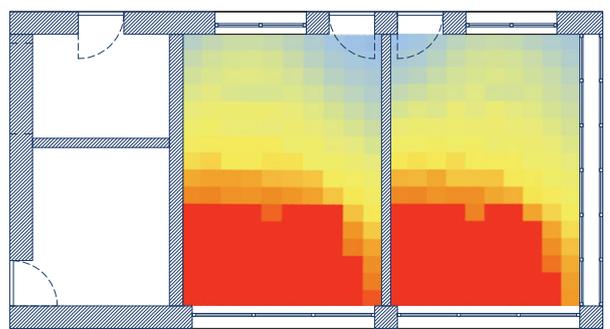
28 Giugno\_ore 18.00



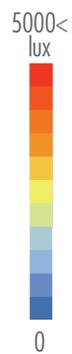
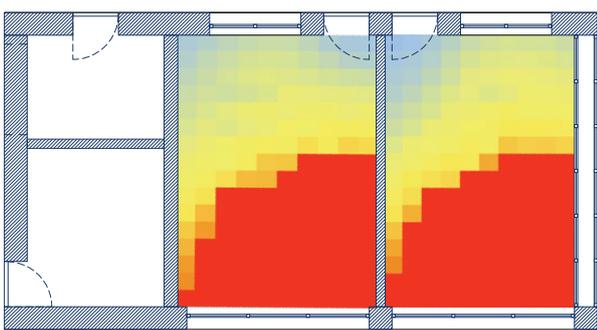
21 Settembre\_ore 9.00



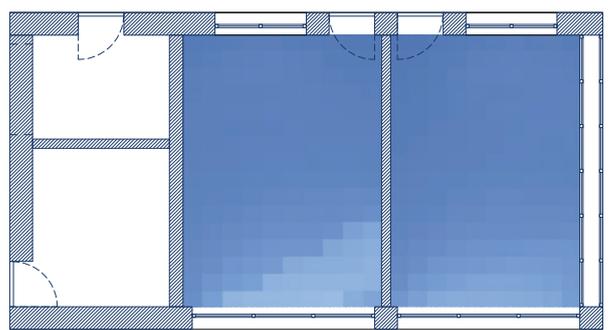
21 Settembre\_ore 12.00



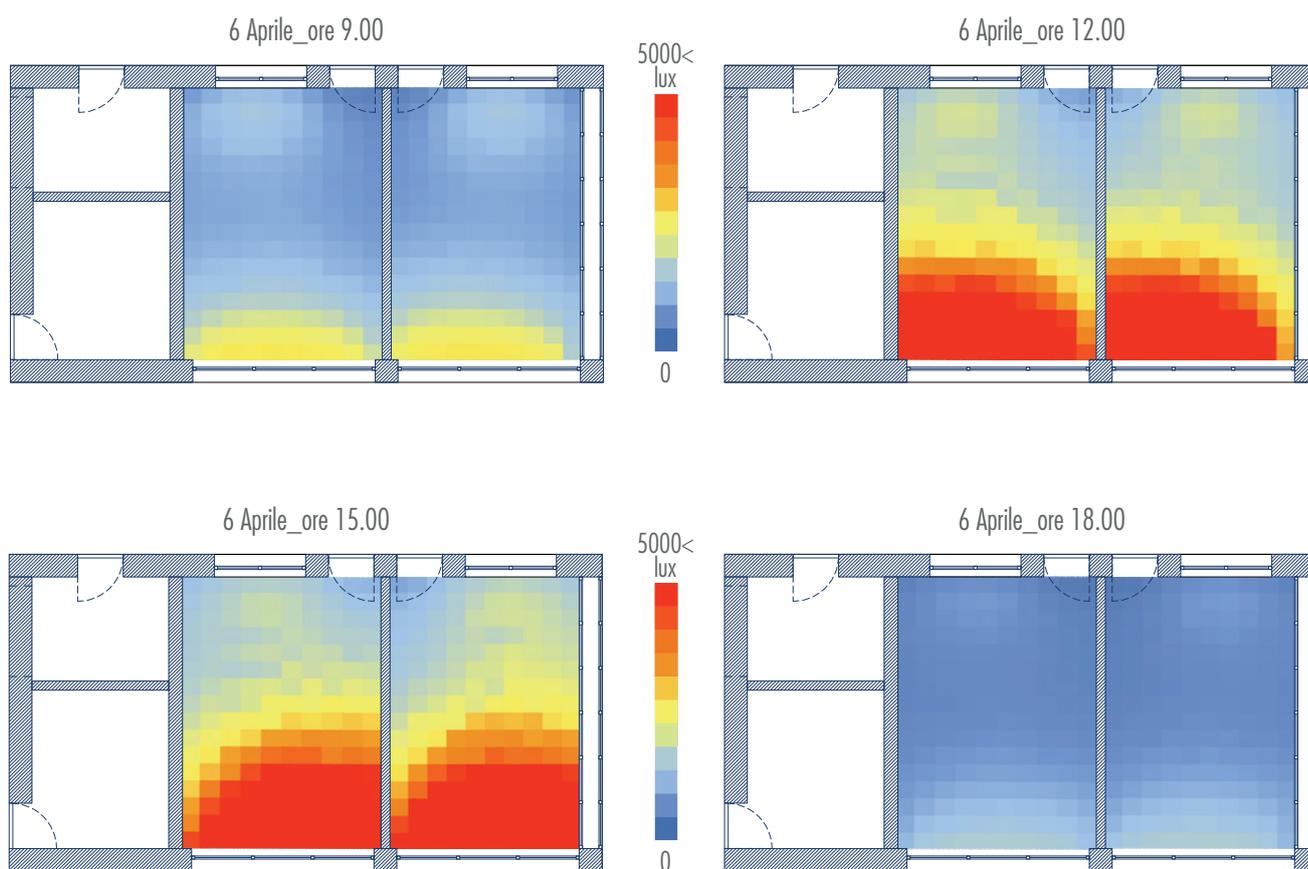
21 Settembre\_ore 15.00



21 Settembre\_ore 18.00



### ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorno cielo coperto



### 6.5.8 Configurazione H

#### SIMULAZIONI ENERGETICHE

##### Zona\_1 - Laboratorio di Misura EST

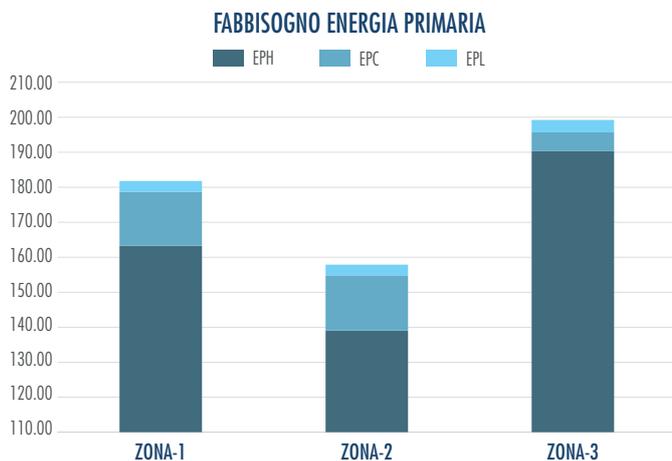
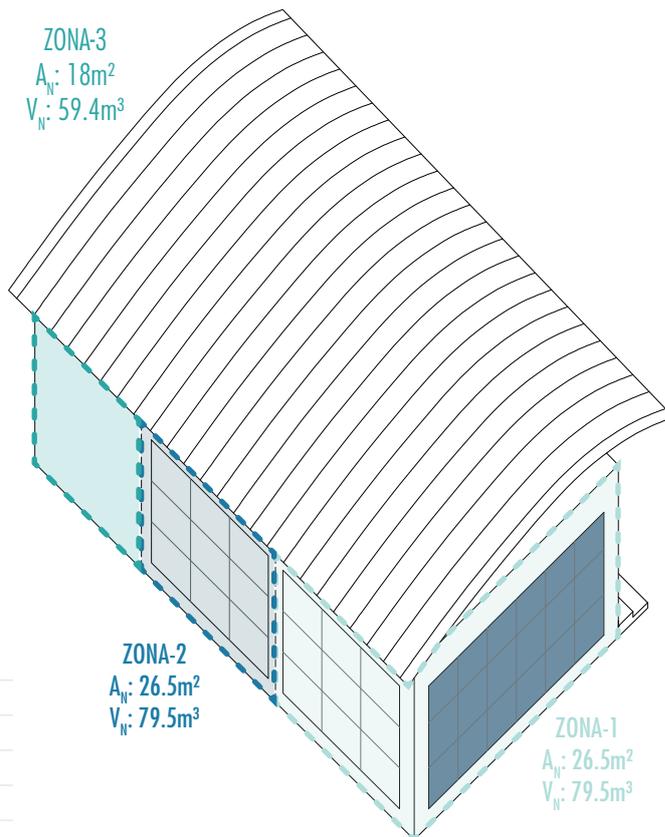
Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 162.40 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 15.13 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 3.09 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

##### Zona\_2 - Laboratorio di Misura OVEST

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 138.54 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 15.53 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 3.02 \text{ kWh/m}^2\text{y}$

##### Zona\_3 - Contro Room + Stanza Impianti

Energia Primaria Riscaldamento	$EP_H = 190.36 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Raffrescamento	$EP_C = 5.29 \text{ kWh/m}^2\text{y}$
Energia Primaria Illuminazione	$EP_L = 2.88 \text{ kWh/m}^2\text{y}$



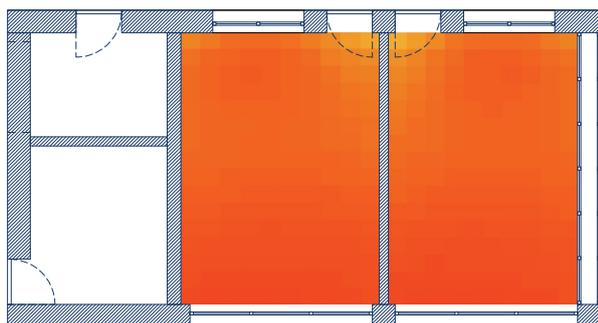
**ENERGIA PRIMARIA GLOBALE CONFIGURAZIONE - H**  
**178.75 kWh/m²K**

<b>POTENZA DI PICCO</b>	<b>FRATTILE 99%</b>	<b>FRATTILE 96%</b>
$Q_{MAX,H} = 27.63 \text{ kW}$	$Q_{99\%,H} = 17.37 \text{ kW}$	$Q_{96\%,H} = 11.63 \text{ kW}$
$Q_{MAX,C} = 7.59 \text{ kW}$	$Q_{99\%,C} = 2.94 \text{ kW}$	$Q_{96\%,C} = 0.20 \text{ kW}$

#### ANALISI DAYLIGHT

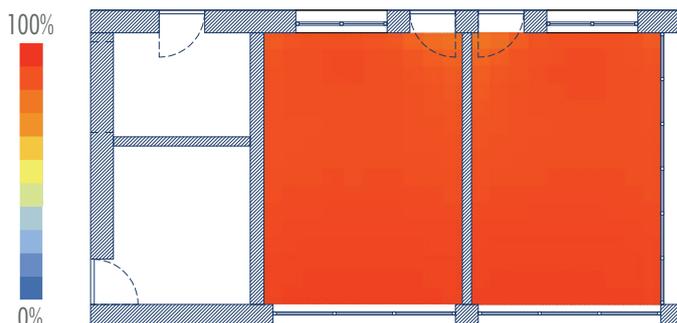
DAYLIGHT AUTONOMY - DA

86.76      86.79



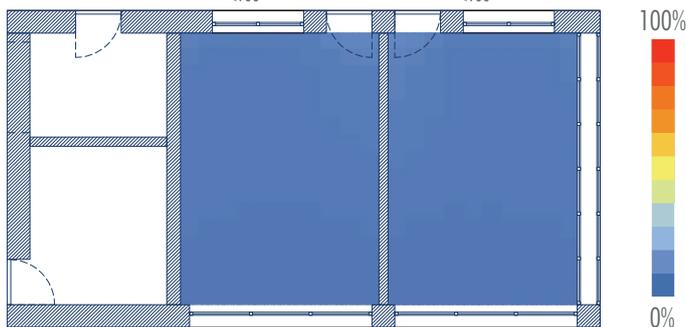
CONTINUOUS DAYLIGHT AUTONOMY - DA<sub>CON</sub>

92.53      92.54



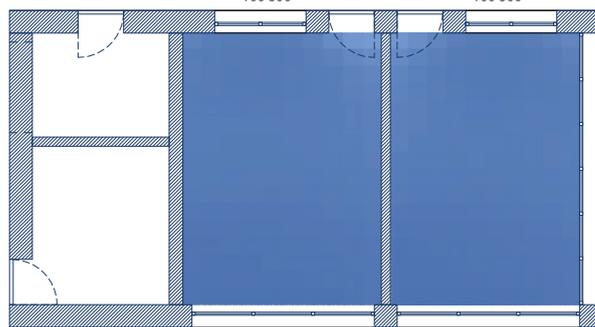
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub><100°</sub>: 3.92      UDI<sub><100°</sub>: 3.96



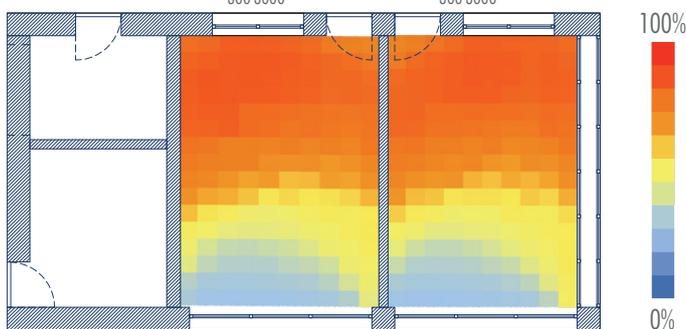
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>100-300°</sub>: 4.03      UDI<sub>100-300°</sub>: 4.00



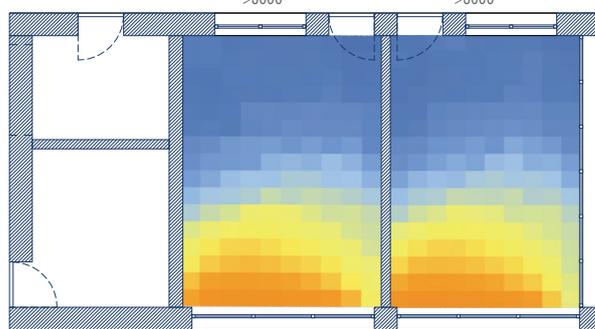
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>300-3000°</sub>: 64.30      UDI<sub>300-3000°</sub>: 64.18



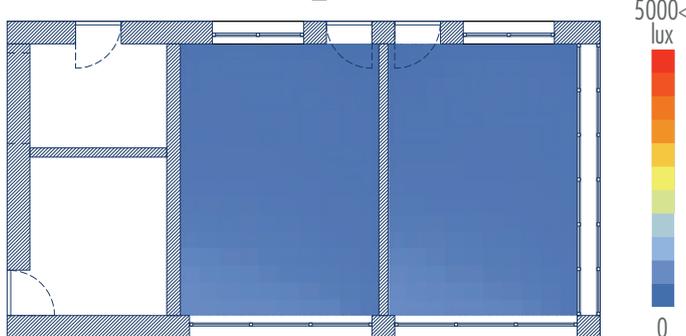
USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

UDI<sub>>3000°</sub>: 27.24      UDI<sub>>3000°</sub>: 27.39

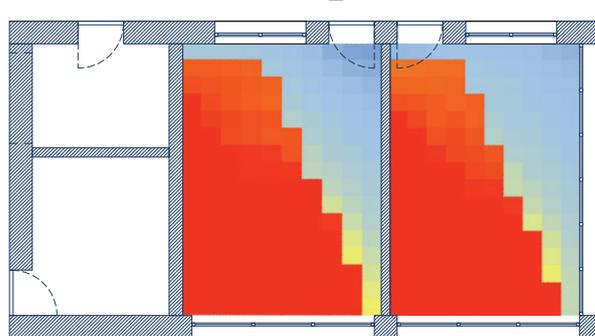


ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorni clear sky

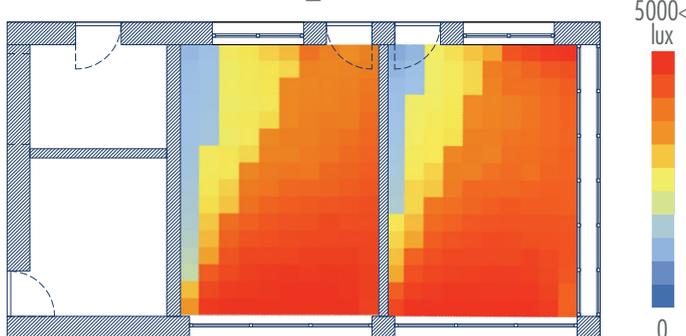
29 Dicembre\_ore 9.00



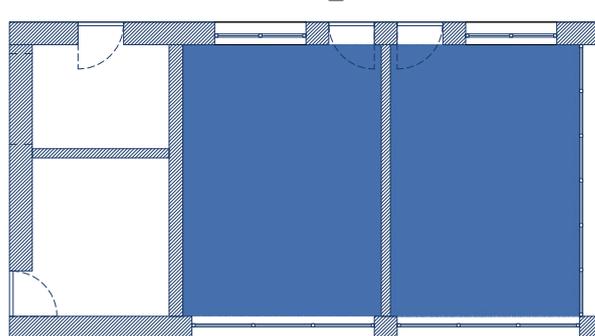
29 Dicembre\_ore 12.00



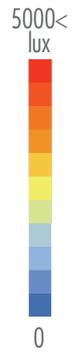
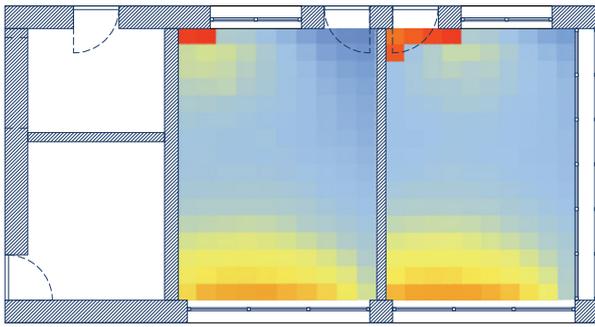
29 Dicembre\_ore 15.00



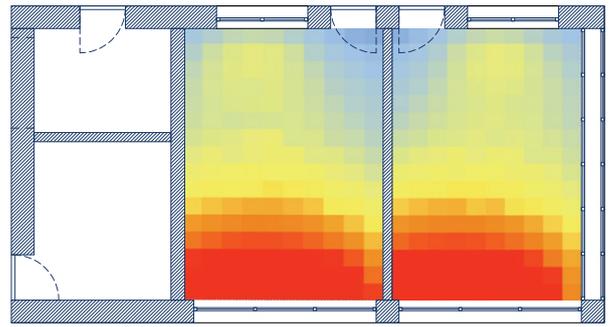
29 Dicembre\_ore 18.00



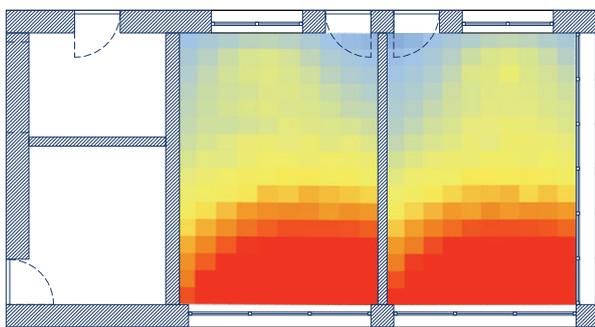
28 Giugno\_ore 9.00



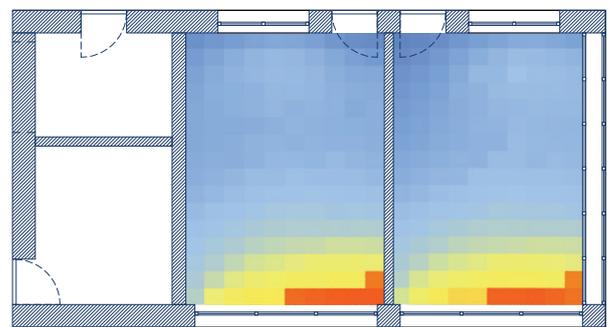
28 Giugno\_ore 12.00



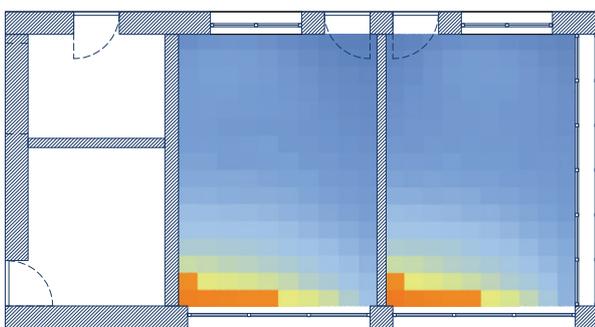
28 Giugno\_ore 15.00



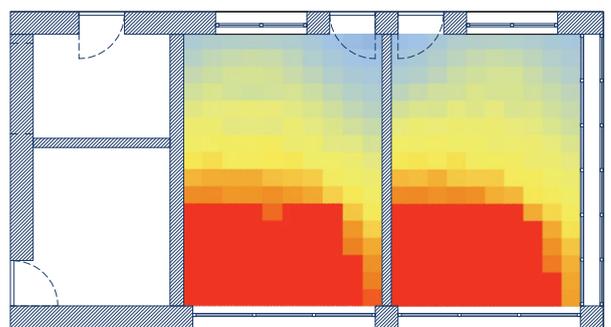
28 Giugno\_ore 18.00



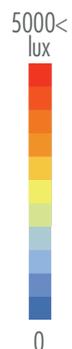
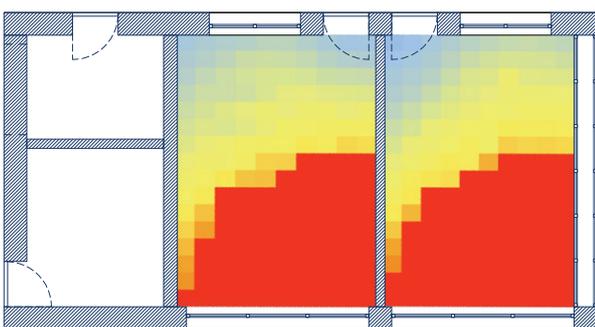
21 Settembre\_ore 9.00



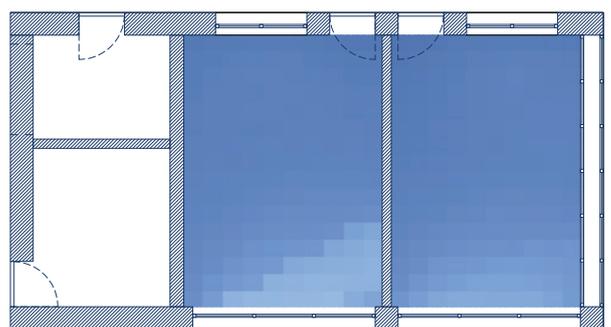
21 Settembre\_ore 12.00



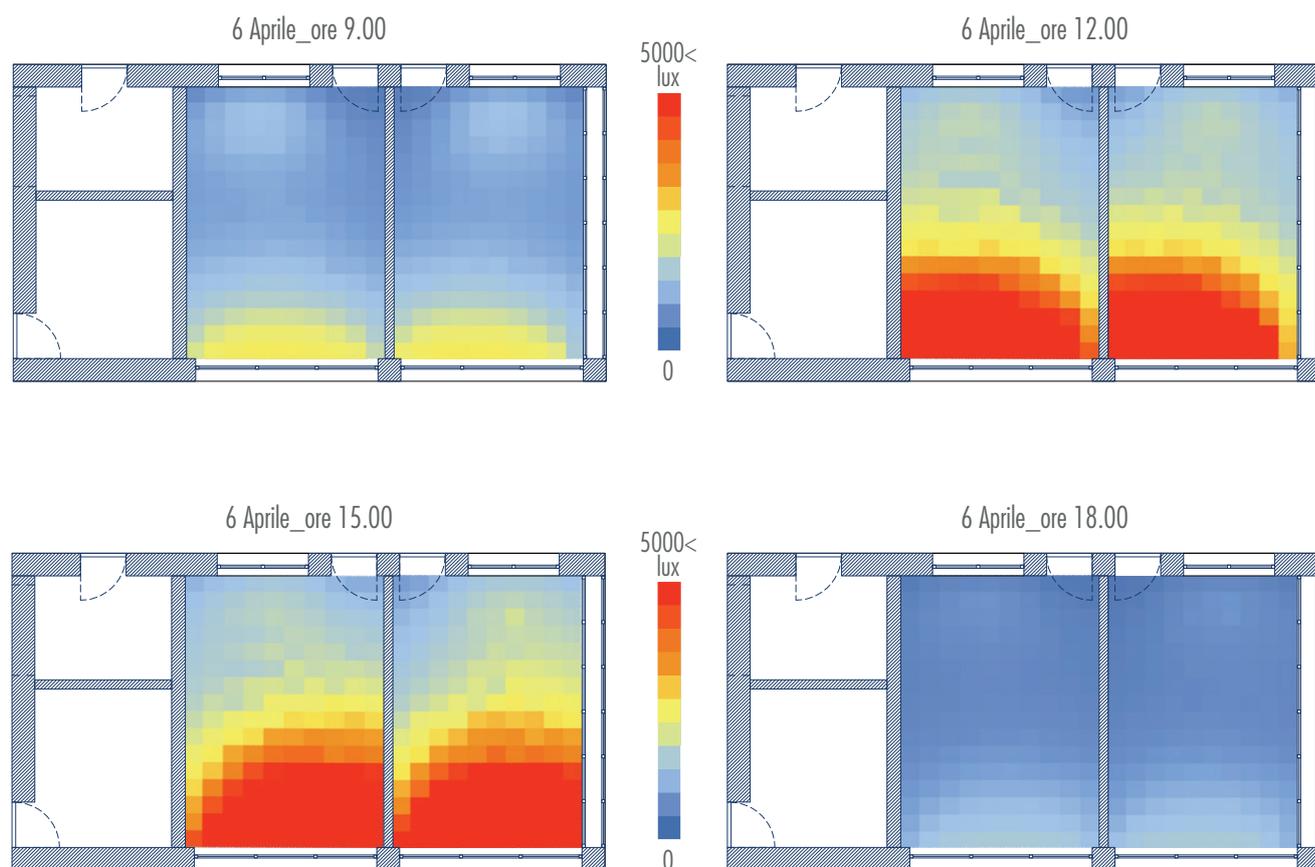
21 Settembre\_ore 15.00



21 Settembre\_ore 18.00

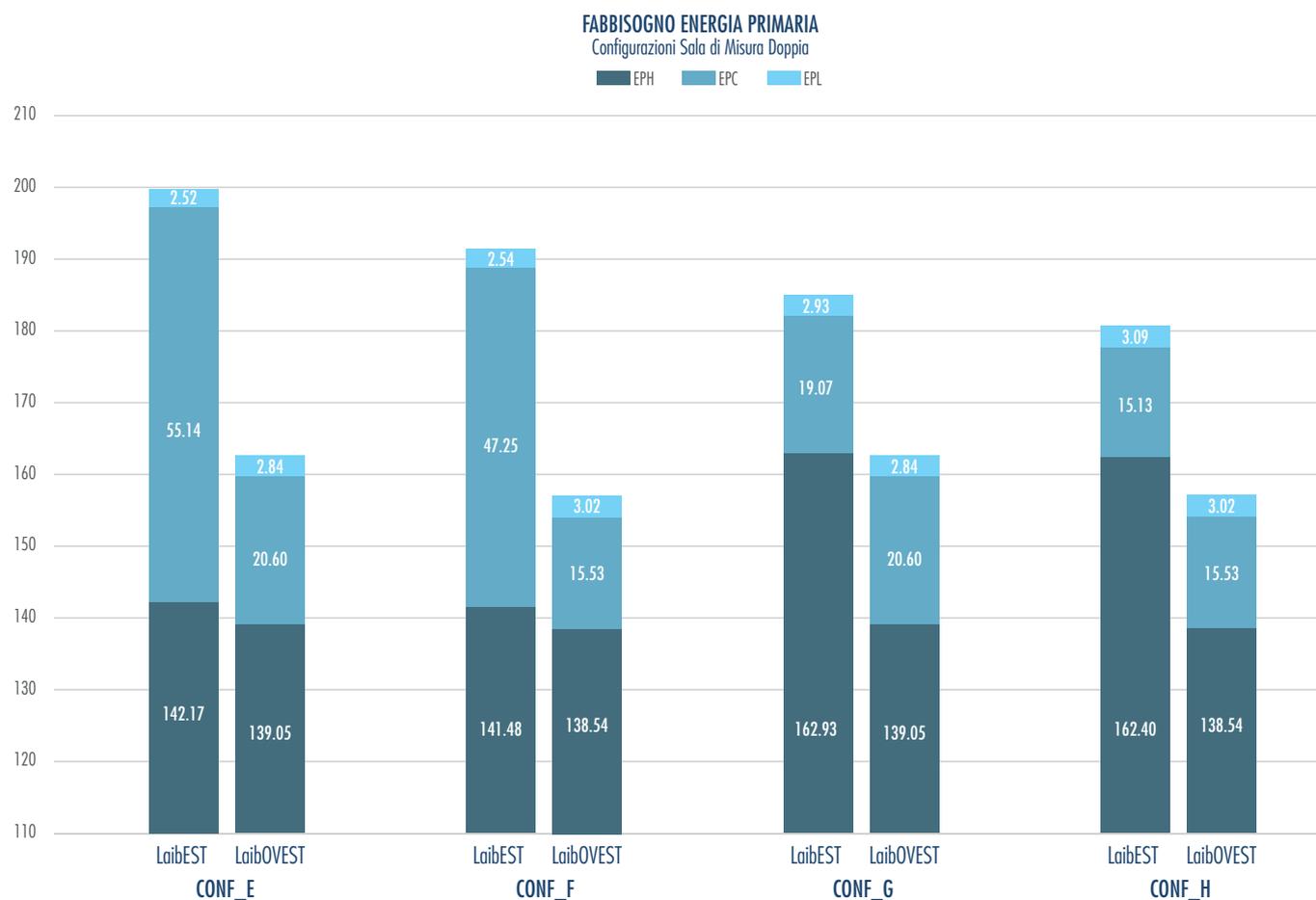


## ANALISI ILLUMINAMENTO\_giorno cielo coperto

*Fabbisogno di energia primaria*

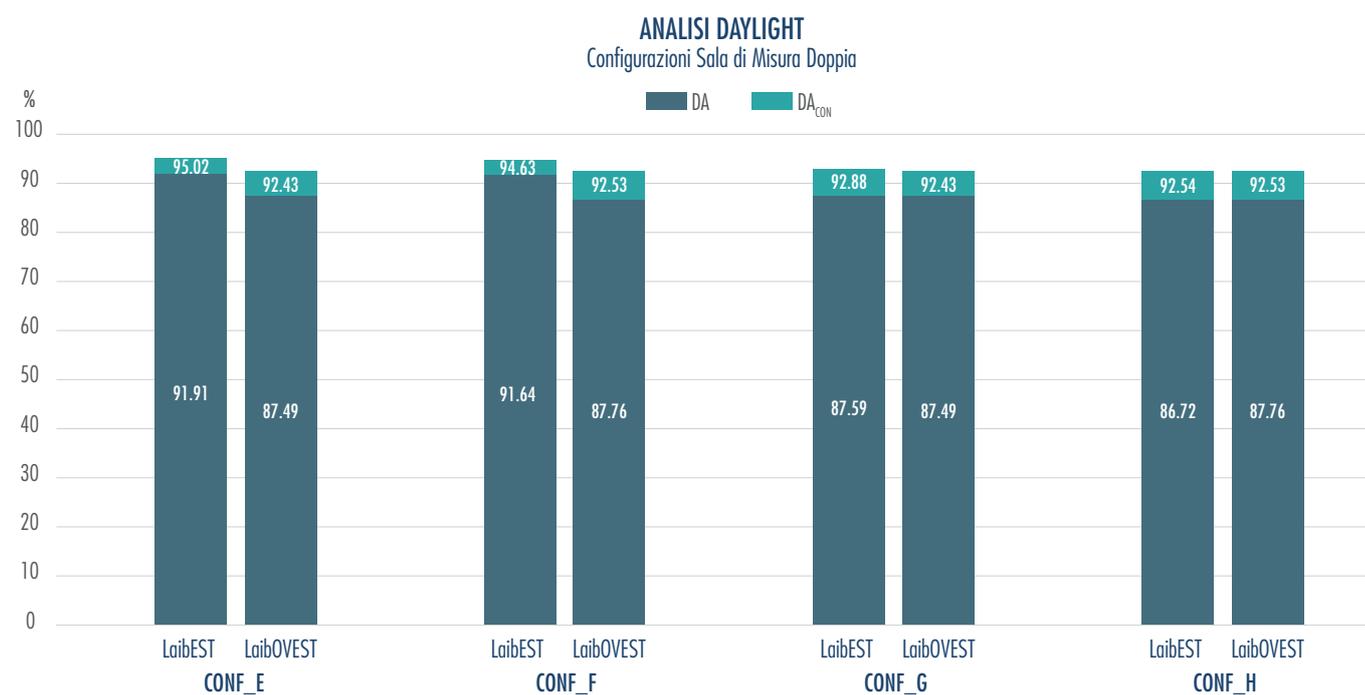
Dalle simulazioni effettuate per quanto riguarda la configurazione del laboratorio come due spazi di misura completamente indipendenti, si possono trarre le seguenti conclusioni. Dal punto di vista del fabbisogno energetico per il riscaldamento è evidente che il laboratorio ad est, complice l'importante superficie della doppia pelle e un numero maggiore di superfici rivolte verso l'esterno, risulta più energivoro rispetto al suo gemello posto ad ovest. Tuttavia, dal punto di vista del raffrescamento estivo, grazie all'inserimento del sistema di schermatura per la specchiatura ad est, si può giungere a bisogni energetici pressoché identici tra i due laboratori.

Rimangono invariate le considerazioni fatte per la presenza o meno della tettoia curva, ovvero la sua presenza risulta di fondamentale importanza per schermare la radiazione solare incidente, riducendo gli apporti gratuiti, sia in estate che in inverno, e provocando un leggero innalzamento del fabbisogno energetico per il riscaldamento ma una notevole diminuzione del consumo per il periodo estivo. Il tutto senza andare ad intaccare in maniera significativa la quota di luce naturale entrante e quindi il fabbisogno di energia elettrica per l'illuminamento.



### Analisi Daylight

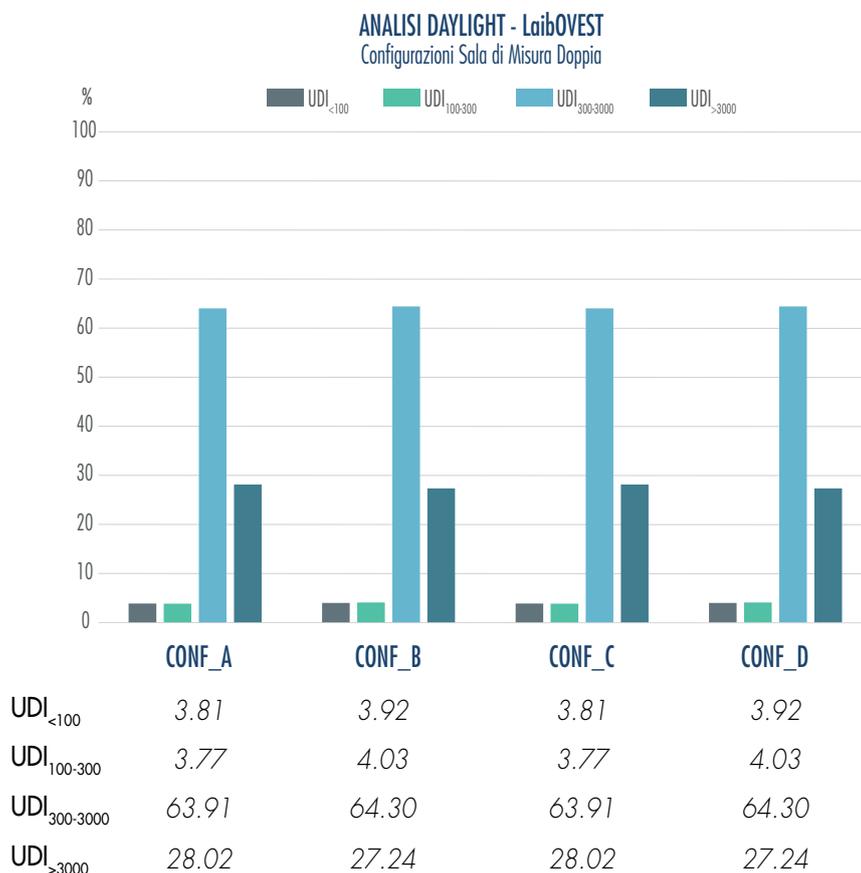
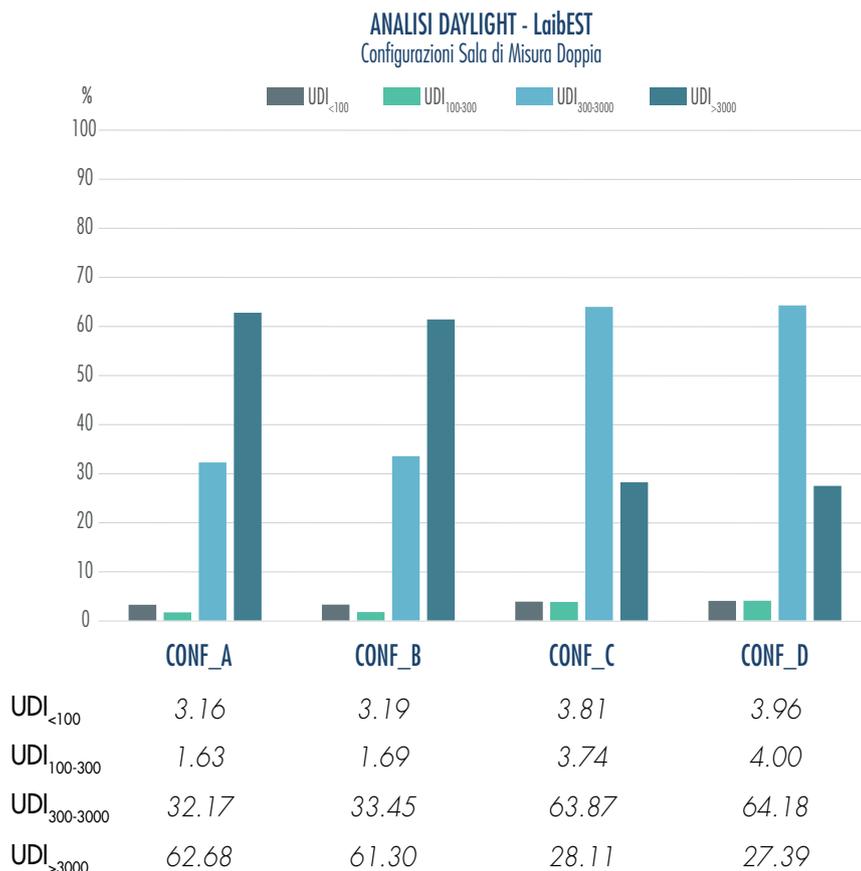
Con le simulazioni effettuate si è provato che è possibile andare a configurare lo spazio in questione come due ambienti di misura pressoché identici, soprattutto dal punto di vista illuminotecnico, grazie all'installazione del sistema oscurante presso la doppia pelle ad est. Tale risultato è stato provato non soltanto grazie alla valutazione delle distribuzioni degli illuminamenti per i giorni più significativi nell'arco dell'anno, ma anche attraverso



osservazioni più specifiche rispetto alle metriche di valutazione precedentemente citate. Si è infatti osservato che la quantità e l'intensità della luce naturale che penetra nello spazio è funzione prevalentemente della presenza/assenza del sistema oscurante e, in secondo luogo, dell'utilizzo o meno della tettoia di copertura. Più precisamente, i due laboratori hanno valori con discrepanze minime (nell'ordine di grandezza delle incertezze del modello) per quanto riguarda la Daylight Autonomy e la Continuous Daylight Autonomy.

Per completare il quadro generale, le classi di UDI mettono in evidenza un comportamento relativamente costante per quanto riguarda il laboratorio ad ovest, dovuto alla presenza/assenza della tettoia come unica variabile. Mentre, il laboratorio ad est subisce importanti variazioni nelle percentuali di  $UDI_{300-3000}$  e  $UDI_{>3000}$  in funzione della presenza della schermatura solare ad est, un dispositivo che non rende soltanto i due laboratori comparabili da un punto di vista sperimentale, ma che va a ridurre in maniera sostanziale (circa del 50%) i fenomeni di abbagliamento.

Rimangono invariate le considerazioni fatte per la presenza o meno della tettoia curva, ovvero la sua presenza risulta di fondamentale importanza per schermare la radiazione solare incidente, riducendo gli apporti gratuiti, sia in estate che in inverno, e provocando un leggero innalzamento del fabbisogno energetico per il riscaldamento ma una notevole diminuzione del consumo per il periodo estivo. Il tutto senza andare ad intaccare in maniera significativa la quota di luce naturale entrante e quindi il fabbisogno di energia elettrica per l'illuminamento.



## 7. CONCLUSIONE

## 7. Considerazioni finali

Giunti alle conclusioni di questo studio, si può affermare che il presente lavoro di ricerca abbia fornito un importante punto di partenza per la definizione complessiva della facility sperimentale del Politecnico di Torino, l'HEQLab, i cui lavori di realizzazione partiranno nei mesi a seguire.

Dopo una prima parte volta all'individuazione di quelle che sono, sia sotto il punto di vista scientifico che normativo, i principali aspetti che necessitano di essere presi in considerazione per la valutazione del comfort all'interno di spazi confinati ed una mappatura dello stato dell'arte delle facility sperimentali nel mondo che, ad oggi, risultano utilizzate per una moltitudine di scopi di ricerca, tra cui test specifici su soluzioni costruttive integrate, interazione con gli occupanti e validazione di software per la modellazione energetica.

Con la necessità di fornire i documenti opportuni per la costruzione effettiva della facility, lo studio si è soffermato sulla definizione della configurazione di partenza per la struttura, sia da un punto di vista delle caratteristiche di layout che delle soluzioni tecnologiche adottate. Un approccio volutamente ed altamente multidisciplinare che ha messo in evidenza le grandi potenzialità della struttura in termini di flessibilità costruttiva, impiantistica e, più in generale, alla rispondenza delle esigenze di carattere sperimentale, per una configurazione ready to be use.

Individuata la configurazione iniziale del laboratorio, questo studio si è soffermato sul metterne in evidenza ed analizzarne le implicazioni di carattere climatico, energetico e di comfort, attraverso una serie di simulazioni. Dal punto di vista climatico, gli aspetti del soleggiamento e dell'ombreggiamento hanno portato osservazioni importanti per le superfici di misura esposte a sud ed ad est. Mentre, dopo aver programmato le schedules di utilizzo del laboratorio sulla base della destinazione d'uso ad ufficio, si sono analizzati i consumi energetici e gli aspetti di comfort relativi alla quantità di luce naturale entrante nell'ambiente.

Per fornire un quadro complessivo e più completo delle potenzialità della facility, oltre alla configurazione di base sono state sviluppate una serie di configurazioni alternative/complementari che forniscono un'ottima base di comparazione per i risultati.

Per concludere, il lavoro di ricerca appena esposto può essere considerato come un buon punto di partenza progettuale ed una serie di osservazioni preliminari aggiuntive in grado di essere sfruttate come base comune per i diversi test che si andranno ad effettuare all'interno dell'HEQLab. Tra gli sviluppi futuri vi sono infatti grandi possibilità di analisi su diverse tipologie di componenti architettonici, su aspetti legati al comfort dell'utente e sistemi integrati per la gestione della struttura.

## 8. RINGRAZIAMENTI

## 8. Ringraziamenti

Questo lavoro di progettazione e ricerca è stato possibile solo grazie al contributo ed al supporto costante di molte persone. Prime fra tutte vorrei ringraziare i miei relatori, la professoressa Valentina Serra ed il professor Fabio Favoino, per i loro consigli, la loro disponibilità, pazienza e soprattutto per la grande quantità di conoscenze che sono stati in grado di trasmettermi e senza le quali non avrei potuto raggiungere questi risultati. Ulteriore gratitudine va espressa nei confronti del professor Francesco Causone che come corelatore ha dimostrato grande disponibilità e professionalità nel seguire e supportare il progetto.

Un altro importante ringraziamento deve essere fatto a Luigi Giovannini per i numerosi consigli, per l'aiuto fornitomi nella definizione del modello energetico e per aver chiarito ogni mio dubbio anche fuori dal suo orario di lavoro.

Un ringraziamento speciale ai miei genitori che da sempre credono in me e che, con i loro grandi sacrifici, mi hanno aiutato e mi sono stati accanto per tutta la durata di questo lungo viaggio. Un doveroso grazie va anche a tutti i miei parenti, nonne, zii e cugine su tutti, per il loro continuo supporto.

Grazie ai miei amici, conoscenti, compagni di corso e di allenamento che per una piccola parte o per tutto il mio percorso accademico e non mi sono stati vicino e con cui ho condiviso momenti di lavoro e di svago.

Vorrei concludere facendo un ulteriore ringraziamento all'architetto, professore ma soprattutto amico Marco Mancini che negli ultimi anni, tramite la sua dedizione al lavoro, mi ha trasmesso una grande passione per il mestiere, per l'architettura e per il mondo delle costruzioni in ogni sua piccola sfaccettatura.

## 9. RIFERIMENTI

## 9. Riferimenti

### 9.1 Bibliografia

- \_ALFANO G., D'AMBROSIO F. E RICCIO G. (1997), *"La valutazione delle condizioni termoigrometriche negli ambienti di lavoro: comfort e sicurezza"*, Napoli: CUEN;
- \_ ANSI/ASHRAE STANDARD 55 (2004). *Thermal Environment Conditions for Human Occupancy*;
- \_ ASDRUBALI F., BALDINELLI G., BIANCHI F. E SAMBUCCO S. (2019), *"Il protocollo LEED e ITACA per gli edifici residenziali: confronto tra protocolli di sostenibilità ambientale"*, Ingenio – Informazione tecnica e progettuale, 20 Maggio 2019. Informazione disponibile su: <https://www.ingenio-web.it/23531-il-protocollo-leed-e-itaca-per-gli-edifici-residenziali-confronto-tra-protocolli-di-sostenibilita-ambientale> (consultato il 17/11/2019);
- \_ BEKO G., HALAS O., CLAUSEN G. E WESCHLER C.J. (2006), *"Initial studies of oxidation processes on filter surfaces and their impact on perceived air quality"*, Indoor Air, vol. 16, pp. 56–64;
- \_ BRAGER G.S. E DE DEAR R.J. (1998.a), *"Thermal adaptation in the built environment: a literature review"*, Energy and Buildings, v 27, n 1, p. 83-96;
- \_ BRAGER G.S. E DE DEAR R.J. (1998.b), *"Developing an adaptive model of thermal comfort and preference"*, University of California, Berkeley, 6 Febbraio;
- \_ BRUNO E. (2018), *"Design for building user comfort"*, in *"10 Priorities for Health and Wellbeing"*, Arup, October;
- \_ CEN/TC 169/WG 11, in materia di *"Daylight"*;
- \_ CEN/TR 16798-2 DEL 2019, in materia di *"Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 2: Interpretation of the requirements in EN 16798-1 - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics (Module M1-6)"*;
- \_ CLAUSEN G. (2004), *"Ventilation filters and indoor air quality: a review of research from the International Centre for Indoor Environment and Energy"*, Indoor Air, vol. 14, pp. 202-207;
- \_ DE GIDS W.F. E WOUTERS P. (2010), *"CO2 as indicator for the indoor air quality. General principles"*, Ventilation Information Paper, n.33, Luglio;
- \_ DE DEAR R.J. E BRAGER G.S. (1998), *"Thermal adaptation in the built environment: a literature review"*, Energy and Buildings, No.27;
- \_ DJONGYANG N., TCHINDA R. E NJOMO D. (2010), *"Thermal comfort: A review paper"*, Elsevier, Building and Environment, Cameroon;
- \_ DM 05 LUGLIO 1975, in materia di *"Requisiti minimi per i locali d'abitazione"*;

- \_ DM 11 OTTOBRE 2017, in materia di "Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici";
- \_ EDWARDS L. E TORCELLINI P. (2002), "A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants", NREL – National Renewable Energy Laboratory, Colorado - USA, Luglio;
- \_ EN 16798-1 DEL 2019, in materia di "Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6";
- \_ FANGER P.O. (2006), "What is IAQ", Indoor Air 16, Singapore, pp. 328-334;
- \_ FANGER P.O. (1970), "Thermal Comfort", New York: McGraw Hill;
- \_ FANG L., WYON D.P., CLAUSEN G. E FANGER P.O. (2004), "Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance", Indoor air 14, Danimarca, pp.74-81;
- \_ FRANTA G. E ANSTEAD K. (1994), "Daylighting Offers Great Opportunities", Window & Door Specifier-Design Lab, Spring, pp.40-43;
- \_ HATHAWAY W.E., HARGREAVES J.A., THOMPSON G.W. E NOVITSKY D. (1992), "A Study Into the Effects of Light on Children of Elementary School Age—A Case of Daylight Robbery", Alberta: Policy and Planning Branch, Planning and Information Services Division, Alberta Education;
- \_ HEINZERLING D., SCHIAVON S., WEBSTER T. E ARENS E. (2013), "Indoor environmental quality assessment models: A literature review and a proposed weighting and classification scheme", Elsevier, Building and Environment, Berkley CA, Agosto;
- \_ HENSEN JLM (1991), "On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system", PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven;
- \_ HINDMARSH M.E. E MACHPERSON R.K. (1962), "Thermal comfort in Australia", Australian Journal of Science 24;
- \_ HUANG L., ZHU Y., OUYANG Q. E CAO B. (2011), "A study on the effects of thermal, luminous, and acoustic environments on indoor environmental comfort in offices", Elsevier, Building and Environment, Tsinghua University, Beijing, Luglio;
- \_ HUMPHREYS M.A. (1995), "Thermal comfort temperatures and the habits of hobbits", in Humphreys N. e Roof S. Editori, "Standards for thermal comfort", Londra: E & FN Spon;
- \_ ISO 21 GIUGNO 2017, n. 17772-1, in materia di "Energy performance of buildings - Indoor environmental quality Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings";
- \_ "Lighting within the artificial light", Fordergemeinschaft Gutes Licht publication;

- \_ LIBERMAN J. (1991), *"Light Medicine of the Future"*, New Mexico: Bear & Company Publishing;
- \_ LOPARDO G. (2010), *"Un modello matematico di termoregolazione del corpo umano"*, Università degli Studi di Salerno;
- \_ NABIL A. AND MARDALJEVIC J. (2005), *"Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings"*, *Light Res Technol* 2005;37(1):41-59;
- \_ MARDALJEVIC J., ANDERSEN M., ROY N. AND CHRISTOFFERSEN J. (2011), *"Daylighting metrics for residential buildings"*, In: *Proceedings of: 27th Session of CIE, Sun City (South Africa)*, pp. 93-111, 11-15 July 2011;
- \_ MARONI M., SEIFERT B. E LINDVALL T. (1995), *"Indoor Air Quality - A Comprehensive Reference Book: Air Quality Monographs, v. 3"*, Elsevier, Amsterdam;
- \_ PERRETTI C. (2013), *"Analisi della qualità degli ambienti interni"*, Università degli Studi di Padova, PhD Tesi;
- \_ PETTENKOFER M. (1858), *"Uber den Luftwechsel in Wohngebäuden (About the air change in residential buildings)"*, Monaco;
- \_ *"Protocollo Itaca, a cosa serve e come si usa. Esempi e software gratuito"*, Biblus-net. Informazione disponibile su: <http://biblus.acca.it/focus/protocollo-itaca-cosa-serve-e-come-si-usa/> (consultato il 17/11/2019);
- \_ SERRA V. (2015), *"Comfort Acustico"*, Politecnico di Torino, Torino;
- \_ *"Sostenibilità edilizia ed aspetti sociali: procedure e protocolli ITACA, LEED, HQE, SBTOOL"*, Biblus-net, 10 Marzo 2016. Informazione disponibile su: <http://biblus.acca.it/procedure-protocolli-sostenibilita-edilizia/> (consultato il 17/11/2019);
- \_ SUGIHTO E. (2016), *"Why human centred design makes a difference in architecture"*, Medium, 13 Settembre. Informazione disponibile su: [https://medium.com/@social\\_archi/why-human-centred-design-makes-a-difference-in-architecture-3252cb798639](https://medium.com/@social_archi/why-human-centred-design-makes-a-difference-in-architecture-3252cb798639) (consultato il 17/11/2019);
- \_ SUNDELL J. (1999), *"Indoor Environment and Health"*, Stockholm, Sweden: National Institute of Public Health;
- \_ SUNDELL J. (2004), *"On the history of indoor quality and health"*, *Indoor Air* 14, Danimarca, pp. 51-58;
- \_ TUGRUL OGULATA R. (2007), *"The Effect of Thermal Insulation of Clothing on Human Thermal Comfort"*, *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, Vol.15, No.2, Aprile-Giugno;
- \_ UNI 30 GIUGNO 1995, n. 10339, in materia di *"Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura"*;

- \_ UNI 05 DICEMBRE 2013, n. 11516, in materia di *"Indicazioni di posa in opera dei sistemi di pavimentazione galleggiante per l'isolamento acustico"*;
- \_ UNI 15 FEBBRAIO 2018, n. 11296, in materia di *"Acustica in edilizia - Posa in opera di serramenti e altri componenti di facciata - Criteri finalizzati all'ottimizzazione dell'isolamento acustico di facciata dal rumore esterno"*;
- \_ UNI EN 01 GENNAIO 2002, n. 7726, in materia di *"Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche"*;
- \_ UNI EN ISO 01 LUGLIO 2002, n. 16017, in materia di *"Aria in ambienti confinati, aria ambiente ed aria negli ambienti di lavoro - Campionamento ed analisi di composti organici volatili mediante tubo di adsorbimento/desorbimento termico/cromatografia gassosa capillare - Campionamento mediante aspirazione con pompa"*;
- \_ UNI EN ISO 28 FEBBRAIO 2006, n. 7730, in materia di *"Ergonomia degli ambienti termici -Determinazione analitica ed interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale"*;
- \_ UNI EN ISO 02 AGOSTO 2005, n. 16032, in materia di *"Acustica - Misurazione del livello di pressione sonora di impianti tecnici in edifici - Metodo tecnico progettuale"*;
- \_ UNI EN ISO 06 LUGLIO 2006, n. 16000, in materia di *"Aria in ambienti confinati"*;
- \_ UNI EN 07 APRILE 2008, n. 15242, in materia di *"Ventilazione degli edifici - Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, comprese le infiltrazioni"*;
- \_ UNI EN 14 FEBBRAIO 2008, n. 15251, in materia di *"Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica"*;
- \_ UNI EN ISO 13 NOVEMBRE 2008, n. 3382, in materia di *"Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti"*;
- \_ UNI EN 21 LUGLIO 2011, n. 12464, in materia di *"Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro"*;
- \_ UNI EN ISO 17 LUGLIO 2014, n. 12341, in materia di *"Aria ambiente - Metodo gravimetrico di riferimento per la determinazione della concentrazione in massa di particolato sospeso PM10 o PM2,5"*;
- \_ UNI EN ISO 05 OTTOBRE 2017, n. 123554, in materia di *"Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti"*;
- \_ UNI EN ISO 01 MARZO 2018, n. 52016-1, in materia di *"Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo"*;
- \_ UNI EN 02 AGOSTO 2018, n. 12665, in materia di *"Luce e illuminazione - Termini fondamentali e criteri per i requisiti illuminotecnici"*;

- \_ UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (2008), "*Kyoto Protocol Reference Manual. On accounting of emissions and assigned amount*", November;
- \_ TUNDO A. (2016), "*La termografia nella valutazione del comfort termico in ambienti scolastici con la partecipazione degli studenti*", ENEA – Dipartimento Tecnologie Energetiche, A&T 10a edizione, Torino, 20-21 Aprile;
- \_ YAO R., LI B. E LIU J. (2009), "*A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV)*", Elsevier - Building and Environment, No. 44, Febbraio;
- \_ ZUMTOBEL (2017), "*Manuale illuminotecnico pratico*", Zumtobel Lighting GmbH, Luglio;

## 9.2 Sitografia

- \_ ROSSI P. (2018), "*Ossigeno, il principale nutrimento del corpo umano*", Royal Society of Medicine: 7° International Kaqun-elo Conference, Londra, 8 Dicembre. Informazione disponibile su: <http://www.acquakaqun.it/2018/05/09/ossigeno-fondamentale-per-la-salute-delle-cellule/> (consultato il 03/09/2019);
- \_ LEED, "*The Impact of Buildings*". Informazione disponibile su: <https://new.usgbc.org/leed> (consultato il 17/11/2019);
- \_ MENDUTO T. (2015), "*L'illuminazione naturale e artificiale degli ambienti di lavoro*", PuntoSicuro, 24 Luglio. Informazione disponibile su: <https://www.puntosicuro.it/sicurezza-sul-lavoro-C-1/tipologie-di-rischio-C-5/luoghi-di-lavoro-C-48/l-illuminazione-naturale-artificiale-degli-ambienti-di-lavoro-AR-15080/> (consultato il 18/10/2019);
- \_ WELL (2018), "*The WELL Building Standard*". Informazione disponibile su: <https://www.wellcertified.com/> (consultato il 17/11/2019);

## 9.3 Appendici

Si allegano:

APPENDIX\_A: Mappatura Facility Sperimentali

- Schede Facility;
- Tabella confronto caratteristiche generali;
- Tabella confronto caratteristiche impiantistiche;
- Tabella confronto caratteristiche sensoristica;
- Tipologia di sensori.

APPENDIX\_B: HIEQLab

- Requisiti Generali;
- Requisiti a confronto;

APPENDIX\_C: HIEQLab - Progettazione

- Work Breakdown Structure.

APPENDIX\_D: Schede Tecniche

- Schede Tecniche.

## **APPENDIX\_A**

A.1 Schede Facility

A.2 Confronto caratteristiche generali

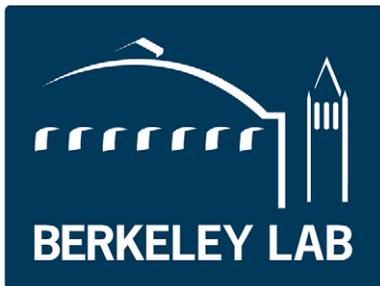
A.3 Confronto Caratteristiche Sensoristica

A.4 Confronto Caratteristiche Impiantistiche

A.5 Tipologia di sensori

# FLEXLAB - Lawrence Berkeley National Laboratory

*Facility for Low Energy eXperiments in buildings*



*Environmental Energy Technologies Division Lawrence  
Berkeley National Laboratory  
Berkeley CA (USA)*



## DESCRIZIONE

La facility è a servizio dell'University of California, Berkeley (USA). Situate all'interno del campus universitario in un ambiente suburbano, le test cells sono gestite dal team di ricerca LBNL, diretto da Stephen Selkowitz.

Le 5 facilities esterne sono entrate in funzione nell'aprile del 2014 per lo sviluppo e la sperimentazione di soluzioni costruttive integrate, IEQ e sistemi di condizionamento.



## APPLICAZIONI

Il laboratorio è attualmente utilizzato per sperimentazioni riguardo:

- Comfort interno ed IEQ;
- Componenti di facciata;
- Sistemi di riscaldamento/raffrescamento;
- Comfort luminoso;
- Ergonomia e funzionalità di componenti di arredo per uffici.



## CONTATTI

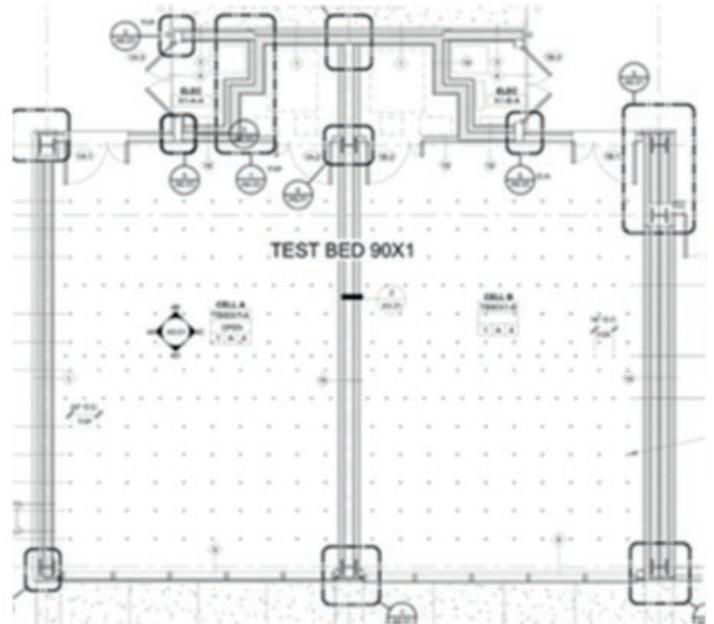
STEPHEN SELKOWITZ  
Mailstop 90-3111 LBNL Berkeley,  
CA 94720  
+1 510 486 5064  
seselkowitz@lbl.gov



## CARATTERISTICHE DI LAYOUT

Quattro delle cinque strutture sono costituite da fabbricati in intelaiatura metallica ad 1 piano fuori terra rivolti verso sud. Ognuna si sviluppa su un'area di 112,24mq (12,2x9,2m) e può essere ulteriormente divisa in due unità speculari (6,1x9,2m). La facility più ad ovest può essere completamente ruotata su stessa in modo da effettuare misurazioni e test su orientamenti differenti.

La quinta testbed si sviluppa su due piani fuori terra per un'altezza complessiva di 8m su un'area di 57,76mq (7,6x7,6m). L'utilizzo di questa struttura può variare e possono essere eseguiti test per ambienti a doppia altezza oppure per ambienti con solaio intermedio.



## CARATTERISTICHE INVOLUCRO



Le pareti esterne "non sperimentali" sono altamente isolate ( $U: 0.07 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) ed altrettanto isolate sono le pareti divisorie interne fra le celle ( $U: 0.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), mentre le superfici esposte a sud, siano esse opache o trasparenti, possono essere sostituite a seconda del test da effettuare. E' da specificarsi che la superficie trasparente massima installabile è pari a 6,0x2,5m circa, con la predisposizione per l'installazione di schermature solari esterne.

In aggiunta, un'importante porzione della copertura può essere rimossa per ospitare lucernari e meccanismi di ventilazione verticale.



## CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE

Ogni singola testbed è equipaggiata con un sistema HVAC completamente indipendente che può alimentare sistemi idronici o ad aria (compresi pannelli radianti a pavimento/soffitto, travi fredde, etc.). Il sistema è inoltre in grado di simulare condizioni esterne, invernali o estive, più rigide rispetto a quelle effettive.

Ogni cella è stata equipaggiata con sistemi di illuminazione artificiale LED forniti dalla Philips.



## CARATTERISTICHE SENSORI

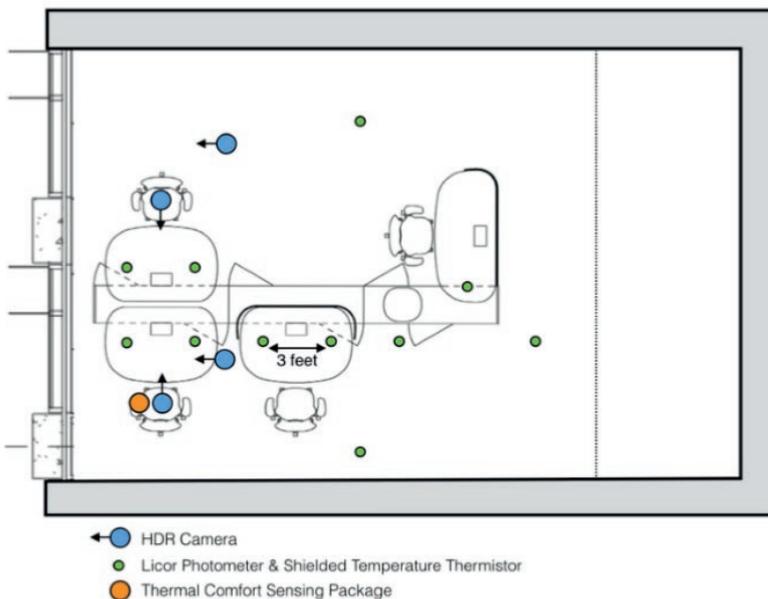
Le facilities sono dotate di circa 500 punti di misura e ulteriori 100 possono essere aggiunti a seconda delle necessità e dei test da effettuare da parte dell'università o dalle aziende partner. I dati vengono poi raccolti all'interno di un database protetto dove alcune serie di informazioni possono essere condivise direttamente dalle aziende partner mentre altri dati vengono tenuti ad uso privato per successivi sviluppi.

### INTERNA

La sensoristica interna si compone di sensori di temperatura puntuali e una sensoristica diffusa per il tracciamento dell'andamento delle temperature da pavimento a soffitto. Inoltre sono stati posizionati dei fotometri orizzontali e verticali per la verifica del comfort luminoso, ed ulteriori misure su abbagliamento ed illuminazione possono essere effettuate tramite implementazione di macchine specifiche.

### ESTERNA

Le condizioni esterne sono totalmente monitorate attraverso una stazione meteorologica posta nelle immediate vicinanze delle facilities. In aggiunta, anche le condizioni di luce esterna sono rilevate attraverso sensori che registrano la copertura nuvolosa, l'irraggiamento solare e la posizione del sole.



## BIBLIOGRAFIA

\_MCNEIL, ANDREW, CHRISTIAN KOHLER, ELEANOR S LEE, AND STEPHEN E SELKOWITZ., "High Performance Building Mockup in FLEXLAB", Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2014. LBNL-1005151;

\_ARNOLD JANSSENS, "Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements", International Energy Agency, EBC Annex 58;

\_CINDY REGNIER, "FLEXLAB (Facility for Low Energy eXperiments in Buildings)", Lawrence Berkeley National Lab;

\_HONGYUAN JIA, XIUFENG PANG, PHILIP HAVES, "Experimentally-determined characteristics of radiant systems for office buildings", Applied Energy, volume 221, 1st July 2018, pp. 41-54;

\_XIUFENG PANG, CARLOS DUARTE, PHILIP HAVES, FRANK CHUANG, "Experimentally-determined characteristics of radiant systems for office buildings", Energy and Buildings, volume 172, 1st August 2018, pp. 432-441.

# MoWiTT

*Mobile Window Thermal Test facility*



*Environmental Energy Technologies Division Lawrence  
Berkeley National Laboratory  
Windows and Daylighting Group  
Berkeley CA (USA)*



## DESCRIZIONE

La facility era al servizio dell'University of California, Berkeley (USA). Le test cells sono state gestite dal team di ricerca LBNL, diretto da Joseph Klems, e potevano essere spostate e completamente ruotate per eseguire vari test in varie posizioni e per le diverse esposizioni

La sperimentazione con queste facility si è concentrata sul controllo della performance delle chiusure trasparenti.



## APPLICAZIONI

Il laboratorio è rimasto in servizio dal 1985 al 2000, ed attualmente non viene più utilizzato per l'entrata in funzione del Flexlab e soprattutto dell'Advanced Facade Testbeds. Nei suoi anni di funzionamento sono stati svolti diversi test riguardo:

-Misure termiche per chiusure trasparenti;

-Verifica delle performance di chiusure trasparenti;



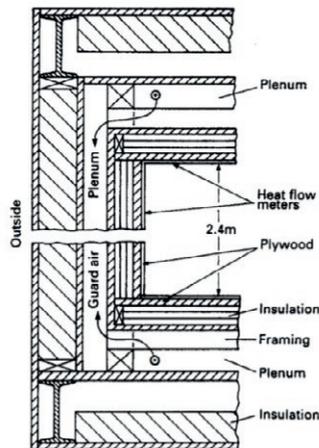
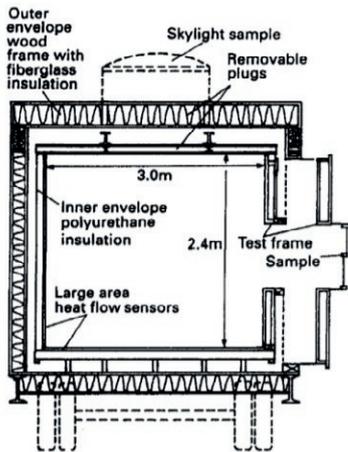
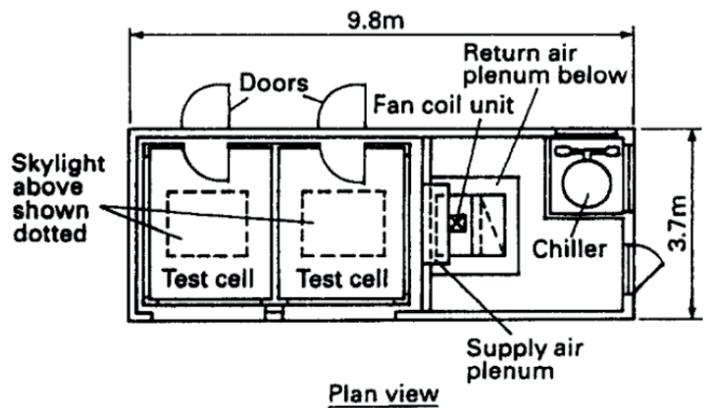
## CONTATTI

JOSEPH KLEMS  
(510) 486-5564  
joklems@lbl.gov



## CARATTERISTICHE DI LAYOUT

La facility era costituita da due fabbricati con intelaiatura metallica ad un piano fuori terra mobili e ruotabili a seconda delle necessità. Ognuna si sviluppava su un'area di 7,2mq (3,0x2,4m) per un'altezza netta interna di 2,4m, andando a creare dei laboratori side-by-side per misurazioni calorimetriche sulle chiusure verticali trasparenti.



## CARATTERISTICHE INVOLUCRO

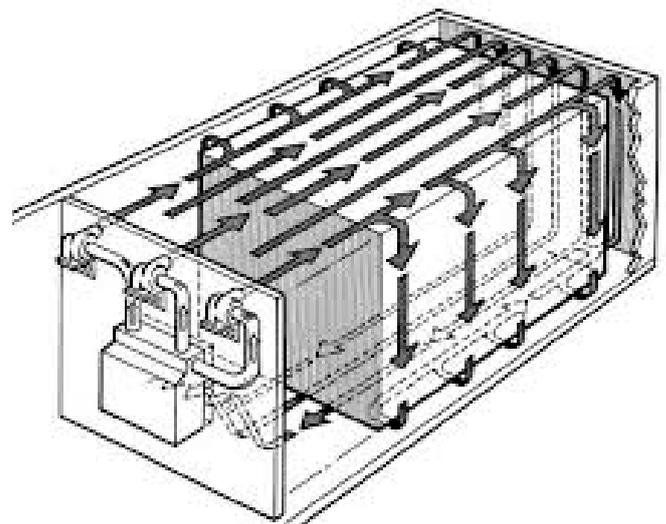


Dato che la facility era stata progettata per misurare le performance e l'efficienza energetica delle chiusure trasparenti, le pareti della struttura sono altamente isolate. E' da specificarsi che la superficie trasparente massima installabile era pari a 2,0x2,5m per le finestre di parete, mentre la dimensione massima dei lucernari era 1,0x1,0m.



## CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE

Dal punto di vista impiantistico le informazioni sono scarse, ma si può supporre dalle immagini interne che la facility fosse dotata di sistemi per il riscaldamento ed il raffrescamento dell'ambiente interno.



## CARATTERISTICHE SENSORI

Le facilities erano dotate di una moltitudine di sensori capaci di tracciare le performance attuali ed i possibili miglioramenti delle chiusure trasparenti.

### *INTERNA*

Erano posizionati dei termoflussimetri che calcolavano, con frequenze di 10-20 minuti, il flusso di calore passante attraverso la finestra. Inoltre, venivano raccolti dati per monitorare il consumo energetico necessario a tenere la camera ad una temperatura costante e per misurare la capacità di accumulo termico della struttura (dato fondamentale per svolgere analisi e bilanci in regime dinamico)

### *ESTERNA*

Le condizioni esterne monitorate erano temperatura, intensità solare, velocità del vento e temperatura effettiva della volta celeste.



## BIBLIOGRAFIA

\_CURCIJA CHARLIE, "Mobile Window Thermal Test (MoWiTT) Facility", Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory;

\_JANSSENS ARNOLD, "Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements", International Energy Agency, EBC Annex 58;

\_KLEMS J.H., "Measurement of Fenestration Net Energy Performance: Considerations Leading to Development of the MOBILE Window Thermal Test (MoWiTT) Facility", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 110, August 1988;

\_ROBINSON PAUL AND LITTLER JOHN, "Advanced Glazing: Outdoor Tegt Room Measurements, Performance Prediction and Building Thermal Simulation", Building and Environment, Vol. 28, No. 2, Great Britain 1993, pp. 145-152;

\_YAZDANIAN M. AND KLEMS J.H., "Measurement of the exterior convective film coefficient for windows in low-rise buildings", ASHRAE Transactions 100, 1994;

# AFT

## Advanced Facade Testbeds



*Environmental Energy Technologies Division Lawrence  
Berkeley National Laboratory  
Berkeley CA (USA)*



### DESCRIZIONE

La facility è a servizio dell'University of California, Berkeley (USA). Situate poco al di fuori del campus universitario in un ambiente extraurbano, le test cells sono gestite dal team di ricerca LBNL, diretto da Stephen Selkowitz.

La facility è entrata in funzione nel 2003 per lo studio di sistemi di facciata rispetto ad aspetti termici, luminosi e del controllo della performance.



### APPLICAZIONI

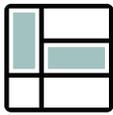
Il laboratorio è utilizzato principalmente per sperimentazioni riguardo:

- Vetri elettrocromici;
- Monitoraggio di sistemi di schermatura interna ed esterna;
- Utilizzo di dispositivi per il reindirizzamento della luce solare;
- Facciate con fotovoltaico integrato;



### CONTATTI

STEPHEN SELKOWITZ  
Mailstop 90-3111 LBNL Berkeley,  
CA 94720  
+1 510 486 5064  
seselkowitz@lbl.gov



## CARATTERISTICHE DI LAYOUT

La facility consiste in 3 identiche side-by-side test rooms costruite con materiali simili e arredate per simulare un ambiente adibito ad ufficio.

Ogni test room si sviluppa su una superficie di circa 14 m<sup>2</sup> (3,05x4,57m) per un'altezza di 3,35m.

La struttura portante è costituita da un'intelaiatura metallica con tamponamenti sostituibili a seconda delle esigenze del test da effettuare.



## CARATTERISTICHE INVOLUCRO



L'involucro è costituito da pareti opache altamente isolate in modo da effettuare test comparativi sui componenti trasparenti intercambiabili posizionati nella facciata sud (dimensioni massime 3,05x3,35m).

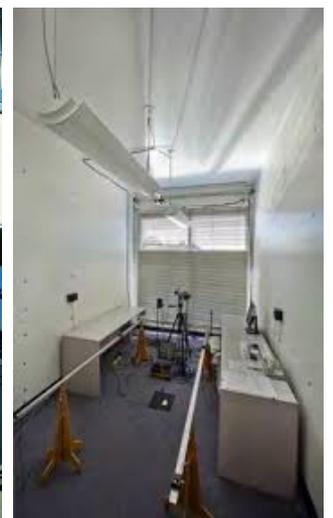
Tutte le test rooms possono essere equipaggiate con diverse schermature solari sia all'esterno che all'interno. Queste schermature, attraverso l'utilizzo di sensori specifici, possono essere completamente automatiche oppure manuali.



## CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE

Ogni singola testbed è equipaggiata con un sistema HVAC completamente indipendente che controlla il riscaldamento/raffrescamento ed il ricambio dell'aria primaria.

Ogni cella è inoltre fornita di sistemi di illuminazione artificiale e tutto l'equipaggiamento necessario a simulare un ambiente adibito ad ufficio.



## CARATTERISTICHE SENSORI

### *INTERNA*

Le varie test rooms possono essere equipaggiate con una grande varietà di sensori a seconda dei test da effettuare. Sono rilevate la temperatura dell'aria interna, la temperatura di facciata attraverso l'utilizzo di immagini HDR ed il flusso termico rispetto alla facciata sud. In aggiunta, possono essere installati sensori per il controllo del consumo energetico e per il monitoraggio dei livelli di illuminamento all'interno di ogni cella.

Per test specifici possono essere utilizzati sensori che rilevano sia dati oggettivi che soggettivi.

### *ESTERNA*

La sensoristica esterna comprende diversi device per la rilevazione di irraggiamento, velocità e direzione del vento, temperatura dell'aria esterna e monitoraggio della temperatura di facciata.



## BIBLIOGRAFIA

\_CURCIJA CHARLIE, "Mobile Window Thermal Test (MoWiTT) Facility", Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory;

\_JANSSENS ARNOLD, "Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements", International Energy Agency, EBC Annex 58;

\_KLEMS J.H., "Measurement of Fenestration Net Energy Performance: Considerations Leading to Development of the MOBILE Window Thermal Test (MoWiTT) Facility", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 110, August 1988;

\_ROBINSON PAUL AND LITTLER JOHN, "Advanced Glazing:Outdoor Tegt Room Measurements, Performance Prediction and Building Thermal Simulation", Building and Environment, Vol. 28, No. 2, Great Britain 1993, pp. 145-152;

\_YAZDANIAN M. AND KLEMS J.H., "Measurement of the exterior convective film coefficient for windows in low-rise buildings", ASHRAE Transactions 100, 1994;

# The Cube



**AALBORG UNIVERSITY**

*Aalborg University*

*Department of Civil Engineering*

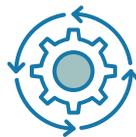
*Indoor Environmental Engineering Research Group*



## **DESCRIZIONE**

La facility è a servizio dell'University di Aalborg, Aalborg (DNK). Situata nell'area suburbana della città, in un ambiente extraurbano, la test cell è gestita dal Dipartimento di Ingegneria Civile, diretto da O. Kalyanova e P. Heiselberg.

La facility è entrata in funzione per lo studio di sistemi di facciata rispetto ad aspetti termici, luminosi e del controllo della performance.



## **APPLICAZIONI**

La facility negli ultimi anni è stata utilizzata per:

- Sviluppo di software per la modellazione di facciate a doppia pelle;
- Monitoraggio di sistemi di facciate a doppia pelle;
- Prototipazione e validazione di software di simulazione energetica.



## **CONTATTI**

OLENA KALYANOVA LARSEN  
ok@civil.aau.dk

PER HEISELBERG  
ph@civil.aau.dk

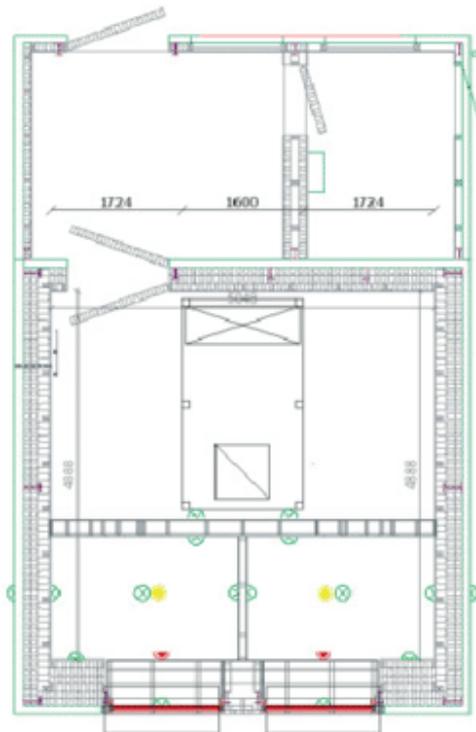


## CARATTERISTICHE DI LAYOUT

La facility si sviluppa intorno a quattro ambienti principali: la doppia pelle vetrata, la stanza dei test, la stanza della strumentazione e la stanza degli impianti.

L'intera struttura è realizzata tramite un'intelaiatura metallica dove la camera dei test si sviluppa su un'area di 36 mq (6,0x6,0m) per 6m di altezza, mentre le stanze della strumentazione e degli impianti occupano un'area di 18 mq (3,0x3,0m) per un'altezza di 3m.

Inoltre, davanti alla doppia pelle vetrata è stato posizionato un tappeto con valori noti di riflettanza così da avere un maggior controllo sulla radiazione solare, aspetto che gioca un ruolo di fondamentale importanza per gli esperimenti condotti sulla facciata.



## CARATTERISTICHE INVOLUCRO



L'involucro è costituito da pareti opache altamente isolate, si tratta di pareti da circa 42cm di spessore costruite con pacchetti comprensivi di 40 cm di isolante in lana di roccia ( $U: 0,039 \text{ W/m}^2$ ). Lo stesso isolante è utilizzato per la copertura, mentre a pavimento sono stati installati pannelli in polistirene espanso da 22cm di spessore ( $U: 0,045 \text{ W/m}^2$ ).

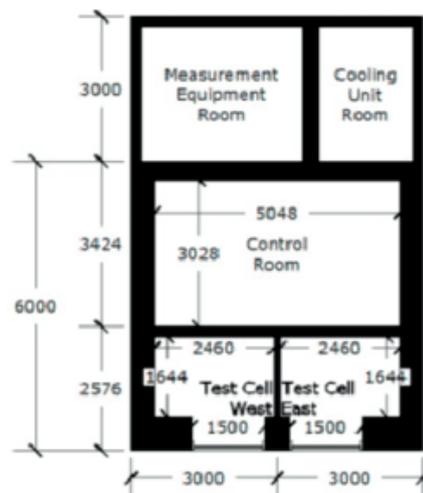
La facciata principale è costituita da una doppia pelle (DSF) suddivisa in 3 strisce verticali e 4 orizzontali. Delle 4 orizzontali la più bassa e la più alta sono apribili in modo da simulare una ventilazione dell'intercapedine. Della vetrata possono essere cambiati sia i vetri che i telai ed è possibile installare schermature esterne se necessario.



## CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE

La testbed è equipaggiata con un sistema di riscaldamento/raffrescamento (con potenze rispettivamente di 2 kW e 10 kW) che mantiene costante la temperatura nella stanza dei test.

Inoltre, è stata installato un sistema di ventilazione che porta un movimento dell'aria interna pari a 0,2 m/s. Tale sistema previene anche la formazione di gradienti di temperatura attraverso il mix dell'aria interna con l'aria di ricircolo.



## CARATTERISTICHE SENSORI

### *INTERNA*

Nella stanza dei test viene misurata la temperatura a diverse altezze, la temperatura delle superfici in diversi punti (sia delle pareti che della faccia interna della DSF), la radiazione solare a 58cm dalla DSF e all'interno dell'intercapedine della doppia pelle. Inoltre, possono essere utilizzati diversi metodi per rilevare la velocità del flusso d'aria all'interno della cavità della DSF, come il profilo delle velocità dell'aria, l'utilizzo di un gas tracciante e il metodo delle differenze di pressione.

### *ESTERNA*

La sensoristica esterna comprende diversi dati rilevati da una stazione meteorologica poco distante dell'Istituto Meteorologico Danese, la temperatura e l'umidità dell'aria nelle immediate vicinanze della facility. Inoltre, sono presenti sistemi per il monitoraggio della radiazione solare incidente sulla DSF e una serie di anemometri posti a diverse altezze per tracciare il profilo della velocità del vento.



## BIBLIOGRAFIA

\_O. KALYANOVA, P. HEISELBERG, " Experimental Set-up and Full-scale measurements in the 'Cube'", Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Technical reports, No. 34, 2008;

\_O. KALYANOVA, "The Cube", VENTInet, (19), 4-5, 2007;

# MATELab

*Mobile Adaptive Technologies Experimental Lab*



UNIVERSITY OF  
CAMBRIDGE

*University of Cambridge*

*Department of Engineering*

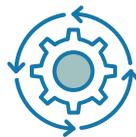
*Glass and Facade Technology Research Group*



## DESCRIZIONE

La facility è a servizio dell'University di Cambridge, Cambridge (GBR). Circondata dal verde e situata nell'area suburbana della città, la test cell è gestita dal Dipartimento di Ingegneria.

La struttura è stata progettata in collaborazione fra l'Università di Cambridge e l'azienda partner Ove Arup. Mentre è stata costruita in Olanda, dall'azienda Permasteelisa Group.



## APPLICAZIONI

La facility è entrata in funzione per studiare ed enfatizzare gli effetti di diverse tecnologie di facciate rispetto a vari aspetti relativi agli utenti, tra cui:

- \_il comfort termico e visivo;
- \_la soddisfazione verso gli ambienti;
- \_le implicazioni sulla produttività.



## CONTATTI

GLASS & FACADE TECHNOLOGY  
RESEARCH GROUP

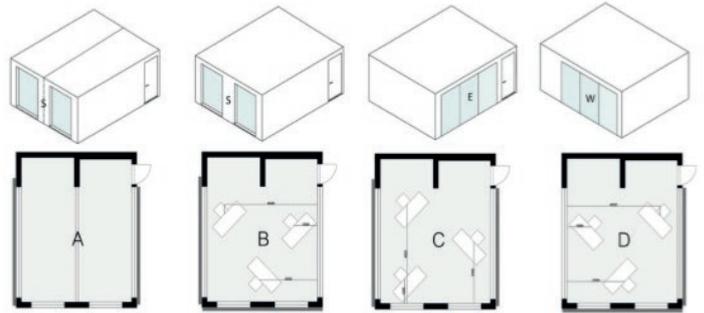
Department of Engineering  
University of Cambridge  
Trumpington Street  
Cambridge, CB2 1PZ (UK)

+44 1223 332659  
gtf-info@eng.cam.ac.uk

## CARATTERISTICHE DI LAYOUT

La facility si sviluppa su una superficie complessiva di circa 30 mq capace di ospitare fino ad un massimo di tre utenti.

L'intera struttura è stata realizzata partendo da due container in modo tale da facilitarne il trasporto e velocizzarne la costruzione. La facility non è ruotabile ma possono essere utilizzati pannelli opachi per coprire le aperture ed effettuare diversi test nelle varie esposizioni. In aggiunta, all'interno della test room può essere installata una parete in modo tale da ottenere due ambienti identici.



## CARATTERISTICHE INVOLUCRO

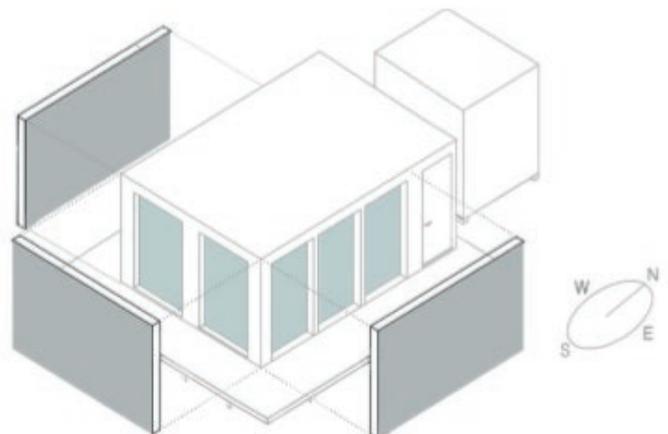
L'involucro è costituito da pareti opache altamente isolate, realizzate in pannelli prefabbricati in poliuretano, sigillati in loco per aumentare l'efficienza termica complessiva e la tenuta all'aria.

La struttura è stata progettata per ospitare elementi vetrati su tre diversi orientamenti, con una dimensione di circa 2,30x1,10m. In particolare, nelle facciate est ed ovest sono presenti tre aperture mentre nella facciata sud soltanto due.

## CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE

La testbed è stata equipaggiata con un sistema di riscaldamento/raffrescamento meccanico anche se può essere facilmente trasformato in un ufficio con ventilazione naturale.

Per la progettazione della struttura si è inoltre tenuta in grande considerazione il comfort dell'utente attraverso vari aspetti, tra cui l'impianto di illuminazione LED, la velocità di mandata dell'aria e vicinanza con le superfici vetrate.



## CARATTERISTICHE SENSORI

La dotazione di sensori della struttura è stata studiata per permettere di eseguire osservazioni riguardo le implicazioni delle diverse tecnologie di facciate rispetto al comfort termico, visivo, acustico, di qualità dell'aria e di interazione con l'utente.

### *INTERNA*

Nella stanza dei test sono misurate la temperatura dell'aria, le temperature delle diverse superfici, la velocità dell'aria e l'umidità. In aggiunta, sono stati inseriti diversi sensori per controllare i livelli di illuminazione, la libertà visiva, i livelli di rumore, i livelli di CO<sub>2</sub> e di monossido di carbonio. Tramite una serie di telecamere viene anche controllato il grado di interazione fra l'utente ed i vari sistemi di facciata.

### *ESTERNA*

La sensoristica esterna comprende una stazione meteorologica posta al di sopra della facility stessa, in modo da rilevare temperatura, velocità dell'aria, umidità e radiazione solare diretta. Inoltre, sono rilevate tutte le temperature superficiali esterne delle pareti ed anche il livello di abbagliamento al di fuori delle chiusure vetrate.



## BIBLIOGRAFIA

\_LUNA-NAVARRO A., MEIZOSO M., DE BLEECKER H., VERHOEVEN Y., DONATO M. E OVEREND M., “Façade impulse: experimental methods for stretching the envelope beyond human comfort”, VIII International Congress on Architectural Envelopes , Donostia-San Sebastian, Spain, June 2018;

# Energy Flex House



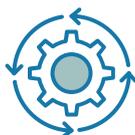
**DANISH  
TECHNOLOGICAL  
INSTITUTE**

*Danish Technological Institute  
Energy and Climate Department  
THE Energy Flex House TEAM*



## DESCRIZIONE

La facility è a servizio del Danish Technological Institute, presso Taastrup (DEN). La test cell è strutturata su due edifici identici (uno che funziona come laboratorio sperimentale e l'altro che è occupato da una famiglia di quattro persone che cambia ogni sei mesi) situati nell'area suburbana della città.



## APPLICAZIONI

L'Energy Flex House è entrata in funzione nell'autunno del 2009 per l'esecuzione di test a breve termine riguardo l'interazione fra impianti, edifici e condizioni climatiche esterne. In particolare, i test si sono concentrati su:

- \_componenti d'involucro;
- \_sistemi di condizionamento;
- \_sistemi di ventilazione;
- \_utilizzo di energie rinnovabili.



## CONTATTI

MIKAEL GRIMMING  
+45 72202415  
mg@teknologisk.dk

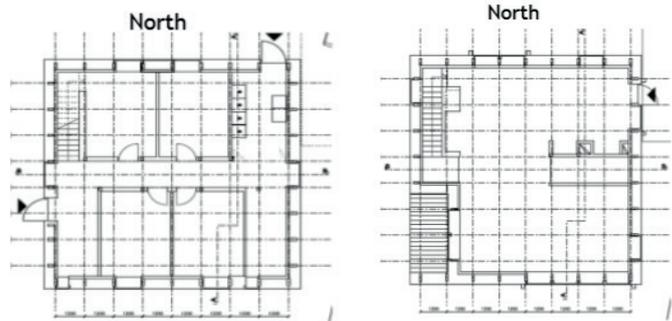
OLE RAVN  
+45 72202521  
or@teknologisk.dk

DK-2730  
Taastrup, Denmark

## CARATTERISTICHE DI LAYOUT

Ogni facility si sviluppa su un totale di 216 mq, disposti su due piani fuori terra. La struttura portante è realizzata in legno e il design dell'abitazione riprende le case tipiche danesi. Al piano terra si possono trovare quattro stanze e due bagni con una disposizione che permette lo svolgimento di test side-by-side. Mentre, al primo piano, si trova un ampio open space comprensivo di zona cucina e soggiorno.

Come precedentemente accennato, una delle due facility ospita una famiglia di quattro persone che cambia ogni sei mesi, in modo da studiare diversi comportamenti ed interazioni con i componenti. Per questo motivo la struttura viene anche chiamata EFH - Living Lab.



## CARATTERISTICHE INVOLUCRO



L'involucro è costituito da pareti perimetrali e copertura altamente isolate attraverso l'utilizzo di pannelli aventi trasmittanza rispettivamente di  $U: 0,08 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $U: 0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Inoltre, anche le chiusure trasparenti sono costituite da elementi vetrati LowE con  $U: 0,73-0,90 \text{ W/m}^2\text{K}$ , mentre i lucernari hanno valori leggermente più alti ( $U: 1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Tali aperture possono essere opportunamente schermate sia internamente che esternamente.

Tali soluzioni tecnologiche permettono alla struttura di essere altamente performante dal punto di vista energetico (consumo al di sotto di  $30 \text{ kWh/m}^2$ ), tanto da essere al di sotto della soglia richiesta per la classe più performante del Danish Building Code del 2015.

## CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE

Entrambe le testbed oltre ad essere dotate di sistemi fotovoltaici e solari sulla copertura, possono contare su numerosi sistemi per il mantenimento del comfort indoor. Pompe di calore e diverse caldaie (funzionanti con vari combustibili) garantiscono il funzionamento di sistemi di riscaldamento a pavimento o tramite radiatori tradizionali. La ventilazione può essere effettuata meccanicamente o naturalmente, ed inoltre vi è la possibilità di installare un sistema di condizionamento se necessario per i test.



## CARATTERISTICHE SENSORI

Le strutture sono dotate di una moltitudine di sensori che permettono sia di effettuare test nella facility sperimentale sia di mantenere il livello di comfort richiesto da una famiglia.

### *INTERNA*

All'interno sono stati installati sensori per rilevare la temperatura degli ambienti e delle superfici, l'umidità, la concentrazione di CO<sub>2</sub>, i flussi di calore che attraversano i componenti perimetrali, l'illuminamento, il consumo elettrico ed anche dei rilevatori per rilevare l'apertura di finestre, porte o lucernari.

### *ESTERNA*

La sensoristica esterna comprende una stazione meteorologica posta a 10m dalle facility, in modo da rilevare temperatura e velocità dell'aria, umidità, radiazione solare diretta e pressione atmosferica. Inoltre, possono essere rilevate la direzione del vento e la presenza o meno di pioggia.



## BIBLIOGRAFIA

ARNOLD JANSSENS, "Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements", International Energy Agency, EBC Annex 58;

SOREN STJERNQVIST, "*Energy Flex House - developing energy efficient technologies meeting the global challenges*", Danish Technological Institute, Taastrup, Denmark.

# CEA - INES

*Experimental Houses facility*



CEA - INES  
*National Institute for Solar Energy*

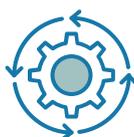
LEB  
*Buildings Energy laboratory*



## DESCRIZIONE

La piattaforma INCAS comprende diverse testbeds tra cui una full-scale facility (FACT), 4 PASSYS test cells e 4 experimental houses. Il complesso si trova nei pressi di Chambéry e, ad oggi, conta circa 300 persone che vi lavorano come ricercatori su vari settori riguardanti diverse applicazioni dell'energia solare.

L'intero complesso è stato progettato e realizzato Buildings Energy Laboratory (LEB).



## APPLICAZIONI

Le quattro Experimental Houses sono state costruite a partire dal 2008. Le strutture sono state progettate per:

\_testare diversi materiali da costruzione;

\_effettuare test riguardo l'efficienza energetica dell'edificio;

\_sviluppo di tecnologie per l'utilizzo dell'energia solare.



## CONTATTI

VIRGINIE RENZI  
INES RDI – CEA

Savoie technolac – BP332  
50 av. du Lac Léman 73377 Le  
Bourget du Lac Cedex (FRA)

+33 479444609  
virginie.renzi@cea.fr

## CARATTERISTICHE DI LAYOUT

Ogni facility si sviluppa su 110 mq con le medesime caratteristiche architettoniche e tecnologiche. Le abitazioni si sviluppano su due piani fuori terra, con un piano interrato ed uno sottotetto.

Le strutture hanno lo stesso layout, la stessa architettura, lo stesso livello di isolamento e sono tutte soggette agli stessi input climatici.

## CARATTERISTICHE INVOLUCRO



L'involucro delle diverse Experimental Houses è stato realizzato con diversi materiali, ovvero blocchi in calcestruzzo, cemento gettato in opera e struttura in legno. Le pareti hanno uno spessore di isolante che può variare dai 20 ai 40 cm in modo tale da soddisfare gli standard nazionali di "Passivhaus" che richiedono un consumo inferiore ai 15 kWh/mq per il riscaldamento. In aggiunta, durante la costruzione è stata prestata particolare attenzione alla realizzazione della struttura, in modo tale da assicurare il giusto livello di tenuta all'aria ed anche la corretta risoluzione di ponti termici.

## CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE

Dal punto di vista impiantistico le strutture sono dotate di sistemi sofisticati per il condizionamento invernale ed estivo degli ambienti, per la ventilazione e per il controllo della radiazione solare.

In aggiunta, in copertura sono stati installati pannelli fotovoltaici e solari per la produzione di energia elettrica ed acqua calda.

Il sistema è inoltre in grado di simulare la presenza di occupanti per testarne il comportamento, l'interazione con il sistema ed i valori IEQ.

## CARATTERISTICHE SENSORI

Le strutture hanno in dotazione circa 100 sensori ognuna con un sistema di acquisizione minuto per minuto 24h/24h - 7gg/7gg.

### *INTERNA*

I sensori interni rilevano continuamente la temperatura degli ambienti e delle superfici, l'umidità, la concentrazione di inquinanti nell'aria (CO<sub>2</sub>, CO, PM10 - PM2,5, radon, aldeidi e composti organici volanti), l'illuminamento ed il comfort acustico.

### *ESTERNA*

Esternamente è presente una stazione meteorologica posta a 5m dalle facility, in modo da rilevare temperatura e velocità dell'aria, umidità e radiazione solare diretta. Inoltre, vengono rilevate le temperature superficiali esterne di tutte le superfici perimetrali.



## BIBLIOGRAFIA

ARNOLD JANSSENS, "Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements", International Energy Agency, EBC Annex 58;

# CEA - INES

## FACade Tools facility



CEA - INES  
National Institute for Solar Energy

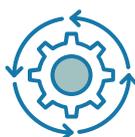
LEB  
Buildings Energy laboratory



### DESCRIZIONE

La piattaforma INCAS comprende diverse testbeds tra cui una full-scale facility (FACT), 4 PASSYS test cells e 4 experimental houses. Il complesso si trova nei pressi di Chambéry e, ad oggi, conta circa 300 persone che vi lavorano come ricercatori su vari settori riguardanti diverse applicazioni dell'energia solare.

l'intero complesso è stato progettato e realizzato Buildings Energy Laboratory (LEB).



### APPLICAZIONI

La facility è entrata in funzione nel Luglio 2016 per l'esecuzione di test su:

- \_elementi opachi e trasparenti;
- \_l'impatto dei componenti sui consumi energetici;
- \_la qualità degli ambienti interni.



### CONTATTI

VIRGINIE RENZI  
INES RDI – CEA

Savoie technolac – BP332  
50 av. du Lac Léman 73377 Le  
Bourget du Lac Cedex (FRA)

+33 479444609  
virginie.renzi@cea.fr

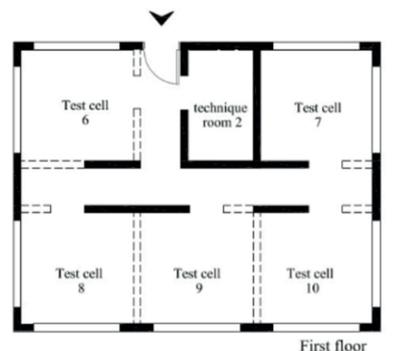
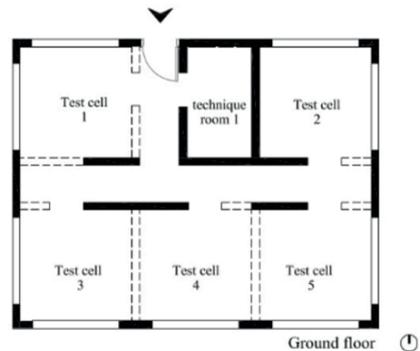


## CARATTERISTICHE DI LAYOUT

La facility si sviluppa su due piani di 76 mq circa con le medesime caratteristiche architettoniche e tecnologiche. Il sistema portante è formato da un'intelaiatura metallica su platea in calcestruzzo.

Ogni piano è strutturato su un corridoio centrale che porta alle cinque testbed di 7,70 mq ed alla cella per gli impianti tecnologici. In tutte le celle possono essere effettuati test su doppia esposizione, tranne nella cella 4 e 9 che presentano solo una facciata esposta a sud.

Questa divisione interna può essere modificata rapidamente in modo tale da effettuare test su layout differenti e spazi a doppia altezza.



## CARATTERISTICHE INVOLUCRO



L'involucro esterno del FACT è costituito da tre diverse tipologie di pannelli in poliuretano, che sono divisi in fissi, semi-fissi e mobili. La copertura ha un valore di resistenza termica pari a  $10.4 \text{ m}^2\text{K/W}$  mentre le pareti raggiungono un valore di  $9 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Inoltre, in tutte le esposizioni possono essere installate superfici vetrate per eseguire test specifici sul componente.

Per permettere la sostituzione dei componenti esterni sono stati progettati dei nodi di ancoraggio appositi che rendono l'operazione veloce e sicura.



## CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE

Dal punto di vista impiantistico la struttura è dotata di un sistema di condizionamento a pompa calore reversibile in grado di mantenere una temperatura controllata ( $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) all'interno delle varie testcell.

Il ricambio d'aria è assicurato da un sistema di ventilazione meccanico che provvede ad un tasso di ricambio variabile da 0.5 a 3 vol/h.

Inoltre, la facility ha la predisposizione per l'installazione di un sistema per il controllo dell'umidità.



## CARATTERISTICHE SENSORI

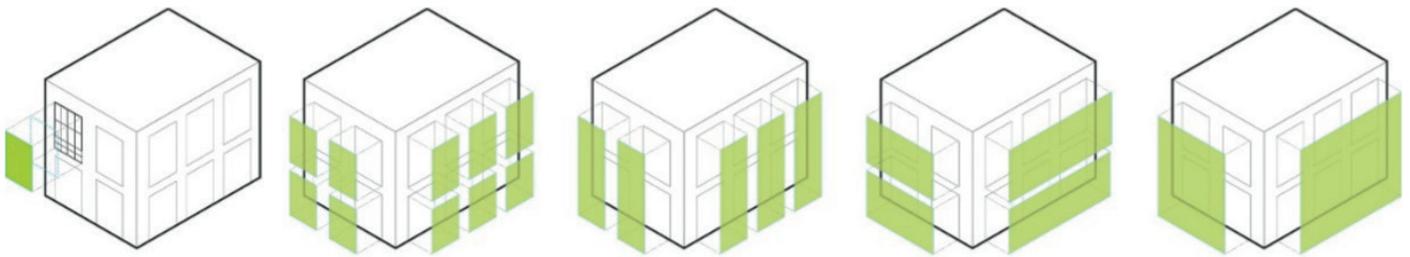
Le strutture hanno in dotazione circa 100 sensori ognuna con un sistema di acquisizione minuto per minuto 24h/24h - 7gg/7gg.

### *INTERNA*

I sensori interni rilevano continuamente la temperatura degli ambienti e delle superfici, l'umidità, la concentrazione di inquinanti nell'aria (CO<sub>2</sub>, CO, PM10 - PM2,5, radon, aldeidi e composti organici volanti), l'illuminamento ed il comfort acustico.

### *ESTERNA*

Esternamento è presente una stazione meteorologica posta a 5m dalle facility, in modo da rilevare temperatura e velocità dell'aria, umidità e radiazione solare diretta. Inoltre, vengono rilevate le temperature superficiali esterne di tutte le superfici perimetrali.



## BIBLIOGRAFIA

BIANCO L., SCHNEUWLY P., WURTS E. AND BRUN A., "Design of a New Full-scale Facility for Building Envelope Test: FACT (FACade Tool)", Energy Procedia, Elsevier, 2017, 111, pp.256 - 266;

# CEA - INES

## PASSYS Test Cells



CEA - INES  
National Institute for Solar Energy

LEB  
Buildings Energy laboratory



### DESCRIZIONE

La piattaforma INCAS comprende diverse testbeds tra cui una full-scale facility (FACT), 4 PASSYS test cells e 4 experimental houses. Il complesso si trova nei pressi di Chambéry e, ad oggi, conta circa 300 persone che vi lavorano come ricercatori su vari settori riguardanti diverse applicazioni dell'energia solare.

l'intero complesso è stato progettato e realizzato Buildings Energy Laboratory (LEB).



### APPLICAZIONI

Le facility sono entrate in funzione nel 2008 per l'esecuzione di test su:

- \_elementi opachi e trasparenti;
- \_l'impatto dei componenti sui consumi energetici;
- \_la qualità degli ambienti interni;
- \_integrazione di sistemi di riscaldamento/raffrescamento.



### CONTATTI

VIRGINIE RENZI  
INES RDI – CEA

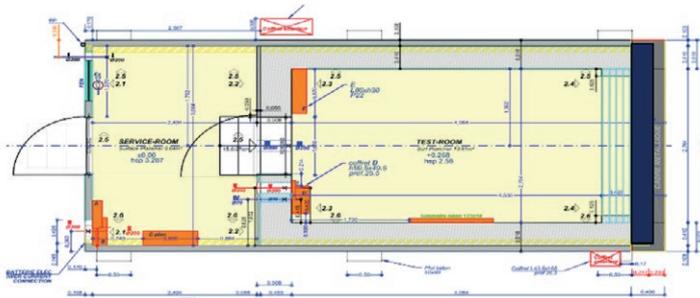
Savoie technolac – BP332  
50 av. du Lac Léman 73377 Le  
Bourget du Lac Cedex (FRA)

+33 479444609  
virginie.renzi@cea.fr

## CARATTERISTICHE DI LAYOUT

Le 4 facility si sviluppano su 18 mq ciascuna (3,0x6,0m circa per un'altezza di 3,30m) ed hanno le medesime caratteristiche architettoniche e tecnologiche, con la sola differenza che due di esse sono fisse, orientate verso sud, mentre le altre due sono installate su piattaforme ruotabili.

La facility si organizza su due ambienti comunicanti, la stanza degli impianti e la stanza dei test, dando la possibilità di effettuare test non solo sui componenti d'involucro ma anche su componenti/sistemi interni.



## CARATTERISTICHE INVOLUCRO



Le pareti esterne non sperimentali delle facility sono altamente isolate, tanto da poter essere considerate adiabatiche, in modo tale da poter eseguire test specifici sui componenti installati nella facciata sperimentale. Proprio quest'ultimi possono essere sostituiti a seconda dei test da effettuare e delle tecnologie da analizzare. Inoltre, le facility sono dotate di ancoraggi per l'installazione di sistemi di schermatura solare interni o esterni (sia automatici che manuali).

## CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE

Le facility fisse sono dotate di sistemi moderni HVAC in grado di controllare la temperatura interna (dai 15 ai 35 °C), l'umidità ed il tasso di ricambio d'aria. Inoltre, all'interno della cella possono essere installati filtri specifici per poter eseguire test sulla qualità dell'aria. Mentre le facility ruotabili sono dotate di piccoli sistemi di riscaldamento/raffrescamento in grado di controllare la temperatura, con una precisione di 5 °C.



## **CARATTERISTICHE SENSORI**

Tutte le facility sono equipaggiate con un ampio range di sensori in grado di misurare diversi fattori a seconda dei test da effettuare.

### *INTERNA*

Internamente sono dotate di sensori per la misurazione della temperatura dell'aria e delle superfici interne, dell'umidità e del consumo energetico sia nel periodo estivo che invernale.

### *ESTERNA*

Esternamente è presente una stazione meteorologica posta a 5m dalle facility, in modo da rilevare temperatura e velocità dell'aria, umidità e radiazione solare diretta. Inoltre, vengono rilevate le temperature superficiali esterne di tutte le superfici perimetrali.



## **BIBLIOGRAFIA**

\_TIMEA BEJAT, "Large scale test installation of products at CEA\_INES", Wall-ACE Workshop, Glasgow, 16 Aprile 2019;

\_ARNOLD JANSSENS, "Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements", International Energy Agency, EBC Annex 58;

\_ROUCHIER S., WOLOSZYN M., KEDOWIDE Y. AND BEJAT T., "Identification of the hygrothermal properties of a building envelope material by the Covariance Matrix Adaptation evolution strategy", Journal of Building Performance Simulation, 2013;

# VERU

*Modular Test Facility for Energy and Indoor Environments*



*Fraunhofer - Institut für Bauphysik  
Standort Holzkirchen*

*Abteilung Energiesysteme*



## DESCRIZIONE

La facility VERU è stata costruita in un ambiente extraurbano vicino alla città di Holzkirchen, in Germania.

Attualmente è a servizio dell'istituto Fraunhofer IBP che la utilizza per eseguire diverse tipologie di test per l'efficiamento energetico dei sistemi di riscaldamento e raffreddamento, lo sviluppo di elementi architettonici e software di simulazione del comportamento delle strutture.



## APPLICAZIONI

La facility è stata costruita nel 2002 ed è entrata in funzione nel 2004. Fino al 2010 è stata usata principalmente per:

\_sviluppo metodi di calcolo per facciate a doppia pelle e sistemi di schermatura;

\_test sulla performance dell'uomo all'interno degli edifici;

\_sviluppo di tecnologie per la produzione di energia solare attraverso elementi fotovoltaici vetriati.



## CONTATTI

HERBERT SINNESBICHLER

Fraunhoferstr. 10 D-83626 Valley

tel: +49 8024/643-241

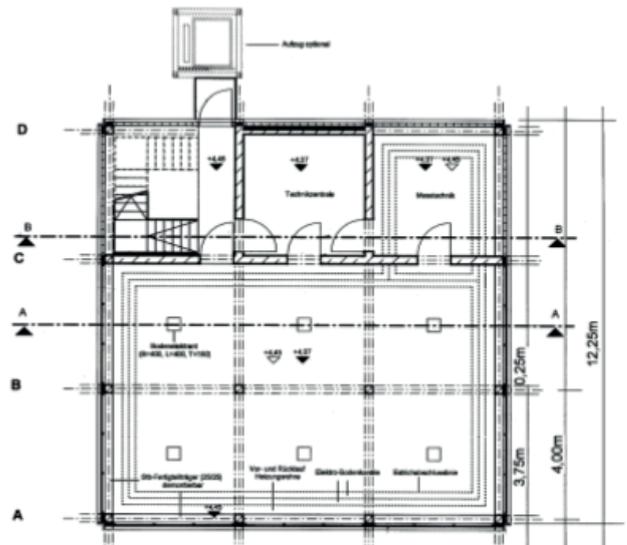
e-mail: [herbert.sinnesbichler@ibp.fraunhofer.de](mailto:herbert.sinnesbichler@ibp.fraunhofer.de)

## CARATTERISTICHE DI LAYOUT

La facility è a pianta quadrata di 144mq (12x12m) su tre piani fuori terra, con struttura portante in telai di calcestruzzo armato.

Ogni piano può ospitare fino ad un massimo di 6 test cell quadrate (4x4m circa), con le pareti interne ed i solai interpiano che possono essere rimossi per effettuare test su stanze più grandi o volumi a doppia altezza. Inoltre, parte della copertura può essere rimossa per ospitare lucernari.

Le tre celle quadrate poste a nord ospitano rispettivamente le scale, gli impianti tecnologici e la stanza delle misurazioni.



## CARATTERISTICHE INVOLUCRO

Le pareti esterne della facility possono essere facilmente sostituite in modo tale da effettuare test su componenti differenti, con la grande possibilità di installare pannelli opachi o aperture trasparenti in qualsiasi direzione.

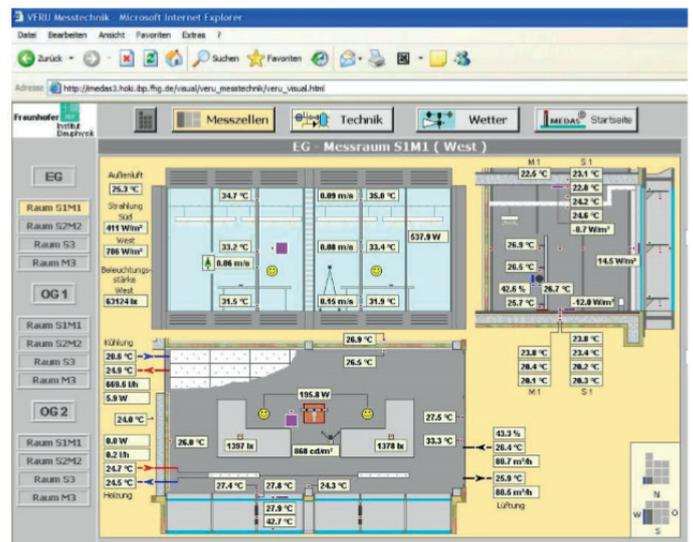
Inoltre, la struttura è stata predisposta con ancoraggi per l'installazione di dispositivi di ombreggiamento esterni, sia automatici che manuali.

## CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE

Dal punto di vista impiantistico la facility è dotata di un sistema di riscaldamento e raffreddamento ad acqua, che produce anche acqua calda sanitaria.

La ventilazione degli spazi è assicurata grazie all'utilizzo di un sistema automatico che ne gestisce anche il preriscaldamento/preraffreddamento e la deumidificazione.

Tutti i dati raccolti possono essere consultati in real-time tramite un software dedicato (IMEDAS™).



## **CARATTERISTICHE SENSORI**

### *INTERNA*

I sensori interni rilevano continuamente la temperatura degli ambienti (a diverse altezze) e delle superfici, l'umidità ed i flussi di calore nella singola cella. Inoltre, vengono rilevati i flussi d'aria ed i flussi di calore sulla facciata.

### *ESTERNA*

Esternamente è presente una stazione meteorologica, in modo da rilevare temperatura e velocità dell'aria, umidità e radiazione solare diretta. Inoltre, vengono rilevate le temperature superficiali esterne delle varie esposizioni ed i livelli di luminosità a parete ed in copertura.



## **BIBLIOGRAFIA**

\_ARNOLD JANSSENS, "Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements", International Energy Agency, EBC Annex 58;

\_“VERU Modular test facility for energy and indoor environments”, Fraunhofer Institute for Building Physics IBP;

\_“VERU - Modular Test Facility Holzkirchen”, Fraunhofer Institute for Building Physics IBP;

# KUBIK

*Intelligent Energy Building*



Inspiring  
Business

Tecnalia  
Research&Innovation



## DESCRIZIONE

La facility è stata progettata e costruita da Tecnalia in modo tale da fornire alle aziende del settore una testbed dove effettuare diverse misurazioni.

Progettata sulla base della facility VERU (vedi scheda specifica), KUBIK è situata vicino Bilbao, in Spagna, in un ambiente extraurbano e permette lo sviluppo di componenti architettonici innovativi, dal concept alla prototipazione.



## APPLICAZIONI

La struttura è stata progettata per effettuare test riguardo l'efficiamento energetico degli edifici attraverso l'utilizzo combinato di soluzioni costruttive innovative, gestione intelligente dei sistemi tecnologici (impianto di condizionamento, illuminazione, etc.) e utilizzo di energie rinnovabili e non.



## CONTATTI

ENRIQUE VADILLO

Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia C/ Geldo, Edificio 700 E-48160 Derio - Bizkaia (España)

[enrique.vadillo@tecnalia.com](mailto:enrique.vadillo@tecnalia.com)

## CARATTERISTICHE DI LAYOUT

La facility è a pianta quadrata di 100mq (10x10m circa), con una struttura portante in telai di acciaio, appoggiati su una soletta in calcestruzzo armato, si sviluppa su tre piani fuori terra ed un piano interrato.

Ogni piano ospita sette celle di misurazione completamente indipendenti, una cella di controllo delle misurazioni ed una cella per i sistemi tecnologici. Inoltre, le pareti interne e i solai interpiano possono essere rimossi per effettuare test specifici su stanze più grandi o volumi a doppia altezza.



## CARATTERISTICHE INVOLUCRO

Le pareti esterne della facility possono essere facilmente sostituite in modo tale da effettuare test su componenti differenti, con la grande possibilità di installare pannelli opachi o aperture trasparenti in qualsiasi direzione.

Inoltre, la struttura è stata predisposta con ancoraggi per l'installazione di dispositivi di ombreggiamento esterni, sia automatici che manuali.



## CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE

Dal punto di vista impiantistico, la struttura è dotata di un sistema HVAC idronico capace di tenere entro parametri prestabiliti tutte le diverse test cell, controllandone temperatura ed umidità.

Il sistema è inoltre in grado di impostare sei diverse zone climatiche per ogni piano ed anche di contabilizzare il consumo energetico della struttura.



## **CARATTERISTICHE SENSORI**

Il sistema di monitoraggio della struttura è equipaggiato con più di 400 sensori.

### *INTERNA*

I sensori interni rilevano continuamente la temperatura degli ambienti e delle superfici, l'umidità, i flussi di calore attraverso gli elementi analizzati e la velocità dell'aria. Inoltre, sono rilevati la radiazione solare, l'illuminamento ed i livelli di anidride carbonica e di rumore.

### *ESTERNA*

Esternamente è presente una stazione meteorologica, in modo da rilevare la temperatura dell'aria, la velocità e la direzione del vento, l'umidità e la radiazione solare diretta. Inoltre, viene rilevata la pressione atmosferica e la presenza di precipitazioni.



## **BIBLIOGRAFIA**

\_CHICA J.A., APRAIZ I., ELGUEZABAL P., RIPS M.O., SÁNCHEZ V. AND TELLADO B., "KUBIK: Open building approach for the construction of an unique experimental facility aimed to improved energy efficiency in buildings", Labein-Tecnalia, Spain, 2010;

\_ELGUEZABAL P., GARAY R AND MARTIN K., "Esperimentation under real performing conditions of a highly integrable unglazed solar collector into a building facade", Elsevier - Science Direct, Lousanne, 6-8 Settembre 2017;

\_GARAY R., CHICA J.A., APRAIZ I., CAMPOS J.M., TELLADO B., URIARTE A. AND SANCHEZ V., "Energy efficiency achievements in 5 years through experimental research in KUBIK", Elsevier - Science Direct, Spain, 2015;

\_GARAY R. AND LARRAZ J.A., "Performance assessment of façade integrated glazed air solar thermal collectors", Elsevier - Science Direct, Spain, 2017;

\_"KUBIK: Intelligent Energy Building", Tecnalia;

# SENSELab

*A playground for the sense*



**TU Delft**

Delft  
University of  
Technology

*Delft University of Technology*

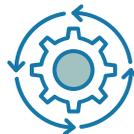
*Faculty of Architecture and the Built Environment*



## DESCRIZIONE

La struttura è a servizio del dipartimento di Architettura della Delft University of Technology. E' costituita da un Experience Room e da quattro test cell che si trovano all'interno di un edificio nel campus universitario a Delft, in Olanda.

Il SenseLab è stato inaugurato nel Dicembre del 2016 ed è tutt'ora utilizzato per effettuare diversi test sul comfort all'interno degli edifici.



## APPLICAZIONI

La facility è stata progettata per lo studio dei quattro parametri di IEQ, ovvero:

- \_qualità dell'aria;
- \_comfort termico;
- \_comfort luminoso;
- \_comfort acustico.

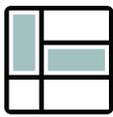


## CONTATTI

PHILOMENA M. BLUYSSSEN

Prof.dr. Chair Indoor Environment,  
Delft University of Technology,  
The Netherlands

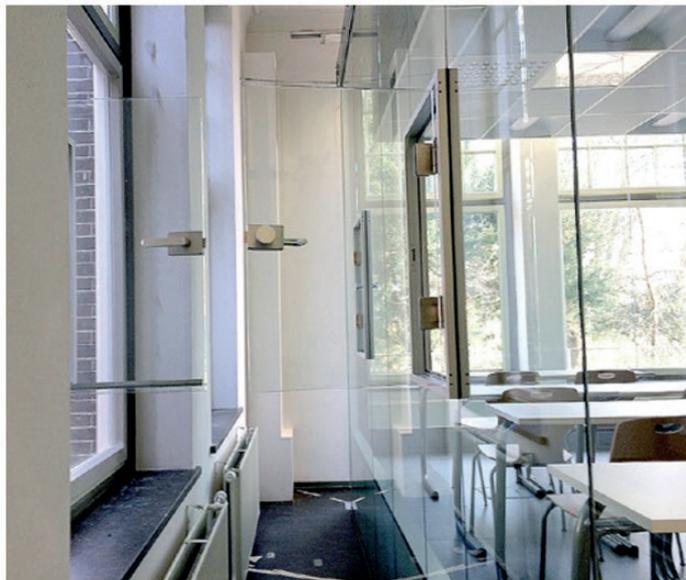
[p.m.bluyssen@tudelft.nl](mailto:p.m.bluyssen@tudelft.nl)



## CARATTERISTICHE DI LAYOUT

La experience room (6,50x4,20m) è costruita tramite un telaio metallico e pareti vetrate dove vengono effettuati studi sugli effetti, positivi e negativi, dell'IEQ sulla salute degli occupanti.

Mentre le quattro test cell (2,40x3,90m al piano terra e 2,40x2,60m al primo piano) sono aperte al pubblico e vengono usate per mostrare diverse percezioni dello spazio interno.



## CARATTERISTICHE INVOLUCRO



Dato che tutte le facility si trovano all'interno di un edificio del campus universitario, i componenti d'involucro delle test cell sono stati risolti tramite divisori in vetro laminato o tramite pareti leggere, debolmente isolate.

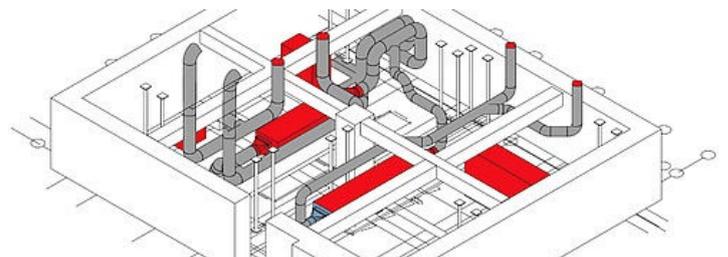
In queste facility, i componenti d'involucro sono fissi e non possono essere sostituiti dato che l'obiettivo principale delle strutture è lo studio dei fattori di IEQ.



## CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE

Dal punto di vista impiantistico le strutture sono dotate di sistemi due sistemi di riscaldamento e raffrescamento separati ed indipendenti per l'Experience room e per le test cell.

Inoltre, tutte le facility sono dotate di un sistema di smart lighting e di una serie di diffusori acustici in grado di simulare la presenza di rumore nelle stanze.



## CARATTERISTICHE SENSORI

La sensoristica interna presente nelle facility rileva continuamente la temperatura degli ambienti e l'umidità. Inoltre, a seconda dei test, possono essere installati diversi dispositivi in grado di rilevare i parametri necessari legati alla qualità dell'aria, al comfort luminoso ed al comfort acustico.



## BIBLIOGRAFIA

- \_BLUYSSSEN P. M., "SenseLab: a genuine playground for the senses", *Rehva Journal*, 54(2), 2017. pp. 29-32;
- \_BLUYSSSEN P. M., VAN ZEIST F., KURVERSA S., TENPIERIKA M., PONTA S., WOLTERSB B., VAN HULSTB L. AND MEERTINS D., "The creation of SenseLab: a laboratory for testing and experiencing single and combinations of indoor environmental conditions ", *Intelligent Buildings International*, vol. 10, No. 1, 2018, pp. 5 -18;

A.2\_RIEPILOGO CARATTERISTICHE GENERALI FACILITY

ID	LABORATORIO	TEAM	UBICAZIONE	TIPO UBICAZIONE	POSIZIONE	LARGHEZZA (m.)	PROFONDITA' (m)	ALTEZZA (m)	AREA (mq)	VOLUME (mc)	AMBIENTE	SUP. OPACA (mq)	SUP. TRASPARENTE (mq)	ORIENTAMENTO	RUOTABILE
1	FlexLab	LBNL	Berkeley (USA)	Suburbanc	Misto	12,20	9,20	4,60	112,24	516,30	Divisibile	13,06	15,00	Sud-Ovest	SI
2	MoWITT (1985-2000)	LBNL	-	-	Outdoor	3,00	2,40	2,40	7,20	17,28	Cella unica	-	-	-	SI
3	Advanced Facade Testbed	LBNL	Berkeley (USA)	Extraurbanc	Misto	3,05	4,57	3,35	13,94	46,69	Cella unica	-	-	-	SI
4	The Cube	DCE	Aalborg (DAN)	Extraurbanc	Outdoor	6,00	6,00	6,00	36,00	216,00	Cella unica	16,63	19,37	Sud	No
5	MATELab	gFT	Cambridge (UK)	Extraurbanc	Outdoor	4,50	6,50	3,00	29,25	87,75	Divisibile	40,62	25,38	Sud	No
6	Energy Flex House	DTI	Taastrup (DAN)	Extraurbanc	Outdoor	-	-	-	432,00	-	Divisibile	-	-	-	No
7	INCAS	INES	Le Bourget du Lac (FRA)	Extraurbanc	Outdoor	-	-	-	330,00	-	Cella unica	-	-	-	No
8	FACT	INES	Le Bourget du Lac (FRA)	Extraurbanc	Outdoor	7,80	9,80	8,34	76,44	637,51	Divisibile	-	30,00	-	No
9	PASSY	INES	Le Bourget du Lac (FRA)	Extraurbanc	Outdoor	3,00	6,00	3,30	18,00	59,40	Cella unica	10,8	-	Sud	SI
10	VERU	IBP	Holzkirchen (GER)	Extraurbanc	Misto	12,00	12,00	-	144,00	-	Divisibile	-	72,00	-	No
11	KUBIK	Tecnalia	Bilbao (ESP)	Extraurbanc	Outdoor	10,00	10,00	10,00	100,00	1000,00	Divisibile	-	-	-	No
12	SenseLab	TUIDelft	Delft (NED)	Urbano	Indoor	10,75	9,15	4,70	98,36	462,30	Divisibile	153,06	34,00	-	No

LEGENDA

Dati verificati  
 Dati ipotizzati

AAA  
 AAA

A.3\_RIEPILOGO CARATTERISTICHE SENSORISTICA FACILITY

ID	LABORATORIO	INTERNA					VARI	ESTERNA
		TERMICO	VISIVO	ACUSTICO	QUALITA' ARIA	ITERAZIONE OCCUPANTE		
1	FlexLab	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Sensori di temperatura</li> <li>_Sensori di temperatura per la definizione del profilo delle temperature da pavimento a soffitto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Fotometri orizzontali e verticali</li> <li>_Misure di illuminazione ed abbagliamento</li> </ul>	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Sensori di occupazione;</li> <li>_Controllo consumo energetico per ogni postazione.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Sensori di pressione</li> <li>_Misurazione del flusso d'aria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Stazione meteorologica</li> <li>_Condizione di luce esterna (copertura nuvolosa, irraggiamento e posizione del sole)</li> </ul>
2	MoWITT	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Termoflussimetri sulle facce dei componenti</li> </ul>	-	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Temperatura</li> <li>_Velocità del vento</li> <li>_Intensità solare</li> <li>_Temperatura volta celeste</li> <li>_Irraggiamento</li> </ul>
3	Advanced Facade Testbeds	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Monitoraggio delle temperature attraverso immagini HDR</li> <li>_Misure flusso termico attraverso la finestra</li> </ul>	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Feedback diretti degli occupanti</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Velocità e direzione del vento</li> <li>_Temperatura</li> <li>_Monitoraggio video della facciata (specialmente per il controllo delle schermature mobili)</li> </ul>
4	The Cube	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Temperatura interna</li> <li>_Temperatura superfici interne</li> <li>_Temperatura faccia interna DSF</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Misure della radiazione solare sulla faccia interna della DSF</li> </ul>	-	-	NO OCCUPANTI	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Sensori di pressione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Dati climatici</li> <li>_Temperatura</li> <li>_Radiazione solare</li> <li>_Velocità del vento</li> </ul>
5	MATELab	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Temperatura aria</li> <li>_Temperatura superfici</li> <li>_Solar radiance</li> <li>_Radiant asymmetry</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Libertà/Occlusioni visive</li> <li>_Illuminamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Controllo del rumore</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Livelli CO2</li> <li>_Livelli di monossido di carbonio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Velocità dell'aria</li> <li>_Umidità</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Temperatura dell'aria</li> <li>_Velocità dell'aria</li> <li>_Temperatura superfici</li> <li>_Solar radiance</li> <li>_Illuminamento</li> </ul>	
6	Energy Flex House	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Temperatura delle installazioni e della struttura</li> <li>_Flussi di calore</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Illuminamento</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>_CO2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Rilevamento delle aperture</li> <li>_Consumo elettrico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Velocità dell'aria</li> <li>_Umidità</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Stazione meteorologica</li> <li>_Radiazione solare</li> <li>_Temperatura ambiente sulle 4 esposizioni</li> </ul>
7	INCAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Temperatura dell'aria</li> <li>_Temperatura superfici</li> <li>_Temperatura della struttura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Illuminamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Livelli di rumore</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_CO2</li> <li>_CO</li> <li>_VOCs</li> <li>_PM 2,5-10</li> <li>_Aldeidi e radior</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>POSSONO ESSERE SIMULATE DIVERSE TIPOLOGIE DI OCCUPAZIONE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Umidità</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Stazione meteorologica</li> <li>_Radiazione solare</li> <li>_Temperatura superfici esterne</li> </ul>
8	FACT	-	-	-	-	-	-	-
9	PASSYS	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Temperatura dell'aria</li> <li>_Temperatura superfici</li> </ul>	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Consumo energetico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Umidità</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Stazione meteorologica</li> </ul>
10	VERU	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Temperatura dell'aria (ad H diverse)</li> <li>_Temperatura delle superfici</li> <li>_Flussi di calore sulle superfici e sulla facciata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Illuminamento</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Flussi d'aria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Consumo elettrico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Umidità</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Stazione meteorologica</li> <li>_Radiazione solare</li> <li>_Temperatura ambiente sulle 4 esposizioni</li> </ul>
11	KUBIK	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Temperatura dell'aria</li> <li>_Temperatura superfici interne</li> <li>_Temperatura media radiante</li> <li>_Flusso di calore</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Radiazione solare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Livelli di rumore</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Concentrazione CO2</li> <li>_Velocità dell'aria</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Umidità</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Temperatura dell'aria</li> <li>_Umidità</li> <li>_Radiazione solare</li> <li>_Direzione del vento</li> <li>_Velocità del vento</li> <li>_Precipitazioni</li> <li>_Pressione atmosferica</li> </ul>
12	SenseLab	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Possibilità di installare diversi sensori a seconda del test da effettuare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Possibilità di installare diversi sensori a seconda del test da effettuare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Possibilità di installare diversi sensori a seconda del test da effettuare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Possibilità di installare diversi sensori a seconda del test da effettuare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_Umidità</li> </ul>	-

A.4\_RIEPILOGO CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE FACILITY

ID	LABORATORIO	COND. ARIA	TEMP. RADIANTE	VENTILAZIONE	ILLUMINAZIONE	SIST. ACUSTICI
1	FlexLab	_HVAC	_Pannelli radianti a soffitto	-	_Sistema illuminazione interno (Philips); _Sistemi di facciata intercambiabili; _Oscuramenti	-
2	MoWITT	-	-	-	-	-
3	Advanced Facade Testbeds	_HVAC	-	-	_Sistema illuminazione standard ufficio _Sistemi oscuramenti interni/esterni intercambiabili	-
4	The Cube	_Macchina di condizionamento _Sistema di ricircolo dell'aria	-	_Sistema di ventilazione con unità di riscaldamento e raffrescamento (v: 0,2m/s)	-	-
5	MATELab	_HVAC	-	-	_Sistema illuminazione artificiale LED	-
6	Energy Flex House	_HVAC _Radiatori	_Riscaldamento a pavimento	_Meccanica _Naturale _Ibrida	_Sistema illuminazione artificiale _Schermate esterne	-
7	INCAS	_HVAC _Split per riscaldamento e raffrescamento	-	_Meccanica	_Sistema illuminazione artificiale	-
8	FACT	_HVAC	-	_Meccanica	-	-
9	PASSYS	_HVAC	-	_Sistema ventilazione meccanica	-	-
10	VERU	_HVAC _Sistema di riscaldamento con acqua calda	-	_Sistema di ventilazione con unità di riscaldamento, raffrescamento e deumidificazioni	_Sistema illuminazione artificiale _Possibilità di installazione di schermature esterne	-
11	KUBIK	_HVAC idronico	-	-	-	-
12	SenseLab	_HVAC	-	_Sistema ventilazione meccanica	_Sistema illuminazione artificiale	_Altoparlanti

## A.5 TIPOLOGIA DI SENSORI

Dotazione sensoristiche delle diverse facility.

Rilevamento	Unità	Sensore	Scheda tecnica
Illuminamento su piano di lavoro	Lux	Licor Photosensor	<a href="https://www.licor.com/env/products/light/">https://www.licor.com/env/products/light/</a>
Energia usata per l'illuminamento	Watts	Trasduttore di corrente e voltmetro	<a href="https://www.pce-italia.it/html/strumenti-di-misura/regolazioni/trasduttori-corrente.htm">https://www.pce-italia.it/html/strumenti-di-misura/regolazioni/trasduttori-corrente.htm</a> <a href="https://www.pce-instruments.com/italiano/strumento-di-misura/misuratore/voltmetro-kat_160130.htm">https://www.pce-instruments.com/italiano/strumento-di-misura/misuratore/voltmetro-kat_160130.htm</a>
Temperatura	°C	Termistore schermato	<a href="https://it.rs-online.com/web/c/passivi/resistori-variabili/termistori/">https://it.rs-online.com/web/c/passivi/resistori-variabili/termistori/</a>
Comfort termico PPD	-	Termistore schermato a bulbo secco, Temperatura del globo grigio (radiante), Sensore di velocità dell'aria omnidirezionale	<a href="https://it.rs-online.com/web/c/passivi/resistori-variabili/termistori/">https://it.rs-online.com/web/c/passivi/resistori-variabili/termistori/</a> <a href="http://www.lsi-lastem.it/it/prodotti/sensori-per-misure-meteorologiche/temperatura-radiante-a-globo-nero-uscita-pt100">http://www.lsi-lastem.it/it/prodotti/sensori-per-misure-meteorologiche/temperatura-radiante-a-globo-nero-uscita-pt100</a> <a href="https://www.pce-italia.it/html/dati-tecnici-2/trasduttore-aria-ee-575.htm">https://www.pce-italia.it/html/dati-tecnici-2/trasduttore-aria-ee-575.htm</a>
Umidità relativa	%RH	RH Sensor	<a href="http://www.lsi-lastem.it/en/products/indoor-environment-sensors/temperature-and-relative-humidity/air-temperature-and-rh-sensor-radio">http://www.lsi-lastem.it/en/products/indoor-environment-sensors/temperature-and-relative-humidity/air-temperature-and-rh-sensor-radio</a>
Abbagliamento DGP	-	Immagini HDR	<a href="https://applied-infrared.com.au/products/4-research-and-automation-infrared-cameras-thermal-imaging/174-hdr-ir-high-dynamic-range-ir-camera">https://applied-infrared.com.au/products/4-research-and-automation-infrared-cameras-thermal-imaging/174-hdr-ir-high-dynamic-range-ir-camera</a>
Temperatura della stanza	°C	Termistore schermato	<a href="https://it.rs-online.com/web/c/passivi/resistori-variabili/termistori/">https://it.rs-online.com/web/c/passivi/resistori-variabili/termistori/</a>
Temperatura dell'aria di mandata	°C	Termistore	<a href="https://it.rs-online.com/web/c/passivi/resistori-variabili/termistori/">https://it.rs-online.com/web/c/passivi/resistori-variabili/termistori/</a>
Flusso d'aria di mandata	m <sup>3</sup> /h	Sensore di flusso	<a href="https://www.pce-italia.it/html/strumenti-di-misura/regolazioni/sensori-flusso.htm">https://www.pce-italia.it/html/strumenti-di-misura/regolazioni/sensori-flusso.htm</a>
Temperatura aria esterna	°C	Termistore	<a href="https://it.rs-online.com/web/c/passivi/resistori-variabili/termistori/">https://it.rs-online.com/web/c/passivi/resistori-variabili/termistori/</a>
Immagini IR	°C	Fotocamera FLIR	<a href="https://www.flir.it/products/e6-wifi/">https://www.flir.it/products/e6-wifi/</a>
Irradianza esterna globale orizzontale	W/m <sup>2</sup>	Piranometro	<a href="http://www.ecosearch.info/piranometri-ter mopila">http://www.ecosearch.info/piranometri-ter mopila</a>
Irradianza diretta normale	W/m <sup>2</sup>	Eliostato	<a href="http://www.ingdemurtas.it/prodotti/inseguitore-solare/">http://www.ingdemurtas.it/prodotti/inseguitore-solare/</a>
Mappatura della luminanza del cielo	cd/m <sup>2</sup>	TerrestrialLight Skycam	<a href="http://terrestriallight.com/conc/">http://terrestriallight.com/conc/</a>

## **APPENDIX\_B**

B.1 H-IEQLab Requisiti

B.2 H-IEQLab Confronto Requisiti

Contributi	
	Pellegrino / Favoino + all (Generali)
	Favoino / Corrado / Serra (Building envelope)
	Perino / Capozzi / Fabrizio (HVAC)
	Acotto/Sheep (Acustica)
	Pellegrino (Illuminotecnica)
Note & Requisiti additionali Utilizzare colore testo sopra per tracciare modifiche	

### Health & Indoor Environmental Quality LAB

Requisiti generali	Scopo sperimentale	Descrizione
1.1	Scopo sperimentale	- Human Centric Health and Indoor Environment Quality (Visual, Thermal, Acoustic, Indoor Air Quality, IEQ and PCS) - Control interaction and tuning between facade system, Lighting and HVAC system - Advanced characterization of built environment for comfort measurement
1.2	Caratteristiche funzionali	- Casetta sperimentale ("Vano Tecnico") caratterizzata da 3 ambienti con accesso indipendente: un ambiente di misura (Ambiente LAB) con caratteristiche ambientali controllabili, un ambiente di controllo (Control Room) e un ambiente impianti (HVAC room), con copertura aggiuntiva per il controllo carichi solari. - L'Ambiente LAB è un ambiente unico, separabile in due ambienti indipendenti (per condizioni di controllo ambientale ed accesso), mediante parete mobile isolata termicamente e acusticamente (isolamento frontale e ponte termico ridotto); - Control Room climatizzata per la raccolta dati ed il controllo delle condizioni ambientali nell'ambiente LAB, con postazione fissa di lavoro e accesso acqua potabile (lavandino); - Ambiente impianti (HVAC) ospitante le dotazioni impiantistiche necessarie per il controllo ambientale dell'ambiente LAB e della Control Room;
1.3	Sistema Costruttivo	Casetta sperimentale realizzata con sistema costruttivo a telaio a secco (in acciaio o legno), rialzata (approx. +0.5 m) rispetto ad una platea di basamento in C.A. Il sistema a telaio prevede una struttura di travi (primarie e secondarie) e pilastri, con una trave inferiore e superiore di bordo per sorreggere gli elementi di involucro verticale (sostituibili ed orizzontale e le partizioni interne mobili. Per i carichi verticali (peso proprio) dell'involucro verticale sulle travi perimetrali (inferiore e superiore), si faccia riferimento alle caratteristiche degli elementi di involucro.

#	Elemento costruttivo	Subcomponenti	Descrizione	Dimensioni (Area, Potenza...) Funzionali	Strutturali / supporto	Requisiti prestazionali				Materiale	Riferimento prodotto	Note
						Termici	Tenuta all'aria	Acustici	Illuminotecnici			
2.1-BAS	Basamento Solajo controterra		1) Platea in C.A. per supporto struttura leggera sovrastante			NA	NA					
2.2-PAV	Pavimento modulo		1) Pavimento isolato contro terra su platea in C.A.									
2.3-INV	Involucro		1) Sistema Costruttivo a Secco su struttura primaria in acciaio			$U_{\text{struttura}} \leq 1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ , ponti termici corretti (isolamento esterno)	$\leq 0.3 \text{ Vh, } 4.3 \text{ l/m}^3$					
2.4-WN-OP		Opaco	1) Sistema di involucro opaco fisso tipo facciata ventilata o ETICS			$U_{\text{facciata}} \leq 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , Uw $\leq 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , g $\geq 0.55$	$\leq 0.3 \text{ Vh, } 4.3 \text{ l/m}^3$					
2.5-WN-P	Wall-Nord	Porte	Opache			$U_{\text{porte}} \leq 1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0.3 \text{ Vh, } 4.3 \text{ l/m}^3$					
2.6-WN-TR		Trasparente (Vetro-Telaio - Apertura)	Apribile parte bassa (anta / vasistas), sopralluce fisso		Aperture per ventilazione naturale (cross ventilation)	$U_{\text{vetro}} \leq 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , Uw $\leq 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , g $\geq 0.55$	$\leq 0.3 \text{ Vh, } 4.3 \text{ l/m}^3$					
2.7-WO-OP		Opaco	1) Sistema di involucro opaco fisso tipo facciata ventilata o ETICS			$U_{\text{facciata}} \leq 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , Uw $\leq 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , g $\geq 0.55$	$\leq 0.3 \text{ Vh, } 4.3 \text{ l/m}^3$					
2.8-WO-TR	Wall-Ovest	Trasparente (Vetro-Telaio - Apertura)	Area da requisiti minimi centrale impianti	Area da requisiti minimi centrale impianti		$U_{\text{vetro}} \leq 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , Uw $\leq 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , g $\geq 0.55$	$\leq 0.3 \text{ Vh, } 4.3 \text{ l/m}^3$					
2.9-WE-OP		Opaco				$U_{\text{facciata}} \leq 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , Uw $\leq 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , g $\geq 0.55$ , specifiche tende?	$\leq 0.3 \text{ Vh, } 4.3 \text{ l/m}^3$					
2.10-WE-TR	Wall-Est	Trasparente (Vetro-Telaio - Apertura)	1) Doppia pelle trasparente, ventilazione interno/interno, dall'esterno etc., con 4 intercapedini indipendenti attrezzate (con guide laterali) per inserimento pannelli e schemature solari intercapedine per black out (T vis = 0 e guida), possibilità di aprire l'intercapedine dall'interno (anta completa e vasistas) e esterno (faccia centrale). Esterno stesso sistema 2.12 WS-TR, interno partizione trasparente con anta apribile, intercapedine 0.5 m (0.6-0.8?)	Moduli di facciata indipendenti da 1.5 m di larghezza (4 intercapedini divise tra loro in larghezza), con intercapedine da 0.5 m netta. Sistema pelle esterno come da 2.12 WS-TR	Controllo della temperatura dell'aria tramite ventilazione (dall'esterno, dall'interno e dall'impianto ad aria), controllo radiazione solare con doppia tenda (1 per controllo solare e 1 per abbassamento, con necessità di guida). Apribili su pelle interna dall'interno per manutenzione ed installazione sensori (apribili esterni?). Bocchette ventilazione regolabili (automaticamente) su pelle esterna (in alto ed in basso) e su pelle interna (in basso, in alto ed in alto su impianto).	Supporto guide tende per abbigliamento in intercapedine	$U_{\text{vetro}} \leq 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , Uw $\leq 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , g $\geq 0.55$ , specifiche tende?	$\leq 0.3 \text{ Vh, } 4.3 \text{ l/m}^3$				
2.11-WS-OP		Opaco	1) Sistema di involucro opaco fisso tipo facciata ventilata o ETICS			$U_{\text{facciata}} \leq 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , Uw $\leq 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , g $\geq 0.55$ , specifiche tende?	$\leq 0.3 \text{ Vh, } 4.3 \text{ l/m}^3$					
2.12-WS-TR	Wall-Sud	Trasparente (Vetro-Telaio - Apertura)	1) Facciata continua trasparente con pannelli sostituibili (sistema stick + unitted), con possibilità di pannelli opachi esterni (solo schemature), e interni (isolamento), telaio attrezzato (metal brackets) per connessione con elementi schermanti esterni ed interni (schemature / lightshelves etc...)	Moduli di facciata da 1-1.5 m larghezza, con divisione orizzontale (traversi) a 1.1 m e 2.2 m, con apribile intermedio.	Apribile intermedio a vasistas e anta. Nel giunto dei sistemi a cellula, in corrispondenza dei montanti, anche in acciaio inox o protetto e sistema di supporto per installazione pannelli opachi esterni, schemature solari e light shelves. Supporto interno per chiusura con pannelli isolanti.		$U_{\text{vetro}} \leq 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , Uw $\leq 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , g $\geq 0.55$ , specifiche tende?	$\leq 0.3 \text{ Vh, } 4.3 \text{ l/m}^3$				
2.13-COS	Chiusura Orizzontale Superiore		1) Solajo leggero con struttura primaria e secondaria in acciaio / legno, lamiera grecata e isolamento			$U_{\text{solajo}} \leq 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0.3 \text{ Vh, } 4.3 \text{ l/m}^3$					
2.14-COP	Copertura		1) Copertura soprallucata per schematura 2.13-COS da carichi solari			$U_{\text{copertura}} \leq 0.15$ , ventilazione tra 2.13 e 2.14	NA					
2.15-PI-O		Partizione Interna Ovest (Lab - Locali tecnici)	1) Parete opaca isolata (termicamente e acusticamente) integrabile con pannelli radianti			$U_{\text{parete}} \leq 0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$	NA					
2.16-PI-MOB		Partizione Interna Mobile	1) Parete opaca isolata mobile (termicamente e acusticamente), correzione ponti acustici superiore ed inferiore (correzione anche a controsoffitto e pavimento galleggiante, con parte fissa)			$U_{\text{parete}} \leq 0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ , intercapedine d'aria per distribuzione temperatura?	$\leq 0.3 \text{ Vh, } 4.3 \text{ l/m}^3$					
2.17-PI-CONT	Partizioni interne	Controsoffitto	1) Controsoffitto modulare che permetta il passaggio degli impianti (dati, elettricità, plenum aria e canali flessibili aria). Trave primaria con isolamento acustico (e binario) sopra parete mobile. Predisposizione binario e bocchette aria lungo perimetro. Sostituzione pannelli per immissione aria sotto postazioni.			NA	NA					
2.18-PI-PAV		Pavimento galleggiante	1) Pavimento Radiante galleggiante che permetta il passaggio degli impianti (dati, elettricità, plenum aria e canali flessibili aria). Trave primaria con isolamento acustico (e binario) sotto parete mobile. Predisposizione binario e bocchette aria lungo perimetro. Predisposizione prese elettriche e sostituzione pannelli per immissione aria sotto postazioni.			NA	NA					

#	Tipologia	Sistema	Sub-componente	Descrizione	Dimensioni (Area, Potenza etc...)	Funzionali	Requisiti prestazionali		Materiale	Riferimento prodotto	Note	
							Strutturali / supporto	Caratteristiche componenti				
3.1-HVAC-H20-E	HVAC	Acqua	Emissione	Pavimento Radiante Soprallucato. Parete radiante e soffitto radiante.	tutta quella utile	Flessibilità di configurazione/smontaggio/modifica		strutture sospese modulari. Strutture appese modulari.		Uniformità di temperatura superficiale per circuito.		
3.2-HVAC-H20-D			Distribuzione	Reti indipendenti per superficie radiante (4 reti pavimento, 2 per ogni stanza (una verso facciata trasparente ed una verso lato opaco) LAB indipendente, + 1 rete indipendente per ogni parete) + rete per travi caldo/freddo (2, 1 per ogni stanza LAB indipendente)	per la potenza di picco possiamo considerare cautelativamente un 75 w/m2 di carico estivo e 25 w/m2 di carico invernale	Flessibilità collegamenti sistemi di emissione. Raccolti svitabili e valvole di intercettazione per permettere modifiche.						
3.3-HVAC-H20-R			Regolazione	regolazione indipendente della portata per ogni pannello radiante								
3.4-HVAC-AIR-E			Emissione	Travi Radianti calde/fredde attive (con emissione di aria)								
3.5-HVAC-AIR-D		Aria primaria	Distribuzione	in plenum inferiore e superiore + tubi flessibili per raggiungere bocchette aria sotto /sopra postazioni o sul perimetro	Possiamo pensare a 5 vol/h come valore massimo di picco (e.g. aule). Prevedere la possibilità di installare facilmente dei recuperatori di calore o entalpic (potrebbe essere uno dei topic di ricerca)				Pavimento galleggiante con almeno 40 cm liberi			* Per i requisiti Acustici: Lw<30DBA
3.6-HVAC-AIR-R		Regolazione	ventilatori invertibili e possibilità di regolare la portata di immissione dalle Bocchette	Mettere anche sulla UTA un post. riscald. elettrico (è più facile da regolare e può rendere utile in alternativa al sbatterla ad acqua) ... dipende dai costi se ci stiamo								
3.7-HVAC-GEN-HOT		Caldo	Scambiatore di calore con rete Envipark				Disponibilità tutto l'anno					
3.8-HVAC-GEN-COLD		Generazione / Scambio	1) Scambiatore di calore con rete Envipark 2) Gruppo Frigo		Prevedere delle valvole a tre vie sia sul lato caldo che freddo per poter regolare la temperatura di mandata. Inoltre forse converrebbe installare dei piccoli accumulatori inerziali a fini di stabilizzazione (qualche centinaio di litri).		Disponibilità tutto l'anno. Necessari spazi adeguati per elementi di centrale.		Portanza adeguata per peso accumulati			

3.9-ELE-GEN	Elettrico		quadro in sala controllo; distribuzione indipendente gli ambienti laboratorio e verso la sala impianti				
3.10-ILL-SIS	Illuminazione	Sistema	binari o canaline elettrificate integrate nella struttura del controsoffitto				
3.11-ILL-APP		Apparecchi					
<b>Requisiti Prestazionali</b>							
	#	Tipologia	Descrizione	Requisiti prestazionali	Materiale	Riferimento	Note
Requisiti Reti	4.1-DAT	Dati	Si cablata su LAN con Enevigark				
	4.2-H2O-HOT	Acqua riscaldata	Vedi impianti				
	4.3-H2O-COLD	Acqua refrigerata	Vedi impianti				
	4.4-GAS	Gas	direi di evitare per tutti i problemi connessi con sicurezza e certificazione				
	4.5-EL	Elettrico					
	4.6-FEM	Forza Motrice					
	4.7-H2O	Acqua sanitaria (calda / fredda + scarico acque bianche)		Una utenza nella control room (T)			
<b>Requisiti Montaggio &amp; Acquisizione</b>							

	AMBITO	SUB-CATEGORIA	FACILITY												
			1_FEXLAB	2_MoWITT	3_AFT	4_The Cube	5_MATELab	6_EFH	7_INCAS	8_FACT	9_PASSYS	10_VERU	11_KUBIK	12_SenseLab	
REQUISITI DI SCOPO	Comfort Termico	Globale	X	X	X		X			X	X		X	X	
		Locale	X	X	X		X			X	X		X	X	
	Qualità dell'aria	IAQ	X				X	X		X	X	X	X	X	
	Luminoso	Qualità di daylight			X		X			X			X	X	
		Comfort visivo			X		X			X			X	X	
	Acustico	Comfort acustico								X				X	
		Termica	X				X	X	X	X	X	X	X		
	Performance dell'edificio	Ventilazione naturale	X					X	X	X	X	X	X		
		Comfort luminoso	X				X			X	X		X		
		Comfort acustico	X							X	X		X		
		Analisi sui componenti	X Trasparenti/Opachi	X Trasparenti	X Trasparenti	X Trasparenti		X	X	X	X	X	X		
		IEQ	X				X		X	X	X	X	X	X	
	Integrazione impiantistica	HVAC	X		X			X		X	X	X	X		
		Impianto luminoso						X							
		Controllo dell'umidità						X				X			
		Sistemi controllo solare Int/Est			X						X	X			
		Sistemi produzione di energia			X			X	X	X	X	X	X		
Interazione occupante	Smart control				X		X	X	X		X	X			
	Controllo parametri fisiologici												X		
	Aspetti comportamentali	X				X	X	X	X		X	X	X		
ELEMENTO		SUB-COMPONENTE													
REQUISITI EDILIZI	Basamento	Solaio controterra	X cls armato		X	X			X U: 0,105 W/mqK	X	X	X	X cls armato	X cls armato	
	Pavimento	Pavimento galleggiante	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Parete - Nord	Opaco	X (U: 0,07 W/mqK)	X	X	X	X Altamente isolata	X Pannelli prefabbricati in poliuretano	X utilizzo di isolante avente U: 0,08-0,09 W/mqK	X da 20 a 40cm di isolante	X pannelli in poliuretano fissi/mobili R: 9 mqK/W	X parete adiabatica	X sostituibile	X sostituibile	
		Porte	X									X			
		Trasparente (Vetro+Telaio+Apertura)							X U: 0,73-0,90 W/mqK	X	X		X sostituibile	X sostituibile	X vetro laminato
	Parete - Ovest	Opaco	X (U: 0,07 W/mqK)	X	X	X	X Altamente isolata	X Pannelli prefabbricati in poliuretano	X utilizzo di isolante avente U: 0,08 W/mqK	X da 20 a 40cm di isolante	X pannelli in poliuretano fissi/mobili R: 9 mqK/W	X parete adiabatica	X sostituibile	X sostituibile	
		Trasparente (Vetro+Telaio+Apertura)						X 3 aperture	X U: 0,73-0,90 W/mqK	X	X		X sostituibile	X sostituibile	X vetro laminato
	Parete - Est	Opaco	X (U: 0,07 W/mqK)	X	X	X	X Altamente isolata	X Pannelli prefabbricati in poliuretano	X utilizzo di isolante avente U: 0,08 W/mqK	X da 20 a 40cm di isolante	X pannelli in poliuretano fissi/mobili R: 9 mqK/W	X parete adiabatica	X sostituibile	X sostituibile	
		Trasparente (Vetro+Telaio+Apertura)						X 3 aperture	X U: 0,73-0,90 W/mqK	X	X		X sostituibile	X sostituibile	X vetro laminato
	Parete - Sud	Opaco	X (U: 0,07 W/mqK) Sostituibile	X	X	X	X Altamente isolata	X Pannelli prefabbricati in poliuretano	X utilizzo di isolante avente U: 0,08 W/mqK	X da 20 a 40cm di isolante	X pannelli in poliuretano fissi/mobili R: 9 mqK/W	X	X sostituibile	X sostituibile	
		Trasparente (Vetro+Telaio+Apertura)	X Sostituibile	X Sostituibile	X Sostituibile	X Sostituibile	X Sostituibile	X 2 aperture	X U: 0,73-0,90 W/mqK	X	X	X	X sostituibile	X sostituibile	X vetro laminato
	Controsoffitto	Controsoffittatura	X			X				X					X
	Chiusura orizzontale superiore	Solaio	X						X	X	X		X	X	
		Lucernario	X Sostituibile	X Sostituibile					X U: 1,40 W/mqK				X sostituibile	X sostituibile	
	Partizioni interne	Copertura	X	X	X	X	X	X	X utilizzo di isolante avente U: 0,09 W/mqK	X da 20 a 40cm di isolante	X pannelli in poliuretano R: 10,4 mqK/W	X	X sostituibile	X sostituibile	
		Partizione interna	X (U: 0,16 W/mqK)	X	X	X	X		X	X	X	X	X sostituibile	X sostituibile	X vetro laminato/parete leggera



## **APPENDIX\_C**

C.1 H-IEQLab Work Breakdown Structure

## C.1\_H-IEQLab Work Breakdown Structure

### A – Componenti Architettonici

#### A.01 Sala test 1

- A.01.PN Parete Nord
  - A.01.PN.po Porta ingresso
  - A.01.PN.fi Finestra
- A.01.PS Parete Sud
  - A.01.PS.fi Finestra
- A.01.PE Parete Est
  - A.01.PE.dp Doppia pelle
- A.01.Pi Parete interna removibile
- A.01.PA Pavimentazione
- A.01.CS Controsoffitto
- A.01.CP Copertura

#### A.02 Sala test 2

- A.02.PN Parete Nord
  - A.02.PN.po Porta ingresso
  - A.02.PN.fi Finestra
- A.02.PD Parete Sud
  - A.02.PS.fi Finestra
- A.02.PO Parete Ovest
- A.02.Pi Parete interna removibile
- A.02.PA Pavimentazione
- A.02.CS Controsoffitto
- A.02.CP Copertura

#### A.03 Control room

- A.03.PS Parete Sud
- A.03.PO Parete Ovest
  - A.03.PO.po Porta ingresso
- A.03.PE Parete Est
- A.03.PN Parete Nord
- A.03.PA Pavimentazione
- A.03.CP Copertura

#### A.04 Locale tecnico

- A.04.PS Parete Sud
- A.04.PO Parete Ovest
  - A.04.PO.fi Finestra
- A.04.PE Parete Est
- A.04.PN Parete Nord
  - A.04.PN.po Porta ingresso
- A.04.PA Pavimentazione
- A.04.CP Copertura

### S – Componenti Strutturali

#### S.01 Struttura di fondazioni

- S.01.PL Platea in cls armato

#### S.02 Pavimentazione

- S.02.PG Pavimento galleggiante

#### S.03 Struttura in elevazione

- S.03.PO Portali legno lamellare
- S.03.TE.mo Montanti
- S.03.TE.tr Traversi

#### S.04 Soffitto

- S.04.CRL Crosslam

#### S.05 Copertura

- S.05.PR Struttura principale – travi reticolari
- S.05.SE Struttura secondaria – travi di ripartizione
- S.05.PAN Pannelli

### I – Sistemi Impiantistici

#### I.01 HVAC

- I.01.CLI Climatizzazione
- I.01.VEN Ventilazione

#### I.02 Impianto Elettrico – Forza

#### I.03 Impianto Elettrico – Illuminazione

#### I.04 Impianto Dati

### R – Rilevatori e Sensoristica

#### R.INT Sensoristica Interna

- R.INT.TER Rilevazione termica
- R.INT.QA Rilevazione della qualità dell'aria
- R.INT.ILL Rilevazione comfort illuminotecnico
- R.INT.ACU Rilevazione comfort acustico
- R.INT.OCC Rilevazione interazione occupante

#### R.EXT Sensoristica Esterna

# APPENDIX\_D

D.1 Schede Tecniche