

CAPITOLO II
PROGETTO ARCHITETTONICO

IV. RICERCHE BIBLIOGRAFICHE

A. VISIONE ARCHITETTONICA.....	171
1. Architettura ambientale.....	171
a) L'architettura di una volta.....	171
b) Il rinnovo dell'architettura ambientale.....	172
2. Qualità ambientale dell'edificio.....	172
a) Alta Qualità Ambientale.....	172
b) BREEAM.....	173
B. ENERGIA SOLARE.....	174
1. Generalità.....	174
a) Sistemi passivi.....	175
b) Sistemi attivi.....	177

A. VISIONE ARCHITETTONICA

1. ARCHITETTURA AMBIENTALE

a) L'architettura di una volta

L'architettura ambientale è il modo di progettare che cerca il miglior equilibrio fra edificio, clima e comfort degli utenti. Era ciò che si faceva nei tempi antichi quando non c'erano le tecnologie che permettevano di arrivare ad un livello di comfort soddisfacente, qualsiasi sia la forma dell'edificio.

Nel passato, nel costruire le sue abitazioni, l'uomo ha maturato una notevole cultura ambientale che oggi sembra, in parte, essere stata dimenticata.

De architectura di Vitruvio: "si farà il tracciato delle vie e dei vicoli, orientato secondo gli angoli, fra due regione di vento contigue. Con questa sistema d'orientamento si riuscirà ad eliminare da case e strade il molesto impeto dei venti" (libro I, cap.6)

Ci sono tanti esempi riguardo l'architettura ambientale:

► Villaggi costruiti dagli antichi popoli ancestrali nel parco Mesa Verde

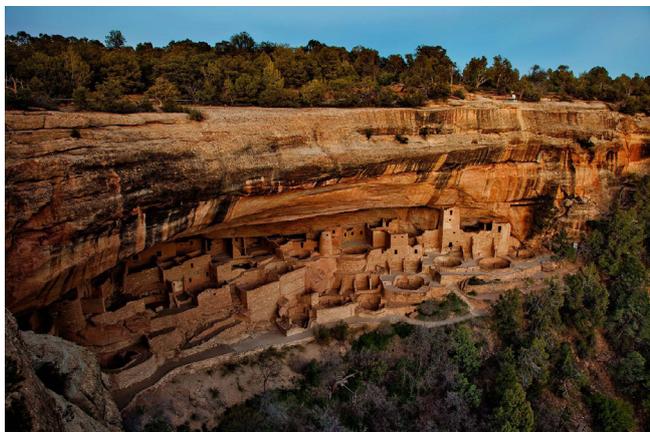


figura IV.184: Fotografia - Parco nazionale di Mesa Verde nello stato del Colorado [Fonte: Jim Shoemaker Photography]

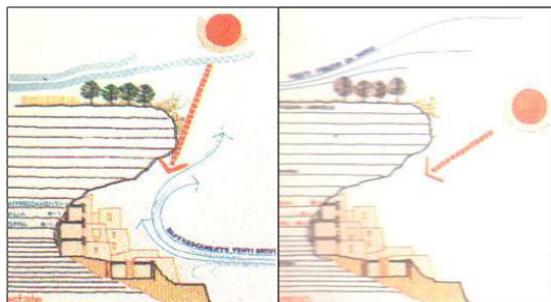


figura IV.185: *Scheme design* del villaggio durante l'estate (a sinistra) e durante l'inverno (a destra) [Fonte: Modulo di Cultura tecnologica della progettazione di Prof. Arch. Antonio Bosco]

In questo esempio si vede che la popolazione ha costruito il villaggio incassato in un taglio orizzontale nella roccia ed esposto a Sud. Così, durante la stagione estiva, la roccia lo protegge dai raggi solari, mentre la massa termica della roccia permette di mantenere una temperatura confortevole nelle case. Invece, durante la stagione invernale, i raggi solari raggiungono il villaggio per riscaldarlo e la massa termica della roccia permette sempre di mantenere una temperatura confortevole negli ambienti interni.

► Trullo pugliese

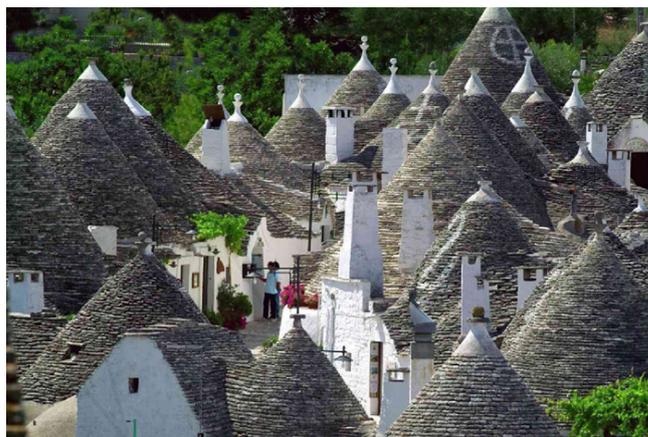


figura IV.186: Fotografia - Case pugliesi [Fonte: Foto Archivio Fotogramma]

La grande massa muraria del trullo assorbe e trattiene il calore delle radiazioni solari, rilasciandolo poi durante la notte. Questo sistema permette di diminuire le variazioni troppo elevate della temperatura all'interno della casa.

In presenza di tessuti insediativi compatti si favorisce il controllo dell'intenso irraggiamento solare estivo attraverso spazi d'ombra ottenuti da stretti vicoli che permettono di controllare il movimento del sole diurno e favorire la formazione durante le ore notturne di bacini d'aria rinfrescante.

La morfologia delle cupole riduce l'azione riscaldate dei raggi solari in copertura in quanto favorisce il flusso di brezze ventose oltre che a facilitare la raccolta dell'acqua piovana.

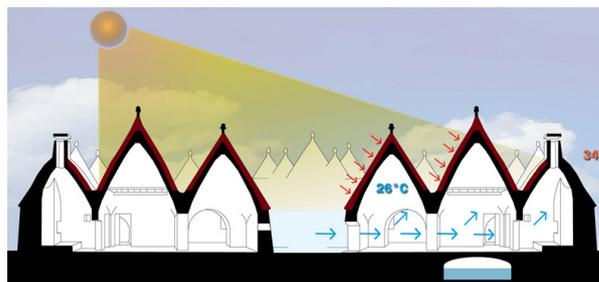


figura IV.187: *Scheme design* dei trulli pugliesi [Fonte: Modelli di architettura mediterranea www.progettoabitare.it]

In generale, nella società industriale, la grande disponibilità di energia a basso costo e la rapida evoluzione dei sistemi impiantistici di controllo climatico hanno portato alla perdita del rapporto tra edifici e clima, tra abitante e ambiente, tra tipologia edilizia e luogo.

b) Il rinnovo dell'architettura ambientale

La necessità di limitare il consumo energetico e il problema dell'inquinamento hanno portato a riconsiderare dagli anni 60 ad oggi le condizioni climatiche come "risorse" progettuali.

L'architettura bioclimatica usa l'irraggiamento solare e la circolazione dell'aria per ridurre il fabbisogno energetico, mantenere un comfort termico, controllare l'umidità e favorire la luce naturale.

Si deve studiare precisamente il contesto e il clima per adattare l'architettura al sito sfruttandone i vantaggi e premunendosi dai rischi.

L'obiettivo è di ottenere un benessere nell'edificio il più naturalmente possibile, cioè usando il meno possibile dei mezzi meccanici e l'energia della rete.

Gli architetti bioclimatici vedono il contesto non come un nemico del benessere degli utenti dell'edificio futuro ma come una fonte di benessere. Cercano una simbiosi con l'ambiente. Inoltre permette di preservarla per le generazioni future. L'architettura bioclimatica ha una dimensione ecologica e si iscrive nel metodo dello sviluppo sostenibile.

L'architettura bioclimatica ha quattro punti fondamentali:

- L'inserimento nel contesto
- I materiali ed il cantiere: uso di materiali naturali (che hanno subito meno trasformazione possibile, e che provengono da fonti naturali locali o rinnovabili), e sani (senza impatto sulla salute dell'utente ma anche sull'ambiente) con un piccolo impatto ambientale (energia grigia del materiale)
- Economia e sobrietà d'uso: sobrietà energetica sfruttando i guadagni gratuiti solari, sobrietà del fabbisogno d'acqua, sobrietà dei rifiuti durante la costruzione, la vita o il reimpiego dell'edificio
- Comfort e salute all'interno: un edificio bioclimatico soddisfa sempre al piacere dei cinque sensi

L'architettura bioclimatica si sviluppa secondo tre assi:

- Captare e proteggersi dall'energia solare, a secondo dei fabbisogni
- Distribuirli
- Conservarla o scaricarla in funzione del fabbisogno

2. QUALITÀ AMBIENTALE DELL'EDIFICIO

a) Alta Qualità Ambientale



La "Haute Qualité Environnementale" (HQE, Alta qualità ambientale) è un concetto francese. Non è una norma ma un insieme di obiettivi dati al momento della progettazione. È un metodo di qualità che aspira ad un miglior comfort nella costruzione e l'uso dell'edificio. Si basa su un metodo di costo globale (finanziario e ambientale) del progetto, dalla sua costruzione alla sua fine di vita, prendendo in conto un bilancio energetico, un bilancio carbone e un'analisi del ciclo di vita, di manutenzione e di cambiamenti degli elementi dell'edificio.

Il Metodo HQE ha quattordici scopi:

Controllo dell'impatto sull'ambiente esterna

- Eco-costruzione
 - Relazione armoniosa fra edificio e ambiente esterna
 - Scelta integrata dei materiali di costruzione
 - Cantiere a piccola nocività
- Eco-gestione
 - Gestione dell'energia
 - Gestione dell'acqua
 - Gestione dei rifiuti di attività
 - Manutenzione

Ambiente interno soddisfacente

- Comfort
 - Igrometrico
 - Acustico
 - Visivo
 - Olfattivo
- Salute
 - Condizioni sanitarie
 - Qualità dell'aria
 - Qualità dell'acqua

Ciò che ci interessa in questo metodo è di pensare all'edificio nella sua intera vita.

B. ENERGIA SOLARE

1. GENERALITÀ

Il sole ha una temperatura di 5777K e una irradiazione massima al di fuori dell'atmosfera di 1367W/m². La radiazione solare è l'energia elettromagnetica emessa dal sole. La lunghezza di onda della radiazione solare va dalle 0.3 μm a 2.5 μm con un picco a 0.5 μm (ultravioletto <0.38, infrarosso > 0.78, visibile).

La radiazione solare che arriva sulla superficie della terra, attraversando l'atmosfera, è stata modificata (diminuendo la sua intensità) a causa della dispersione e dell'assorbimento. La parte delle radiazioni solari che è deviata e arriva sulla superficie della terra da tutte le direzioni è chiamata la radiazione solare diffusa. L'altra parte che non entra in interazione con le molecole dell'atmosfera e conserva la sua direzione originale è chiamata la radiazione solare diretta.

La radiazione solare dipende dalle condizioni del tempo.

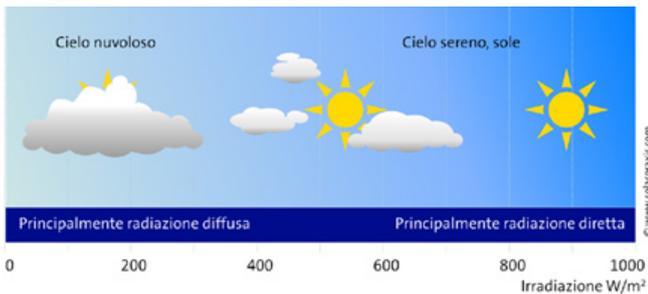


figura IV.188: Irradiazione in funzione delle condizioni del tempo [Fonte: www.solarpraxis.com]

La radiazione solare disponibile sulla superficie della terra dipende da:

- La trasparenza dell'atmosfera
- La posizione relativa del sole nel cielo che varia in funzione delle ore del giorno, della stagione e del sito
- Altitudine del sito
- La durata della giornata

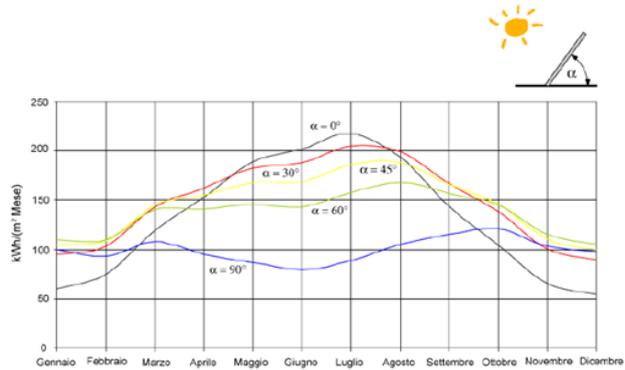


figura IV.189: Irraggiamento di superficie con inclinazioni diverse su un anno [Fonte: Lezione del Prof. Mario Motta: Solar thermal systems]

Ogni secondo, nel cuore del sole, circa 700 milioni di tonnellate d'idrogeno sono convertiti in 695 milioni di tonnellate di elio e 5 milioni di tonnellate di energia in raggi gamma. Il sole misura 1400000 km di diametro, 108 volte il diametro della Terra. Sulla Terra riceviamo 176.10³ TW ossia 3850.10²¹ J ogni anno ciò che corrisponde a 92 000 Gtep. Per paragonare, la produzione delle centrali nucleari è di 2.9.10¹⁶ J per un anno.

Il consumo energetico mondiale è di 8 Gtep in 2006, sia 1/11500 l'energia solare assorbita in un anno, equivalente all'energia solare assorbita dalla Terra in 45 minuti.

2. I SISTEMI SOLARI

a) Sistemi passivi

L'edificio stesso funziona sfruttando le proprietà fisiche naturali dei flussi di calore.

I sistemi solari passivi sono composti da quattro elementi:

- Lo spazio da riscaldare
- Il collettore (consiste in una superficie vetrata integrata)
- Un assorbitore (consiste per esempio in una superficie opaca di colore scuro posizionata dietro il vetro che assorbe la radiazione solare e la converte in calore)
- L'accumulo (costituito da uno o più materiali di elevata capacità termica che possono immagazzinare calore per poi restituirlo nei momenti in cui l'edificio non è direttamente riscaldato dal sole)

Si possono aggiungere dei sistemi di controllo della radiazione solare. Quelli possono essere elementi che riducono le perdite di calore notturne o elementi ombreggianti che riducono l'irraggiamento in estate...

I sistemi solari passivi usano i tre modi di trasporto dell'energia solare:

- Conduzione
- Convezione
- Irraggiamento

1) A guadagno diretto

È il sistema più semplice di guadagno solare. I fenomeni che permettono di captare l'energia che vengono sfruttati sono l'irraggiamento e la convezione. La radiazione solare passa attraverso le superfici vetrate opportunamente esposte e, sotto forma di calore, si trasferisce direttamente all'ambiente interno. Si accumula nella massa termica del pavimento, del soffitto o delle pareti che a loro volta per irraggiamento e convezione trasferiranno il calore all'ambiente interno comportandosi da volano termico.

Il guadagno diretto può venire sia da una superficie verticale (finestre, vetrate ...) sia da una superficie orizzontale (lucernari, shed solari). In entrambi i casi va privilegiata l'esposizione a sud. L'esposizione a sud con una inclinazione di 90° è quella che ha un maggior irraggiamento durante l'inverno ed un minor irraggiamento durante l'estate.

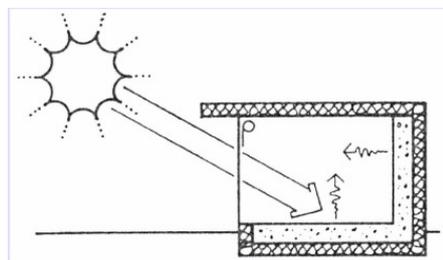


figura IV.190: Schema di funzionamento dei sistemi solari passivi a guadagno diretto (tipo 1) [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi]

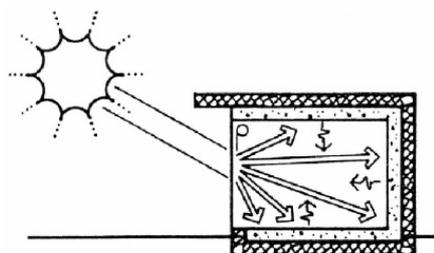


figura IV.191: Schema di funzionamento dei sistemi solari passivi a guadagno diretto (tipo 2) [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi]

La scelta dei colori è determinante per l'assorbimento del calore. Il nero ha un coefficiente di assorbimento superiore rispetto al bianco. Per l'accumulo, è determinante la capacità termica.

L'accumulo termico permette peraltro di evitare il fenomeno di surriscaldamento.

L'uso di vetri diffusori, tendine o della riflessione tramite superfici di colore chiaro, ha l'effetto di diffondere la radiazione solare ovunque attraverso il locale.

2) A guadagno indiretto

È composto dagli stessi componenti del sistema passivo a guadagno diretto, però non sono posizionati della stessa maniera. Infatti, l'elemento captante di accumulo è una parte integrante dell'involucro nel sistema a guadagno indiretto. Così non permette alla radiazione solare di raggiungere direttamente l'ambiente da riscaldare. L'elemento captante riceve la radiazione solare, accumula il calore e lo restituisce lentamente all'ambiente interno.

► Parete di Trombe-Michel

Il muro trombe è costituito da una parete vetrata e da una parete captante con un'alta capacità di assorbimento ed un'alta massa termica. Il principio è di accumulare il calore nella parete captante e di restituirlo all'ambiente interno lentamente per irraggiamento.

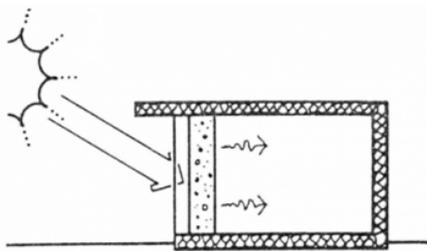


figura IV.192: Schema di funzionamento del muro Trombe-Michel [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi]

Si possono aggiungere delle griglie alla base ed alla sommità per far entrare il calore per convezione nelle giornate ben soleggiate. Invece durante la notte queste griglie devono rimanere chiuse per non avere dispersione di calore.

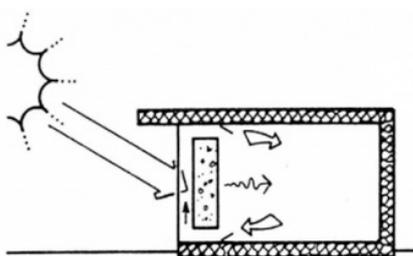


figura IV.193: Schema di funzionamento del muro Trombe-Michel (variante) [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi]

Questo sistema può funzionare anche per raffrescare l'ambiente. Aggiungendo delle aperture alla base ed alla sommità della vetrata, l'aria calda dell'ambiente interno sarà attirata nell'intercapedine con un effetto camino e viene espulsa fuori dell'edificio.

► Muro ad accumulo isolato

La parete ad accumulo è simile nella forma al Muro Trombe, ma è coibentata sulla parete rivolta verso l'interno, per impedire la trasmissione del calore per conduzione e irraggiamento: tutto il calore è trasmesso per convezione, sia naturale che forzata.

► Muro d'acqua

È lo stesso sistema del muro Trombe o muro ad accumulo con la sola differenza che l'acqua sostituisce la parete solida. Poiché l'acqua ha una capacità termica superiore a quella dei mattoni e del cemento e inoltre le correnti convettive al suo interno la rendono un accumulo termico quasi isoterma, il sistema può lavorare con un'efficienza maggiore rispetto al muro massivo o Trombe.

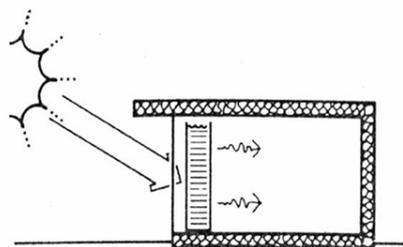


figura IV.194: Schema di funzionamento del muro d'acqua [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi]

► Roof-pond

La massa termica è disposta orizzontalmente, sopra il soffitto dell'edificio. La maggior parte dei tetti ad accumulo termico usano contenitori, tipo materassino d'acqua, coprenti una parte o tutto il soffitto. L'acqua deve essere in contatto diretto con le strutture del soffitto che la sostengono, così l'energia termica viene trasmessa per conduzione attraverso il soffitto per poi riscaldare l'ambiente per irraggiamento.

Durante la notte o nei periodi di cielo coperto, un isolamento copre l'acqua calda e ne riduce le perdite di calore. L'accumulo d'acqua sul tetto può essere usato anche per il raffreddamento estivo.

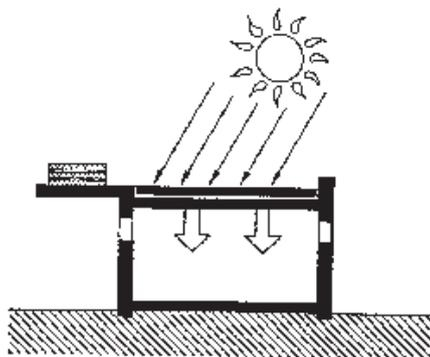


figura IV.195: Schema di funzionamento del Roof-pond durante i giorni invernali ed estivi [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi]

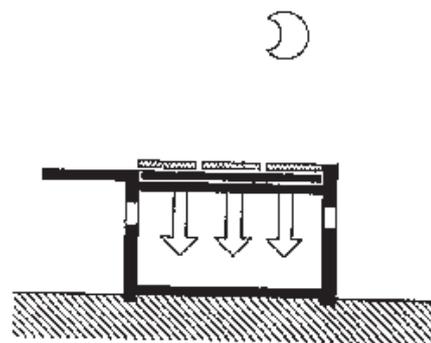


figura IV.196: Schema di funzionamento del Roof-pond durante le notti invernali [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi]

3) Misto: la serra

Lo spazio solare consiste in una serra che forma un ambiente distinto dal resto dell'abitazione. Aumenta la superficie, crea un spazio cuscinetto ed è semplice da realizzare.

Si deve evitare il surriscaldamento con la geometria, gli elementi ombreggianti e una ventilazione con delle aperture alla base e alla sommità. (10% di aperture)

A metà tra i sistemi passivi diretti e indiretti, la serra solare, sia che venga utilizzata come ambiente frequentato, che come collettore energetico, è un ottimo sistema di uso del calore.

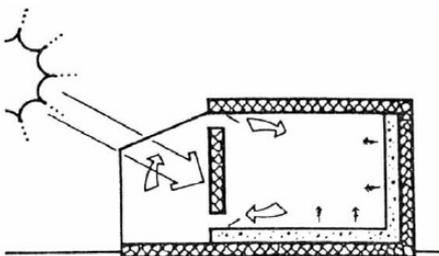


figura IV.197: Schema di funzionamento di una serra solare [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi]

La serra solare è una combinazione di un sistema a guadagno diretto e di un muro ad accumulato. Infatti, l'ambiente nella serra riceve i raggi del sole che riscaldano direttamente lo spazio, mentre il muro di separazione fra la serra e l'edificio accumula il calore per restituirlo più tardi. Per questo motivo si deve portare una grande intenzione ai materiali del muro di separazione dei due ambienti che deve avere una buona inerzia termica. L'inserimento di ventoline migliora lo scambio d'aria tra i locali che si affacciano sulla serra. Si deve pensare alle aperture delle vetrate per permettere la regolazione climatica in funzione della stagione.

Le regole principali:

- Facciata principale a sud con una tolleranza di 30/40°, evitare le vetrate ad Est ed Ovest che sono responsabili del surriscaldamento.
- Ventilazione della serra per evitare il surriscaldamento nei mesi estivi e nelle stagione intermedie
- Schermature in particolare per le vetrate orizzontali e quelle esposte ad ovest. All'esterno della superficie trasparente con un colore chiaro
- Taglio termico per ridurre le dispersioni

b) Sistemi attivi

1) Solare termico

Un pannello solare termico è un dispositivo che permette la conversione della radiazione solare in energia termica per trasferirla ad un sistema, nel nostro caso: l'edificio. Può servire a riscaldare l'edificio stesso o per l'acqua calda sanitaria.

Ci sono tre tipi di pannelli solari diversi:

- I pannelli solari sottovuoto sono in grado di garantire un maggiore apporto energetico anche in condizioni di basso irraggiamento o basse temperature esterne. Esistono principalmente due tipi di collettori sottovuoto, detti anche collettori a tubi sottovuoto: quelli che contengono un tubo a U in cui circola direttamente il liquido che assorbe il calore e quelli "Heat pipe" che contengono un tubo in rame chiuso alle estremità contenente un liquido in bassa pressione che evapora riscaldandosi e si condensa nella parte alta del tubo cedendo il calore all'acqua sovrastante.
- I pannelli solari termici piani vetrati: il fluido è spesso dell'acqua mescolata con un antigelo che circola nei tubi collocati in un cassone. Questo è composto in fondo da un isolante e sulla parte superiore da vetro. Il vetro è trasparente ai raggi solari ma opaco ai raggi infrarossi ciò che imprigiona il calore.
- I pannelli solari termici piani non vetrati: hanno il vantaggio di essere poco costosi e di avere un ottimo rendimento in condizioni ottimali di irraggiamento quando la temperatura esterna è alta. A causa della mancanza dell'isolamento il loro rendimento diminuisce rapidamente all'allontanarsi dalle condizioni ottimali. Sono adatti perciò al solo uso stagionale ed esclusivamente per la produzione di acqua calda sanitaria, sono spesso impiegati nel riscaldamento delle piscine.

2) Fotovoltaico

Un pannello solare fotovoltaico è un sistema tecnologico energetico a base di cellule fotovoltaiche che funziona come un generatore d'elettricità di corrente continua.

I pannelli fotovoltaici funzionano grazie a dei materiali semiconduttori come il silicio. Questi materiali assorbono la luce del sole per trasformarla in energia elettrica. Questa trasformazione si chiama effetto fotovoltaico. I fotoni della luce del sole eccitano gli elettroni del silicio che si muove e genera dell'energia elettrica in continuazione.

Per il bilancio energetico, secondo l'EPIA (Associazione Europea dell'Industria del Fotovoltaico), sotto la latitudine di Lione in Francia, un modulo fotovoltaico restituisce in due anni e mezzo l'energia che è stata necessaria per la sua fabbricazione.

V. LA SERRA

A. PERCHÉ UNA SERRA ?	181
1. Premessa.....	181
2. Uno spazio abitabile.....	181
3. Immagine architettonica.....	181
4. Uno spazio di aggregazione.....	181
5. Migliorare la qualità degli spazi.....	181
B. CHE TIPO DI SERRA USARE	183
1. Tipologie funzionali.....	183
a) Serra a guadagno diretto.....	183
b) Serra a scambio convettivo.....	183
c) Serra a scambio radiante.....	183
2. La massa termica.....	183
a) Accumulo a parete.....	184
b) Accumulo a pavimentazione.....	184
c) Accumulo centrale.....	184
3. Regimi di funzionamento.....	184
a) Invernale diurno.....	184
b) Invernale notturno.....	185
c) Estivo diurno.....	185
d) Estivo notturno.....	185
C. PROGETTARE UNA SERRA SOLARE	187
1. Parametri da considerare.....	187
a) Orientamento.....	187
b) Dimensioni.....	187
c) I sottosistemi.....	187
2. Simulazioni energetiche della serra sul progetto.....	189
a) Studio semplice dell'aggiunta di una serra.....	189
b) Prima ottimizzazione.....	192
c) Seconda ottimizzazione.....	193
d) Scambi di calore in funzione della geometria della serra.....	194
e) Studio del progetto.....	197

A. PERCHÉ UNA SERRA ?

1. PREMESSA

Tra i diversi sistemi solari, la serra è stato quello che ci sembrava più idoneo da sviluppare per il nostro progetto. Infatti, il polo di formazione professionale si collocandosi nell'alta città di Sondrio con una grande facciata a sud, ci permette di sfruttare i guadagni solari diretti del sole nella serra, mentre serve da cuscinetto termico per il resto dell'edificio.

Inoltre una serra solare si presta molto bene ad interventi sul patrimonio esistente.

Progettare una serra è un lavoro per un architetto nel senso in cui si deve dare molta attenzione alle implicazioni linguistiche architettoniche mentre si deve progettare un spazio abitabile.

2. UNO SPAZIO ABITABILE

La serra solare è uno dei sistemi solari più apprezzato perché permette di realizzare uno spazio abitabile piacevole.

Le condizioni di comfort di una serra non sono paragonabili a quelle abituali che prevedono una temperatura dell'aria costante pari a 20°C. Ciò nonostante, in molti casi si può sentire una sensazione di comfort. Per esempio, durante una giornata soleggiata d'inverno, fa molto freddo fuori, però la presenza di radiazione diretta produce una sensazione di comfort anche se le temperature non raggiungono 20°C. Invece durante una giornata coperta d'inverno, la serra riesce a sfruttare la radiazione indiretta per poter innalzare le temperature interne verso i limiti di comfort.

La serra è un vero spazio abitabile e deve essere considerata come tale per progettarela affinché possa arricchire il progetto intero.

3. IMMAGINE ARCHITETTONICA

Una serra si iscrive nel linguaggio architettonico dell'architettura trasparente permettendo un contrasto fra leggero e pesante. L'architettura trasparente essendo molto usata nell'architettura contemporanea, la serra permette di dare una immagine moderna all'edificio. Uno dei requisiti della direttrice del Polo di Formazione Professionale era di migliorare l'immagine della scuola, lavorando sull'aspetto visivo esterno che deve mostrare una scuola nuova all'avanguardia delle tecnologie.

4. UNO SPAZIO DI AGGREGAZIONE

Siccome la serra non sarà uno spazio riscaldato, si deve dedicarla ad una attività temporanea.

Dopo l'analisi dell'edificio esistente ci siamo resi conto che alla scuola mancavano degli spazi di aggregazione. La serra è lo spazio idoneo per collocare degli spazi di aggregazione. Non è necessario avere delle temperature di comfort come nelle aule didattiche o negli uffici, comunque è un spazio piacevole perché si può godere della vista panoramica ed è un spazio soleggiato.

5. MIGLIORARE LA QUALITÀ DEGLI SPAZI

La vista panoramica è una delle forze dell'edificio esistente, però per godere di una tale vista si deve avere la volontà di vederla.

Inoltre, i professori si sono lamentati degli allievi che non riescono a concentrarsi durante le lezioni perché guardano sempre la vista al di fuori ed i movimenti sul parcheggio.

Di conseguenza, abbiamo scelto di adattare la possibilità di guardare fuori in funzione dell'occupazione degli allievi: gli utenti che sono nella serra possono godere della vista come piace a loro. Invece, dalle aule di fianco alla serra abbiamo spostato le finestre un po' più in alto in modo che gli allievi non siano distratti, senza ridurre gli apporti di luce naturale. Abbiamo comunque conservato la possibilità di guardare fuori, se gli allievi si alzano o si raddrizzano.

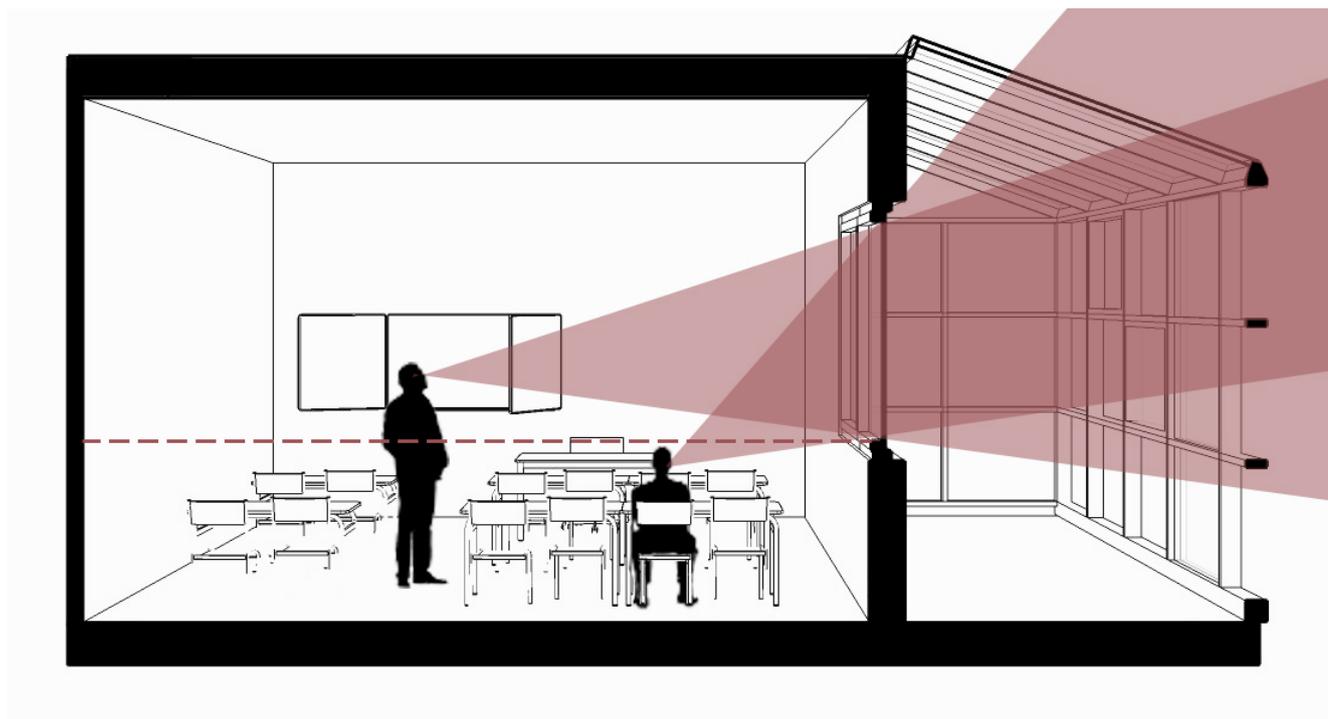


figura V.198: Schema di spiegazione dell'altezza delle finestre

Su questo schema, si vede che l'altezza della finestra è appena sopra la testa di un allievo seduto. Così, l'allievo non ha lo sguardo attirato fuori, però se vuole può riguardare raddrizzandosi.

B. CHE TIPO DI SERRA USARE

1. TIPOLOGIE FUNZIONALI

Esistono tre tipologie funzionali diverse. È importante conoscere tutte le tipologie esistenti per capire i vantaggi, svantaggi e i casi di applicazione di ciascuna al fine di progettare correttamente la serra del progetto.

a) Serra a guadagno diretto

La superficie di separazione fra la serra solare e l'ambiente interno si può rimuovere per permettere al calore di andare direttamente nello spazio interno senza avere uno sfasamento dovuto all'accumulo e scarico della parete intermedia. In questo caso la serra non è più un sistema solare misto ma solo un sistema solare passivo a guadagno diretto.

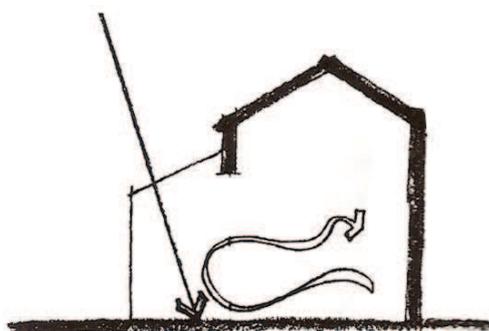


figura V.199: Funzionamento di una serra a guadagno diretto [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

b) Serra a scambio convettivo

Lo scambio di calore si fa per convezione. La superficie di separazione è composta da aperture per permettono lo scambio d'aria fra la serra e l'interno. Funziona come la serra a guadagno diretto, però la quantità di aria scambiata è minore, ma regolabile. Per avere una buona circolazione dell'aria, si devono avere delle aperture alla base e alla sommità della parete di separazione. In alcuni casi viene aggiunta una ventilazione forzata per migliorarla o per riscaldare spazi che non sono accanto alla serra.

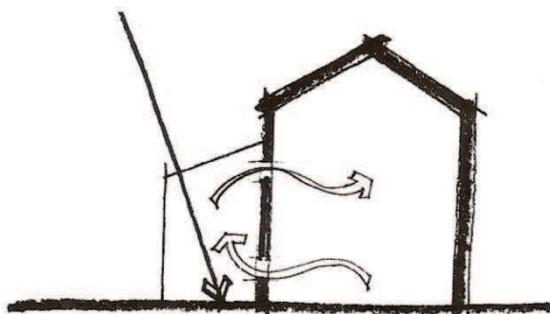


figura V.200: Funzionamento di una serra a scambio convettivo [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

c) Serra a scambio radiante

La parete di separazione è l'elemento captante di un sistema solare passivo. Riceve la radiazione solare, accumula il calore e lo restituisce lentamente all'ambiente interno. Questo tipo di scambio è un scambio radiante.

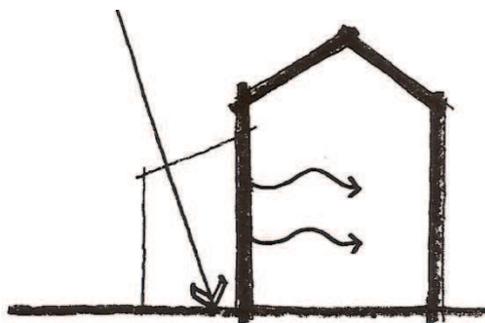


figura V.201: Funzionamento di una serra a scambio radiante [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

Il progetto riguarda una scuola professionale. Di conseguenza viene usata solo durante la giornata dalle 8 alle 17 e non viene usata durante i mesi più caldi (luglio e agosto). Durante le ore serali (dopo le 18), non è necessario riscaldare l'edificio.

La serra solare del progetto serve da cuscinetto termico per limitare le dispersioni di calore e di accumulo di calore quando la radiazione solare diventa sufficiente. Non è necessario conservare questo calore per restituirlo durante la notte. Bisogna trasmetterlo velocemente all'ambiente interno, quando serve.

Però, per garantire il controllo delle temperature all'interno delle aule, la serra non può essere a guadagno diretto. Per questi motivi useremo una serra a scambio convettivo.

2. LA MASSA TERMICA

La massa termica ci interessa per lo sfasamento. Infatti, la radiazione solare presenta un andamento simmetrico rispetto alle ore 12 solari, invece la temperatura esterna si sfasa di qualche ora a causa dell'inerzia termica della superficie terrestre e dell'atmosfera.

Nel caso di un involucro completamente vetrato, la temperatura interna evolve come quella esterna ottenendo delle temperature molto più elevate grazie all'isolamento dell'edificio. La temperatura aumenta con le radiazioni solari e diminuisce rapidamente con l'assenza di raggi solari. Avere una superficie con un'inerzia termica elevata permette di accumulare il calore che non è necessario all'interno durante le ore più calde della giornata e di restituire il calore nelle ore più fredde. L'inerzia termica permette di attenuare la variazione della temperatura interna.

Lo scopo delle masse termiche è quello di immagazzinare l'energia captata dalla serra per renderla disponibile per il suo utilizzo nelle ore di massimo bisogno.

Il buon funzionamento della massa di accumulo termico dipende:

- dalla posizione;
- dalla costituzione materica;
- dallo spessore;
- dalla quantità.

Si possono mettere due tipi diversi di massa a accumulo termico:

- esposta alla radiazione solare diretta
- non direttamente esposte alla radiazione solare, dette "secondarie". E' meno efficace per l'inverno, però diventa molto utile per evitare il surriscaldamento estivo.

Esistono diversi tipi di massa termica ad accumulo, in tutti i casi si deve prestare molta attenzione all'isolamento del lato freddo per diminuire le dispersioni di calore.

a) Accumulo a parete

La parete verticale in fondo alla serra rivolta a sud è quella più esposta ai raggi solari invernali. La parete in fondo non è in contatto con l'esterno, quindi ha meno dispersioni di calore.

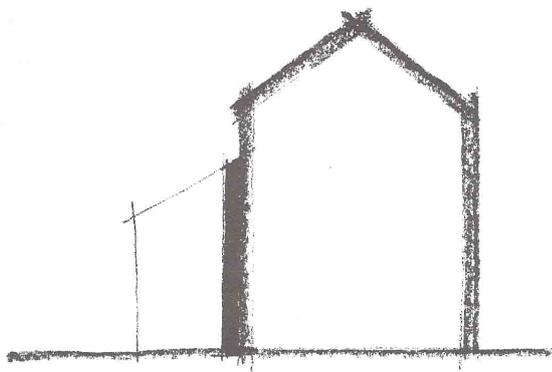


figura V.202: Accumulo a parete [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

b) Accumulo a pavimentazione

Questo tipo di accumulo si trova spesso nelle serre a guadagno diretto o nelle serre molto incassate dove i raggi solari non possono arrivare fino ad una parete verticale. Inoltre l'accumulo a pavimentazione può essere usato come complemento dell'accumulo a parete.

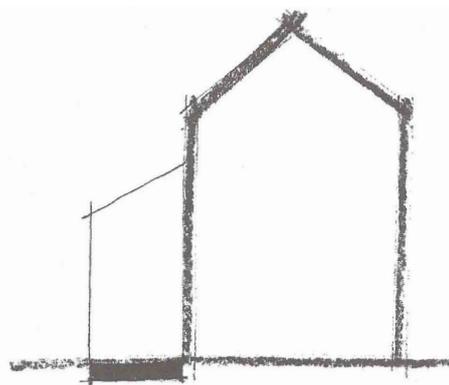


figura V.203: Accumulo a pavimento [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

c) Accumulo centrale

La massa termica si può anche mettere nel centro della serra. Questo tipo di accumulo si fa per le serre di dimensioni più grandi. L'accumulatore centrale può essere l'acqua.

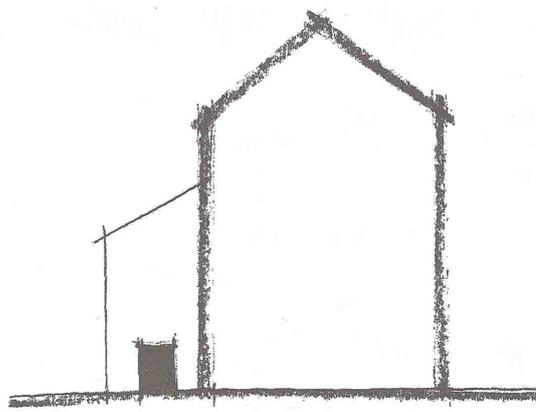


figura V.204: Accumulo centrale [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

Anche qui, non ci serve accumulare il calore per rilasciarlo più tardi visto che non vi sono persone nella scuola durante ore notturne. Pertanto né i solai, né i muri devono avere una grande massa termica.

3. REGIMI DI FUNZIONAMENTO

Visto che abbiamo scelto di fare una serra a scambio convettivo, riassumiamo solo il funzionamento di questo tipo di serra.

a) Invernale diurno

Lo scopo durante le giornate invernali è di massimizzare la captazione. La possibilità di captare energia è legata alla quantità di radiazione presente in un determinato momento.

Per la serra a scambio convettivo, si attiverà lo scambio d'aria quando la temperatura della serra avrà raggiunto la temperatura di comfort. Lo scambio d'aria viene fatta attraverso l'apertura di serramenti che collegano i due ambienti. Quest'apertura può essere sia

manuale che automatizzata.

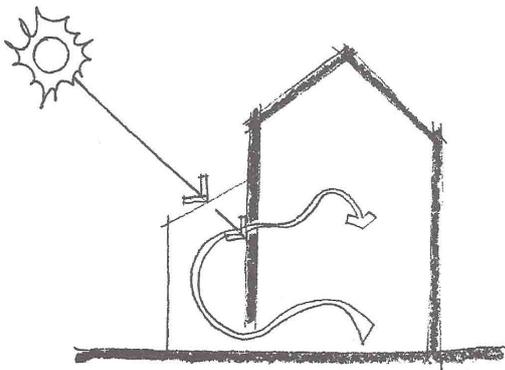


figura V.205: Funzionamento invernale diurno della serra
[Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

Per la scuola, le aperture fra la serra e le aule didattiche saranno dei serramenti con uso manuale. Questa soluzione è la più idonea per una scuola.

b) Invernale notturno

Lo scopo durante le notti dei mesi freddi è di minimizzare le dispersioni della serra verso l'esterno.

Per la serra a scambio convettivo, quando la temperatura interna della serra scende al di sotto della temperatura dei locali interni, si deve cessare lo scambio convettivo chiudendo i serramenti. Inoltre si devono ridurre le dispersioni di calore degli ambienti interni verso la serra, per questo motivo sarà opportuno avere una parete intermedia con una buona capacità di isolamento termico. Si deve comunque ridurre le dispersioni dalla serra verso l'esterno affinché l'aria di essa non si raffreschi troppo velocemente con l'utilizzo di dispositivi d'isolamento mobili applicati sull'involucro.

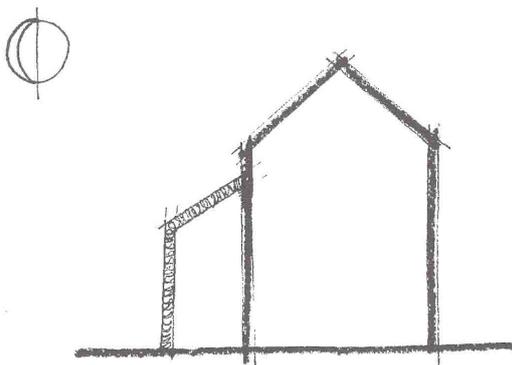


figura V.206: Funzionamento invernale notturno della serra [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

Siccome la scuola non viene più utilizzata a partire dalle 17, non ci sembra opportuno di progettare dei dispositivi d'isolamento mobili.

c) Estivo diurno

La voglia di progettare una serra viene principalmente dai suoi vantaggi durante l'inverno per massimizzare la captazione dei raggi solari. Però se ben

progettata, la serra può costituire un arricchimento dell'edificio stesso, creando uno spazio piacevole durante tutto l'intero anno.

Ci sono due attori principali della progettazione estiva di una serra:

- le schermature: si deve ridurre il soleggiamento della serra durante l'estate e le stagioni intermedie, principalmente per le pareti orizzontali che ricevono la maggior parte dei raggi solari. Si deve evitare che i raggi solari raggiungano le masse termiche.
- La ventilazione è molto importante per evitare l'effetto serra. La quantità e la posizione dei serramenti dovrà essere l'oggetto di un attento studio in stretta relazione con le esigenze di fruibilità e la presenza di sistemi di ombreggiamento. La serra può essere usata come camino solare: con delle aperture ben calibrate nella parte inferiore e superiore della serra, si può generare durante le giornate calde un moto d'aria ascendente che tende a creare una depressione all'interno della serra; attirando l'aria della casa per rinnovarla.

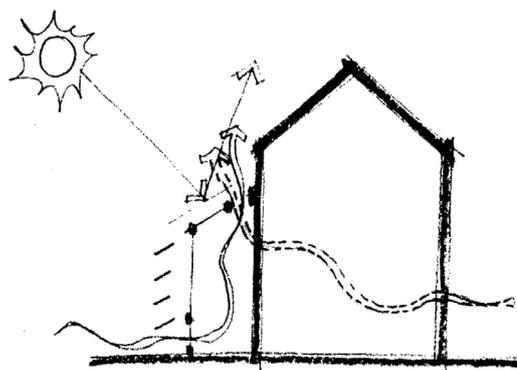


figura V.207: Funzionamento estivo diurno della serra
[Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

d) Estivo notturno

Lo scopo del funzionamento estivo notturno è di massimizzare le dispersioni radiative e per convezione. In generale si usano delle aperture alla sommità della copertura ed eventuali aperture sui fianchi dell'involucro sfruttando i moti d'aria caratteristici del sito.

Nel nostro caso, visto che la direzione maggiore del vento è O-E o NO-SE, potrebbe essere interessante avere delle aperture sui fianchi est ed ovest della serra.

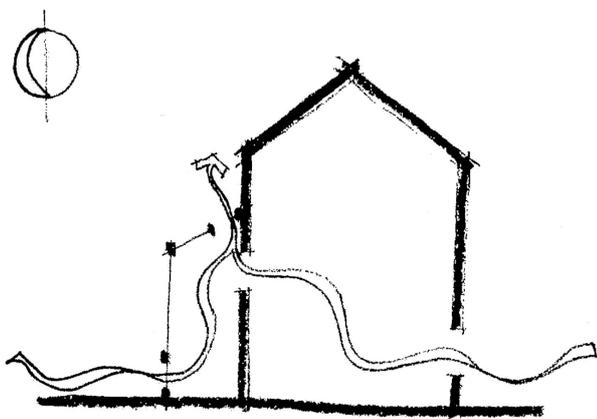


figura V.208: Funzionamento estivo notturno della serra
[Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

Non dobbiamo preoccuparci tanto per i mesi estivi perché la scuola è chiusa per le vacanze. Nei mesi intermedi potrebbero esserci dei problemi di surriscaldamento se questi due parametri non vengono ben studiati. Vedremo prossimamente più precisamente come progettargli.

C. PROGETTARE UNA SERRA SOLARE

1. PARAMETRI DA CONSIDERARE

a) Orientamento

L'orientamento dell'edificio e l'inclinazione delle superfici vetrate hanno un'importanza sulla quantità di raggi solari che vengono captati e sulla quantità di calore perso per conduzione.

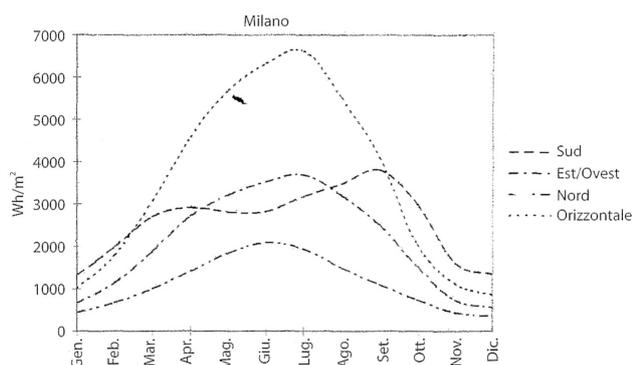


figura V.209: Energia incidente su superfici variamente orientate [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

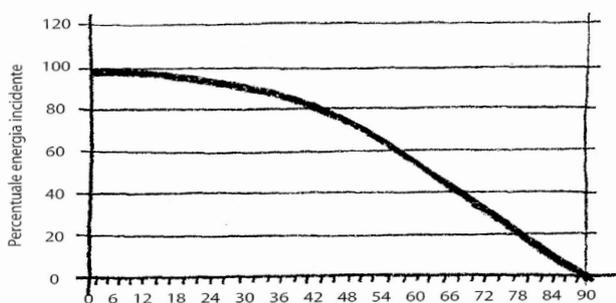


figura V.210: Rapporto tra angolo di incidenza ed energia incidente [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

Questi grafici ci mostrano bene che si deve tenere conto di questi due parametri per la progettazione della serra solare.

b) Dimensioni

Più la serra è larga più la distanza per i raggi solari sarà grande prima di raggiungere una parete ad accumulo. Inoltre ci saranno più dispersioni di calore per riscaldare l'ambiente della serra prima di immagazzinarsi nella parete.

c) I sottosistemi

1) I vetri

Il vetro compone la maggior parte dell'involucro della serra. Tutti i raggi solari attraversano il vetro. Le

proprietà del vetro che ci interessano sono:

- il fattore solare;
- la trasmittanza termica;
- la selettività (rapporto fra il fattore solare e la trasmissione luminosa).

La radiazione che colpisce la superficie trasparente viene in parte riflessa all'esterno, in parte assorbita dal materiale e ritrasmessa all'esterno e all'interno e in parte attraversa il materiale e penetra all'interno. Il fattore solare esprime in percentuale la quantità di energia solare che penetra all'interno della serra, considerando la radiazione che attraversa direttamente il vetro e l'energia trasmessa per conduzione all'interno.

Affinché l'effetto serra abbia la massima efficienza, è necessario contenere le dispersioni di calore verso l'esterno. Evidentemente l'obiettivo di ridurre le dispersioni di calore contrasta con il requisito precedente. Per minimizzare le dispersioni di calore, cercheremo di minimizzare la trasmittanza termica del vetro.

2) Ventilazione

La posizione e il dimensionamento delle aperture della serra permettono di evitare il surriscaldamento sia durante i mesi intermedi che durante l'estate. Inoltre la ventilazione permette di far circolare l'aria durante le ore notturne evitando che la massa termica riscaldata durante il giorno riscalda tutto l'edificio.

Per una buona ventilazione della serra si deve mettere delle aperture alla base e alla sommità dell'involucro.

Per una maggior efficienza, si devono prevedere più aperture per l'uscita dell'aria che per l'entrata: l'effetto Venturi permette di ottenere un moto d'aria più veloce all'interno della serra con maggiori benefici al livello di comfort sensoriale nel caso in cui la serra sia occupata.

La quantità delle aperture dipende molto dalla situazione climatica del sito. In climi temperato caldi, è necessaria una superficie maggiore per garantire una notevole ventilazione durante i mesi estivi. In questo clima bisogna prevedere, anche quando la serra è ben schermata dagli irraggiamenti solari, una superficie apribile non minore di 1/3 della superficie vetrata.

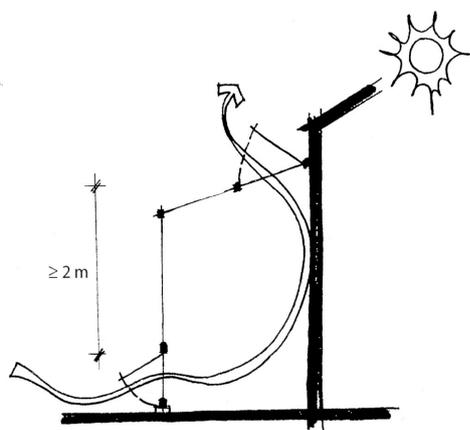


figura V.211: Schema del funzionamento della ventilazione in una serra [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

In climi più freddi come quello nord europeo o per esempio in siti montani italiani nei quali ci sono delle estati miti, la necessità della ventilazione è minore e il rapporto tra serra apribile e superficie vetrata può scendere fino a 1/10.

3) Isolamento

Siccome l'obiettivo è di ridurre il consumo energetico dell'edificio aggiungendo una serra, la questione sull'isolamento termico della serra o della parete dell'edificio verso la serra è importante.

L'isolamento termico dell'involucro è importante per il rendimento dell'intero sistema:

- Isolamento interno: il calore che entra riscalda l'ambiente interno nelle ore di sole, ma non si accumula efficacemente sulle pareti essendo queste isolate, quindi non accumulando di calore, si raffredderanno velocemente.
- Isolamento esterno: il calore che entra riscalda sia l'ambiente che le masse termiche presenti. Quando non c'è più il sole, il calore accumulato viene rilasciato lentamente e non sarà disperso verso l'esterno grazie all'isolamento.

Abbiamo scelto di mettere l'isolante all'esterno (verso la serra) della parete divisoria per permettere all'aria della serra di riscaldarsi più velocemente e trasmettere questo calore per convezione aprendo le finestre delle aule.

Nel nostro caso non sappiamo a che punto la serra deve essere isolata: se l'isolamento sarebbe meglio sull'involucro della serra o sulle chiusure fra la serra e il resto dell'edificio. Per questo motivo studieremo questi due casi.

4) Schermature

Siccome l'involucro della serra è per la maggior parte vetrata, si deve trattare con cura il problema delle schermature per evitare i problemi di surriscaldamento durante i mesi intermedi ed estivi. Il problema è di ricevere il massimo di guadagni solari durante l'inverno

e di ridurre i raggi solari per le altre stagioni.

Si possono mettere sia delle schermature fisse sia delle schermature mobili.

- Schermature fisse: per evitare che i raggi solari raggiungono le superfici vetrate d'estate senza cambiare l'irraggiamento delle vetrate d'inverno si può mettere un oggetto orizzontale posto sopra la vetrata. Questo oggetto si può mettere sia sopra tutta la facciata, sia sopra ogni serramento. La posizione della schermatura deve permettere ai raggi invernali di colpire direttamente la superficie vetrata della serra, e di fermare i raggi estivi.
- Schermature mobili: per essere efficace, la schermatura deve evitare che i raggi solari attraversino la superficie trasparente, per questo le schermature devono trovarsi all'esterno.

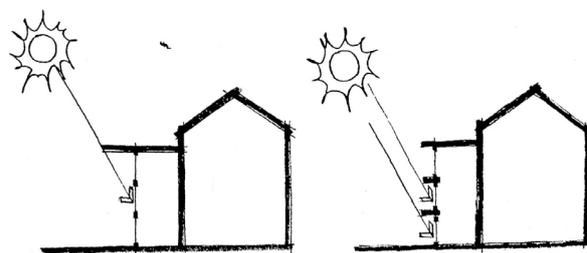


figura V.212: Schema dei diversi tipi di schermature fisse [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]

L'efficienza delle tende interne è molto bassa perché non impediscono i raggi solari di entrare nella serra e di riscaldare l'aria interna. I motivi di uso delle tende interne sono doppi: proteggere dalla radiazione diretta le masse termiche ed assicurare un comfort visivo per gli utenti.

I serramenti con doppio vetro e veneziana nell'intercapedine sono sconsigliati perché sono costosi e scarsamente efficienti.

2. SIMULAZIONI ENERGETICHE DELLA SERRA SUL PROGETTO

Per progettare la serra abbiamo deciso di fare delle simulazioni energetiche dell'edificio facendo variare alcuni parametri al fine di capire quali hanno un'influenza maggiore. Ciò che valuteremo non sarà solamente il consumo dell'edificio ma anche la variazione del costo in funzione delle scelte (tipo di vetro, spessore d'isolante, superficie,...) e l'energia grigia.

Lo scopo di questo studio non è di disegnare la serra, ma di capire l'influenza di ciascun parametro sul consumo energetico e sul costo finale per poter alla fine disegnare la serra adeguata al progetto da un punto di vista architettonico, energetico ed economico.

Per lo studio della serra abbiamo fatto diverse simulazioni:

- Studio semplice delle serre facendo variare la ventilazione, il coupling fra la serra e le aule didattiche retrostanti, le schermature e la quantità di superfici vetrate sui muri fra serra e edificio.
- Studio del funzionamento delle serre
- Studio di due serre facendo variare i parametri geometrici delle serre usando i valori migliori, trovati nelle simulazioni precedenti.
- Studio del progetto finale

Le prime simulazioni ci permettono di capire il funzionamento di una serra e l'influenza dei diversi parametri sul consumo.

L'ultima simulazione è stata fatta quando abbiamo scelto di fare due serre diverse per motivi architettonici ed energetici. Lo scopo era di capire l'influenza di ciascun parametro sul consumo energetico globale per poter darci il margine di manovra per il disegno architettonico in cui il consumo non varia tanto.

a) Studio semplice dell'aggiunta di una serra

Il primo studio che abbiamo fatto era quello di aggiungere una serra e guardare l'evoluzione delle perdite e dei guadagni dell'edificio per vedere se aggiungere una serra può permettere di diminuire il consumo per il riscaldamento.

Prima di trovare un software che potesse far variare i parametri da solo e quindi farci guadagnare tempo, abbiamo già fatto variare alcuni parametri a mano per vedere i cambiamenti sui consumi dell'edificio.

Per questo studio abbiamo modellizzato l'edificio in un modo più semplice per non renderlo troppo pesante.

Le stratigrafie utilizzate sono quelle esistenti, aggiungendo un isolamento esterno come l'avevamo de-

terminato precedentemente (30cm d'isolante).

1) Semplificazione del modello geometrico

Siccome non avevamo determinato la distribuzione degli spazi interni, tranne le zone di circolazione, abbiamo considerato solamente tre tipi di zone termiche: le serre, le circolazioni, e gli altri spazi. Il numero di persone per metro quadro in questi ultimi spazi è uguale al numero di persone per metro quadro medio negli spazi equivalenti esistenti.

2) Semplificazione delle impostazioni

Per quanto riguarda il riscaldamento, abbiamo messo in tutti gli spazi riscaldati la stessa impostazione, cioè gli spazi sono riscaldati, se necessario, dal lunedì al giovedì dalle 7 alle 17 e il venerdì dalle 7 alle 12 (basandoci sugli orari di lezione), dal 15 di ottobre fino al 15 di aprile. La variabile che tiene conto di questi parametri si chiama HEAT.

Il valore di riscaldamento è:

$$\text{RISCALDAMENTO} = 15 \times \text{HEAT} + 5$$

Questo significa che quando non chiediamo il riscaldamento, non funziona, a meno che la temperatura interna sia inferiore a 5°C. Quando chiediamo il riscaldamento, funziona per riscaldare l'ambiente a 20°C (15°C+5°C).

Per il raffrescamento, abbiamo impostato in tutti gli spazi un impianto di raffrescamento che funziona (se è necessario) dal lunedì al giovedì dalle 7 alle 17 e il venerdì dalle 7 alle 12 (basandoci sugli orari di lezione) dal 15 di aprile fino al 15 di ottobre. Inoltre, abbiamo aggiunto il fatto che non vorremo avere impianti di raffrescamento nella scuola, le temperature di consegna sono calcolate basandoci sul comfort adattivo.

Abbiamo comunque impostato un sistema di raffrescamento, al fine di poter ottimizzare un unico valore (il consumo) e di non dover trovare un compromesso tra comfort e consumo. Il raffrescamento funzionerà quando la temperatura non sarà più sopportabile secondo il comfort adattivo e raffrescherà fino alla temperatura massima ammissibile. (Queste temperature sono descritte nella parte: "III. Studio energetico", "B. Studio Termico dell'esistente".)

Per le infiltrazioni dovute alla permeabilità dell'edificio, abbiamo scelto il valore di 0.5 volume/ora che corrisponde alla classe A secondo Casaclima, classe che ci auguriamo di raggiungere.

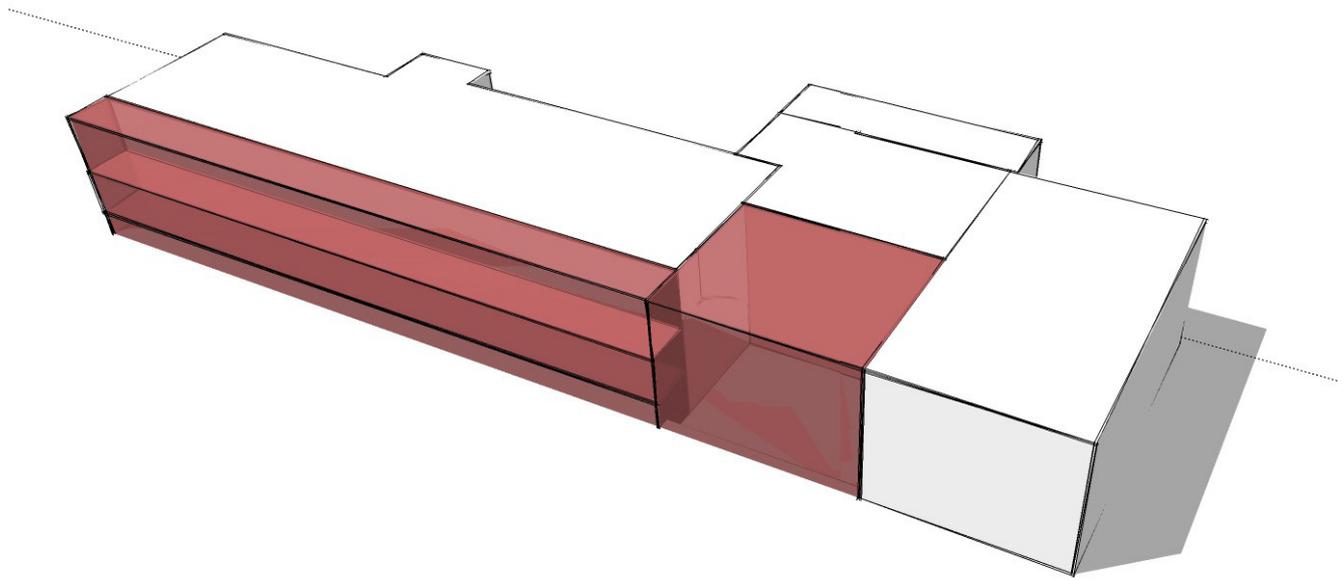
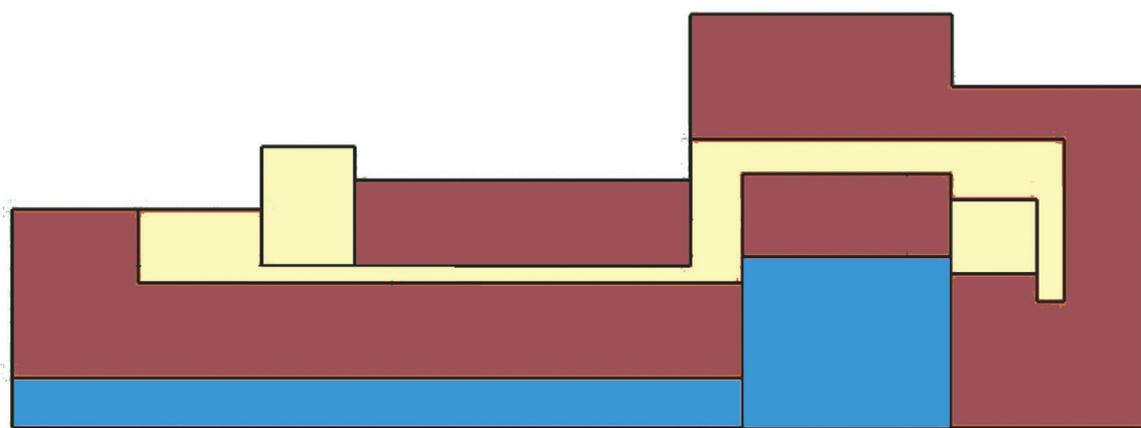
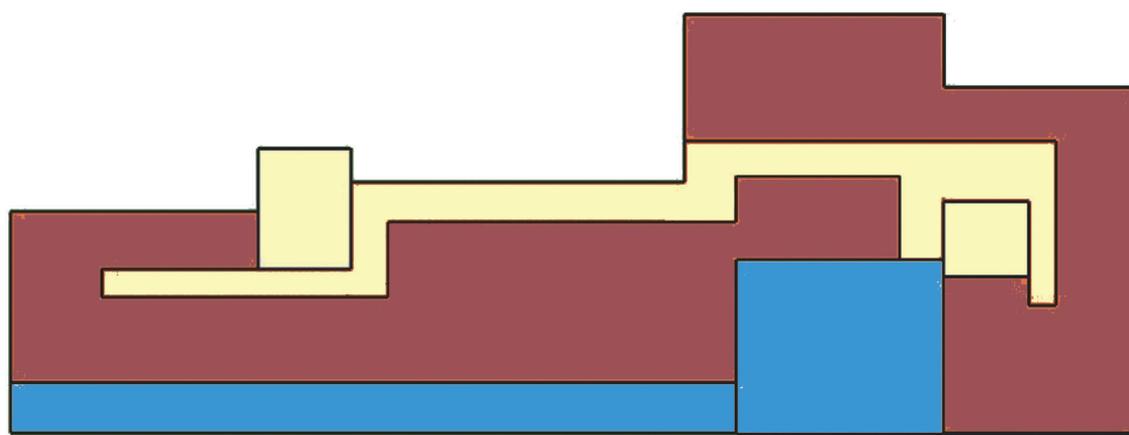


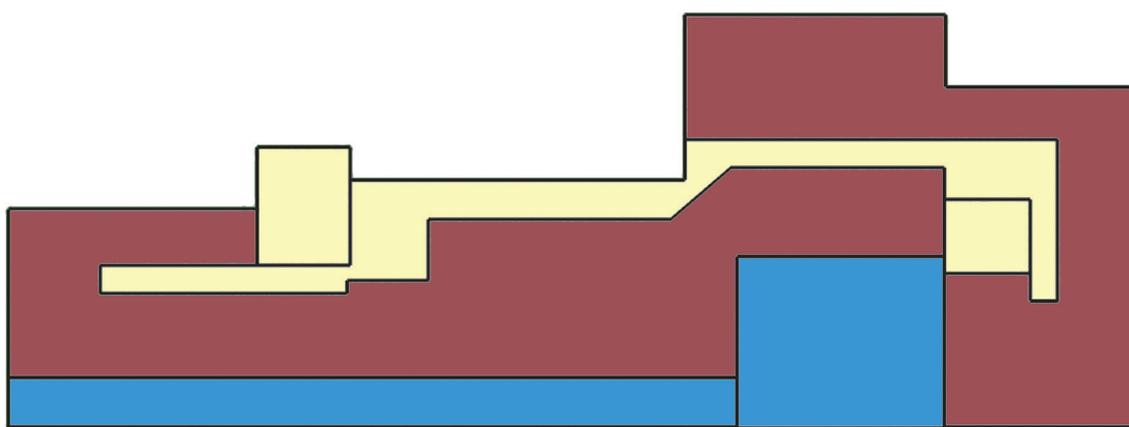
figura V.213: 3D del modello usato per la simulazione su Trnsys



Primo Piano



Piano Terra



Piano Seminterrato

figura V.214: Zone termiche del modello usato per le simulazioni su Trnsys

3) Validazione del modello

Per validare il modello che studieremo in questa parte, abbiamo confrontato il consumo del modello dell'edificio esistente, al quale abbiamo aggiunto un isolamento (vedere parte "III. Studio energetico"), al consumo di questo nuovo modello, al quale abbiamo tolto le serre. In questo modo, i due modelli, che corrispondono all'edificio esistente isolato, dovrebbero avere un consumo equivalente.

Abbiamo verificato che questi due modelli hanno un consumo simile.

4) Risultati

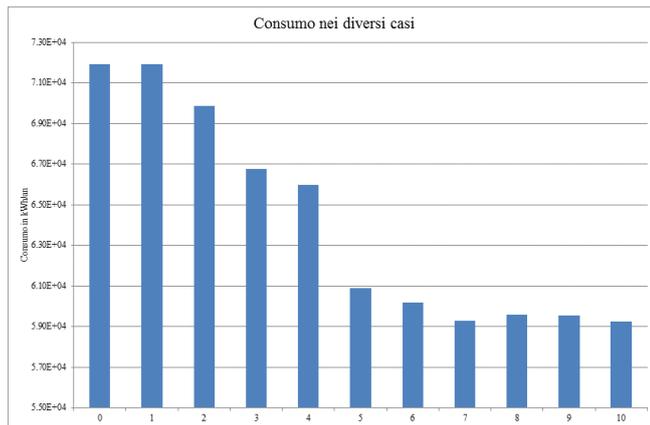


figura V.215: Paragone del consumo dell'edificio nei diversi casi studiati

Caso 0: Primo modello con 30 cm d'isolante

Caso 1: Secondo modello con 30 cm d'isolante

Caso 2: Aggiunta di una serra con delle finestre più grandi possibili.

Caso 3: Cambiamento del vetro della serra per prenderne uno con g_value (percentuale di radiazione solare che attraversano il vetro) elevato e U_value (trasmissione del serramento) basso.

Caso 4: Coupling fra l'aula 33 (la più calda perché piccola e esposta a sud) e la grande serra quando la temperatura della serra diventa superiore a 21°C. Il coupling si fa con un scambio di 1 volume/ora.

Caso 5: Coupling fra ogni aula e la serra con lo stesso set-point e lo stesso volume/ora.

Caso 6: Coupling di 1.5 volume/ora quando la temperatura della serra diventa superiore a 21°C fino a che quest'ultima diventa inferiore a 20°C.

Caso 7: Coupling di 3 volume/ora quando la temperatura della serra diventa superiore a 21°C fino a che quest'ultima diventa inferiore a 20°C.

Caso 8: Coupling di 3 volume/ora quando la temperatura della serra diventa superiore a 19°C fino a che quest'ultima diventa inferiore a 18°C.

Caso 9: Coupling di 3 volume/ora quando la temperatura della serra diventa superiore a 20°C fino a che quest'ultima diventa inferiore a 18°C.

Caso 10: Coupling di 3 volume/ora quando la temperatura della serra diventa superiore a 20°C fino a che quest'ultima diventa inferiore a 20°C.

Sul grafico, si vede che il consumo dell'edificio per il riscaldamento diminuisce in modo significativo tre volte:

- All'aggiunta della serra, diminuendo le perdite di calore attraverso i muri esposti a sud.
- Al cambiamento dei serramenti della serra, permettendo a più raggi solari di entrare nella serra (T_sol elevato) e conservando meglio questo calore (U_value basso)
- All'aggiunta del coupling fra ogni zona accanto alla serra e la serra (utilizzare il calore accumulato nella serra per trasmetterlo per convezione alle altre zone)

Con questo grafico abbiamo solo studiato il fabbisogno di riscaldamento. Infatti nell'ultimo caso (che è il migliore per questo studio) abbiamo una diminuzione del fabbisogno di riscaldamento del 17.6% (passa da 72000 kWh/anno a 59000 kWh/anno per le parti riscaldate dell'edificio).

b) Prima ottimizzazione

Per valutare l'influenza dei parametri che studiamo, abbiamo scelto di ottimizzare il consumo di riscaldamento e di raffrescamento dell'edificio, facendo variare i parametri di cui vogliamo capire l'influenza.

1) Serramenti

Abbiamo considerato un serramento a doppio vetro con argon. Le sue caratteristiche sono:

- U-value = 1.4 W/m²K
- g-value = 0.589
- T-sol = 0.426
- Rf-sol = 0.266
- T-vis = 0.706

2) Impostazione del coupling

Il primo studio riguarda la percentuale di superficie trasparenti tra serra ed esterno e tra serra ed interno, e gli scambi tra gli spazi interni (serra e aule).

Il coupling fra serra e gli ambienti interni corrisponde ad uno scambio d'aria fra i diversi spazi.

$$\text{Coupling} = C_1 \times ((1 - C_2) + C_2 \times C_3) \times C_4$$

dove:

- C_4 corrisponde al volume ora di scambio d'aria
- C_2 vale 1 quando la temperatura dell'aula più calda diventa superiore a T2 e torna a 0 quando questa temperatura diventa inferiore a T2b.
- C_1 vale 1 quando la temperatura della serra diventa superiore a T1 e torna a 0 quando questa tem-

peratura diventa inferiore a T1b.

- C_3 vale 1 quando la temperatura dell'aula più calda è superiore alla temperatura della serra.

Con questa impostazione, il coupling funziona sia per riscaldare l'ambiente interno che per raffrescarlo.

C_4 , T1, T1b, T2, T2b sono le variabili della simulazione per capire come deve funzionare la serra per essere più performante possibile.

3) Parametri variabili

I parametri variabili sono:

- la percentuale di superficie vetrata fra la serra e gli ambienti interni
- percentuale di superficie vetrata per la serra
- il coupling
- la temperatura di set-point per il coupling

4) Risultati

I valori seguenti corrispondono al fabbisogno minore di riscaldamento:

- 30% di finestre fra serra e ambienti interno
- 95% di vetrata per la facciata a sud e per il tetto della serra
- 5% di vetrata per le facciate ad est ed ovest.
- un coupling di 45 V/h

Temperatura	Valore °C
T1	21
T1b	22
T2	26
T2b	21

figura V.216: Risultati dell'ottimizzazione del consumo di riscaldamento dell'edificio

Per il momento abbiamo fatto lo studio solo per minimizzare il riscaldamento volendo massimizzare il guadagni solari d'inverno. Il lavoro sulle schermature e sulla ventilazione ci permetterà di raggiungere delle temperature accettabile per il comfort degli utenti.

Facciamo la stessa ottimizzazione aggiungendo le schermature e la ventilazione, per minimizzare il fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento. Infatti vogliamo minimizzare le due fabbisogni per essere sicuri che alla fine dello studio non sarà necessario il raffrescamento nella scuola.

Fissiamo i parametri studiati precedentemente per la dimensione delle finestre e per le temperature.

c) Seconda ottimizzazione

1) Impostazione della ventilazione, di schermature variabili per la serra

La ventilazione della serra è impostata come se fosse l'aria esterna che entra nella serra con un scambio d'aria definito come segue:

$$\text{Ventilazione} = V_1 \times V_2 \times V_3$$

dove:

- V_1 vale 1 quando la temperatura dell'aula più calda diventa superiore a T4 e torna a 0 quando questa temperatura diventa inferiore a T4b.
- V_2 vale 1 quando la temperatura della serra diventa superiore a T3 e torna a 0 quando questa temperatura diventa inferiore a T3b.
- V_3 è la quantità d'aria che si scambia quando la ventilazione funziona.

Le schermature della serra sono impostate per essere chiuse quando la temperatura della serra diventa troppo alta.

$$\text{Schermature} = S_1 \times S_2 \times S_3$$

dove:

- S_1 vale 1 quando la temperatura dell'aula più calda diventa superiore a T4 e torna a 0 quando questa temperatura diventa inferiore a T4b.
- S_2 vale 1 quando la temperatura della serra diventa superiore a T5 e torna a 0 quando questa temperatura diventa inferiore a T5b.
- S_3 è la percentuale di schermature. È una variabile della simulazione.

2) Parametri variabili

I parametri variabili sono:

- S_3 , la quantità di schermature
- C_4 , il flusso d'aria per il coupling
- V_3 , il flusso d'aria per la ventilazione
- le temperature T3, T3b, T4, T4b, T5 e T5b

3) Risultati

Parametri	Valore
S3	46 %
C4	10 V/h
V3	20 V/h
T3	25 °C
T3b	24.375 °C
T4	25.44 °C
T4b	21 °C

T5	30.2 °C
T5b	25.375 °C

figura V.217: Risultati dell'ottimizzazione del consumo di riscaldamento e raffreddamento dell'edificio

Con questi parametri ottimizzati otteniamo un consumo per il riscaldamento di 22.8 kWh/m²a. Proveremo di cambiare la geometria della serra per capire l'influenza dei diversi parametri sul consumo totale dell'edificio.

d) Scambi di calore in funzione della geometria della serra

Questo studio riguarda più particolarmente i scambi di calori tra l'esterno, la serra e l'interno. Lo scopo è di capire il funzionamento della serra, con la geometria descritta nella parte precedentemente. I scambi studiati sono di tipo:

- radiativi: in funzione della percentuale di vetro e di schermature, e dell'orientamento delle parete trasparenti
- convettivi: attraverso il coupling tra gli ambienti interni e la ventilazione tra ambienti interni ed esterno.
- conduttivi: in funzione della tipologia di vetro e dello spessore di isolante

1) Parametri variabili

Per questo studio, i parametri variabili sono:

- La ventilazione (temperature di avviamento e volume di ricambio);
- Il coupling (temperature di avviamento e volume di scambio);
- Le schermature (percentuale e temperature di abbassamento e alzamento);
- La profondità della serra;
- L'inclinazione delle parete e del tetto (verticalmente e orizzontalmente);
- Il percentuale di superficie vetrata sulle pareti e il tetto;

Percentuale di vetrata
Percentuale di schermature

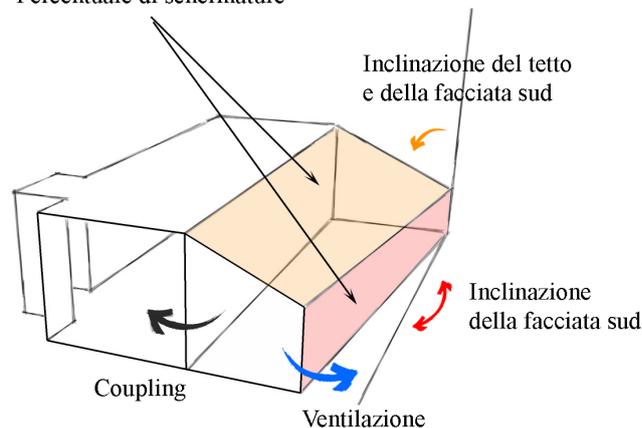


figura V.218: Schema di spiegazione della simulazione

2) Orientamento

In una prima parte studieremo l'influenza dell'inclinazione della facciata a sud e del tetto e dell'orientamento della facciata sud sul consumo di riscaldamento e totale:

► Consumo di riscaldamento

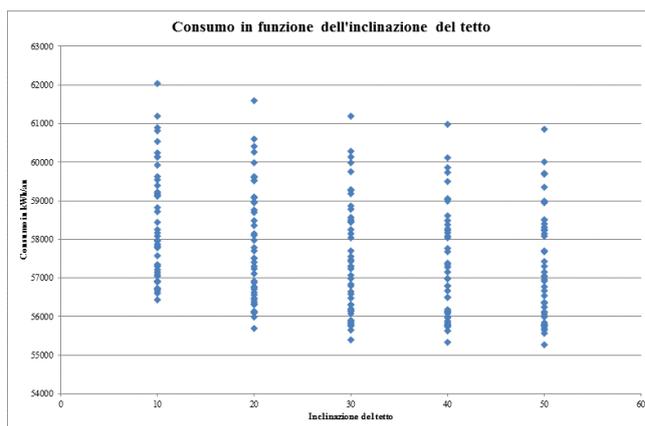


figura V.219: Consumo dell'edificio in funzione dell'inclinazione del tetto

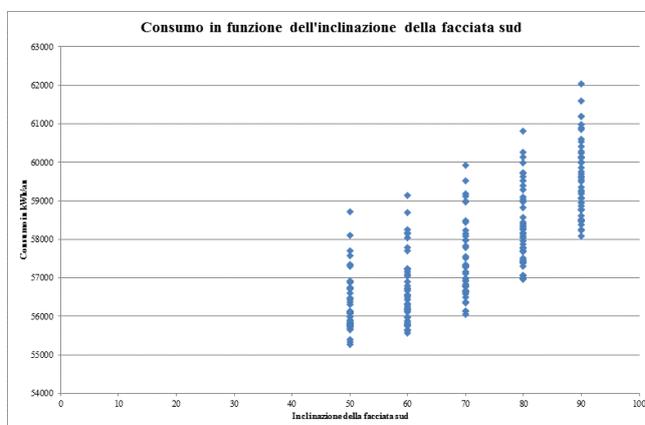


figura V.220: Consumo dell'edificio in funzione dell'inclinazione della facciata a sud

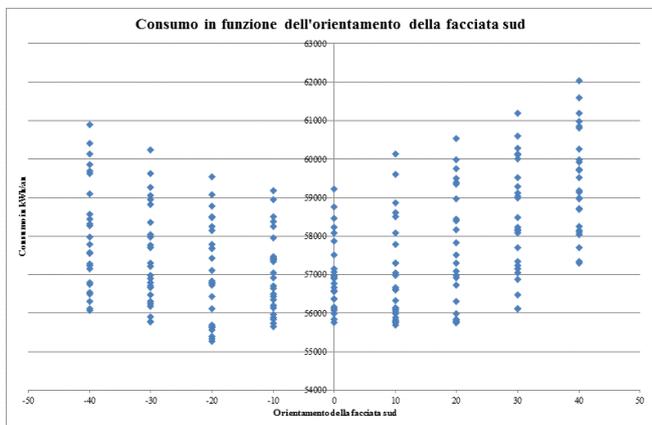


figura V.221: Consumo dell'edificio in funzione dell'orientamento della facciata a sud

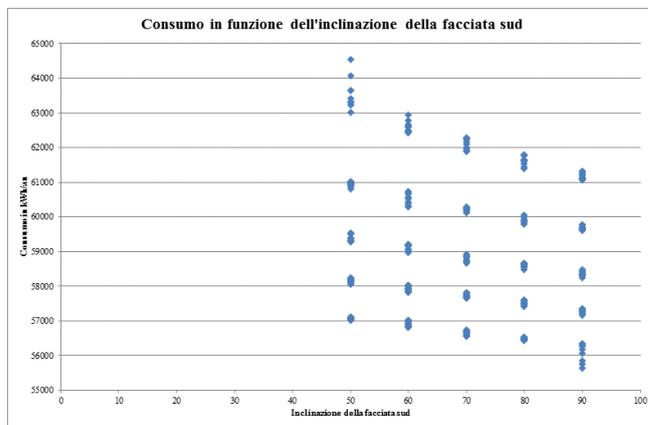


figura V.223: Consumo dell'edificio in funzione dell'inclinazione della facciata a sud

Il parametro che ha una maggiore influenza sul consumo di riscaldamento sembra essere l'inclinazione della facciata a sud. Infatti per ricevere il maggior numero di raggi solari è meglio avere una inclinazione della facciata.

L'inclinazione del tetto ha un'influenza minore rispetto alla facciata sud.

Sembra meglio avere la facciata sud un po' orientata ad ovest. Può derivare dal fatto che durante l'inverno si può captare di più i raggi solari alla fine del pomeriggio quando l'aria esterna si raffresca.

► Consumo totale

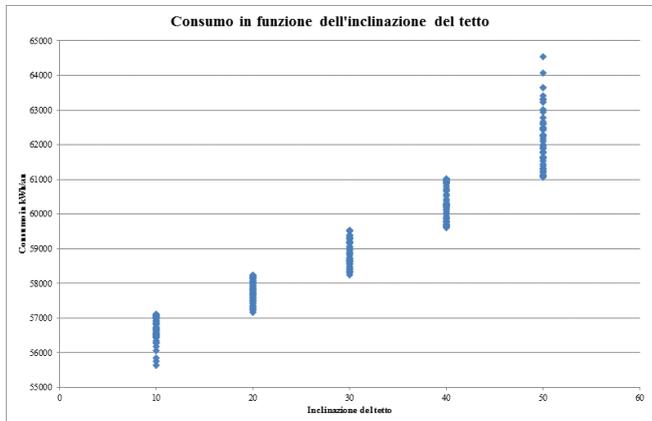


figura V.222: Consumo dell'edificio in funzione dell'inclinazione del tetto

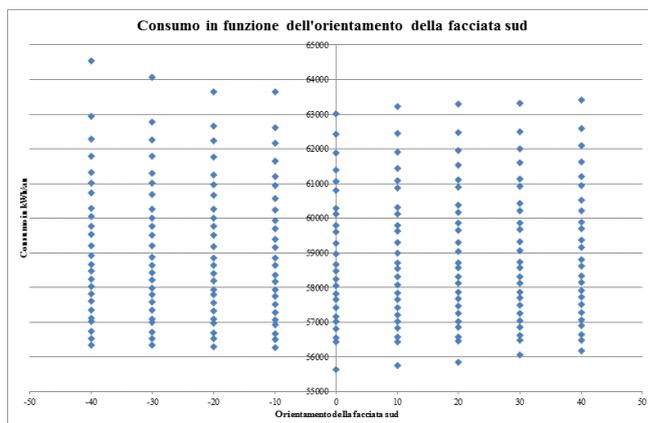


figura V.224: Consumo dell'edificio in funzione dell'orientamento della facciata a sud

L'inclinazione del tetto ha un'influenza maggiore sul consumo totale che sul riscaldamento. Questo viene dal fatto che le superfici orizzontali o poco inclinate ricevono più raggi solari durante l'estate quando non bisogna riscaldare l'ambiente interno.

Tutti i parametri hanno un'influenza al contrario di ciò che si osserva per il riscaldamento. Vuol dire che il raffrescamento diventa molto importante per questi casi. Inoltre per lo studio geometrico della serra ci sembra più giusto provare a diminuire al massimo i fabbisogni di riscaldamento. Cercheremo dopo con la ventilazione e le schermature di ottenere delle temperature di comfort per gli utenti.

3) Superficie

In una seconda parte, scegliendo l'orientamento e le inclinazioni della facciata e del tetto migliori per il riscaldamento (340°, 50°, 50°), studieremo l'influenza dei parametri seguenti sul consumo di riscaldamento e di raffrescamento (separatamente):

- Il volume della serra;
- Le superfici ad ovest, sud e del tetto;
- La percentuale di superfici vetrate su ogni facciata.

► **Consumo di riscaldamento**

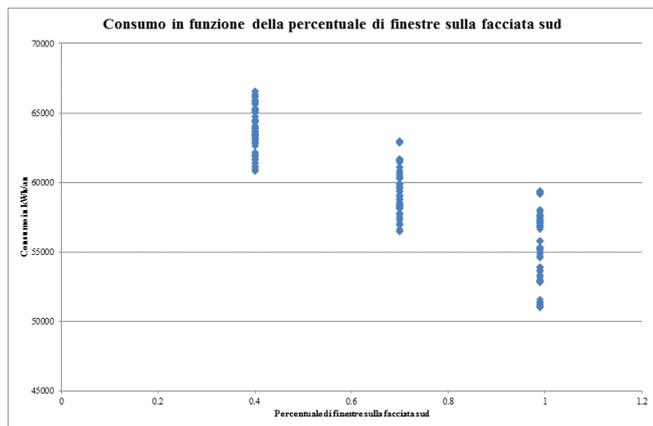


figura V.225: Consumo di riscaldamento dell'edificio in funzione della percentuale di finestre sulla facciata sud

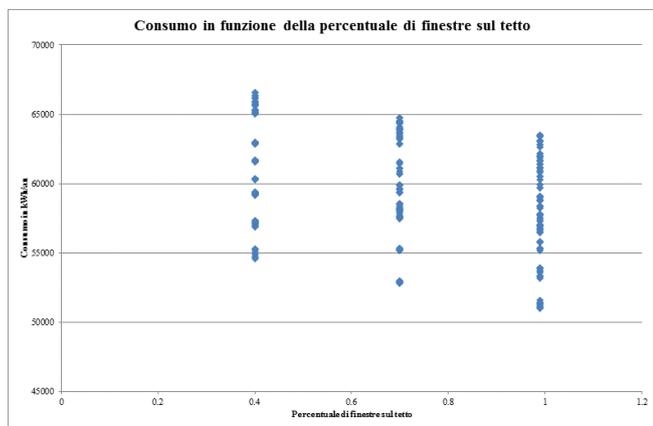


figura V.226: Consumo di riscaldamento dell'edificio in funzione della percentuale di finestre sul tetto

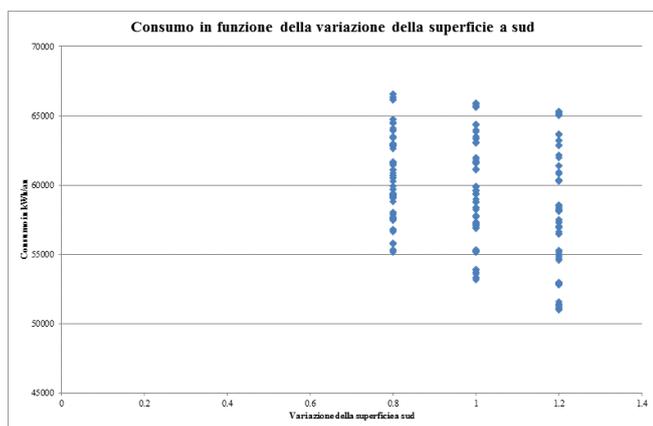


figura V.227: Consumo di riscaldamento dell'edificio in funzione della variazione della superficie a sud

Si osserva che l'influenza maggiore è per la percentuale di finestre sulla facciata sud e che il fabbisogno minimo di riscaldamento risulta quando le superfici vetrate sono il più grande possibili.

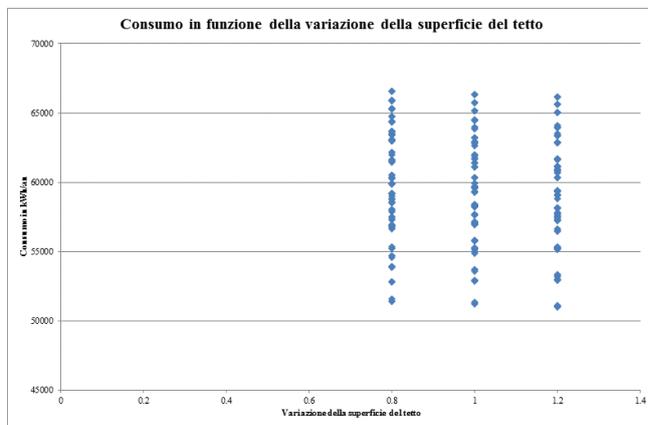


figura V.228: Consumo di riscaldamento dell'edificio in funzione della variazione della superficie del tetto

► **Consumo di raffrescamento**

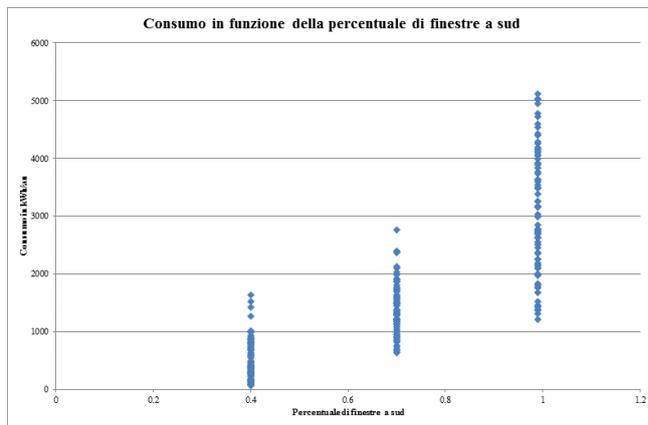


figura V.229: Consumo di raffrescamento dell'edificio in funzione della percentuale di finestre sulla facciata sud

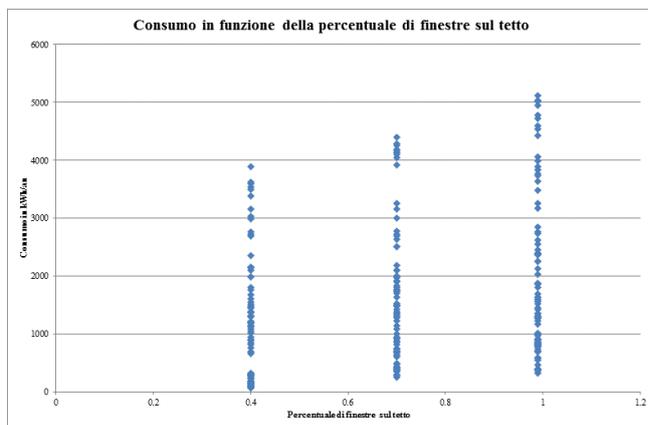


figura V.230: Consumo di raffrescamento dell'edificio in funzione della percentuale di finestre sul tetto

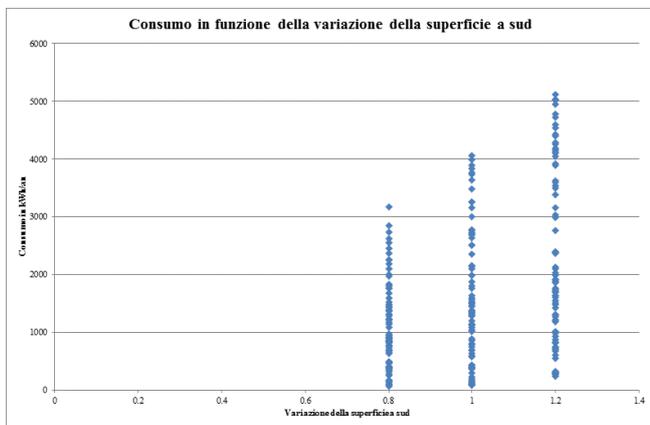


figura V.231: Consumo di raffrescamento dell'edificio in funzione della variazione della superficie a sud

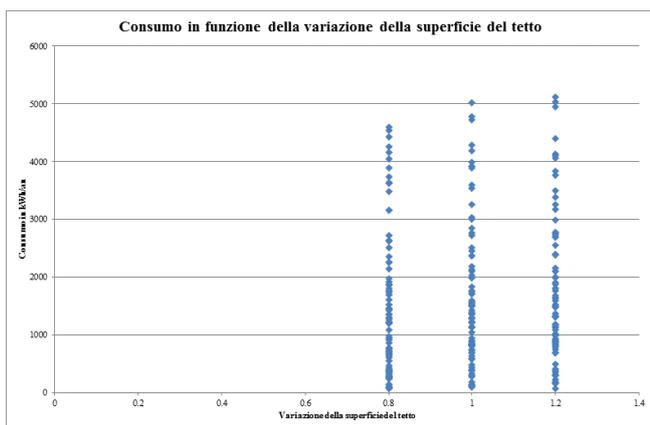


figura V.232: Consumo di raffrescamento dell'edificio in funzione della variazione della superficie del tetto

Il consumo migliore per il riscaldamento che otteniamo alla fine di queste simulazioni è 54500 kWh/an, sia 15.9 kWh/m²/a.

e) Studio del progetto

Lo scopo di questo studio è doppio:

- verificare che la serra progettata permetta di raggiungere dei consumi poco superiori a quelli della serra ottimizzata precedentemente
- dimensionare l'isolamento della serra e delle schermature. Per l'isolamento della serra intendiamo l'isolamento sia con l'esterno (solaio, serramenti) che con l'interno (solaio interno, serramenti fra serra e interno).

Il modello termico usato per le simulazioni è stato cambiato seguendo le nostre scelte architettoniche e distributive. Di conseguenza abbiamo cambiato le chiusure, le pareti e le finestre con quelle che abbiamo scelto per il progetto finale e abbiamo definito 5 tipi di spazi diversi:

- Le aule
- Gli uffici
- I Corridoi
- La Mensa

- Le serre

1) Impostazione

Il riscaldamento, il raffrescamento, le infiltrazioni e le schermature sono impostati come segue per tutte le zone tranne per le serre:

► Riscaldamento

Per le temperature interne dell'edificio abbiamo impostato:

- Per i corridoi:

$$18^{\circ}\text{C} \times \text{presenza} + 0^{\circ}\text{C}$$
- Per gli uffici, le aule e la mensa:

$$20^{\circ}\text{C} \times \text{presenza} + 0^{\circ}\text{C}$$

Questo significa che in presenza di persone il riscaldamento funziona per riscaldare i spazi a 18°C per i corridoi, e a 20°C per gli uffici, la mensa e le aule didattiche. In assenza di persone, il riscaldamento funziona quando la temperatura interna dell'edificio scende al di sotto del 0°C.

Abbiamo impostato due riscaldamenti diversi per gli spazi con permanenza di persone e quelli dove non c'è permanenza di persone. Inoltre nei corridoi le persone circolano e quindi il fabbisogno diminuisce a causa dell'attività fisica degli utenti.

► Raffrescamento

Per il funzionamento del raffrescamento, ci siamo basati sul comfort adattivo. Abbiamo calcolato le temperature a partire dal quale gli utenti sono in situazione di discomfort. Questa temperatura si chiama T_{cool} . Il raffrescamento funziona in presenza di persone quando la temperatura T_{cool} è raggiunta nell'aula fino a raggiungere $T_{\text{cool}} - 1^{\circ}\text{C}$, nell'assenza di persone funziona quando la temperatura interna raggiunge 35°C.

L'obiettivo delle simulazioni è di minimizzare il consumo globale di riscaldamento e di raffrescamento. Alla fine studieremo il comfort della scuola senza impianto di raffrescamento per confermare che non è necessario averne uno.

► Infiltrazioni

Le infiltrazioni corrispondono sia alle infiltrazioni dovute ai serramenti (0.5 volumi/ora secondo la classe A di CasaClima), sia alla ventilazione dovuta all'apertura delle finestre (5 volumi/ora). C'è la ventilazione quando la temperatura dall'aula diventa superiore a $T_{\text{cool}} - 1^{\circ}\text{C}$ in estate e 24°C in inverno.

► Schermature

Le schermature sono attive quando la temperatura dell'aula diventa superiore a 24°C fino a diventare inferiore a 20°C.

Per le serre, abbiamo usato i risultati delle simulazioni precedenti:

► Coupling

Il coupling fra serra e gli ambienti interni corrisponde ad uno scambio d'aria fra i diversi spazi.

$$\text{Coupling} = C_1 \times ((1 - C_2) + C_2 \times C_3) \times C_4$$

dove:

- C_4 corrisponde al volume ora di scambio d'aria e vale 10 V/h.
- C_2 vale 1 quando la temperatura dell'aula più calda diventa superiore a 26 e torna a 0 quando questa temperatura diventa inferiore a 21.
- C_1 vale 1 quando la temperatura della serra diventa superiore a 21 e torna a 0 quando questa temperatura diventa inferiore a 22.
- C_3 vale 1 quando la temperatura dell'aula più calda è superiore alla temperatura della serra.

Con questa impostazione, il coupling funziona sia per riscaldare l'ambiente interno che per raffrescarlo.

► Ventilazione serra

$$\text{Ventilazione} = V_1 \times V_2 \times V_3$$

dove:

- V_1 vale 1 quando la temperatura dell'aula più calda diventa superiore a 25.44 e torna a 0 quando questa temperatura diventa inferiore a 21.
- V_2 vale 1 quando la temperatura della serra diventa superiore a 25 e torna a 0 quando questa temperatura diventa inferiore a 24.375.
- V_3 è la quantità d'aria che si scambia quando la ventilazione funziona e vale 20 V/h.

► Schermature serre

Le schermature della serra sono impostate per essere chiuse quando la temperatura della serra diventa troppo alta.

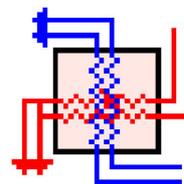
$$\text{Schermature} = S_1 \times S_2 \times S_3$$

dove:

- S_1 vale 1 quando la temperatura dell'aula più calda diventa superiore a 25.44 e torna a 0 quando questa temperatura diventa inferiore a 21.
- S_2 vale 1 quando la temperatura della serra diventa superiore a 30.2 e torna a 0 quando questa temperatura diventa inferiore a T5b.
- S_3 è la percentuale di schermature e vale 46 %.

► Ricambio d'aria

Per questa ultima analisi, abbiamo impostato una ventilazione che permette il ricambio d'aria per assicurare il comfort dovuto alla qualità dell'aria. Nello software si può usare un Heat exchanger/cross flow/both fluids unmixed, è il tipo 5e:



Input dell'oggetto:

- Temperatura del fluido esterno che entra
- Flusso del fluido esterno che entra
- Temperatura del fluido interno che entra
- Temperatura del fluido interno che entra
- Coefficiente globale del trasferimento di calore

Output dell'oggetto:

- Temperatura del fluido che esce all'esterno
- Flusso del fluido che esce all'esterno
- Temperatura del fluido che esce all'interno
- Flusso del fluido che esce all'interno
- Coefficiente del trasferimento di calore
- Efficienza dello scambiatore di calore

Il flusso d'aria dipende dalla norma e ha un valore di 30 m³/ora/persona.

La ventilazione funziona sempre in presenza di persone nella scuola. Permette di assicurare una buona qualità dell'aria.

Siccome abbiamo 5 tipi di zone diverse, abbiamo per la ventilazione:

- Nelle aule con una superficie per persone di 2 m², la ventilazione sarà di 5 volumi/ora
- Negli uffici, c'è una persona per ufficio. La ventilazione sarà di 30 m³/ora.
- Nei corridoi e nelle serre la ventilazione non è impostata perché non ci sono permanenze di persone.
- Nella mensa, che ha una capacità di accoglienza di 210 persone. La ventilazione è impostata a 3900m³/ora.

2) Ottimizzazione del progetto

Le variabili della simulazione sono:

- L'isolamento di CO6 (chiusura orizzontale della serra), CV1serre (chiusura fra serra e il resto dell'edificio) e PO2 (parete orizzontale fra la serra e il resto dell'edificio).
- La percentuale di schermature per i due tipi di serre
- Il tipo di serramento per la mensa, e le due serre

Per i serramenti, i diversi valori della simulazione sono quelli per il vetro singolo (S), il doppio vetro (D) e il triplo vetro (T):

Design	U-value	g-value	T-sol	Rf-sol	
S	4	5.68	0.855	0.83	0.075
D	4/15/4	0.75	0.613	0.521	0.355
T	4/10/4/10/4	0.52	0.585	0.456	0.254

figura V.233: Tabella dei serramenti

	Caso 1	Caso 2
Spessore d'isolante per CO6 (m)	0.1	0.4
Spessore d'isolante per PV2 (m)	0.1-0.2-0.3-0.4	0.1
Spessore d'isolante per CV1serre (m)	0.2-0.3-0.4-0.5	0.2-0.3-0.4-0.5
Tipo serramento Serra	Singolo-Doppio-Triplo	Triplo
Tipo serramento Mensa	Singolo-Doppio-Triplo	Singolo-Doppio-Triplo
Tipo serramento intermedio	Singolo-Doppio-Triplo	Singolo-Doppio-Triplo
Percentuale di schermature nelle piccole serre	0.2-0.3-0.4	0.2-0.3-0.4
Percentuale di schermature nella grande serra	0.2-0.3-0.4	0.2-0.3-0.4

figura V.234: Tabella delle simulazioni realizzate con GenOpt

Per tutti questi casi, ci siamo interessati al consumo energetico ed al costo.

Per i costi abbiamo considerato - secondo il prezzario di Bolzano - i prezzi dei diversi tipi di finestre, dell'isolante e del consumo dell'edificio. Abbiamo considerato che la speranza di vita degli elementi considerati era di 50 anni, per poter calcolare il costo annuale e paragonarlo al costo annuale per il riscaldamento e il raffrescamento.

Per l'energia abbiamo tenuto conto dell'energia grigia dei materiali e l'energia necessaria per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio.

Visto che le due variabili ci interessano, abbiamo fatto un ratio per scegliere il caso migliore secondo il nostro metodo:

$$R = \frac{\text{Costo}_{\max} - \text{Costo}}{\text{Costo}_{\max} - \text{Costo}_{\min}} \times \frac{\text{Energia}_{\max} - \text{Energia}}{\text{Energia}_{\max} - \text{Energia}_{\min}}$$

Questo valore ci permette di valutare le due variabili come se abbiano la stessa importanza.

Abbiamo studiato i casi seguenti per paragonare la variazione del costo e dell'energia globali e scegliere la soluzione in concordanza con il progetto. Una volta fatta questa scelta, verificheremo il comfort della scuola.

	Caso Migliore
Isolamento CO6	0.1
Isolamento PV2	0.1
Isolamento CV1serre	0.3
Tipo serramento Serra	Doppio
Tipo serramento Mensa	Triplo
Tipo serramento intermedio	Doppio
Schermature Serre1	0.2
Schermature Serre2	0.2

figura V.235: Risultato migliore ottenuto con GenOpt

Una volta scelti questi parametri, abbiamo studiato il consumo per mese dell'edificio e il comfort. I risultati sono:

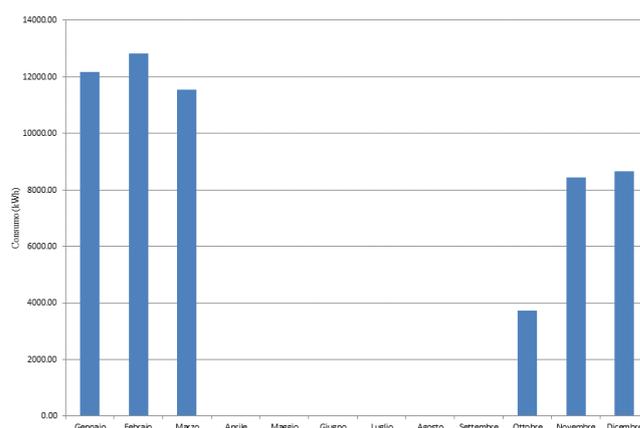


figura V.236: Consumo mensile della scuola

Con l'impostazione del ricambio d'aria previsto dalla norma, abbiamo un consumo per il riscaldamento di 15 kWh/°a.

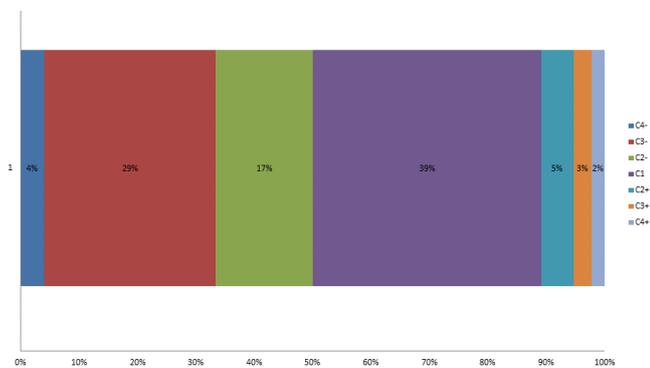


figura V.237: Footprint del comfort della scuola sull'anno

Per il 94% delle ore di uso della scuola, il comfort si colloca nelle classe 1, 2 o 3. Il discomfort a causa del freddo è dovuto alle stagioni intermedie, quando il riscaldamento è spento, e le temperature esterne non sono abbastanza elevate.

Abbiamo impostato un valore di consegna per il riscaldamento di 20°C quando ci sono delle persone nella scuola. Secondo la norma che permette di valutare il comfort negli edifici, questo valore corrisponde al limite superiore della classe C3-. Per questo motivo che ci numerose ore che sono considerate come troppo fredde.

Possiamo dire che non serve mettere un raffrescamento per 2% delle ore.

Di seguito, abbiamo valutato il comfort nelle serre. Le temperature nelle serre a diversi momenti dell'anno sono rappresentati sui grafici seguenti.

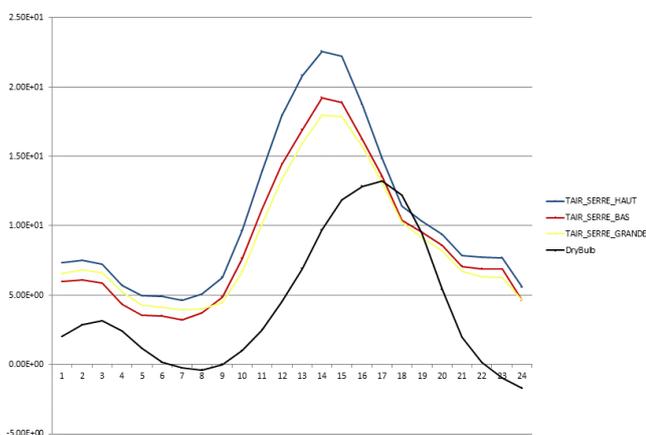


figura V.238: Temperature delle serre il 15 gennaio

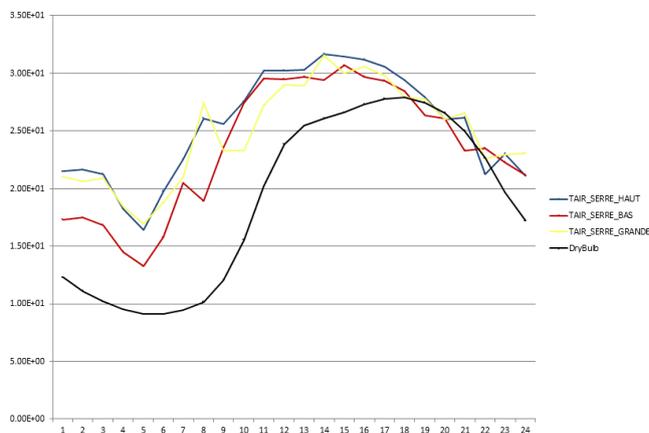


figura V.239: Temperature delle serre il 15 maggio

Non possiamo considerare che le temperature nelle serre devono soddisfare alle stesse esigenze che le aule o gli uffici. Però, è importante di verificare che le temperature sono accettabile perché la serra sia un spazio fruibile.

Vediamo che durante l'inverno, le temperature interne delle serre raggiungono delle temperature di comfort verso mezzogiorno, e che sono superiori a 15 °C da mezzogiorno alle 17.

Durante le giornate più calde, la serra raggiunge delle temperature di comfort la mattina e il pomeriggio. A mezzogiorno le temperature sono più elevate, però non sono insopportabili. Inoltre si vede l'azione della ventilazione: quando funziona, le temperature delle serre scendono subito di alcuni gradi. Il controllo della ventilazione è stato molto difficile da modellizzare sui software nelle serre, a causa delle variazioni rapidi di temperature.

3) Studio senza il ricambio d'aria

Per poter paragonare i nostri risultati con i precedenti, abbiamo fatto un'ultima simulazione senza ricambio d'aria.

Con questa simulazione otteniamo un consumo energetico dell'edificio di 13.65 kWh/m²an. Questo valore è più basso del valore alla fine delle simulazioni geometriche (15,9 kWh/m²). Questo è dovuto al fatto che la geometria dei due modelli sono diversi, in particolare i serramenti: abbiamo sostituito i doppi vetri con tripli vetri.

Possiamo dedurre di quest'analisi che le nostre scelte architettoniche sulle serre non hanno provocato un aumento notevole del consumo.

VI. STUDIO DEL MODULO

A. STUDIO DI UN VOLUME TEORICO.....	173
1. Introduzione.....	173
2. Metodo.....	173
a) Definizione del volume.....	173
b) Risultati da ottimizzare.....	173
c) Calcolo dell'energia grigia.....	173
d) Calcolo dei costi.....	176
e) Calcolo dell'energia per l'illuminamento, il riscaldamento e il raffrescamento.....	177
f) Calcolo dell'illuminamento.....	179
3. Studio dei parametri continui.....	181
4. Risultati.....	192
a) Orientamento / Dimensione finestra.....	192
b) Impostazione di una schermatura.....	194
c) Orientamento / rapporto S/V.....	197
d) Spessore isolante.....	199
e) Finestra orizzontale/spessore di isolante.....	201
f) Dimensione finestra muro / dimensione finestra tetto.....	202
g) Differenza doppio vetro / triplo vetro.....	202
h) Tecnologia lorda/leggera.....	205
B. STUDIO DEL MODULO EFFETTIVO.....	208
1. Metodo.....	208
a) Richiamo dei vincoli architettonici.....	208
b) Definizione delle zone termiche.....	209
c) Nuova problematica di studio.....	210
d) Compromesso tra costo ed energia.....	211
2. Risultati.....	212
a) Aule didattiche a nord.....	212
b) Conclusione.....	215
C. CASO DELLE FINESTRE DELL'EDIFICIO ESISTENTE.....	216
D. POSIZIONAMENTO DELLE FINESTRE.....

A. STUDIO DI UN VOLUME TEORICO

1. INTRODUZIONE

Lo scopo di questa parte consiste nella caratterizzazione dell'influenza di vari parametri sul fabbisogno energetico e i relativi costi. Le analisi saranno condotte in via preliminare su un volume semplice. Questi risultati saranno utili per capire come può essere costruito il modulo (forma, materiali, orientamento,...).

Affinché questi risultati siano adattati al nostro caso particolare, abbiamo considerato l'ambiente del PFP, in termini climatici e di ombreggiamento.

2. METODO

a) Definizione del volume

Abbiamo supposto in una prima parte la destinazione di questo volume, una aula didattica, e le sue caratteristiche che conserveremo costanti, poiché tali valori dipendono esclusivamente dalle scelte progettuali, e non da considerazioni energetiche:

- la superficie: 100 m²
- l'altezza interpiano: 4 m

Le altre caratteristiche saranno scelte per lavorare con un "caso base", e poi varieranno per studiarne l'influenza. Nello specifico sono:

- l'orientamento
- il rapporto S/V
- la posizione, numero e dimensione delle finestre
- i materiali
- la quantità di isolamento
- le schermature
- il tipo di ventilazione
- la presenza di pannelli fotovoltaici,...

Non dovremo dimenticare che questi parametri dipendono anche da scelte progettuali. Non è quindi utile considerare un campo di variazione troppo largo. Per esempio, la larghezza di un edificio non può essere troppo ridotta. Conserveremo sempre in mente questo per non considerare soluzioni che, di un punto di vista energetico, sono forse ottimali, ma non sono idonee per un uso reale.

Tuttavia, questo studio essendo teorico, possiamo considerare variazioni su questi parametri abbastanza ampie. (La larghezza del volume potrà scendere fino a 3 metri per esempio.)

b) Risultati da ottimizzare

L'obiettivo di questo studio è di ottimizzare i consumi del nostro edificio. Questi consumi sono di due tipi

diversi: energetico e finanziario. Per avere dei risultati sfruttabili in un caso reale, abbiamo definito un sistema il più ampio possibile: dalla nascita dell'edificio fino alla sua morte e ad un eventuale riuso. In effetti, non possiamo prendere in considerazione solamente il consumo dell'edificio nel periodo di utilizzo. In questo caso, sarebbe stato per esempio semplice considerare che più c'è isolamento, meglio è, senza tenere in conto il fatto che la sua produzione assorbe energia e denaro.

Ottimizzeremo quindi il consumo energetico dell'edificio, composto da:

- i prodotti usati
- il processo di costruzione
- l'uso
- la distruzione

Ottimizzeremo anche i costi globali, perché questo parametro è quello che avrà più influenza sulla scelta finale. Prende in considerazione:

- i costi di costruzione
- l'uso (energia spesa per riscaldamento, illuminamento, raffrescamento)

Possiamo notare che il costo di fine di vita dell'edificio non va tenuto in conto nell'analisi di costi, perché sarebbe illusorio di voler determinare delle spese che occorreranno in più di 50 anni. Avremmo anche potuto considerare altre fonti di danni per l'ambiente o la salute come l'emissione di gas a effetto di serra, l'acidificazione... Non lo faremo in una prima fase, per non avere troppi parametri da considerare, e da ottimizzare. (In pratica, non è possibile di ottimizzare più obiettivi.)

Oltre al comfort termico che gestiremo con un impianto di riscaldamento e di raffrescamento, valuteremo in parallelo il comfort visivo.

Vedremo nei punti seguenti come vanno calcolati tutti questi valori, e alla fine, come sono associati per ottimizzare il volume.

c) Calcolo dell'energia grigia

Questo calcolo permette di prendere in considerazione i trasporti e la produzione dei materiali, la messa in opera e la fine di vita.

Il problema incontrato per questo calcolo è stato di trovare una banca di dati sufficientemente precisa e completa. Infatti, se le norme ISO 14040 e ISO 14044 permettono di capire come si calcola e a cosa serve il ciclo di vita, non da i dati che permettono di fare questo calcolo in pratica. Per essere precisi, servirebbe chiamare i vari produttori per creare questa banca. Non volendo spendere troppo tempo per questo, e non avendo trovato una tale banca, abbiamo usato il software Athena Impact Estimator for Buildings 4.5, benché sia adattato per gli Stati Uniti.

Questo programma è adattato per fare dei calcoli su edifici, ma è anche idoneo per singoli elementi costruttivi (muro, tetto, serramenti,...)

figura VI.240: Schermata di Athena Impact Estimator for Buildings

In una prima fase, si deve scegliere una localizzazione, una destinazione d'uso, una speranza di vita, l'altezza e la superficie dell'edificio.

La localizzazione potendo essere scelta solamente negli Stati Uniti, abbiamo scelto di usare il caso più generale, e di non scegliere una città in particolare, ma gli Stati Uniti.

Per quanto riguarda la speranza di vita dell'edificio, ci siamo riferiti a dati provenienti da La mia CasaClima. Abbiamo ipotizzato che un edificio di tecnologia massiccia (calcestruzzo armato) abbia una speranza di vita di 100 anni, e che uno leggero (struttura in legno, o in metallo) ne abbia una di 60 anni. Il consumo in kWh/m²an sarà quindi:

$$E_{\text{tot annuale}} = \frac{E_{\text{grigia}}}{A} + E_{\text{risc}} + E_{\text{raffr}} + E_{\text{luce}}$$

dove:

- $E_{\text{tot annuale}}$ è l'energia valutata per un anno [kWh/m²an]
- E_{grigia} è l'energia grigia contenuta nelle parti studiate dell'edificio [kWh/m²]

- A è la lunghezza del ciclo di vita [an]
- E_{risc} è l'energia spesa per il riscaldamento durante un anno [kWh/m²an]
- E_{raffr} è l'energia spesa per il raffreddamento durante un anno [kWh/m²an]
- E_{luce} è l'energia spesa per l'illuminamento durante un anno [kWh/m²an]

La destinazione d'uso, l'altezza e la superficie corrispondono a quelle che abbiamo scelte per il modulo.

Si possono successivamente scegliere che tipo di elemento studieremo tra fondazione, muro, tetto, solaio, struttura o altro. Definiamo poi il materiale con le sue caratteristiche, come possiamo vederlo sull'esempio successivo.

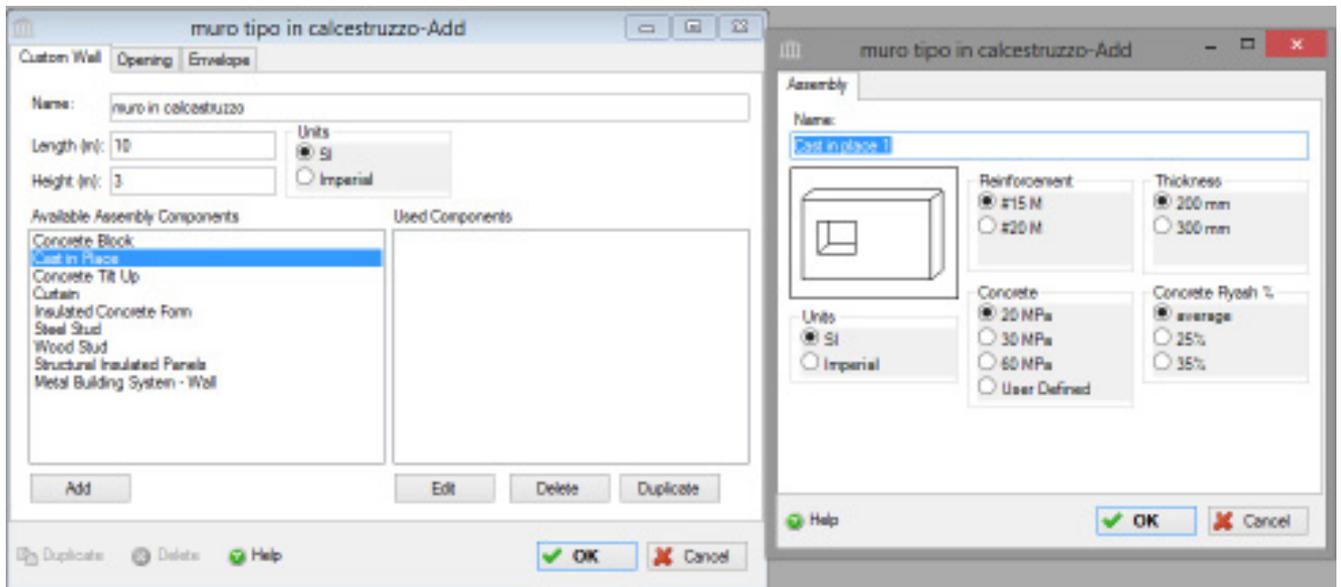


figura VI.241: Interfaccia di Athena Impact Estimator Building

I serramenti e i diversi strati tecnologici (tranne lo strato portante) sono calcolati, associati ad un elemento portante. In una prima fase, i consumi legati alla costruzione di un muro con un serramento sono calcolati, poi in una seconda fase, a questo consumo va tolto il consumo legato alla costruzione del muro senza finestra. Questo ci permette di estrarre il consumo della finestra sola.

Il programma calcola:

- i consumi di combustibili fossili (MJ),
- il Global Warming Potential (kg CO₂ eq)
- l'impatto sull'acidificazione (kg SO₂ eq) delle acque e l'eutrofizzazione (kg N eq)
- l'impatto sulla salute (kg PM_{2.5} eq)
- l'impatto sul buco nell'ozono (kg CFC-11 eq)
- Photochemical Ozone Formation Potential (kg O₃ eq)

- e la quantità dei materiali usati.

Nel nostro caso, useremo solo i consumi di combustibili fossili, che potremo paragonare con i consumi in riscaldamento e raffrescamento durante l'uso dell'edificio. Siccome questi dati sono dati per degli elementi di costruzione, abbiamo creato questi elementi con valori vicini a quelli che useremo (per esempio un muro in calcestruzzo armato di 10m×3m di altezza, e 20 cm di spessore), poi abbiamo esportato i risultati in excel e normalizzato questi valori (per esempio, dividendo il consumo di combustibili fossile per il volume - 6 m³ per il caso precedente). Abbiamo in anticipo verificato che il consumo era proporzionale al volume (o alla superficie secondo i casi).

Possiamo vedere sulle tabelle seguente un esempio di risultati che è dato da Athena Impact Estimator Building per un muro in calcestruzzo gettato. I materiali usati sono i seguenti:

Material	Quantity	Unit	Mass Value	Mass Unit
Concrete 20 MPa (flyash av)	6.2781	m3	14.5967	Tonnes
Rebar, Rod, Light Sections	0.1651	Tonnes	0.1651	Tonnes

figura VI.242: Esempio di consumo di materiale

USA Project: wall cast in place 1 m²
flyash average thickness 200 mm reinforcement #15 M concrete 15 Mpa

Summary Measures	PRODUCT			CONSTRUCTION PROCESS			END OF LIFE			TOTAL EFFECTS		
	Manufacturing	Transport	Total	Construction-installation Process	Transport	Total	De-construction Demolition	Transport	Total	Non-Transport	Transport	Total
Fossil Fuel Consumption (MJ)	367.2542266	24.245229	391.4995	72.25828573	37.694631	109.9529	56.04497782	16.928021	72.973	495.5574901	78.867881	574.4254
Global Warming Potential (kg CO ₂ eq)	47.30567352	1.7837163	49.08939	5.974634909	2.895597	8.870232	3.784224801	1.3021003	5.086325	57.06453323	5.9814135	63.04595
Acidification Potential (kg SO ₂ eq)	0.216009542	0.0085389	0.224548	0.042365774	0.0133934	0.055759	0.049496554	0.0060165	0.055513	0.30787187	0.0279488	0.335821
HH Particulate (kg PM _{2.5} eq)	0.134189118	0.0002613	0.13445	0.006081456	0.0004151	0.006497	0.001811887	0.0001865	0.001998	0.142082461	0.0008629	0.142945
Eutrophication Potential (kg N eq)	0.005188346	0.0006138	0.005802	0.002297623	0.0009666	0.003264	0.003244523	0.0004343	0.003679	0.010730491	0.0020147	0.012745
Ozone Depletion Potential (kg CFC-11 eq)	4.20533E-07	7.125E-11	4.21E-07	2.10345E-08	1.154E-10	2.11E-08	1.60055E-10	5.19E-11	2.12E-10	4.41727E-07	2.386E-10	4.42E-07
Smog Potential (kg O ₃ eq)	2.549336655	0.3019808	2.851317	1.28534441	0.4735951	1.75894	1.725120201	0.2127424	1.937863	5.559801266	0.9883183	6.54812

figura VI.243: Impatto sull'ambiente della costruzione di un muro in calcestruzzo armato di 1 m²

Summary Measures	PRODUCT			CONSTRUCTION PROCESS			END OF LIFE			TOTAL EFFECTS		
	Manufacturing	Transport	Total	Construction-installation Process	Transport	Total	De-construction Demolition	Transport	Total	Non-Transport	Transport	Total
Fossil Fuel Consumption (MJ)	11017.6268	727.35687	11744.98	2167.748572	1130.8389	3298.588	1681.349334	507.84064	2189.19	14866.7247	2366.0364	17232.76
Global Warming Potential (kg CO ₂ eq)	1419.170206	53.511488	1472.682	179.2390473	86.867909	266.107	113.526744	39.063009	152.5898	1711.935997	179.44241	1891.378
Acidification Potential (kg SO ₂ eq)	6.480286263	0.2561674	6.736454	1.270973218	0.4018034	1.672777	1.484896606	0.1804939	1.66539	9.236156087	0.8384647	10.07462
HH Particulate (kg PM _{2.5} eq)	4.02567353	0.0078398	4.033513	0.182443695	0.0124525	0.194896	0.054356614	0.005596	0.059953	4.262473839	0.0258883	4.288362
Eutrophication Potential (kg N eq)	0.155650372	0.0184129	0.174063	0.068928678	0.0289992	0.097928	0.09733568	0.0130283	0.110364	0.32191473	0.0604404	0.382355
Ozone Depletion Potential (kg CFC-11 eq)	1.2616E-05	2.137E-09	1.26E-05	6.31034E-07	3.462E-09	6.34E-07	4.80165E-09	1.557E-09	6.36E-09	1.32518E-05	7.157E-09	1.33E-05
Smog Potential (kg O ₃ eq)	76.48009966	9.0594237	85.53952	38.56033229	14.207854	52.76819	51.75360604	6.3822723	58.13588	166.794038	29.64955	196.4436

figura VI.244: Impatto sull'ambiente della costruzione di un muro in calcestruzzo armato di 13 m²

I consumi dati per un muro di una dimensione tipica (10 metri di lunghezza per 3 metri di altezza) sono poi divisi per la superficie totale di questo muro per avere dei valori normalizzati.

d) Calcolo dei costi

Per avere una reale ottimizzazione del modulo, abbiamo calcolato i costi che variano a seconda della geometria che usiamo e della quantità di componenti. I costi analizzati sono i seguenti:

- Parte portante
- Serramenti (telaio e vetrata)
- Isolamento

I vari costi sono stati estratti del documento Prezzi informativi Opere Edili 2013 della provincia di Bolzano.

La fornitura, la messa in opera, e i materiali annessi sono compresi da i prezzi dati da questo documento, tranne l'armatura del calcestruzzo armato, che è stato calcolato separatamente.

A questo costo verrà aggiunto quello dell'uso (riscaldamento, raffrescamento e illuminamento) del modulo. Il costo di fine di vita del modulo non è stato preso in considerazioni perché ci sembrava illusorio di calcolare dei costi per un intervento che occorrerà in più di 50 anni.

e) Calcolo dell'energia per l'illuminamento, il riscaldamento e il raffrescamento

Lo studio del consumo energetico del modulo si fa mediante l'uso di un plug-in di Grasshopper: Archsim. Questo plug-in permette di legare Grasshopper e EnergyPlus, e quindi di usare un programma di simulazioni energetiche molto preciso con la possibilità di modulare facilmente i parametri geometrici grazie a Grasshopper.

La geometria che va messa in input di Archsim è composta degli elementi seguenti:

- zone termiche: una sola per questo studio,
- finestre,
- condizione al limite: nel nostro caso, sarà la temperatura della superficie del terreno; la geometria considerata essendo solo il suolo del modulo.

Le loro caratteristiche geometriche precise sono ricapitolate nelle tabelle 1.6. La finestra verticale è dimensionata in modo tale di ottenere un RAI equivalente a 1/8; quella del tetto non sarà, in una prima fase, utilizzata.

		x	0
	Punto Base	y	0
		z	0
Volume Base		x	10
	Dimensioni	z	4
		superficie	100
Finestra facciata		centrato secondo y	(y/2)
	altezza da pavimento	z	0.9
		y	4
	dimensioni	z	3
Finestra tetto		centrato secondo x	1
		centrato secondo y	8
		x	2
	dimensioni	y	4

figura VI.245: Dimensioni del modulo studiato

L'angolo di rotazione corrisponde all'orientamento dell'edificio. 0 corrisponde alla posizione della finestra a ovest, 90 a sud, 180 a est e 270 a nord.

Archsim prende anche in input un file climatico dello stesso tipo che Energy+. Basta mettere il file path. Nel nostro caso, siccome non abbiamo trovato quello di Sondrio, lavoriamo con quello di Bergamo, dove il clima è molto simile (parte "E. Analisi climatica" nell'analisi del contesto).

Avendo creato la geometria da studiare, il modulo Archsim permette di impostare i valori seguenti, legati al consumo energetico. (I vari schedule corrispondono all'utenza effettiva attuale.)

1) Carichi termici

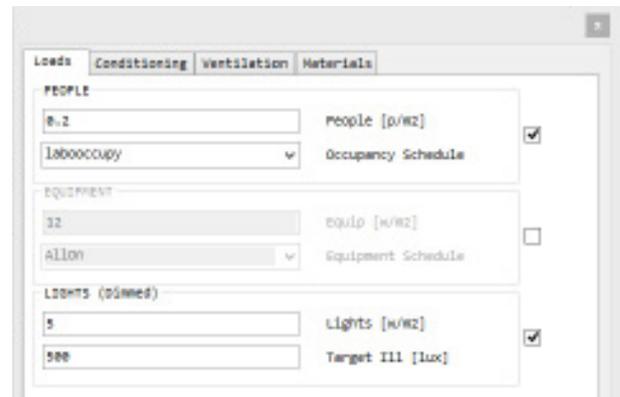


figura VI.246: Schermata dell'interfaccia di Archsim

2) Condizionamento

► Riscaldamento:

set point	20 °C	come richiesto dall'Azienda Sanitaria Locale della Provincia di Sondrio
schedule	<i>heatingyear</i>	schedule
limita potenza	infinita	lo studio degli impianti non è l'oggetto di questa parte

► Raffrescamento:

set point	26 °C	temperatura di comfort in caso di impianto di raffrescamento
schedule	<i>coolingyear</i>	schedule
limita potenza	infinita	lo studio degli impianti non è l'oggetto di questa parte

► Ventilazione meccanica:

ricambio d'aria	0,008333 m ³ /(s.personna)	come richiesto dal Decreto Ministeriale del 18 di dicembre 1975
recupero di calore ?	si	
tasso di energia sensibile recuperata	0,80	il valore massimo essendo di 0,90 secondo CasaClima
tasso di energia latente recuperata	0,65	

3) Ventilazione

► Ventilazione programmata (on/off)

ricambio d'aria	0,6	parametro variabile
Temperatura minima interna	18°C	parametro variabile
Schedule	<i>AllOn</i>	parametro variabile

► Ventilazione naturale (off/on)

origine del movimento d'aria	principio di Archimede: no	le finestre sono a priori alla stessa quota
	vento: si	i serramenti saranno a priori apribili
Raffreddare fino alla temperatura minima	20°C	parametro variabile
Temperatura massima dell'aria esterna	28 °C	parametro variabile
Umidità relativa massimi esterni	80%	
Schedule	<i>coolingyear</i>	parametro variabile
Ventilazione + controllo ibrido del raffrescamento	no	

► Infiltrazioni

Ricambio d'aria per ora	0,1 ach	CasaClima classe A
-------------------------	---------	--------------------

4) Finestre

► Tipo di vetro: *doppio con aria in intercapedine (6+13+6)*

► Schermature (on/off)

Esterne		
Disponibilità	Periodo di raffrescamento	
Valore di consegna per la chiusura	100 W/m ² di radiazione solare	parametro variabile
Trasmittanza termica	0,5	parametro variabile

► Parametri di ventilazione (on/off)

5) Stratigrafie

a. Tetto

Calcestruzzo armato	20 cm	
XPS	30 cm	parametro variabile

b. Solaio contro terra

calcestruzzo armato	20 cm	
XPS	10 cm	parametro variabile

c. Chiusure perimetrali

calcestruzzo armato	20 cm	
XPS	30 cm	parametro variabile

figura VI.247: Caratteristiche termiche del volume di studio

I parametri per i quali è stato precisato “parametro variabile” saranno l’oggetto di un studio.

Gli schedule, corrispondono a quello di uso delle aule didattiche. Per il riscaldamento, e il raffrescamento, i periodi di uso sono comprese tra il 15 di ottobre e il 15 di aprile, conformemente all’articolo 9 del DPR del 26 agosto 1993, n°412, ed al fatto che Sondrio sia nella zona F. Inoltre, le 14 ore massime in cui il riscaldamen-

to e il raffrescamento non saranno oltrepassate perché il numero di ore di corso per giorno è molto inferiore.

È possibile di calcolare con questo modulo le diverse temperature legate alla nostra zona, anziché all’esterno, ed i vari consumi di riscaldamento, raffrescamento ed illuminamento.

f) Calcolo dell'illuminamento

Siccome è solamente possibile calcolare i consumi per l'illuminamento con Archsim, ma non quantificarlo, lo facciamo con Daysim. Abbiamo quindi una reale visualizzazione dell'illuminamento, e non solo un valore di fabbisogno energetico.

Il principio del studio illuminotecnico è simile a quello del studio energetico: legare Daysim con Grasshopper via DIVA Daylight permette di usare

Parete interne	<i>GenericInteriorWall_50</i>
Finestra muro	<i>Glazing_DoublePane_LowE_Argon_65</i>
Finestra tetto	<i>Glazing_DoublePane_LowE_Argon_65</i>

figura VI.248: Nomenclatura delle parete utilizzata per il calcolo dell'illuminamento

È possibile di dettagliare di più gli elementi non trasparenti dell'edificio. Però per questo studio preliminare, non avrebbe senso di essere troppo preciso.

2) Superficie di calcolo

Un'altra parte della geometria da disegnare su Grasshopper è la superficie sulla quale saranno calcolati i diversi risultati. Questa griglia è stata scelta delle stesse dimensioni del pavimento, all'altezza 0.9 metri della quota del pavimento, ciò che corrisponde all'altezza di una scrivania. Siccome queste scrivanie non sono distribuite sull'intera superficie del pavimento, e la lavagna ha bisogno di condizione di luce diverse, avremmo potuto essere più precisi. Ma per semplificare il modello, a questo punto del progetto, abbiamo scelto di contentarci di quest'approssimazione.

La griglia di calcolo è divisa in entrambe direzioni in 5.

3) Altri parametri

Gli altri parametri che possiamo scegliere sono:

- I dati climatici (weather file)
- Un set point per l'illuminamento: 500 lux
- Un tipo di controllo per la luce: *Dimming w. Occupancy On/Off sensor*. Il controllo viene fatto automaticamente, con valori di funzionamento della luce continue (non solo on o off) e la luce è disponibile solo quando ci sono delle persone dentro. Il schedule è ovviamente lo stesso che per lo studio energetico.

4) Risultati disponibili

I risultati che possiamo visualizzare sono i seguenti

- Daylight autonomy
- Continuous Daylight Autonomy
- Daylight availability
- Usefull Daylight Illuminance (100-2000 lux)
- Usefull Daylight Illuminance (< 100 lux)

un programma efficiente con i vantaggi del disegno parametrico.

1) Geometria

Anche di un punto di vista funzionale, è molto simile: si mette in input la geometria da studiare, disegnata su Grasshopper. Si scelgono poi i materiali dei vari elementi:

- Usefull Daylight Illuminance (>2000 lux)
- Hourly illuminance

Per darci un'idea sull'anno della qualità dell'illuminamento naturale nel modulo e poter dedurre l'energia che costa, abbiamo scelto di lavorare con il Daylight autonomy: infatti, l'energia consumata corrisponde al prodotto della percentuale media per il numero di ora per la potenza elettrica dell'illuminamento artificiale installata.

Se il risultato non sarà usato direttamente per il calcolo dell'energia totale, verificheremo che la potenza luminosa disponibile che è stata impostata in archsim è idonea, avendo la potenza massima effettivamente usata per la luce (corrisponde alla massima percentuale del daylight autonomy, moltiplicata per la potenza inserita in DIVA. Inoltre, compareremo i dati ottenuti da DIVA e Archsim, per verificare la loro pertinenza e esattezza.

5) Calcolo globale

Se DIVA e archsim sono dei plug-in di Grasshopper, e che è quindi facile di legarli tra di loro e con una geometria comune, non è vero per gli elementi che abbiamo usato per fare il calcolo dell'energia grigia e del prezzo.

Abbiamo dovuto estrarre i dati geometrici utile per questi calcoli, che sono presente nella geometria generale. Per esempio, la quantità di calcestruzzo armato è uguale alla superficie delle chiusure dove c'è calcestruzzo, moltiplicato dallo spessore. Queste quantità sono poi moltiplicate per il prezzo o l'energia grigia che sono stati calcolati precedentemente.

Le caratteristiche principale del volume studiato sono ricapitolate nella figura seguente:

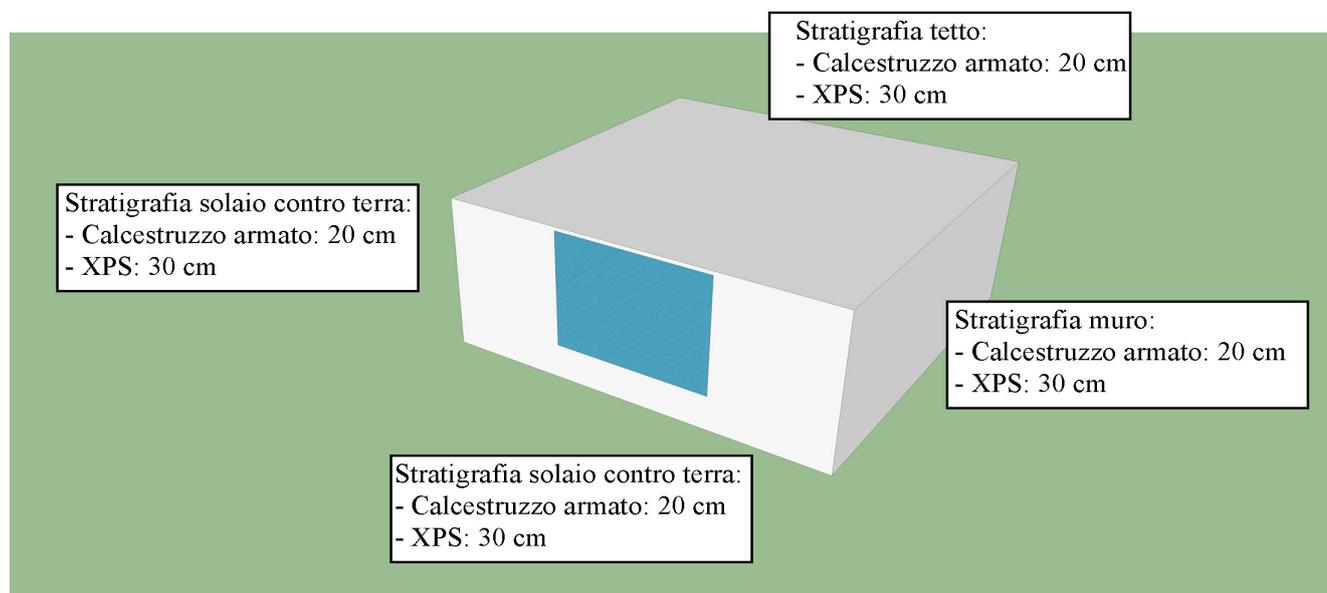


figura VI.249: Schema e caratteristiche costruttive del modulo studiato

3. STUDIO DEI PARAMETRI CONTINUI

In una prima parte, faremo variare i parametri continui del modello. Questi parametri sono riassunti nella tabella seguente:

- Orientamento
- Dimensione del lato finestrato
- Spessore di isolante
- Spessore di isolante sulle chiusure contro terra
- Inclinazione del tetto
- Dimensione della finestra orizzontale
- Dimensione della finestra verticale

Se vogliamo fare un'ottimizzazione del consumo di questo volume, e che consideriamo che ognuno di questi parametri può prendere 10 valori, avremo 10⁷ simulazione da fare. Siccome servono per ogni simulazione 20 s, servirebbero in totale più di 6 anni, solo per fare i calcoli.

Abbassando il numero di valori per parametro a 4, risulterebbe 91 ore di calcolo, per un risultato poco preciso. Per esempio, se ipotizziamo che lo spessore di isolante può variare tra 0 e 60 cm, la precisione del risultato sarà di 20 cm. Per affinare questi risultati, servirebbe di nuovo una simulazione di più giorni. Questo approccio dovrà essere eseguito per ogni parametro.

Invece di spendere tanto tempo per fare dei simulazioni, valuteremo quali parametri hanno un'influenza

maggiore, in quale intervallo la sua influenza è la più importante, e qual'è l'influenza di un parametro in funzione dei valori degli altri. In questo scopo, useremo un metodo di analisi di sensibilità globale: il metodo di Monte Carlo. Le tappe di questo metodo sono:

- la definizione del modello e dei suoi parametri,
- la scelta di una funzione di densità di probabilità per i parametri,
- il calcolo dell'output,
- il data processing

Il modello è ovviamente quello del volume che abbiamo studiato precedentemente, e la sua modellizzazione si farà mediante i vari software che abbiamo descritti.

Per il nostro studio, abbiamo deciso di non limitarci con criteri di pratica usuale: per esempio, lo spessore di isolante potrà raggiungere fino a 1 metro. Abbiamo tenuto in conto il prezzo e l'energia grigia per non imporre a priori nessuna limita ai casi studiati. Siccome valuteremo sempre il costo globale e l'energia grigia spesa, non c'è nessun motivo per supporre che una configurazione di parametri a più probabilità di essere che un'altra. La densità di probabilità che useremo sarà quindi uniforme per tutti i parametri.

L'influenza di un parametro si determina, calcolando il coefficiente di correlazione di Pearson, che valuta il grado di correlazione lineare:

$$correl(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y - \bar{y})^2}}$$

Per i nostri casi, X sarà il parametro di input studiato, e Y l'output, ai fini di valutare la correlazione di questi due valori. Il coefficiente di correlazione di Pearson varia tra -1 e 1. Se vale 1 (rispettivamente -1), esiste una relazione lineare di coefficiente di linearità positivo (rispettivamente negativo).

Questo coefficiente essendo solo idoneo per valuta-

re relazioni lineari, se il coefficiente di Pearson è molto basso, dovremo verificare se questo significa che non esiste una correlazione tra input e output, o se esiste, ma non è lineare (tipicamente, per lo studio dell'influenza dell'orientamento, se la correlazione è periodica). Questa verifica si farà mediante la rappresentazione del valore di output in funzione del valore del parametro.

		spessore isolante contro terra	spessore isolante	dim fin verticale	dim. Finestra tetto	orientamento	lunghezza x	inclinazione tetto
coefficiente di correlazione di Pearson	raffrescamento	-0.05	0.22	0.56	0.19	-0.18	0.16	-0.15
	riscaldamento	0.01	-0.81	-0.17	-0.18	0.06	-0.22	0.17
	luce artificiale	0.00	0.00	-0.37	-0.42	0.02	0.39	0.18
	energia finestra	0.00	0.00	0.75	0.52	-0.22	0.00	-0.01
	energia totale	0.01	-0.07	-0.05	-0.06	0.02	-0.34	0.87
	costo	0.01	0.06	-0.02	-0.02	0.01	-0.32	0.89

figura VI.250: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra parametri e consumi

I valori superiori (in valore assoluti) a 0,4 sono evidenziati. Per quanto riguarda il fabbisogno di riscaldamento e di raffrescamento, vediamo che tutti i parametri, tranne lo spessore di isolante contro terra e l'orientamento hanno un coefficiente di Pearson che indica che la loro influenza non può essere trascurata. Più precisamente, l'influenza massima sul raffrescamento è quella della dimensione della finestra verticale: più aumenta, più il fabbisogno di raffrescamento aumenta.

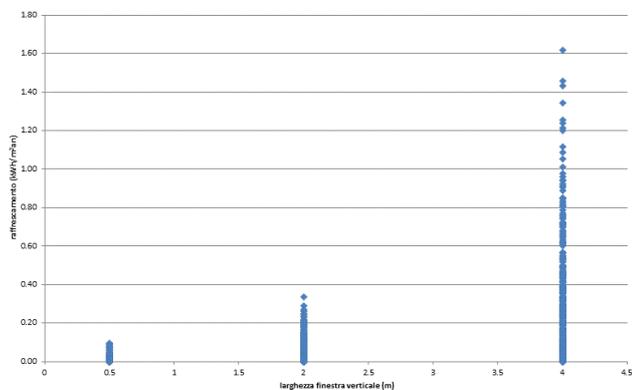


figura VI.251: Sensibilità del fabbisogno di raffrescamento alla larghezza della finestra verticale

Il coefficiente di Pearson indica che la variazione del fabbisogno di riscaldamento, invece è quasi lineare in funzione dello spessore di isolante sulle chiusure in contatto con l'aria.

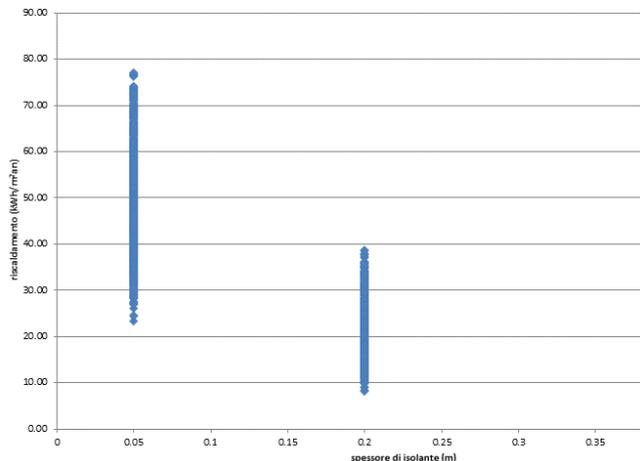


figura VI.252: Sensibilità del fabbisogno di riscaldamento allo spessore di isolante

Osservando il grafico della sensibilità del fabbisogno di riscaldamento allo spessore di isolante, vediamo che l'influenza di questo parametro è molto più grande quando lo spessore è più ridotto: più c'è isolante, meno si risparmia, aumentando questo spessore. Il punto dove non sarà più economico di aumentare lo spessore di isolante sarà determinato considerando il prezzo di questa aggiunta, o il suo consumo di energia grigia.

L'energia che attraversa le finestre è influenzata da la dimensione dei serramenti e dell'orientamento. Però, il coefficiente di Pearson è molto più elevata per le dimensioni dei serramenti.

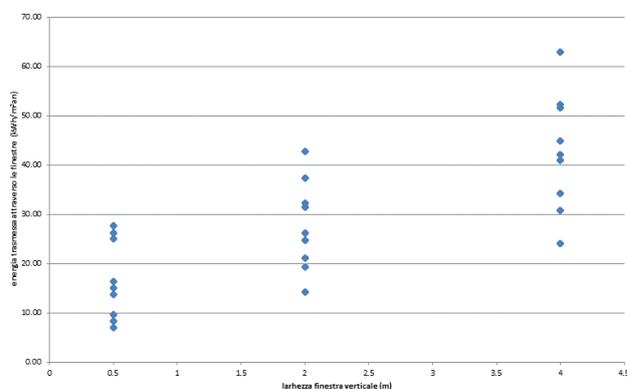


figura VI.253: Sensibilità dell'energia trasmessa attraverso le finestre alla larghezza della finestra verticale

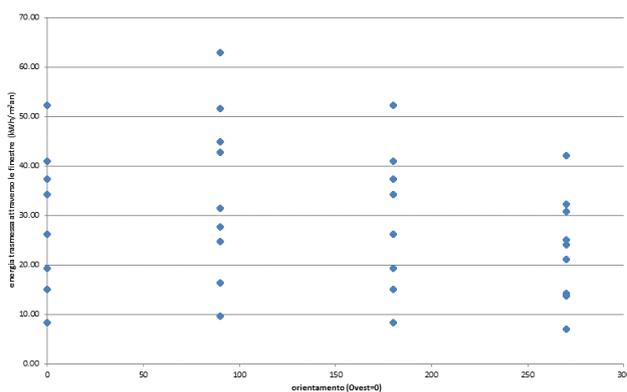


figura VI.254: Sensibilità dell'energia trasmessa attraverso le finestre all'orientamento

Vediamo con questo caso il limite dell'efficienza del parametro di Pearson: valuta solo la correlazione lineare tra due parametri. L'influenza dell'orientamento sull'energia trasmessa attraverso le chiusure trasparenti deve essere considerata, anche se il coefficiente di Pearson è relativamente basso. In generale, poiché qualsiasi output a pochissime possibilità di essere correlato in modo lineare all'orientamento, verifichiamo sempre i grafici della sensibilità di questi output all'orientamento.

In pratica, tutti i grafici di sensibilità sono stati disegnati, per evitare di non vedere una correlazione, che non sarebbe stata lineare.

Per il fabbisogno di energia per la luce artificiale, non esiste un parametro che ha un coefficiente di Pearson molto elevato.

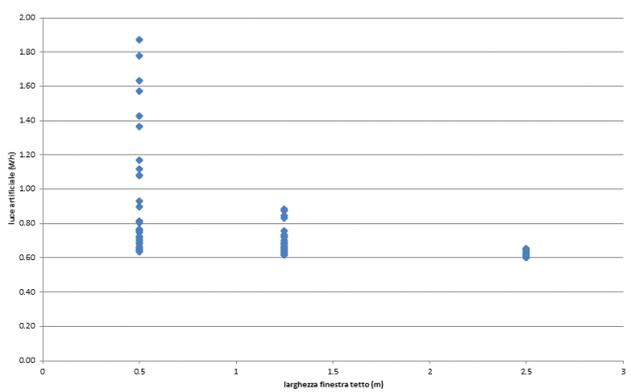


figura VI.255: Sensibilità del fabbisogno di luce artificiale alla larghezza della finestra orizzontale

Il parametro con il quale la variazione del fabbisogno di luce artificiale è più elevata è quello legato alla larghezza della finestra orizzontale. Però, vediamo che con una finestra di dimensione ridotte (50 cm di larghezza), è sempre possibile di raggiungere un fabbisogno relativamente basso. I risultati legati alla finestra verticale sono dello stesso tipo.

Va anche notato che più il lato del volume dove si trova la finestra è grande (quindi meno c'è profondità nella direzione perpendicolare alla finestra), più basso è il fabbisogno in luce artificiale.

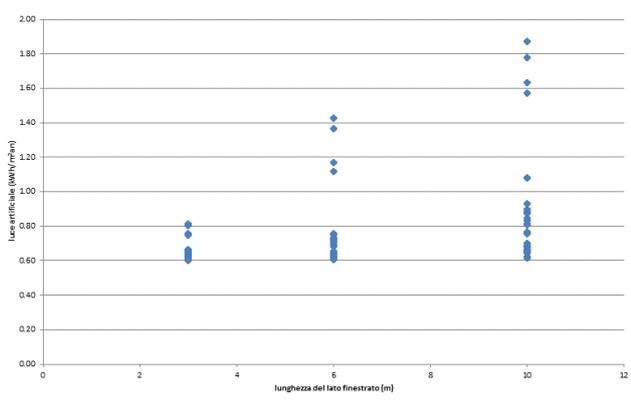


figura VI.256: Sensibilità del fabbisogno di luce artificiale al rapporto S/V

Il fabbisogno globale in energia, come il costo totale, è più influenzato dall'inclinazione del tetto che da tutti gli altri parametri. Questo è dovuto al fatto che l'altezza minima è stata conservata costante: con la pendenza del tetto aumentano il volume da riscaldare o raffreddare, e la quantità di materiali da usare.

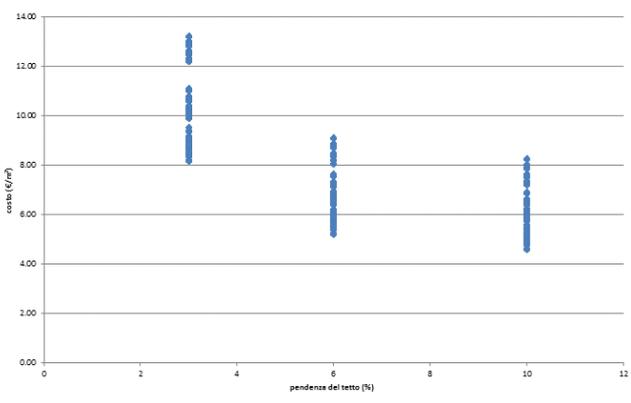


figura VI.257: Sensibilità del costo all'inclinazione del tetto

Per poter valutare l'influenza degli altri parametri, abbiamo realizzato lo stesso studio senza considerare la variazione dell'inclinazione del tetto. La matrice dei coefficienti di Pearson diventa:

		spessore isolante contro terra	spessore isolante	dim fin verticale	dim. Finestra tetto	orientamento	lunghezza x
coefficiente di correlazione di Pearson	raffrescamento	-0.05	0.23	0.59	0.20	-0.18	0.21
	riscaldamento	0.01	-0.80	-0.18	-0.19	0.04	-0.30
	luce artificiale	0.00	0.00	-0.37	-0.48	0.01	0.34
	energia finestra	0.00	0.00	0.77	0.54	-0.18	0.00
	energia totale	0.04	-0.74	-0.17	-0.19	0.04	-0.40
	costo	0.05	-0.65	-0.18	-0.17	0.04	-0.52

figura VI.258: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra parametri (salvo l'inclinazione del tetto) e consumi

I valori dei coefficienti non sono fondamentalmente cambiati per gli output per quali l'influenza dell'inclinazione del tetto era bassa. Invece, per il costo vediamo che lo spessore di isolante e il rapporto S/V hanno adesso una maggiore influenza. Il che equivale a dire

che la pendenza del tetto a l'influenza maggiore, seguita dallo spessore di isolante e dal rapporto S/V. Gli altri parametri hanno invece un'influenza molto bassa.

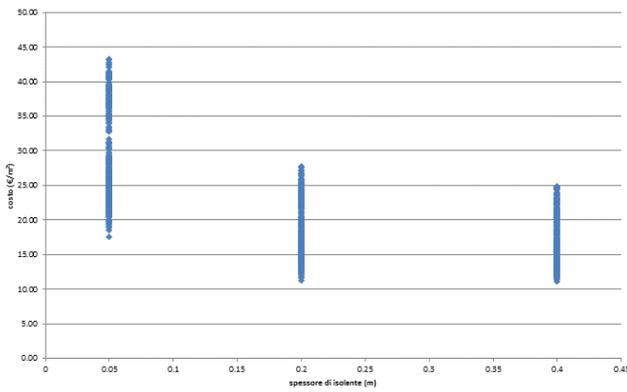


figura VI.259: Sensibilità del costo allo spessore di isolante

Vediamo su questo che il costo globale diminuisce con lo spessore di isolante fino a un certo valore, attorno a 40 cm di isolante. Sappiamo che salirà se aumentiamo lo spessore di isolante. (Con una quantità infinita, il risparmio energetico tende a diventare nullo, mentre il costo aumenta sempre.) Lo studio di questo ottimale

coefficienti di Pearson saranno sempre:

$$\text{correl}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y - \bar{y})^2}}$$

con:

$$\begin{cases} X_i = \frac{y(x_1, \dots, x_{j-1}, x_j + \Delta, x_{j+1}, \dots, x_n) - y(x_1, \dots, x_n)}{\Delta} \approx \frac{\partial y}{\partial x_j} \\ Y_i = x_i \end{cases}$$

In questo studio, y saranno gli output e x_i sono i parametri. Dovremo quindi calcolare i valori degli output per i vettori di input trasferiti di Δ in ogni direzione. Δ sarà preso uguale a 5% del valore del parametro. Notiamo che i e j possono essere uguali, ovvero è possibile di calcolare il coefficiente di correlazione tra la variazione indotta da un parametro e questo parametro stesso. In questo caso, significa che l'evoluzione dell'output in funzione di questo parametro è di tipo quadratico. Dovremo quindi prestare molta attenzione alla variazione di questo parametro.

Questa analisi dovrà permetterci di cercare gli ottimi solamente per i coppi rilevanti. Se avessimo dovuto cercare gli ottimi per tutti i coppi di parametri, sempre con 10 valori per ogni parametro, avremo dovuto effettuare 45 studi di 100 simulazioni, e analizzarle tutte.

sarà effettuato successivamente.

Lo studio dell'influenza di ogni parametro sui consumi sarà fatto comunque per tutti i parametri, senza limitarci ai valori alti dei coefficienti di Pearson: in effetti, se esiste per esempio un ottimo di spessore per l'isolamento delle chiusure, è sempre meglio conoscerlo per poter raggiungere dei consumi più bassi. L'interesse di aver condotto questo studio di sensibilità è di capire quali sono i parametri che sono più vincolati dall'obiettivo di diminuire il fabbisogno energetico. Per esempio, sappiamo che sarà fondamentale la variazione della pendenza del tetto, è che non verrà aumentata senza motivo importante. Invece, sappiamo che sarà possibile di cambiare l'orientamento senza aumentare troppo i consumi.

La seconda tappa dello studio di sensibilità globale permette di capire la correlazione (lineare, sempre secondo il coefficiente di Pearson) tra due parametri, più precisamente tra la variazione di fabbisogno legato alla variazione di un parametro, e il valore di un altro: i

1) Raffrescamento

	derivata parziale in funzione di						
	spessore isolante contro terra	spessore isolante	dimensione finestra verticale	dimensione finestra orizzontale	orientamento	lunghezza del lato finestrato	inclinazione tetto
spessore isolante contro terra	-0.32	-0.02	0.22	0.25	-0.41	0.14	-0.20
spessore isolante	-0.01	0.63	0.05	0.07	0.41	-0.06	0.07
dimensione finestra verticale	0.42	-0.17	0.59	0.61	0.00	0.38	-0.56
dimensione finestra orizzontale	0.14	0.02	0.16	0.19	0.00	0.11	-0.20
orientamento	-0.12	0.06	-0.21	-0.18	-0.05	-0.11	0.16
lunghezza del lato finestrato	0.12	-0.13	0.14	0.15	0.00	-0.41	-0.32
inclinazione tetto	-0.11	0.08	-0.12	-0.16	0.00	-0.14	0.20

figura VI.260: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra derivata parziale dei parametri e i parametri per il consumo di raffrescamento

I fattori di correlazione lineare sono più elevati tra:

- l'influenza dello spessore di isolante e lo spessore di isolante
- l'influenza della dimensione della finestra verticale e la dimensione della finestra verticale
- l'influenza della dimensione della finestra orizzontale e la dimensione della finestra verticale
- l'influenza dell'inclinazione del tetto e la dimensione della finestra verticale

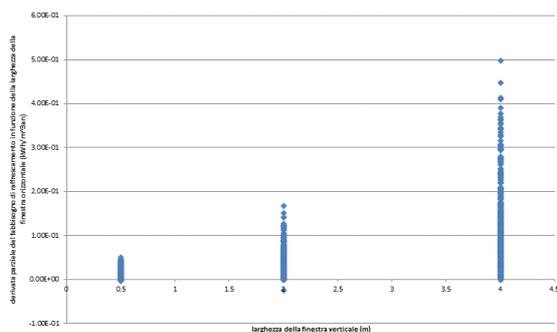


figura VI.261: Sensibilità del fabbisogno di raffrescamento alla variazione della larghezza della finestra orizzontale in funzione della larghezza della finestra verticale

La sensibilità del fabbisogno di raffrescamento alla variazione della finestra orizzontale dipende fortemente dalla dimensione della finestra verticale: se quest'ultima è bassa, potremo scegliere una dimensione di finestra orizzontale senza essere molto vincolato dal fabbisogno di raffrescamento. Invece, se la finestra verticale è grande, dovremo prestare attenzione alla scelta della dimensione della finestra sul tetto.

2) Riscaldamento

	derivata parziale in funzione di						
	spessore isolante contro terra	spessore isolante	dimensione finestra verticale	dimensione finestra orizzontale	orientamento	lunghezza del lato finestrato	inclinazione tetto
spessore isolante contro terra	-0.14	-0.02	-0.05	-0.11	-0.01	0.00	0.00
spessore isolante	-0.57	0.84	0.50	0.60	0.01	0.35	-0.74
dimensione finestra verticale	-0.07	0.03	0.28	0.39	0.00	0.02	-0.05
dimensione finestra orizzontale	-0.10	0.02	0.26	0.33	0.02	0.03	-0.02
orientamento	0.04	0.00	0.29	0.10	0.00	0.00	0.19
lunghezza del lato finestrato	0.02	0.13	0.12	0.29	0.02	0.72	0.44
inclinazione tetto	0.02	-0.08	-0.05	-0.10	-0.02	0.07	0.10

figura VI.262: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra derivata parziale dei parametri e i parametri per il consumo di riscaldamento

I fattori di correlazione lineare sono più elevati tra:

- l'influenza dello spessore di isolante contro terra e lo spessore di isolante
- l'influenza dello spessore di isolante e lo spessore di isolante
- l'influenza della dimensione della finestra orizzontale e lo spessore di isolante
- l'influenza della dimensione del rapporto S/V e il rapporto S/V
- l'influenza dell'inclinazione del tetto e lo spessore di isolante

Questo significa che se dobbiamo cambiare lo spessore di isolante, dovremo probabilmente cambiare altri parametri, per raggiungere di nuovo, bassi consumi per il riscaldamento.

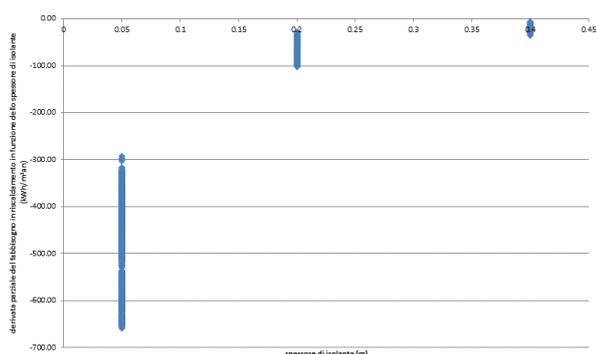


figura VI.263: Sensibilità del fabbisogno di riscaldamento alla variazione dello spessore di isolante in funzione dello spessore di isolante

Il fabbisogno di riscaldamento è dipendente fortemente dallo spessore di isolamento per due motivi:

- abbiamo già visto che dipende direttamente dallo spessore di isolante
- vediamo adesso che tranne per il rapporto S/V, la sensibilità del fabbisogno di riscaldamento agli altri parametri dipende dallo spessore di isolante.

3) Energia trasmessa attraverso le finestre

	derivata parziale in funzione di						
	spessore isolante contro terra	spessore isolante	dimensione finestra verticale	dimensione finestra orizzontale	orientamento	lunghezza del lato finestrato	inclinazione tetto
spessore isolante contro terra	-	-	0.00	0.00	0.00	-	0.00
spessore isolante	-	-	0.00	0.00	0.00	-	0.00
dimensione finestra verticale	-	-	0.00	0.00	-0.05	-	0.00
dimensione finestra orizzontale	-	-	0.00	0.00	-0.03	-	-0.08
orientamento	-	-	-0.62	-0.50	0.03	-	-0.53
lunghezza del lato finestrato	-	-	0.00	0.00	0.00	-	0.00
inclinazione tetto	-	-	0.00	-0.10	-0.01	-	-0.11

figura VI.264: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra derivata parziale dei parametri e i parametri per l'energia trasmessa attraverso le finestre

E osservando le variazioni dell'energia trasmessa attraverso le finestre che si capisce l'influenza dell'orientamento: in funzione della dimensione dei serramenti aumenta l'importanza della scelta dell'orientamento. Ricordiamo che il coefficiente di Pearson non può essere calcolato se uno dei due vettori è costante.

I fattori di correlazione lineare sono più elevati tra:

- l'influenza della dimensione della finestra verticale e l'orientamento
- l'influenza della dimensione della finestra orizzontale e l'orientamento
- l'influenza della pendenza del tetto e l'orientamento

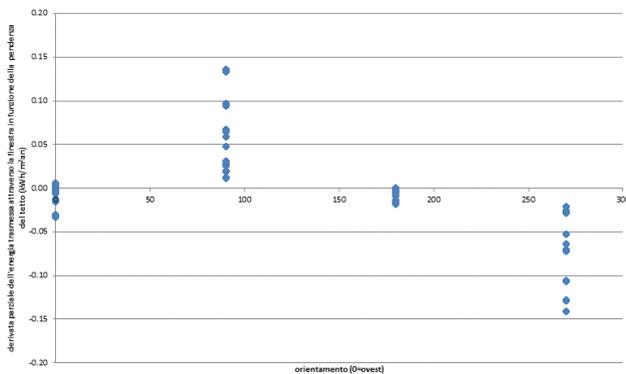


figura VI.265: Sensibilità dell'energia trasmessa attraverso le finestre alla variazione di inclinazione del tetto in funzione dell'orientamento

Secondo l'orientamento, aumentare la pendenza del tetto può diminuire (nord) l'energia trasmessa attraverso i serramenti o al contrario aumentarla (sud).

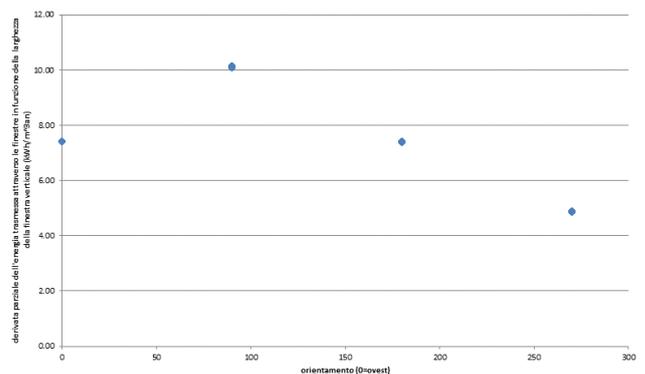


figura VI.266: Sensibilità dell'energia trasmessa attraverso le finestre alla variazione di larghezza della finestra verticale in funzione dell'orientamento

L'influenza della dimensione della finestra sull'energia che passa attraverso i serramenti dipende esclusivamente dall'orientamento.

4) Energia totale

	derivata parziale in funzione di						
	spessore isolante contro terra	spessore isolante	dimensione finestra verticale	dimensione finestra orizzontale	orientamento	lunghezza del lato finestrato	inclinazione tetto
spessore isolante contro terra	-0.16	-0.02	-0.01	-0.08	0.00	0.00	0.00
spessore isolante	-0.57	0.84	0.09	0.47	-0.01	0.00	0.52
dimensione finestra verticale	-0.04	0.02	0.06	0.54	0.00	0.01	-0.01
dimensione finestra orizzontale	-0.09	0.02	0.07	0.50	0.00	0.01	-0.01
orientamento	0.03	0.00	0.01	0.05	0.56	0.00	0.03
lunghezza del lato finestrato	0.03	0.05	0.02	0.07	0.00	0.73	-0.73
inclinazione tetto	0.01	0.17	-0.02	-0.12	0.00	-0.37	0.02

figura VI.267: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra derivata parziale dei parametri e parametri per l'energia totale

I fattori di correlazione lineare sono più elevati tra:

- l'influenza dello spessore di isolante e lo spessore di isolante
- l'influenza del rapporto S/V e il rapporto S/V
- l'influenza della pendenza del tetto e il rapporto S/V
- l'influenza dello spessore di isolante contro terra e lo spessore di isolante
- l'influenza dell'orientamento e l'orientamento

Si nota che la variazione del consumo globale in funzione delle dimensioni delle finestre verticali e orizzontali è sempre legata, come l'abbiamo visto per il raffrescamento.

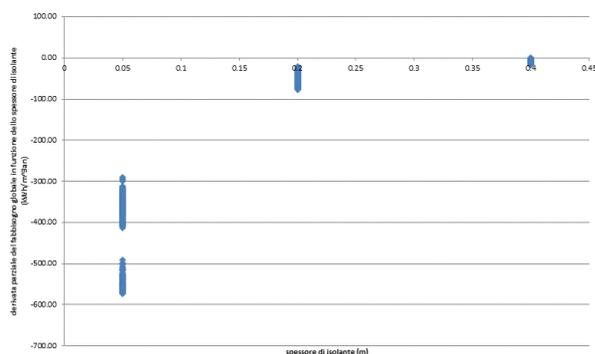


figura VI.268: Sensibilità del fabbisogno globale alla variazione di spessore di isolante in funzione dello spessore di isolante

Ricordiamo ancora una volta l'importanza dello spessore di isolante, anche sul consumo globale di energia: l'energia grigia contenuta in un isolante attenua poco la redditività di aumentare lo spessore di isolante (in effetti, la derivata parziale rimane negativa).

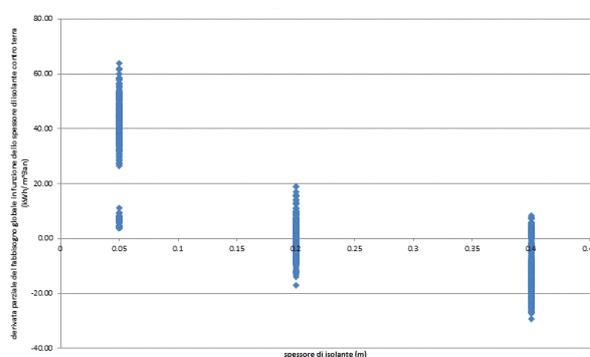


figura VI.269: Sensibilità del fabbisogno globale alla variazione di spessore di isolante contro terra in funzione dello spessore di isolante

Per quanto riguarda l'isolamento contro terra, possiamo notare che se l'edificio è poco isolato sui muri e sul tetto, aumentare l'isolamento contro terra è controproducente. Invece può diventare interessante di aumentare la quantità di isolante contro terra con un edificio bene isolato. Questo è dovuto al fatto che la temperatura del terreno in inverno è più elevata che quella dell'aria. Se l'edificio è poco isolato, le perdite si faranno comunque, attraverso la parete in contatto con l'aria esterna, indipendentemente dall'isolamento della quantità di isolante contro terra.

L'aumento di consumo di energia grigia non sarà quindi compensato da una trasmissione di calore attraverso i muri più deboli.

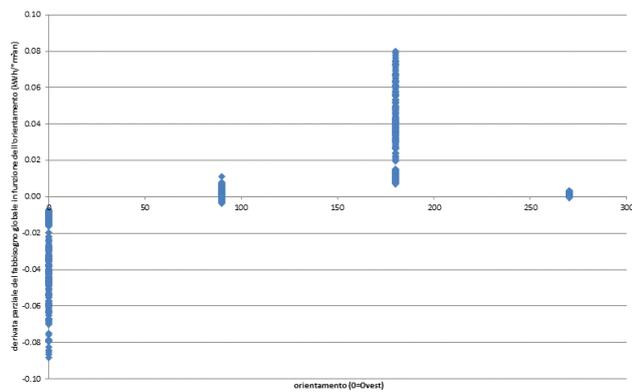


figura VI.270: Sensibilità del fabbisogno globale alla variazione di orientamento in funzione dell'orientamento

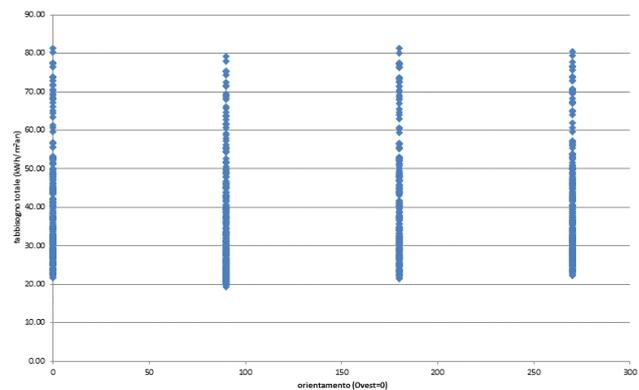


figura VI.271: Sensibilità del fabbisogno globale all'orientamento

L'influenza dell'orientamento sul fabbisogno globale non è trascurabile, come avremo potuto pensarlo con la figura VI.271. In effetti, questo grafico significa che è possibile ottenere un consumo alto, o basso, con qualsiasi orientamento. Invece, è possibile vedere che l'ottimo sarà ottenuto con un serramento a sud. L'influenza dell'orientamento sul consumo globale attorno a un orientamento sud o nord è poco importante (cfr. figura VI.270). Invece, se la finestra è orientata verso ovest o est, una variazione di orientamento potrà essere influente.

5) Costo

	derivata parziale in funzione di						
	spessore isolante contro terra	spessore isolante	dimensione finestra verticale	dimensione finestra orizzontale	orientamento	lunghezza del lato finestrato	inclinazione tetto
spessore isolante contro terra	-0.16	-0.02	-0.01	-0.08	0.00	0.00	0.00
spessore isolante	-0.57	0.78	0.38	0.44	-0.01	-0.04	0.01
dimensione finestra verticale	-0.04	0.02	0.51	0.54	0.00	0.00	0.00
dimensione finestra orizzontale	-0.09	0.02	0.39	0.51	0.00	0.00	0.00
orientamento	0.03	0.00	0.21	0.05	0.56	0.00	0.01
lunghezza del lato finestrato	0.03	-0.03	0.07	0.07	0.00	0.68	-0.79
inclinazione tetto	0.01	0.38	-0.11	-0.13	0.00	-0.43	0.01

figura VI.272: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra derivata parziale dei parametri e i parametri per il costo

I coefficienti di Pearson calcolati per il costo totale del volume sono simili a quelli dell'energia totale: solo due fattori di correlazione hanno ordini di grandezza differenti: l'influenza della pendenza del tetto in funzione dello spessore di isolante non sono più correlati, mentre l'influenza della dimensione della finestra verticale e la dimensione di questa finestra lo sono. Il fattore di correlazione dell'influenza della variazione di spessore di isolante in funzione dello spessore di isolante è più basso per il costo che per il consumo globale. Il punto ottimale per questi due output sarà quindi probabilmente differente.

Alla luce di questo studio di sensibilità, possiamo limitarci allo studio di tutti i parametri indipendentemente

tranne la pendenze del tetto. In effetti, considereremo che dovremo minimizzare questa pendenza indipendentemente dal valore degli altri parametri. Quanto allo studio di parametri correlati, studieremo i coppi di parametri elencati nella tabella seguente. È notevole che faremo solamente 5 studi, al posto dei 45 possibili: i 3 coppi di parametri che avevano una correlazione elevata, e due coppi con l'orientamento di cui l'influenza non è definita da coefficienti di correlazione lineari.

Visto che lo studio di sensibilità è solamente possibile per variabili continui (a causa del calcolo della derivata parziale), non abbiamo potuto valutare l'influenza di alcuni parametri. Saranno quindi studiati associati a parametri che ci sembrano correlati.

Fattore analizzato	influenza su	daylight autonomy	energia grigia	costi
Dimensione finestra	orientamento	x	x	x
orientamento	rapporto S/V	x	x	x
spessore isolante muri	spessore di isolante contro terra		x	x
dimensione finestra tetto	spessore isolante muri	x	x	x
dimensione finestra muro	dimensione finestra tetto	x	x	x
tecnologia	massiccia leggera		x x	x x
vetro	doppio triplo	x x	x x	x x
isolante (origine materiale)	sintetica vegetale minerale			
panelli fotovoltaici				

Studiati in parti ulteriore

figura VI.273: Riassunto dei parametri e coppi di parametri da studiare

4. RISULTATI

a) Orientamento / Dimensione finestra

raffrescamento (kWh/(m ² *anno))		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
dim finestra	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.03	0.06	0.07	0.06	0.05	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
	5	0.11	0.21	0.24	0.21	0.17	0.13	0.07	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03
	6	0.25	0.45	0.54	0.50	0.42	0.31	0.18	0.07	0.03	0.02	0.03	0.09
	7	0.48	0.86	1.03	0.94	0.83	0.61	0.35	0.15	0.06	0.04	0.06	0.18
	8	0.79	1.39	1.64	1.54	1.37	1.06	0.61	0.27	0.11	0.08	0.11	0.30
	9	1.20	2.05	2.42	2.29	2.06	1.66	0.97	0.43	0.18	0.12	0.18	0.48

figura VI.274: Raffrescamento in funzione dell'orientamento e della dimensione della finestra

riscaldamento (kWh/(m ² *anno))		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
dim finestra	1	20.5	20.3	20.1	20.0	20.2	20.4	20.6	20.7	20.7	20.7	20.7	20.7
	2	20.7	20.1	19.6	19.3	19.7	20.3	20.8	21.1	21.1	21.1	21.1	21.0
	3	20.7	19.9	19.0	18.5	19.0	20.0	20.9	21.4	21.5	21.4	21.4	21.3
	4	20.8	19.6	18.3	17.8	18.4	19.7	20.9	21.6	21.8	21.7	21.7	21.5
	5	20.8	19.3	17.8	17.1	17.8	19.3	20.9	21.8	22.1	22.0	22.0	21.7
	6	20.8	19.0	17.2	16.4	17.2	19.0	20.8	22.0	22.3	22.2	22.2	21.9
	7	20.7	18.8	16.8	15.9	16.7	18.7	20.7	22.1	22.5	22.5	22.4	22.0
	8	20.7	18.5	16.4	15.4	16.3	18.4	20.6	22.2	22.7	22.6	22.6	22.1
	9	20.6	18.3	16.0	15.0	15.9	18.1	20.6	22.3	22.8	22.8	22.7	22.2

figura VI.275: Riscaldamento in funzione dell'orientamento e della dimensione della finestra

energia luce elettrica (kWh/(m ² *anno))		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
dim finestra	1	2.6	2.6	2.7	2.8	3.0	3.0	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.5
	2	2.3	3.0	2.0	2.6	3.5	2.2	2.8	3.4	2.4	2.6	2.9	2.1
	3	2.1	2.2	1.9	2.2	2.5	2.2	2.6	2.8	2.5	2.4	2.5	2.2
	4	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.2	2.3	2.3	2.4	2.3	2.2	2.0
	5	1.8	1.6	1.9	1.8	1.8	2.1	2.1	2.2	2.5	2.1	2.0	2.2
	6	1.6	1.8	1.6	1.6	1.7	1.7	1.9	2.0	1.9	2.0	1.9	1.8
	7	1.4	1.7	1.3	1.4	1.9	1.4	1.7	2.3	2.0	1.8	2.1	1.7
	8	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.6	1.5
	9	1.3	1.0	2.7	1.3	1.0	3.0	1.5	1.1	2.1	1.6	1.1	1.9

figura VI.276: Energia per la luce artificiale in funzione dell'orientamento e della dimensione della finestra, calcolata con Daysim

energia luce elettrica (kWh/(m ² *anno))		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
dim finestra	3.00	4.8	4.5	4.1	3.9	3.7	3.8	4.2	4.6	4.9	5.0	5.1	5.0
	4.00	4.0	3.6	3.2	2.8	2.6	2.7	3.1	3.7	4.1	4.4	4.4	4.3
	5.00	3.3	3.0	2.6	2.3	2.1	2.2	2.5	2.9	3.4	3.7	3.8	3.6
	6.00	2.9	2.6	2.3	2.0	1.9	1.9	2.1	2.5	2.8	3.1	3.2	3.1
	7.00	2.5	2.3	2.0	1.8	1.7	1.7	1.9	2.2	2.4	2.7	2.7	2.7
	8.00	2.3	2.1	1.9	1.7	1.6	1.6	1.7	2.0	2.2	2.4	2.5	2.4
	9.00	2.1	2.0	1.8	1.6	1.5	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.2	2.2
	10.00	2.0	1.9	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5	1.7	1.9	2.0	2.1	2.1
	11.00	1.9	1.8	1.6	1.5	1.4	1.4	1.5	1.6	1.8	1.9	2.0	2.0

figura VI.277: Energia per la luce artificiale in funzione dell'orientamento e della dimensione della finestra, calcolata con Archsim

I primi risultati (figura VI.274) riguardano l'influenza dell'orientamento e della dimensione della finestra. In pratica, considereremo che l'altezza di questa finestra rimane costante, ma che la larghezza varia tra 1m e 9m. Ricordiamo che per l'orientamento, 0 corrisponde a una finestra a ovest, e 90 a sud.

La prima cosa che possiamo dedurre di questi dati è che, anche con una finestra a sud di 27m² (quindi un RAI di 27% > 2*1/8), una ventilazione adattata, ma senza schermatura, i consumi in raffrescamento sono molto limitati. Questo è dovuto al fatto che la scuola sia chiusa una buona parte dell'estate, è che il clima sia abbastanza rigoroso. Proveremo nell'analisi seguenti di

impostare delle schermature, per vedere a che punto è possibile ridurre il fabbisogno energetico per raffrescamento, e se sarà possibile pensare a non avere nessun impianto per il raffrescamento, ciò che costituirebbe un risparmio sostanziale.

Per quanto riguarda il consumo di riscaldamento (figura VI.275), vediamo che il consumo in kWh/m²an non è molto elevato, probabilmente perché è acceso durante poche ore alla settimana (meno di un quarto), e durante le ore più calde. L'importante presenza di persone è anche un fatto che conduce ad avere dei consumi ragionevoli.

I risultati della figura VI.276 ci permettono di valutare i consumi energetici per la luce artificiale. È stato calcolato da Daysim. Vediamo che è la luce indiretta che conta di più: la variazione del consumo in funzione dell'orientamento non è chiara. Sembra che il peggio sia quando la finestra è a est. Però l'ambito delle variazioni è molto ridotto. Inoltre ci sono valori sorprendenti per una finestra di 9 m di larghezza.

Invece, i risultati della figura VI.277 sono sempre i valori del fabbisogno per la luce elettrica, ma calco-

lati con Archsim. Possiamo osservare che sono due volte più importante che quelli che calcolati con DIVA. Cambieremo quindi il valore della potenza per l'illuminamento che avevamo impostato prima, dividendolo per 2. La potenza disponibile sarà quindi adattata al fabbisogno.

Vediamo anche che la variazione è più o meno la stessa, ciò che conferma la pertinenza dei risultati.

energia grigia (kWh/(m ² *anno))		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
dim finestra	1	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9
	2	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0
	3	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0
	4	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1
	5	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1
	6	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1
	7	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2
	8	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2
	9	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3

figura VI.278: Energia grigia in funzione dell'orientamento e della dimensione della finestra

energia totale (kWh/(m ² *anno))		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
dim finestra	1	36.5	35.9	35.3	35.0	35.0	35.4	35.9	36.5	36.8	36.9	36.9	36.8
	2	35.8	34.9	33.9	33.3	33.5	34.2	35.1	35.9	36.4	36.6	36.7	36.5
	3	35.3	34.1	32.9	32.1	32.4	33.5	34.6	35.6	36.1	36.4	36.4	36.2
	4	35.0	33.6	32.1	31.2	31.7	32.9	34.4	35.5	35.9	36.2	36.3	36.0
	5	34.9	33.2	31.5	30.5	31.1	32.6	34.3	35.5	35.9	36.1	36.2	35.9
	6	34.8	33.1	31.2	30.1	30.7	32.4	34.2	35.5	36.0	36.1	36.2	35.9
	7	34.8	33.1	31.1	30.0	30.6	32.4	34.3	35.7	36.2	36.3	36.3	36.0
	8	35.0	33.3	31.2	30.0	30.7	32.5	34.4	35.8	36.3	36.4	36.5	36.1
	9	35.3	33.6	31.5	30.3	30.9	32.8	34.7	36.0	36.5	36.5	36.6	36.3

figura VI.279: Energia totale in funzione dell'orientamento e della dimensione della finestra

Siccome i consumi per produrre ed installare un serramento sono più alti in termini di energia grigia che la costruzione di un muro in calcestruzzo, è normale ottenere la tabella precedente (figura VI.278). Ovviamente, l'orientamento non ha nessun impatto.

I risultati di consumo globale (figura VI.279) mettono in evidenza che il riscaldamento è il consumo preponderante. Infatti, i consumi più bassi sono raggiunti

con una finestra a sud. Ma contrariamente ai consumi per il riscaldamento, il più efficiente non è di avere una finestra la più grande possibile, ma di dimensione appena più ridotte (7 o 8 metri se la finestra è a sud). Questo è dovuto all'impatto dell'energia grigia e del raffrescamento.

Il punto ottimale è ottenuto per una finestra di larghezza tra 7 e 8 metri, orientata a sud.

energia trasmessa attraverso la finestra (kWh/(m ² *anno))		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
dim finestra	1	13.7	9.0	9.8	10.0	9.8	9.0	7.7	6.2	5.1	4.8	5.1	6.3
	2	15.4	18.1	19.6	19.9	19.6	18.1	15.4	12.5	10.3	9.5	10.3	12.5
	3	23.1	27.1	29.4	29.9	29.4	27.1	23.1	18.7	15.4	14.3	15.4	18.8
	4	30.8	36.2	39.3	39.9	39.3	36.2	30.8	25.0	20.6	19.0	20.6	25.0
	5	38.6	45.2	49.1	49.9	49.1	45.2	38.5	31.2	25.7	23.8	25.7	31.3
	6	46.3	54.3	58.9	59.8	58.9	54.3	46.2	37.5	30.9	28.5	30.9	37.5
	7	54.0	63.3	68.7	69.8	68.7	63.3	54.0	43.7	36.0	33.3	36.0	43.8
	8	61.7	72.4	78.5	79.8	78.5	72.4	61.7	50.0	41.2	38.0	41.2	50.0
	9	69.4	81.4	88.3	89.8	88.3	81.4	69.4	56.2	46.3	42.8	46.3	56.3

figura VI.280: Energia trasmessa attraverso la finestra in funzione dell'orientamento e della dimensione della finestra

Abbiamo stampato i risultati che guardano l'energia trasmessa attraverso la finestra (figura VI.280), soprattutto per verificare la giustezza dei nostri risultati. Possiamo però osservare l'importanza di questi guadagni gratuiti: sono fino a sei volte più importante che i consumi per il riscaldamento. Dovremo quindi prestare un'attenzione particolare al trattamento delle finestre.

Costo totale (€/an*m²)		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
dim finestra	1	25.4	25.1	24.8	24.7	24.7	24.9	25.1	25.4	25.6	25.6	25.6	25.6
	2	25.1	24.6	24.1	23.8	23.9	24.3	24.7	25.1	25.4	25.5	25.5	25.4
	3	24.8	24.2	23.6	23.2	23.4	23.9	24.5	24.9	25.2	25.3	25.4	25.2
	4	24.6	23.9	23.2	22.7	23.0	23.6	24.3	24.9	25.1	25.2	25.3	25.1
	5	24.5	23.7	22.9	22.4	22.7	23.4	24.2	24.8	25.1	25.2	25.2	25.1
	6	24.5	23.6	22.7	22.2	22.5	23.3	24.2	24.9	25.1	25.2	25.2	25.1
	7	24.5	23.6	22.6	22.1	22.4	23.3	24.2	24.9	25.2	25.2	25.2	25.1
	8	24.6	23.7	22.7	22.1	22.4	23.3	24.3	25.0	25.2	25.3	25.3	25.1
	9	24.7	23.9	22.8	22.2	22.5	23.5	24.4	25.1	25.3	25.3	25.4	25.2

figura VI.281: Costo “totale” in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra

Alla fine, vediamo che l’ottimo, in termini di costi, è ottenuto per le stesse caratteristiche che per il consumo. Su queste tabelle, sarà importante di guardare la variazione, ma non il risultato assoluto, che non a senso, poiché non prende in considerazioni i costi che non variano.

b) Impostazione di una schermatura

Per capire adesso se sarebbe opportuno togliere un

eventuale impianto di raffrescamento, abbiamo impostato delle schermature con le caratteristiche seguente:

- Schermature esterne
- schedule di funzionamento: *Coolingyear*
- Set point di chiusura: 100W/m²
- Trasmittanza termica 0.5

raffrescamento (kWh/(m²*anno))		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
dim finestra	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
	7	0.04	0.07	0.08	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	8	0.08	0.14	0.16	0.15	0.12	0.08	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03
	9	0.14	0.23	0.26	0.24	0.19	0.14	0.08	0.04	0.03	0.02	0.03	0.07

figura VI.282: Raffrescamento in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra con una schermatura

riscaldamento (kWh/(m²*anno))		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
dim finestra	1	20.5	20.3	20.1	20.0	20.2	20.4	20.6	20.7	20.7	20.7	20.7	20.7
	2	20.7	20.2	19.6	19.4	19.7	20.3	20.8	21.1	21.1	21.1	21.1	21.0
	3	20.8	19.9	19.1	18.6	19.1	20.1	20.9	21.4	21.5	21.4	21.4	21.3
	4	20.8	19.7	18.5	17.9	18.5	19.7	20.9	21.7	21.8	21.7	21.7	21.5
	5	20.9	19.4	17.9	17.2	17.9	19.4	20.9	21.9	22.1	22.0	22.0	21.8
	6	20.8	19.1	17.4	16.5	17.3	19.1	20.9	22.0	22.3	22.3	22.3	21.9
	7	20.8	18.9	16.9	16.0	16.8	18.8	20.8	22.2	22.5	22.5	22.5	22.1
	8	20.7	18.6	16.5	15.5	16.4	18.5	20.7	22.3	22.7	22.7	22.6	22.2
	9	20.7	18.4	16.1	15.1	15.9	18.2	20.6	22.3	22.8	22.8	22.8	22.3

figura VI.283: Riscaldamento in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra con una schermatura

energia trasmessa attraverso la finestra (kWh/(m²*anno))		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
dim finestra	1	3.1	3.7	4.1	4.3	4.1	3.7	3.1	2.6	2.2	2.1	2.2	2.6
	2	6.3	7.4	8.3	8.6	8.3	7.4	6.3	5.1	4.4	4.1	4.4	5.2
	3	9.4	11.2	12.4	12.9	12.4	11.2	9.4	23.3	19.7	18.6	19.7	23.3
	4	12.6	14.9	16.6	17.2	16.6	14.9	12.6	25.9	21.9	20.7	21.9	25.9
	5	15.7	18.6	20.7	21.5	20.7	18.6	15.7	28.4	24.1	22.7	24.1	28.5
	6	18.9	22.3	24.9	25.8	24.9	22.3	18.8	31.0	26.2	24.8	26.3	31.0
	7	22.0	26.1	29.0	30.1	29.0	26.1	22.0	33.6	28.4	26.8	28.4	33.6
	8	25.1	29.8	33.2	34.4	33.2	29.8	25.1	36.2	30.6	28.9	30.6	36.2
	9	28.3	33.5	37.3	38.7	37.3	33.5	28.3	38.7	32.8	30.9	32.8	38.8

figura VI.284: Energia trasmessa attraverso la finestra in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra con una schermatura

Questi risultati ci permettono di supporre che non ci sarà nessun impianto di raffrescamento nel modulo se viene trattato in un modo più preciso. In effetti, abbiamo ottenuto un consumo massimo di 0.26kWh/m²an con una finestra di dimensioni simili a quelle del muro, ed orientata a sud. Se è pensabile di avere una tale finestra, sappiamo che un impegno importante sarà dedicato al disegno delle schermature, che avranno anche come funzione di rispettare la vita privata, e anche di

impedire agli allievi di dare più attenzione all’esterno che all’interno.

Possiamo verificare che il consumo di riscaldamento non è stato alzato grazie alla figura VI.283.

I valori sono effettivamente stati alzati, ma solamente di meno di 1%. In effetti, abbiamo impostato l’abbassamento delle schermature solo d’estate. (In pratica, non dovrebbe essere diversi.)

energia luce elettrica (kWh)/(m ² *anno)	orientamento (0=Ovest)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
1	5.0	4.8	4.4	4.3	4.3	4.5	4.8	5.0	5.1	5.2	5.2	5.2
2	4.3	3.9	3.5	3.3	3.2	3.4	3.9	4.3	4.6	4.7	4.7	4.6
3	3.7	3.3	2.9	2.6	2.5	2.7	3.1	3.6	4.0	4.1	4.2	4.1
4	3.2	2.9	2.5	2.3	2.1	2.2	2.6	3.1	3.4	3.7	3.7	3.6
5	2.9	2.5	2.3	2.0	1.9	1.9	2.2	2.6	3.0	3.2	3.3	3.2
6	2.6	2.3	2.0	1.8	1.7	1.7	2.0	2.3	2.6	2.8	2.9	2.8
7	2.3	2.1	1.9	1.7	1.6	1.6	1.8	2.1	2.3	2.5	2.6	2.5
8	2.2	2.0	1.8	1.6	1.5	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.4	2.3
9	2.0	1.9	1.7	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7	1.9	2.1	2.2	2.1

figura VI.285: Energia per la luce artificiale in funzione dell'orientamento e della dimensione della finestra con una schermatura

Osserviamo anche (figura VI.284) che le schermature hanno permesso di diminuire di più della metà l'energia che passa attraverso la finestra.

E interessante di vedere che in consumi per l'illuminamento non sono stati sostanzialmente cambiati (meno di 10%). Questo è probabilmente dovuto al fatto che le schermature si chiudono quando la luce naturale

nel volume è più che sufficiente. Siccome la trasmittanza luminosa delle schermature non è nulla, la luce naturale continua ad illuminare l'ambiente.

► Verifica dell'ipotesi di assenza di impianto di raffrescamento

Per confermare questa ipotesi, dobbiamo verificare che, senza nessun impianto di raffrescamento, il comfort termico, definito nella norma EN15251, è soddisfacente.

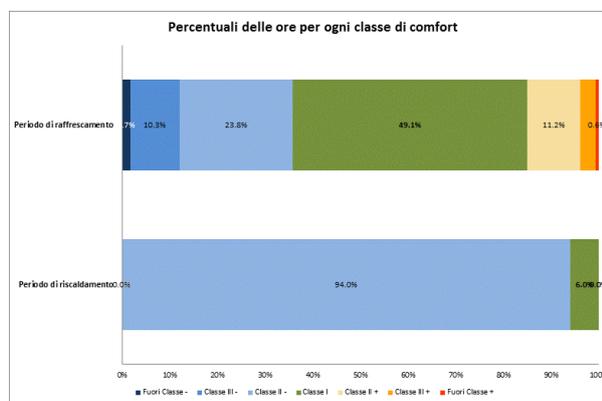
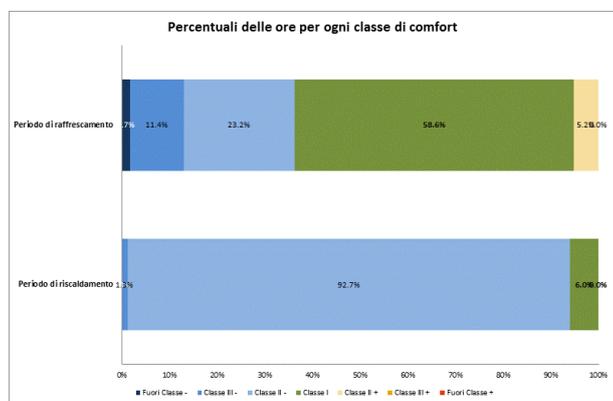


figura VI.286: Confronto tra il comfort termico di un aula con impianto di raffrescamento (a sinistra) e senza impianto di raffrescamento (a destra)

Abbiamo diviso i risultati fra il periodo di raffrescamento e quello di riscaldamento. Durante il periodo di riscaldamento, il comfort ottenuto è abbastanza alto: in entrambi i casi, durante più di 90% delle ore, siamo nella classe II. Ricordiamo che 20°C corrisponde a questa classe. Siccome è la temperatura che abbiamo impostata, è normale di non raggiungere le condizioni della classe I.

Per quanto riguarda il comfort durante il periodo di raffrescamento (dal 15 aprile al 15 ottobre), vediamo che abbiamo delle ore nella classe III e fuori classe, sia perché le temperature sono troppo basse, sia perché le temperature sono troppo alte. Le temperature troppo basse, presente con e senza schermatura, sono dovute al fatto che la temperatura esterna a fine aprile è ancora troppo bassa, e che servirebbe di poter accendere il riscaldamento. In effetti, la temperatura T_{m} (definita nella parte "III. Studio energetico") scende fino a 8,7°C. Le temperature troppo alte sono raggiunte solamente nel caso dove non c'è l'impianto di raffrescamento. Però, il discomfort occorre poche volte: 3,2% delle ore troppo

calde sono nella classe III, e 0.6% (ciò che corrisponde a 3 ore all'anno) sono fuori classe. Inoltre, la temperatura massima raggiunta durante le ore di uso è 29°C. Se è in effetti troppo alta per essere accettabile, sembra che potranno essere corrette con un studio più preciso delle schermature e della ventilazione.

In ogni caso, installare un impianto di raffrescamento per meno di 10 ore all'anno non sembra opportuno.

c) Orientamento / rapporto S/V

I risultati seguenti riguardano l'influenza dell'orientamento e del rapporto S/V, che varierà mediante la lunghezza del lato dove è presente la finestra verticale.

Ricordiamo nella tabella seguente i valori del rapporto S/V in funzione della larghezza del volume.

L	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
S/V	1.23	1.08	1	0.95	0.93	0.91	0.9	0.9	0.9	0.91	0.91	0.92	0.93	0.95	0.96	0.97	0.99	1

figura VI.287: Rapporto tra S/V e la larghezza del volume studiato

riscaldamento (kWh/(m ² *anno))		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
lunghezza lato finestra (m)	3	26.0	24.2	22.2	21.3	22.0	23.9	25.8	27.0	27.3	27.3	27.3	27.1
	4	22.6	20.9	19.1	18.3	19.0	20.7	22.4	23.6	24.0	23.9	23.9	23.7
	5	20.7	19.1	17.4	16.7	17.3	18.9	20.5	21.6	22.0	21.9	21.9	21.7
	6	19.5	18.0	16.4	15.7	16.2	17.7	19.3	20.4	20.7	20.7	20.7	20.4
	7	18.7	17.2	15.7	15.0	15.6	17.0	18.6	19.6	19.9	19.8	19.8	19.6
	8	18.2	16.8	15.3	14.6	15.2	16.6	18.1	19.0	19.3	19.2	19.2	19.0
	9	17.8	16.5	15.1	14.4	14.9	16.3	17.7	18.6	18.9	18.8	18.8	18.6
	10	17.6	16.3	14.9	14.3	14.8	16.1	17.5	18.4	18.6	18.6	18.6	18.4
	11	17.5	16.2	14.9	14.2	14.8	16.1	17.4	18.3	18.5	18.5	18.5	18.3
	12	17.5	16.2	14.9	14.3	14.8	16.1	17.4	18.3	18.5	18.5	18.5	18.3
	13	17.6	16.3	15.0	14.3	14.9	16.2	17.5	18.4	18.6	18.6	18.6	18.4
	14	17.7	16.4	15.1	14.5	15.0	16.3	17.6	18.5	18.8	18.8	18.8	18.5
	15	17.8	16.5	15.2	14.6	15.1	16.4	17.8	18.6	18.9	19.0	18.9	18.7
	16	18.0	16.7	15.4	14.8	15.3	16.6	18.0	18.9	19.2	19.2	19.2	18.9
	17	18.3	17.0	15.7	15.0	15.6	16.9	18.2	19.1	19.4	19.5	19.4	19.1
	18	18.5	17.2	15.9	15.2	15.8	17.1	18.4	19.4	19.7	19.8	19.7	19.4
	19	18.8	17.5	16.2	15.5	16.1	17.4	18.7	19.7	20.0	20.1	20.0	19.7
20	19.1	17.8	16.4	15.8	16.3	17.7	19.0	20.0	20.3	20.4	20.3	20.0	

figura VI.288: Riscaldamento in funzione dell'orientamento e del rapporto S/V

Non è sorprendente di vedere che i consumi più bassi sono raggiunti per dei rapporti S/V più bassi, è sempre con una finestra a sud. Il fatto che il valore più bassa sia ottenuto per un volume di 11 m di lunghezza (non corrisponde al rapporto S/V minimo), è probabilmente dovuto alla presenza di una finestra su un solo lato.

Siccome nostro volume è previsto per un uso didattico, il rapporto S/V, e più particolarmente il rapporto fra lunghezza e larghezza dovrà essere definito in un modo adeguato, per permettere una qualità di funzionamento delle lezioni idoneo. Per esempio, per che ciascun allievo abbia una buona vista sulla lavagna, l'aula non dovrà probabilmente essere un quadrato, ma un rettangolo.

raffrescamento (kWh/(m ² *anno))		orientamento (0=Ovest)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
lunghezza lato finestra	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	6	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	7	0.002	0.005	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	8	0.003	0.008	0.009	0.007	0.005	0.004	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
	9	0.005	0.010	0.011	0.009	0.006	0.005	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001
	10	0.006	0.011	0.013	0.011	0.007	0.006	0.004	0.002	0.001	0.000	0.001	0.002
	11	0.006	0.012	0.014	0.011	0.008	0.007	0.005	0.003	0.001	0.001	0.001	0.003
	12	0.007	0.012	0.013	0.011	0.008	0.007	0.005	0.003	0.001	0.001	0.001	0.003
	13	0.006	0.012	0.013	0.010	0.008	0.007	0.005	0.003	0.001	0.001	0.001	0.002
	14	0.005	0.011	0.011	0.009	0.007	0.007	0.004	0.002	0.001	0.000	0.001	0.002
	15	0.005	0.009	0.010	0.008	0.006	0.006	0.004	0.002	0.001	0.000	0.001	0.002
	16	0.004	0.008	0.008	0.007	0.005	0.005	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
	17	0.003	0.006	0.007	0.005	0.004	0.004	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
	18	0.002	0.005	0.005	0.004	0.003	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	19	0.001	0.003	0.004	0.003	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	0.001	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

figura VI.289: Raffrescamento in funzione dell'orientamento e del rapporto S/V

Se i valori assoluti del raffrescamento sono sempre molto bassi, ci danno comunque un'informazione importante: è quando il rapporto S/V è il più grande, quindi quando abbiamo più trasmissione di calore attraverso i muri che il consumo è più basso. Possiamo dedurre che la maggior parte del tempo, il fabbisogno in raffrescamento non è dovuto al fatto che la temperatura dell'aria esterna superi i 26°C, ma che gli apporti legati alla presenza di persone dentro il volume sono troppo importanti. Non essendo possibile di cambiare questo

parametro, dovremmo impostare una ventilazione efficiente d'estate, che ci servirà a raffrescare il volume.

Questa conclusione vale anche per l'intervento sull'edificio esistente: se riusciamo a favorire la ventilazione, potremo raggiungere un fabbisogno in raffrescamento bassissimo, se non addirittura non averne.

energia luce elettrica (kWh/(m ² *anno))		orientamento (0=Ovest)												
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
lunghezza lato finestra (m)	3.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	4.00	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	5.00	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
	6.00	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2
	7.00	1.5	1.3	1.1	1.0	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6	1.7	1.7	1.6	1.6
	8.00	1.8	1.6	1.4	1.2	1.2	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.2	2.1	2.1
	9.00	2.2	1.9	1.6	1.4	1.4	1.5	1.8	2.2	2.5	2.7	2.7	2.5	2.5
	10.00	2.6	2.2	1.8	1.6	1.6	1.8	2.1	2.6	2.9	3.2	3.2	2.9	2.9
	11.00	2.9	2.5	2.1	1.8	1.8	2.0	2.4	2.9	3.3	3.5	3.5	3.3	3.3
	12.00	3.1	2.7	2.3	2.0	2.0	2.2	2.7	3.2	3.6	3.8	3.8	3.5	3.5
	13.00	3.3	2.9	2.5	2.2	2.2	2.4	2.9	3.4	3.8	4.0	4.0	3.8	3.8
	14.00	3.5	3.1	2.7	2.4	2.4	2.6	3.1	3.6	4.0	4.1	4.1	3.9	3.9
	15.00	3.7	3.2	2.8	2.6	2.6	2.8	3.2	3.8	4.1	4.3	4.3	4.1	4.1
	16.00	3.8	3.4	2.9	2.7	2.7	2.9	3.4	3.9	4.3	4.4	4.4	4.2	4.2
	17.00	3.9	3.5	3.1	2.9	2.8	3.1	3.5	4.0	4.4	4.5	4.5	4.3	4.3
	18.00	4.0	3.6	3.2	3.0	3.0	3.2	3.6	4.1	4.4	4.6	4.6	4.4	4.4
	19.00	4.1	3.7	3.3	3.1	3.1	3.3	3.7	4.2	4.5	4.6	4.6	4.5	4.5
20.00	4.2	3.8	3.4	3.2	3.2	3.4	3.8	4.3	4.6	4.7	4.7	4.5	4.5	

figura VI.290: Energia per la luce artificiale in funzione dell'orientamento e del rapporto S/V

energia totale (kWh/(m ² *anno))		orientamento (0=Ovest)												
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
lunghezza lato finestra (m)	3	47.9	46.1	44.1	43.2	43.9	45.8	47.8	49.0	49.3	49.2	49.3	49.1	49.1
	4	42.0	40.3	38.5	37.7	38.3	40.0	41.8	43.0	43.4	43.3	43.4	43.1	43.1
	5	38.8	37.1	35.4	34.6	35.2	36.8	38.5	39.7	40.1	40.1	40.1	39.8	39.8
	6	37.0	35.3	33.7	32.9	33.5	35.0	36.7	37.8	38.2	38.2	38.2	38.3	38.0
	7	36.0	34.3	32.7	31.9	32.4	33.9	35.6	36.8	37.2	37.3	37.3	37.4	37.0
	8	35.5	33.9	32.2	31.4	31.9	33.4	35.1	36.3	36.8	37.0	37.0	36.6	36.6
	9	35.4	33.7	32.0	31.2	31.7	33.2	34.9	36.2	36.7	36.9	36.9	36.9	36.5
	10	35.4	33.8	32.0	31.2	31.7	33.2	34.9	36.2	36.9	37.0	37.0	37.0	36.6
	11	35.7	34.0	32.3	31.4	31.9	33.4	35.2	36.5	37.2	37.3	37.3	37.3	36.9
	12	36.0	34.3	32.6	31.7	32.2	33.8	35.5	36.9	37.6	37.7	37.7	37.7	37.2
	13	36.5	34.7	33.0	32.1	32.7	34.2	35.9	37.3	38.0	38.2	38.2	38.1	37.7
	14	37.0	35.2	33.5	32.6	33.1	34.7	36.4	37.8	38.5	38.7	38.7	38.6	38.2
	15	37.5	35.7	34.0	33.1	33.7	35.2	37.0	38.4	39.1	39.2	39.2	39.2	38.7
	16	38.0	36.3	34.6	33.7	34.2	35.8	37.5	39.0	39.6	39.8	39.8	39.7	39.3
	17	38.6	36.9	35.1	34.3	34.8	36.4	38.1	39.6	40.2	40.4	40.4	40.3	39.9
	18	39.2	37.5	35.7	34.9	35.4	37.0	38.7	40.2	40.8	41.0	41.0	40.9	40.5
	19	39.8	38.1	36.4	35.5	36.0	37.6	39.4	40.8	41.5	41.6	41.6	41.6	41.1
20	40.5	38.7	37.0	36.1	36.7	38.2	40.0	41.5	42.1	42.2	42.2	42.2	41.7	

figura VI.291: Energia totale in funzione dell'orientamento e del rapporto S/V

Costo totale (€/m ²)		orientamento (0=Ovest)												
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
lunghezza lato finestra (m)	3	24.4	23.5	22.5	22.0	22.4	23.4	24.3	24.9	25.1	25.0	25.1	25.0	25.0
	4	20.7	19.9	19.0	18.6	18.9	19.7	20.6	21.2	21.4	21.4	21.4	21.3	21.3
	5	18.7	17.9	17.1	16.6	16.9	17.8	18.6	19.2	19.4	19.4	19.4	19.4	19.2
	6	17.6	16.8	15.9	15.5	15.8	16.6	17.4	18.0	18.2	18.2	18.2	18.2	18.1
	7	17.0	16.1	15.3	14.9	15.2	15.9	16.8	17.4	17.6	17.6	17.6	17.6	17.5
	8	16.7	15.8	15.0	14.6	14.8	15.6	16.4	17.0	17.3	17.4	17.4	17.4	17.2
	9	16.5	15.7	14.9	14.4	14.7	15.4	16.3	16.9	17.2	17.3	17.3	17.3	17.1
	10	16.6	15.7	14.9	14.4	14.7	15.4	16.3	17.0	17.3	17.4	17.4	17.4	17.1
	11	16.7	15.9	15.0	14.6	14.8	15.6	16.4	17.1	17.4	17.5	17.5	17.5	17.3
	12	16.9	16.0	15.2	14.7	15.0	15.8	16.6	17.3	17.7	17.7	17.7	17.7	17.5
	13	17.1	16.3	15.4	15.0	15.2	16.0	16.9	17.6	17.9	18.0	18.0	18.0	17.8
	14	17.4	16.6	15.7	15.3	15.5	16.3	17.2	17.9	18.2	18.3	18.3	18.3	18.0
	15	17.7	16.9	16.0	15.6	15.8	16.6	17.5	18.2	18.5	18.6	18.6	18.6	18.4
	16	18.1	17.2	16.3	15.9	16.2	16.9	17.8	18.5	18.9	18.9	18.9	18.9	18.7
	17	18.4	17.6	16.7	16.3	16.5	17.3	18.2	18.9	19.2	19.3	19.3	19.3	19.1
	18	18.8	17.9	17.1	16.6	16.9	17.7	18.6	19.3	19.6	19.7	19.7	19.7	19.4
	19	19.2	18.3	17.4	17.0	17.3	18.1	18.9	19.7	20.0	20.1	20.1	20.0	19.8
20	19.6	18.7	17.8	17.4	17.7	18.4	19.3	20.1	20.4	20.5	20.5	20.4	20.2	

figura VI.292: Costo "totale" in funzione dell'orientamento e del rapporto S/V

Questa verifica (figura VI.290) ci mostra che se la finestra è sul lato corto del volume, il fabbisogno energetico per la luce artificiale è inferiore. In un'aula didattica, corrisponderebbe ad avere la finestra sui lati dell'aula, ciò che è più interessante di un punto di vista funzionale: è possibile di metterne su entrambi i lati. Però, siccome questo significa avere una finestra a sud e una a nord nel nostro caso, questa considerazione sarà da confrontare con il fabbisogno per riscaldare.

Il punto più efficiente dell'analisi del fabbisogno in energia totale in funzione dell'orientamento e della compattezza dell'edificio (figura VI.291) corrisponde

ha un orientamento sempre a sud, e una lunghezza del lato dove è posizionata la finestra fra 9 e 10 metri, cioè un rapporto S/V il più piccolo possibile.

Il punto ottimale in termini di costi (figura VI.292) è lo stesso nel caso dell'analisi del costo totale, poiché avere un rapporto S/V piccolo significa anche avere meno di materiali usati per la costruzione dell'edificio.

d) Spessore isolante

Questo studio sullo spessore di isolante in XPS. Siccome la produzione di questo materiale a un importante impatto ambientale, è necessario di dimensiona-

re in un modo corretto la quantità necessaria. Abbiamo scelto di fare variare gli spessore fra 0,1m e 1,1m, e di separare le chiusure contro terra, e le altre (muri e tetto).

riscaldamento (kWh/(m ² *anno))		spessore isolante (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
spessore isolante contro terra (m)	0.1	26.4	17.8	14.3	12.4	11.3	10.6	10.0	9.6	9.4	9.1	8.6
	0.2	26.8	17.8	14.2	12.2	11.0	10.3	9.7	9.2	9.0	8.7	8.2
	0.3	27.0	17.9	14.1	12.1	10.9	10.2	9.6	9.1	8.9	8.5	8.1
	0.4	27.1	17.9	14.1	12.1	10.9	10.1	9.5	9.0	8.8	8.5	8.0
	0.5	27.1	17.9	14.1	12.1	10.8	10.1	9.5	9.0	8.8	8.4	8.0
	0.6	27.2	17.9	14.1	12.1	10.8	10.1	9.5	9.0	8.7	8.4	8.0
	0.7	27.2	17.9	14.1	12.1	10.8	10.1	9.4	8.9	8.7	8.4	7.9
	0.8	27.2	17.9	14.1	12.1	10.8	10.1	9.4	8.9	8.7	8.4	7.9
	0.9	27.3	17.9	14.1	12.1	10.8	10.1	9.4	8.9	8.7	8.3	7.9
	1	27.2	17.9	14.1	12.0	10.8	10.0	9.4	8.9	8.7	8.3	7.9
	1.1	27.2	17.9	14.1	12.0	10.8	10.0	9.4	8.9	8.7	8.3	7.9

figura VI.293: Riscaldamento in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra

raffrescamento (kWh/(m ² *anno))		spessore isolante muri										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Spessore isolante contro terra	0.1	0.01	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	0.2	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	0.3	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
	0.4	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	0.5	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	0.6	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	0.7	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	0.8	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	0.9	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	1.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

figura VI.294: Raffrescamento in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra

energia totale (kWh/(m ² *anno))		spessore isolante (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
spessore isolante contro terra (m)	0.1	39.3	32.7	31.2	31.3	32.1	33.5	34.9	36.4	38.2	39.9	41.4
	0.2	40.6	33.6	31.9	31.9	32.7	34.0	35.4	36.9	38.7	40.3	41.9
	0.3	41.6	34.5	32.7	32.7	33.4	34.7	36.1	37.6	39.4	41.0	42.6
	0.4	42.6	35.3	33.5	33.5	34.2	35.5	36.9	38.4	40.1	41.8	43.4
	0.5	43.5	36.2	34.3	34.3	35.1	36.3	37.7	39.2	40.9	42.6	44.1
	0.6	44.3	37.0	35.2	35.1	35.9	37.1	38.5	40.0	41.7	43.4	45.0
	0.7	45.2	37.8	36.0	36.0	36.7	38.0	39.3	40.8	42.5	44.2	45.8
	0.8	46.0	38.7	36.8	36.8	37.5	38.8	40.1	41.6	43.4	45.0	46.6
	0.9	46.9	39.5	37.7	37.6	38.3	39.6	40.9	42.4	44.2	45.8	47.4
	1	47.7	40.3	38.5	38.4	39.1	40.4	41.8	43.2	45.0	46.6	48.2
	1.1	48.5	41.2	39.3	39.2	40.0	41.2	42.6	44.0	45.8	47.5	49.0

figura VI.295: Energia totale in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra

Costo totale (€/m ²)		spessore isolante (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
spessore isolante contro terra (m)	0.1	19.0	15.4	14.4	14.2	14.4	14.8	15.3	15.8	16.5	17.1	17.6
	0.2	19.4	15.7	14.6	14.3	14.5	14.9	15.3	15.8	16.5	17.1	17.6
	0.3	19.7	15.9	14.8	14.5	14.6	15.0	15.5	16.0	16.6	17.2	17.7
	0.4	20.0	16.1	14.9	14.7	14.8	15.2	15.6	16.1	16.8	17.4	17.9
	0.5	20.2	16.3	15.1	14.9	15.0	15.4	15.8	16.3	16.9	17.5	18.1
	0.6	20.4	16.5	15.3	15.1	15.2	15.6	16.0	16.5	17.1	17.7	18.2
	0.7	20.6	16.7	15.5	15.2	15.4	15.8	16.2	16.7	17.3	17.9	18.4
	0.8	20.8	16.9	15.7	15.4	15.5	15.9	16.4	16.9	17.5	18.1	18.6
	0.9	21.0	17.1	15.9	15.6	15.7	16.1	16.6	17.0	17.7	18.3	18.8
	1	21.2	17.3	16.1	15.8	15.9	16.3	16.7	17.2	17.9	18.4	19.0
	1.1	21.4	17.4	16.3	16.0	16.1	16.5	16.9	17.4	18.0	18.6	19.2

figura VI.296: Costo "totale" in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra

I risultati dell'analisi del fabbisogno energetico per il riscaldamento in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra (figura VI.293), mostrano che ovviamente, più c'è isolante, meglio è. Però, possiamo anche osservare che lo spessore dell'isolante del solaio contro terra non ha una grande influenza sul consumo.

Osserviamo che il fabbisogno energetico per il raffrescamento (figura VI.294) è sempre molto basso. E che meno ci sono perdite attraverso i muri (quindi con degli spessori di isolante più alti), più consuma. Questo conferma che durante l'estate, la strategia da adottare non sarà di isolare, ma di favorire la ventilazione, come l'abbiamo visto nella parte precedente.

Per quanto riguarda il consumo totale (figura VI.295), il caso peggiore è quando c'è pochissimo isolante sui muri (10 cm), e lo spessore massimo contro terra.

Il punto ottimale è ottenuto con 10 cm di isolante contro terra, e 30 centimetri sui i muri e sul tetto. Perfezioneremo i risultati per il nostro studio del modulo in particolare.

Il punto ottimale per i costi (, invece, è ottenuto con valori di isolante sulle chiusure non contro terra più alti: 40 cm. Questo significa che dovremmo fare una scelta tra favorire un costo basso, o favorire un impatto

ambientale ridotto.

e) Finestra orizzontale/ spessore di isolante

A questo punto, aggiungiamo la possibilità per il tetto di diventare in parte trasparente. Dato che abbiamo già visto che era interessante di massimizzare la superficie vetrata a sud, è interessante sapere se la stessa conclusione vale anche per il tetto. Siccome approfitterà più delle radiazioni durante la stagione dove il sole è alto, e meno durante l'inverno, è probabile che i risultati non siano i stessi.

riscaldamento (kWh/(m ² *anno))		spessore isolante muri (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
dimensione finestra orizzontale (m)	1	28.5	19.8	16.3	14.3	13.1	12.4	11.8	11.3	11.1	10.7	10.3
	2	24.6	16.4	13.1	11.3	10.3	9.7	9.1	8.7	8.5	8.2	7.8
	3	21.1	13.5	10.6	9.1	8.2	7.7	7.2	6.9	6.7	6.4	6.1
	4	18.1	11.2	8.7	7.4	6.6	6.2	5.8	5.5	5.4	5.2	4.9
	5	15.5	9.4	7.2	6.1	5.5	5.1	4.8	4.5	4.4	4.2	4.0
	6	13.3	7.9	6.0	5.1	4.5	4.2	3.9	3.7	3.7	3.5	3.3
	7	11.4	6.7	5.1	4.3	3.8	3.6	3.3	3.2	3.1	2.9	2.8
	8	9.8	5.7	4.3	3.6	3.3	3.1	2.9	2.7	2.7	2.5	2.5

figura VI.297: Riscaldamento in funzione dello spessore di isolante e della dimensione della parte trasparente del tetto

raffrescamento (kWh/(m ² *anno))		spessore isolante muri (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
dimensione finestra orizzontale (m)	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.07	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	5	0.12	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
	6	0.19	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20
	7	0.28	0.28	0.32	0.35	0.37	0.39	0.40	0.41	0.41	0.42	0.43
	8	0.42	0.51	0.59	0.65	0.68	0.70	0.72	0.73	0.74	0.74	0.76

figura VI.298: Raffrescamento in funzione dello spessore di isolante e della dimensione della parte trasparente del tetto

Il risultato interessante per quanto riguarda il riscaldamento con una finestra sul tetto (figura VI.297) è che raggiungiamo dei consumi bassissimi di riscaldamento: fino a 2,5 kWh/m²an.

Il consumo per il raffrescamento, benché sia stato alzato, rimane facilmente gestibile, anche per dimensioni di finestre e spessore di isolante molto alti.

energia totale (kWh/(m ² *anno))		spessore isolante muri (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
dimensione finestra orizzontale (m)	1	38.7	30.8	28.0	26.8	26.3	26.4	26.6	26.8	27.4	27.7	28.0
	2	34.8	27.3	24.7	23.7	23.3	23.5	23.7	24.0	24.6	24.9	25.3
	3	31.5	24.5	22.3	21.5	21.4	21.6	21.8	22.2	22.7	23.1	23.5
	4	28.7	22.5	20.7	20.1	20.0	20.3	20.6	20.9	21.5	22.0	22.4
	5	26.5	21.0	19.5	19.0	19.0	19.3	19.7	20.1	20.6	21.1	21.5
	6	24.6	19.8	18.6	18.3	18.4	18.7	19.0	19.5	20.0	20.5	20.9
	7	23.1	18.9	18.0	17.8	18.0	18.4	18.7	19.2	19.7	20.2	20.7
	8	21.9	18.4	17.7	17.7	17.9	18.3	18.7	19.2	19.7	20.2	20.7

figura VI.299: Energia totale in funzione dello spessore di isolante e della dimensione della parte trasparente del tetto

Costo totale (€/m ²)		spessore isolante muri (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
dimensione finestra orizzontale (m)	1	19.9	16.3	15.3	15.1	15.2	15.6	16.1	16.6	17.2	17.8	18.3
	2	18.1	14.7	13.7	13.6	13.8	14.2	14.7	15.2	15.9	16.4	16.9
	3	16.5	13.4	12.7	12.6	12.9	13.3	13.8	14.3	15.0	15.5	16.1
	4	15.3	12.5	11.9	12.0	12.3	12.7	13.2	13.8	14.4	14.9	15.5
	5	14.3	11.9	11.4	11.5	11.9	12.3	12.8	13.4	14.0	14.5	15.1
	6	13.4	11.4	11.1	11.2	11.6	12.1	12.6	13.1	13.7	14.2	14.8
	7	12.8	11.0	10.9	11.1	11.5	12.0	12.5	13.0	13.6	14.1	14.6
	8	12.3	10.9	10.8	11.1	11.5	12.0	12.5	13.0	13.6	14.1	14.6

figura VI.300: Costo "totale" in funzione dello spessore di isolante e della dimensione della parte trasparente del tetto

Come per le finestre a sud, il punto ottimale per il fabbisogno in energia totale è ottenuto con una superficie vetrata la più grande possibile. Questo è dovuto al fatto che la radiazione solare sia prevalentemente diffusa (51% d'estate e 69% d'inverno): il velux ci permette di captare una più ampia quantità di energia durante l'inverno e di non captarne troppo durante l'estate. Ricordiamo anche che la scuola è chiusa durante i mesi caldi.

L'altro risultato interessante è che lo spessore ideale di isolante è stato significativamente abbassato con questa finestra: è ottimale di avere tra 30 cm e 40 cm di isolante mentre era ottimale di averne circa 50 cm senza finestra sul tetto. Tale parere è dovuto al fatto che d'inverno, il volume è più facilmente riscaldato grazie

ai guadagni gratuiti (irraggiamento), è che il guadagno marginale di energia risparmiata grazie a l'aumento di spessore di isolante non compensa più l'energia grigia dell'isolamento.

Il costo ottimale è ottenuto per una finestra di 8 m di larghezza (in pratica un tetto trasparente), e 30 cm di isolante.

f) Dimensione finestra muro / dimensione finestra tetto

Sarà adesso interessante di vedere se è efficiente di avere le due superficie (a sud e il tetto) trasparente, o se è meglio avere un compromesso tra le due.

raffrescamento (kWh/(m ² *anno))		larghezza finestra verticale (m)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
larghezza finestra orizzontale (m)	1	0.00	0.00	0.00	0.02	0.07	0.15	0.29	0.51	0.80
	2	0.00	0.00	0.03	0.07	0.15	0.29	0.49	0.77	1.10
	3	0.00	0.03	0.08	0.15	0.28	0.48	0.74	1.07	1.48
	4	0.04	0.08	0.16	0.28	0.47	0.72	1.04	1.44	1.94
	5	0.09	0.16	0.28	0.46	0.71	1.03	1.43	1.93	2.50
	6	0.17	0.28	0.47	0.73	1.05	1.45	1.93	2.51	3.14
	7	0.32	0.52	0.78	1.10	1.48	1.96	2.52	3.14	3.82
	8	0.59	0.85	1.17	1.54	2.00	2.54	3.15	3.82	4.53

figura VI.301: Raffrescamento in funzione delle dimensioni delle finestre verticale e orizzontale

energia totale (kWh/(m ² *anno))		larghezza finestra verticale (m)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
larghezza finestra orizzontale (m)	1	28.0	26.2	24.8	23.6	22.7	21.9	21.3	20.9	20.6
	2	24.7	23.4	22.5	21.7	21.0	20.5	20.2	19.9	19.9
	3	22.3	21.5	20.8	20.3	19.8	19.5	19.4	19.3	19.4
	4	20.7	20.1	19.6	19.2	19.0	18.9	18.9	19.1	19.4
	5	19.5	19.1	18.7	18.6	18.5	18.6	18.8	19.1	19.6
	6	18.6	18.3	18.2	18.2	18.3	18.6	18.9	19.4	20.0
	7	18.0	17.9	18.0	18.1	18.4	18.8	19.3	19.9	20.5
	8	17.7	17.8	18.0	18.3	18.7	19.2	19.7	20.4	21.1

figura VI.302: Energia totale in funzione delle dimensioni delle finestre verticale e orizzontale

Il risultato che contiene la risposta è quello del fabbisogno di raffrescamento (figura VI.301) : se le due superficie hanno una percentuale di superficie trasparente importante, il fabbisogno di raffrescamento esplose.

Gli effetti di questo risultato si vedono sul fabbisogno globale (figura VI.302): è più efficiente di avere un tetto totalmente vetrato e un fronte a sud opaco. Questo risultato viene dal fatto che le schermature a sud anno un fattore minimo di trasmittanza di 0,5, mentre quelle sul tetto raggiungono 0,1. In pratica, se vogliamo conservare delle finestre sui muri, potremo considerare i casi con una superficie trasparente del tetto un po' meno importante, e una superficie vetrata a sud che può raggiungere fino a un quarto della superficie calpestabile, senza che i consumi aumentino troppo.

g) Differenza doppio vetro / triplo vetro

Per questa analisi, abbiamo confrontato i consumi di un volume con un serramento a doppio vetro, e con triplo vetro, facendo variare lo spessore di isolante. In effetti, sappiamo che la messa in opera di un serramento a triplo vetro permette di diminuire le perdite di calore per conduzione. Però, siccome costa di più, se le chiusure opache non sono abbastanza isolate, l'effetto del triplo vetro sarà annullato dai scambi di calore attraverso i muri. L'obiettivo di questo studio è quindi di determinare a partire di che spessore di isolante diventa vantaggioso di installare dei serramenti a triplo vetro.

I risultati che presentiamo non saranno i consumi nell'uno o nell'altro dei casi, ma la differenza tra il caso con triplo vetro, e quello con doppio vetro. Se il risultato è negativo, significa che il triplo vetro è meno interessante. Se è positivo, è più vantaggioso di avere dei serramenti a triplo vetro.

raffrescamento (kWh/(m ² *anno))		spessore isolante (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
spessore isolante contro terra (m)	0.1	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.2	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	0.3	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002
	0.4	0.001	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004
	0.5	0.001	0.004	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.004	0.004	0.004
	0.6	0.002	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004	0.005	0.005	0.003
	0.7	0.002	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.003
	0.8	0.001	0.004	0.004	0.005	0.006	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
	0.9	0.002	0.004	0.004	0.006	0.006	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
	1	0.002	0.004	0.004	0.005	0.006	0.005	0.004	0.004	0.004	0.003	0.004
	1.1	0.002	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004

figura VI.303: Raffrescamento in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra con serramenti a triplo vetro

riscaldamento (kWh/(m ² *anno))		spessore isolante (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
spessore isolante contro terra (m)	0.1	1.22	1.38	1.43	1.43	1.44	1.47	1.45	1.44	1.45	1.43	1.41
	0.2	1.23	1.39	1.45	1.46	1.48	1.49	1.52	1.48	1.50	1.47	1.43
	0.3	1.22	1.40	1.46	1.48	1.48	1.52	1.50	1.49	1.51	1.49	1.48
	0.4	1.23	1.40	1.47	1.50	1.51	1.53	1.53	1.50	1.51	1.50	1.45
	0.5	1.22	1.40	1.47	1.49	1.49	1.53	1.53	1.53	1.51	1.49	1.46
	0.6	1.22	1.40	1.47	1.49	1.50	1.53	1.54	1.54	1.52	1.49	1.46
	0.7	1.25	1.40	1.47	1.49	1.52	1.54	1.54	1.54	1.52	1.49	1.46
	0.8	1.25	1.41	1.47	1.51	1.52	1.54	1.57	1.54	1.53	1.49	1.47
	0.9	1.25	1.40	1.47	1.51	1.52	1.55	1.54	1.53	1.55	1.50	1.47
	1	1.25	1.40	1.47	1.51	1.52	1.55	1.54	1.54	1.55	1.50	1.47
	1.1	1.25	1.41	1.47	1.51	1.52	1.55	1.54	1.54	1.55	1.50	1.47

figura VI.304: Riscaldamento in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra con serramenti a triplo vetro

E già interessante di vedere sulla figura VI.303 che in funzione della quantità di isolamento, il triplo vetro non è sempre molto vantaggioso per diminuire il fabbisogno in raffrescamento: se c'è poco isolante, è quasi equivalente avere un serramento con doppio vetro.

Questo risultato è abbastanza difficile da spiegare: c'è un massimo di risparmio sull'energia di riscaldamento quando si sceglie un triplo vetro al posto di un doppio. Avremmo potuto pensare che più lo spessore di isolante era grande, più la percentuale di perdite at-

traverso il serramento è alto, quindi più il valore di trasmittanza termica è importante.

Questo si spiega vedendo il grafico seguente, che rappresenta la stessa differenza, ma divisa dal valore di fabbisogno in riscaldamento nel caso del doppio vetro:

$$\frac{E_{risc\ doppio} - E_{risc\ triplo}}{E_{risc\ doppio}}$$

riscaldamento (kWh/(m ² *anno))		spessore isolante (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
spessore isolante contro terra (m)	0.1	4.42%	7.19%	9.09%	10.34%	11.30%	12.16%	12.63%	13.10%	13.39%	13.61%	14.02%
	0.2	4.37%	7.25%	9.31%	10.69%	11.88%	12.60%	13.53%	13.85%	14.25%	14.49%	14.77%
	0.3	4.33%	7.24%	9.37%	10.85%	11.94%	12.98%	13.54%	14.11%	14.49%	14.81%	15.49%
	0.4	4.33%	7.24%	9.41%	11.03%	12.22%	13.10%	13.83%	14.25%	14.66%	15.01%	15.28%
	0.5	4.29%	7.25%	9.42%	10.96%	12.08%	13.11%	13.92%	14.57%	14.71%	15.04%	15.42%
	0.6	4.30%	7.27%	9.45%	10.98%	12.13%	13.17%	13.99%	14.64%	14.77%	15.08%	15.45%
	0.7	4.38%	7.26%	9.46%	11.00%	12.31%	13.22%	14.06%	14.67%	14.87%	15.12%	15.53%
	0.8	4.39%	7.28%	9.45%	11.11%	12.31%	13.26%	14.30%	14.70%	14.92%	15.14%	15.66%
	0.9	4.38%	7.24%	9.43%	11.11%	12.32%	13.32%	14.05%	14.69%	15.14%	15.21%	15.69%
	1	4.38%	7.25%	9.47%	11.12%	12.36%	13.34%	14.06%	14.75%	15.20%	15.25%	15.69%
	1.1	4.38%	7.29%	9.46%	11.13%	12.37%	13.35%	14.08%	14.78%	15.20%	15.25%	15.71%

figura VI.305: Rapporto tra $E_{risc\ doppio} - E_{risc\ triplo}$ e $E_{risc\ doppio}$ in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra

Su questo grafico, vediamo che la variazione di guadagno è tale che la pensavamo: la percentuale aumenta con l'aumento del spessore dell'isolamento.

energia totale (kWh/(m ² *anno))		spessore isolante (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
spessore isolante contro terra (m)	0.1	1.24	1.39	1.44	1.45	1.45	1.48	1.46	1.46	1.47	1.44	1.42
	0.2	1.24	1.41	1.47	1.48	1.50	1.51	1.53	1.50	1.51	1.48	1.44
	0.3	1.24	1.41	1.48	1.50	1.50	1.54	1.52	1.51	1.52	1.50	1.50
	0.4	1.24	1.41	1.48	1.52	1.53	1.55	1.55	1.52	1.53	1.51	1.47
	0.5	1.23	1.42	1.49	1.51	1.51	1.55	1.55	1.55	1.53	1.51	1.48
	0.6	1.24	1.42	1.49	1.51	1.51	1.55	1.56	1.55	1.54	1.51	1.47
	0.7	1.26	1.42	1.49	1.51	1.54	1.56	1.56	1.55	1.54	1.51	1.48
	0.8	1.26	1.42	1.49	1.53	1.54	1.56	1.59	1.55	1.54	1.51	1.49
	0.9	1.26	1.42	1.49	1.53	1.54	1.57	1.56	1.55	1.57	1.52	1.49
	1	1.26	1.42	1.49	1.53	1.54	1.57	1.56	1.56	1.57	1.52	1.49
1.1	1.27	1.43	1.49	1.53	1.54	1.57	1.56	1.56	1.57	1.51	1.49	

figura VI.306: Differenza tra energia totale con serramenti a doppio vetro e energia totale con serramenti a triplo vetro in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra

Invece, quando calcoliamo i guadagni in termini di fabbisogno totale in energia, ciò che ci interessa è di sapere quanto risparmiamo con un triplo vetro. Non prendiamo più, quindi, la percentuale, ma semplicemente la differenza.

La variazione è dello stesso tipo di quella che avevamo per il riscaldamento (perché costituisce la maggior parte del consumo): con un massimo, e valori più piccoli con un spessore di isolamento molto alto o molto basso. In effetti, quando il volume è molto isolato, la percentuale di risparmio che abbiamo grazie al triplo vetro è la più alta (fino a 16%), ma il consumo di ri-

scaldamento è più basso. Avere un triplo vetro è quindi meno interessante (benché sia sempre interessante). Notiamo anche che è sempre vantaggioso di avere un triplo vetro.

La cosa che va mostrata con questo studio, è che, anche se eravamo capace di capire il comportamento dei vari consumi separatamente, il risultato globale è molto più complesso. Dovremo calcolare di nuovo, quando progetteremo il modulo definitivo, se è interessante di utilizzare dei serramenti con triplo vetro, e ricalcolare in un secondo tempo lo spessore ottimale di isolante.

Costo totale (€/m ²)		spessore isolante (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
spessore isolante contro terra (m)	0.1	0.54	0.62	0.64	0.65	0.65	0.67	0.66	0.65	0.66	0.64	0.63
	0.2	0.54	0.63	0.66	0.66	0.67	0.68	0.69	0.67	0.68	0.66	0.64
	0.3	0.54	0.63	0.66	0.67	0.67	0.69	0.68	0.68	0.68	0.67	0.67
	0.4	0.54	0.63	0.67	0.68	0.69	0.70	0.70	0.68	0.69	0.68	0.66
	0.5	0.54	0.63	0.67	0.68	0.68	0.70	0.70	0.70	0.69	0.68	0.66
	0.6	0.54	0.63	0.67	0.68	0.68	0.70	0.70	0.70	0.69	0.68	0.66
	0.7	0.55	0.63	0.67	0.68	0.69	0.70	0.70	0.70	0.69	0.68	0.66
	0.8	0.56	0.64	0.67	0.69	0.69	0.70	0.72	0.70	0.69	0.68	0.67
	0.9	0.55	0.63	0.67	0.69	0.69	0.71	0.70	0.70	0.71	0.68	0.67
	1	0.55	0.63	0.67	0.69	0.69	0.71	0.70	0.70	0.71	0.68	0.67
1.1	0.56	0.64	0.67	0.69	0.69	0.71	0.70	0.70	0.71	0.68	0.67	

figura VI.307: Differenza tra costo "totale" con serramenti a doppio vetro e costo "totale" con serramenti a triplo vetro in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra

Costo totale (€/m ²)		larghezza finestra verticale (m)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
larghezza finestra orizzontale (m)	1	0.90	1.05	1.16	1.25	1.31	1.39	1.46	1.50	1.54
	2	1.38	1.47	1.53	1.60	1.66	1.72	1.76	1.79	1.79
	3	1.76	1.81	1.85	1.90	1.95	1.99	2.00	1.99	1.96
	4	2.03	2.07	2.12	2.16	2.18	2.19	2.17	2.13	2.05
	5	2.27	2.30	2.34	2.36	2.35	2.32	2.26	2.17	2.08
	6	2.47	2.50	2.50	2.47	2.43	2.36	2.27	2.18	2.08
	7	2.62	2.61	2.56	2.52	2.46	2.37	2.28	2.17	2.06
	8	2.69	2.65	2.60	2.53	2.45	2.36	2.26	2.16	2.05

figura VI.308: Differenza tra costo "totale" con serramenti a doppio vetro e costo "totale" con serramenti a triplo vetro in funzione delle dimensioni dei serramenti

La stessa cosa vale per il costo globale (figura VI.307). Però, vediamo che con questa dimensione di serramento (uno di 12 m²), il risparmio dovuto al triplo vetro non è molto importante: fino a 0.72€/m²anno, quindi 72€ per anno per il modulo, e solamente 64€ per anno per il punto ottimale per quanto riguarda i spessori di isolamento.

Lo stesso studio facendo variare le dimensioni dei serramenti verticali ed orizzontali da i risultati della figura VI.308

Al punto ottimale (una grande finestra sul tetto, e una piccola sui muri) risparmiamo con un triplo vetro fino a 269€ per anno per questi 100 m², ciò che rappresenta 20 % del totale dei costi variabili in questo caso.

h) Tecnologia massiccia/ leggera

Un altro fattore fondamentale del consumo energetico di un edificio (soprattutto per quanto riguarda il raffrescamento) è la capacità di una parete a sfasare e attenuare il flusso di calore.

- Lo sfasamento di una parete è “la differenza di tempo che occorre tra l’ora in cui si ha la massima temperatura all’esterno e l’ora in cui si ha la massima temperatura all’interno” (Normativa per l’efficienza energetica in edilizia, Graziano Salvalai).
- L’attenuazione è “il rapporto tra la variazione massima della temperatura esterna ΔT_e e quella della temperatura interna ΔT_i in riferimento alla temperatura media della superficie interna” (Normativa per l’efficienza energetica in edilizia, Graziano Salvalai).

Questi due fattori sono valutati dalla trasmittanza termica periodica Y_{ie} che permette di valutare con calcoli stazionari un fenomeno dinamico.

Le Linee Guida Nazionali introdotte in 2009 definiscono delle qualità prestazionali da “ottime” (I) a “me-

diocri” (V) per valutare la capacità di attenuazione e di sfasamento delle parete. In pratica, oltre la resistenza termica, il calore specifico e la massa di una parete sono tenuto in conto per la valutazione della resistenza periodica termica: più la capacità di una parete ad assorbire il calore (quindi il calore specifico e la massa) è elevata, migliore sarà la resistenza termica periodica.

Per contro, il consumo di costruzione e di fine di vita di un edificio massiccio (in calcestruzzo e mattoni) è più elevato del consumo di un edificio “leggero” (con una struttura in legno o in acciaio).

Valuteremo quindi il consumo del nostro modulo con una tecnologia massiccia (struttura, solaio e tetto in calcestruzzo, muri in laterizi pieni), e quello del nostro modulo con una tecnologia più leggera in legno, facendo variare lo spessore di isolante del tetto e lo spessore di isolante dei muri.

Per questo studio, calcoleremo la differenza (in percentuale) tra i valori corrispondenti a un edificio massiccio e un edificio “leggero”. Se questa percentuale è negativa, significa che il consumo dell’edificio massiccio è più basso.

Differenza di consumo per il riscaldamento		spessore isolante muri (m)						
		0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
spessore isolante tetto (m)	0.25	-1.54%	-2.83%	0.39%	-1.57%	-1.91%	-0.78%	-1.73%
	0.3	-1.56%	-0.70%	-2.06%	-2.06%	-2.35%	-1.79%	-1.51%
	0.35	-3.29%	-1.78%	-1.98%	-2.91%	-3.69%	-1.95%	1.47%
	0.4	-0.30%	-1.81%	-2.81%	-0.08%	0.52%	1.42%	1.30%
	0.45	-2.43%	-2.07%	-4.06%	0.32%	0.10%	0.06%	-0.02%
	0.5	-3.20%	-3.77%	-1.99%	-0.10%	-0.88%	-0.02%	-0.96%

figura VI.309: Rapporto tra $E_{\text{risc mass}} - E_{\text{risc leggero}}$ e $E_{\text{risc leggero}}$ in funzione dello spessore di isolante sui muri e dello spessore di isolante sul tetto

Differenza di costo totale		spessore isolante muri (m)						
		0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
spessore isolante tetto (m)	0.25	-4.42%	-5.09%	-4.00%	-4.87%	-5.12%	-4.85%	-5.27%
	0.3	-4.42%	-4.24%	-4.91%	-5.04%	-5.26%	-5.18%	-5.19%
	0.35	-5.08%	-4.63%	-4.85%	-5.31%	-5.70%	-5.21%	-4.22%
	0.4	-3.87%	-4.61%	-5.11%	-4.27%	-4.24%	-4.09%	-4.25%
	0.45	-4.66%	-4.68%	-5.53%	-4.15%	-4.36%	-4.51%	-4.64%
	0.5	-4.89%	-5.25%	-4.74%	-4.24%	-4.65%	-4.49%	-4.90%

figura VI.310: Rapporto tra $\text{Costo}_{\text{mass}} - \text{Costo}_{\text{leggero}}$ e $\text{Costo}_{\text{leggero}}$ in funzione dello spessore di isolante dei muri e dello spessore di isolante sul tetto

La prima analisi (figura VI.309) dell’influenza della tecnologia utilizzata evidenzia l’assenza di impatto della tecnologia durante il periodo di riscaldamento: in effetti, le differenze di consumo sono comprese tra -4.06 % e 1.47 %. La resistenza termica periodica essendo stata creata per valutare il funzionamento termico delle parete durante il periodo di raffrescamento, è normale che non abbia un’influenza notevole durante l’inverno. Inoltre, va osservato che non esiste una correlazione tra questa differenza di fabbisogno di riscal-

damento e gli spessori di isolante.

Invece, la differenza di consumo per il raffrescamento varia tra -21,24 % e -22,69 %. Un edificio con delle parete massicci permette quindi di contribuire in misura significativa al risparmio di energia per il raffrescamento.

Nella tabella che rappresenta la differenza di costo totale per serramenti doppi e tripli (figura VI.310), vediamo che il consumo di raffrescamento generalmen-

te più basso e il costo di costruzione in calcestruzzo armato più basso per un edificio massiccio conducono ad un costo globale più basso.

Differenza di consumo globale		spessore isolante muri (m)						
		0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
spessore isolante tetto (m)	0.25	23.52%	22.55%	24.64%	23.13%	22.78%	23.30%	22.47%
	0.3	23.86%	24.38%	23.36%	23.22%	22.79%	22.95%	22.97%
	0.35	22.91%	23.88%	23.64%	22.80%	22.24%	23.17%	25.00%
	0.4	25.18%	24.08%	23.25%	24.91%	25.10%	25.36%	25.05%
	0.45	23.93%	24.10%	22.74%	25.39%	25.05%	24.82%	24.52%
	0.5	23.72%	23.25%	24.40%	25.38%	24.74%	24.97%	24.22%

figura VI.311: Rapporto tra $E_{\text{Totale mass}} - E_{\text{Totale leggero}}$ e $E_{\text{Totale leggero}}$ in funzione dello spessore di isolante dei muri e dello spessore di isolante sul tetto

Al contrario, il consumo globale è molto più basso (tra 22,24 % e 25,36 %) per l'edificio leggero. Questo è dovuto al consumo di energia grigia, bassissimo per una costruzione in legno, e molto più alto per una costruzione in calcestruzzo armato.

Un calcolo simile con una struttura leggera in acciaio avrebbe condotto a dei risultati di consumo di raffrescamento e di riscaldamento paragonabile a quello della costruzione in legno, e un consumo in energia grigia più alto e un costo di costruzione più basso.

Nel nostro caso, con un edificio dove il raffrescamento è poco necessario, perché il clima è relativamente freddo, e la scuola è chiusa durante i giorni più caldi, era prevedibile che la tecnologia più leggera (in legno e in metallo) fosse vantaggiosa.

► Ventilazione forzata/naturale

Dato il fabbisogno di ricambio d'aria richiesto dal decreto ministeriale del 12 dicembre 1975 (5 volumi per ora), non è immaginabile di non avere un impianto meccanico di ventilazione per garantire il minimo rinnovo d'aria, senza avere delle perdite enorme di calore. Un scambiatore di calore inserito sul sistema di ventilazione meccanizzata permetterà di risparmiare una percentuale importante di energia spesa per il riscaldamento. Questa percentuale sarà valutata nella parte di calcoli impiantistici. Nel frattempo, sarà considerata uguale a 80 %.

B. STUDIO DEL MODULO EFFETTIVO

1. METODO

Dopo aver effettuato questo studio, che ci ha permesso di valutare quali saranno i parametri che hanno l'influenza maggiore sul consumo energetico e sul costo finale del modulo, e in che direzione e in che quantità possono variare, dobbiamo capire come il consumo del edificio vero potrà essere minimizzato.

a) Richiamo dei vincoli architettonici

Prima di tutto, è molto importante di ricordare il disegno finale non verrà fatto solamente su criteri definiti in modo computazionale: in effetti, alcuni parametri sono definiti da criteri architettonici che ci sembrano essenziali per il buon funzionamento dell'edificio. Questi criteri sono dettagliati nella parte "VII. Architettura". Però, ricordiamo brevemente quali sono.

Innanzitutto, la posizione della parte aggiunta del nostro progetto: per minimizzare l'impatto sul suolo e conservare una superficie ragionevole libera di costruzione sul terreno (ricordiamo che è già molto inferiore con gli edifici esistenti alle esigenze del decreto ministeriale del 12/18/1975), abbiamo scelto di inserirlo sul tetto del costruito esistente. Per motivi di accessibilità, abbiamo dovuto disegnarlo vicino ad un vano scala.

Ciò stabilito, l'unica scelta che ci rimane a fare per la posizione è di scegliere tra il vano scala ad est e quello ad ovest. Per massimizzare la possibilità di inserire delle superficie vetrate a sud, come raccomandato dallo studio precedente, verrà progettato sul corpo ovest dell'edificio esistente.

Nel frattempo, l'orientamento del modulo è quindi stato definito: per non perdere troppo spazio e non creare angoli difficili da gestire, conserveremo l'orientamento esistente.

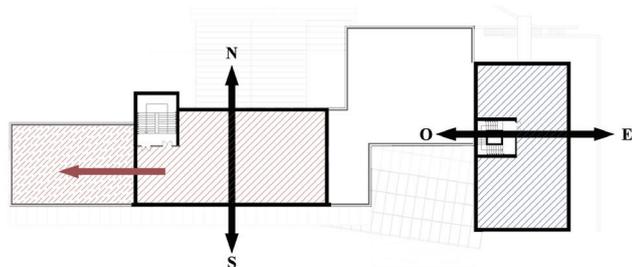


figura VI.312: Possibilità di inserimento del modulo

Il terzo parametro che è stato studiato di un punto di vista computazionale, ma sul quale i criteri architettonici

saranno determinanti è la compattezza (vale a dire il rapporto volume su superficie). In effetti, la distribuzione interna è stata determinata con criteri principalmente di uso, e con criteri energetici semplici (aula di insegnamento a sud, corridoi di superficie minima,...).

Per quanto riguarda la scelta del tipo di stratigrafia che useremo, alla luce dei risultati precedenti, ci siamo evidentemente orientati verso una soluzione di tipo leggero. La scelta rimanente è tra una struttura a telaio (o a pilastri e travi) in legno o in acciaio. Considerate le numerose silvocolture nella regione delle Alpe svizzere, approfitteremo di questa vicinanza per conservare l'identità molto tradizionale del contesto costruttivo.

Tra struttura leggera e telaio travi/pilastri, quest'ultimo sistema ci permette di usare meno materiale (quindi di avere una più grande leggerezza, ciò che ci permetterà di non rinforzare la struttura esistente), e di lavorare con dei pannelli prefabbricati.

Inoltre, non si è fatto impellente la necessità di avere delle grandi vetrate, e le ragionevoli luci interne non ci hanno obbligato a scegliere una struttura travi/pilastri.

Tutti questi vincoli architettonici non sono imprescindibile: non è impossibile che un metodo completamente computazionale abbia potuto determinare un'altra soluzione valida. Però, una quantità colossale di parametri sarebbero dovuti essere aggiunti per permetterci di arrivare ad una soluzione. Se consideriamo per esempio il problema dell'orientamento, rendere possibile la rotazione della parte nuova rispetto alla parte esistente, avrebbe condotto a poter avere due volumi che non si sovrappongono. Avremmo quindi dovuto considerare problemi strutturali, valutare la variazione di complessità di messa in opera,...

Inoltre, questa complessificazione avrebbe aumentato in maniera ampia il rischio di errore. Detto questo, non ci saremo comunque riusciti.

Per questi motivi, abbiamo considerato che il modo più semplice (o almeno non troppo complesso) poteva essere il modo migliore.

b) Definizione delle zone termiche

Siamo quindi arrivati al disegno di un modulo seguente, dove la maggior parte dei criteri geometrici era già definita. Solo la pendenza del tetto è stata fissata al minimo, secondo lo studio precedente.

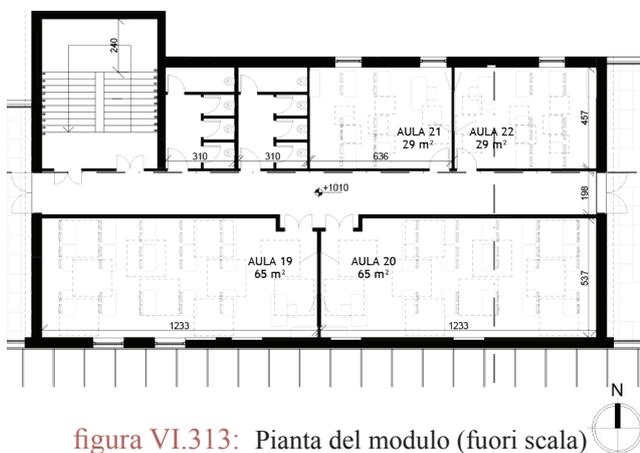


figura VI.313: Pianta del modulo (fuori scala)

Quei limiti allo studio termico del modulo essendo stati definiti, abbiamo definito le differenti zone termiche da studiare. Per motivi di semplificazione del modello e di velocità dei calcoli, abbiamo deciso di studiare il modulo nella sua interezza, ma di dividerlo in parte che hanno un funzionamento indipendente. La prima divisione è stata fatta in funzione dell'orientamento perché ovviamente, non hanno lo stesso comportamento termico. La seconda divisione è dovuta all'uso degli spazi: gli apporti di calori nelle aule o nei servizi igienici non sono paragonabili. Inoltre, abbiamo scelto di non ottimizzare in questa parte il vano scala, che è troppo legato al funzionamento termico degli spazi sottostanti.

Per garantire che questo volume possa essere ingrandito sia ad est che ad ovest, non abbiamo conservato la possibilità di avere delle superfici vetrate su questi lati. Abbiamo considerato che le aule a est e a ovest sono equivalenti, in termini termici.

In tutti i casi, studieremo la coppia aula (o servizi) / corridoio. In effetti, la temperatura di consegna del riscaldamento del corridoio sarà di 18°C, mentre quella delle aule, sarà mantenuta a 20°C. Per questo motivo, non possiamo trascurare i scambi termici tra aule e corridoi.

Invece, le parete comune con il volume studiato e un aula saranno considerate come adiabatiche, che appartengano a un corridoio, a un'aula o al locale che contiene i servizi igienici.

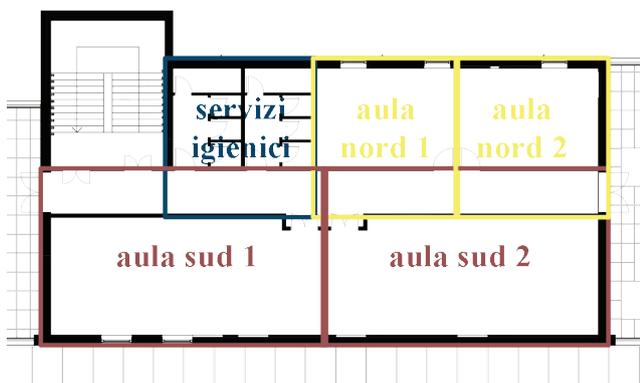


figura VI.314: Zone termiche del modulo

c) Nuova problematica di studio

Alla luce dello studio su un volume teorico, possiamo prevedere quale sarà approssimativamente il comportamento termico del volume aggiunto. In effetti, abbiamo visto che dovrebbe funzionare senza riscaldarsi troppo senza che la messa in opera di un impianto di raffrescamento sia necessario. A tal fine, abbiamo anche visto che ci servirà prestare un'attenzione particolare alla ventilazione e all'impostazione di schermature.

Il consumo principale su quale potremmo influire sarà quindi il riscaldamento, garantendo nel contempo di evitare il surriscaldamento "estivale". Ricordiamo i parametri che hanno una maggiore influenza sul riscaldamento, e che non sono ancora stati definiti per il nostro caso, secondo lo studio precedente:

- lo spessore di isolante sulle parete in contatto con l'aria esterno
- la dimensione delle parte trasparente
- la loro posizione (tra sud, o nord nel caso delle zone che hanno una facciata a nord, e tetto)

I parametri che faremo variare per evitare il surriscaldamento sono invece:

- il tasso di ricambio d'aria della ventilazione meccanica,

e per ciascuna finestra:

- la percentuale di schermatura
- e lo set point, in termini di radiazione solare.

Va fatto presente che abbiamo alla fine più parametri per il riscaldamento che per il raffrescamento (benché non sia previsto un impianto), quest'ultimo essendo più complesso da gestire.

Useremo sempre il plug-in Archsim che permette di connettere Grasshopper e Energy+. Per ottimizzare il risultato, useremo un altro plug-in, Galapagos, che contiene un algoritmo evolutivo di ottimizzazione.

Quest'ottimizzazione si può naturalmente fare solamente per un risultato. Piuttosto che di introdurre dei vincoli di comfort (per esempio non considerare i risultati avendo un valore di comfort termico troppo basso), abbiamo scelto di ottimizzare il consumo totale (riscaldamento, raffrescamento, elettricità per l'illuminazione e energia grigia). Questa scelta è stata fatta per motivi di semplicità e di flessibilità. In effetti, se avessimo scelto per esempio di non poter avere più di 5 % delle ore nella classe di comfort IV, rischiamo di ottenere una percentuale appena inferiore a 5 % (ricordiamo che le esigenze di raffrescamento e di riscaldamento sono contrapposte). Inoltre, non vedremo un potenziale altro risultato, con una percentuale appena superiore a 5 %, ma che potrebbe avere un fabbisogno di riscaldamento molto più basso.

Per contro, studiare il consumo totale permette di

minimizzare sia il riscaldamento che il raffrescamento. Dovremo però verificare, dopo aver ottenuto un punto ottimale, che le temperature dell'ambiente studiato rispettano le norme di comfort termico estivale, senza l'impianto di raffrescamento. Faremo quindi una nuova simulazione termica per calcolare le temperature interne senza impianto di raffrescamento.

d) Compromesso tra costo ed energia

I valori delle simulazioni che saranno registrati sono gli stessi che nella parte dello studio del volume teorico:

- riscaldamento
- raffrescamento
- energia elettrica per l'illuminazione
- energia grigia
- costi variabili di costruzione

Siccome siamo interessati nei risultati, non calcoleremo più l'energia trasmessa attraverso le parti trasparenti.

La sintesi di questi consumi può farsi in due valori diversi: il consumo energetico globale, che prende in considerazione l'energia grigia e il costo globale (energia e costi variabili di costruzione).

Se l'ottimizzazione si farà solo sul consumo energetico, dobbiamo definire un metodo che permetterà di tenere in conto sia quest'ultimo criterio, sia i costi.

In questa ottica, abbiamo deciso di creare una media ponderata tra il rapporto costo/costo minimo e energia/energia minima. Quest'indice sarà quindi:

$$I = \frac{\alpha_1 * \frac{\text{Costo}}{\text{Costo}_{\min}} + \alpha_2 * \frac{E_{\text{tot}}}{E_{\text{tot}_{\min}}}}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

dove i coefficienti α_1 e α_2 rappresentano l'importanza che il cliente attribuisce rispettivamente all'economia finanziaria e all'economia energetica. Abbiamo infatti visto che questi due criteri non sono sempre in adeguazione, e che un miglioramento dell'uno può innescare un peggioramento dell'altro.

Più l'indice I sarà vicino al valore 1, migliore sarà il compromesso tra costo ed energia. Se α_1 è molto importante rispetto a α_2 , l'indice sarà uguale al rapporto del costo sul costo minimo. L'indice sarà più basso (uguale a 1) per il costo minimo. E viceversa.

Nel nostro caso sceglieremo di fissare entrambi i coefficienti a 1.

2. RISULTATI

a) Aule didattiche a nord

Le prime zone termiche studiate sono le due zone equivalenti a sud.

Il tipo di serramento fa riferimento ad una finestra ad alta selettività e doppio vetro (0), o che lascia passare tutte le radiazioni solari e a triplo vetro (1). "Area" è l'area trasparente. "Scher." corrisponde alla trasmittanza termica (per la radiazione) delle schermature. Rc è la radiazione solare al di là della quale le schermature si chiudono.

I risultati che otterremo saranno a priori dei criteri che rispetteremo, almeno che un criterio di un altro tipo (architettonico, di comfort,...) lo controindichi.

Finestra tetto			Finestra muro				Sp. isolante		ricam-		Consumo		
Tipo	Area	scher.	Rc	Tipo	Area	scher.	Rc	tetto	muro	bio	Costo	Energia	Indice
										d'aria			
1	14.8	0.1	280	0	2	0	170	0.3	0.3	0.5	11.97	15.69	1.013
1	14.4	0.1	290	0	2	0	170	0.35	0.25	0.5	11.88	15.83	1.014
1	15.2	0.1	280	0	2	0	170	0.35	0.25	0.5	11.96	15.74	1.014
1	14.4	0.1	280	0	2	0	170	0.3	0.3	0.5	11.94	15.77	1.015
1	14.4	0.1	280	0	2	0.1	170	0.3	0.3	0.5	11.94	15.77	1.015
1	13.6	0.1	270	0	2	0	170	0.3	0.3	0.5	11.87	15.88	1.015
1	14.4	0.1	270	0	2	0	170	0.4	0.25	0.5	11.95	15.77	1.015
1	14.4	0.1	280	0	2	0	170	0.35	0.25	0.5	11.89	15.86	1.015
1	14	0.1	270	0	2	0	170	0.35	0.3	0.5	11.97	15.75	1.015
1	14	0.1	270	0	2	0.1	170	0.35	0.3	0.5	11.97	15.75	1.015
1	13.2	0.1	270	0	2	0	170	0.3	0.25	0.5	11.72	16.09	1.015
1	13.6	0.1	290	1	2	0	170	0.35	0.25	0.5	11.81	15.97	1.016
1	14.4	0.1	280	0	2	0	170	0.3	0.25	0.5	11.84	15.94	1.016
1	13.6	0.1	270	0	2	0	180	0.3	0.3	0.5	11.88	15.89	1.016
1	14	0.1	270	0	2	0	180	0.35	0.3	0.5	11.98	15.76	1.016
1	14	0.1	270	0	2	0	170	0.35	0.25	0.5	11.86	15.92	1.016

...
0	0.4	0.1	320	0	6	0.3	170	0.25	0.5	1.5	16.06	26.57	1.536
0	19.2	0.2	390	0	10	0.4	220	0.35	0.35	1	18.28	24.77	1.573
0	0.8	0.1	250	0	2	0	240	0.45	0.25	1.5	16.22	28.05	1.590

figura VI.315: Estratto della tabella riepilogativa dei risultati ottenuti per le aule a nord

Per le due aule didattiche a nord, i consumi più bassi vanno raggiunti per una finestra sulla facciata, quindi a nord, la più piccola possibile. Sapendo che non progetteremo comunque un'aula senza finestra attraverso la quale gli allievi possono guardare, avevamo mantenuto un valore minimo per l'area trasparente su questa facciata superiore a 0. La scelta di questa dimensione non si farà quindi su criteri energetici, né di comfort termico, ma su considerazioni estetiche e di benessere.

Per quanto riguarda le schermature, non accetteremo di scendere fino a una trasmittanza di 0. In effetti, la protezione termica delle schermature che lasciano passare un tasso non uguale a zero di luce hanno, nel caso migliore delle trasmittanze termiche che raggiungono 0,1.

Vedendo le linee 4 e 5, vediamo che i risultati non cambiano quando la schermatura passa di 0 a 0,1 di trasmittanza. Dato che ci sono solo raggi solari indiretti, è ovvio che i consumi non dipendono dalla scherma-

tura delle finestre a nord. Inoltre, ricordiamo che tutte le simulazioni non sono state effettuate, dato che lavoriamo con un algoritmo di ottimizzazione. Ecco perché la simulazione con le stesse caratteristiche della prima, ma con delle schermature di 0,1 o 0,2 non apparisce: non è stata effettuata. Cambiare questo valore di 0 a 0,1 manualmente ci mostra la validità del ragionamento: i consumi cambiano di meno di 0,01%.

Considereremo quindi come configurazione migliore la prima, con una schermatura più trasparente.

La simulazione ottimale è stata rifatta, senza raffrescamento per ottenere il diagramma di comfort seguente, e verificare che l'ipotesi dell'assenza di raffrescamento può essere validata.

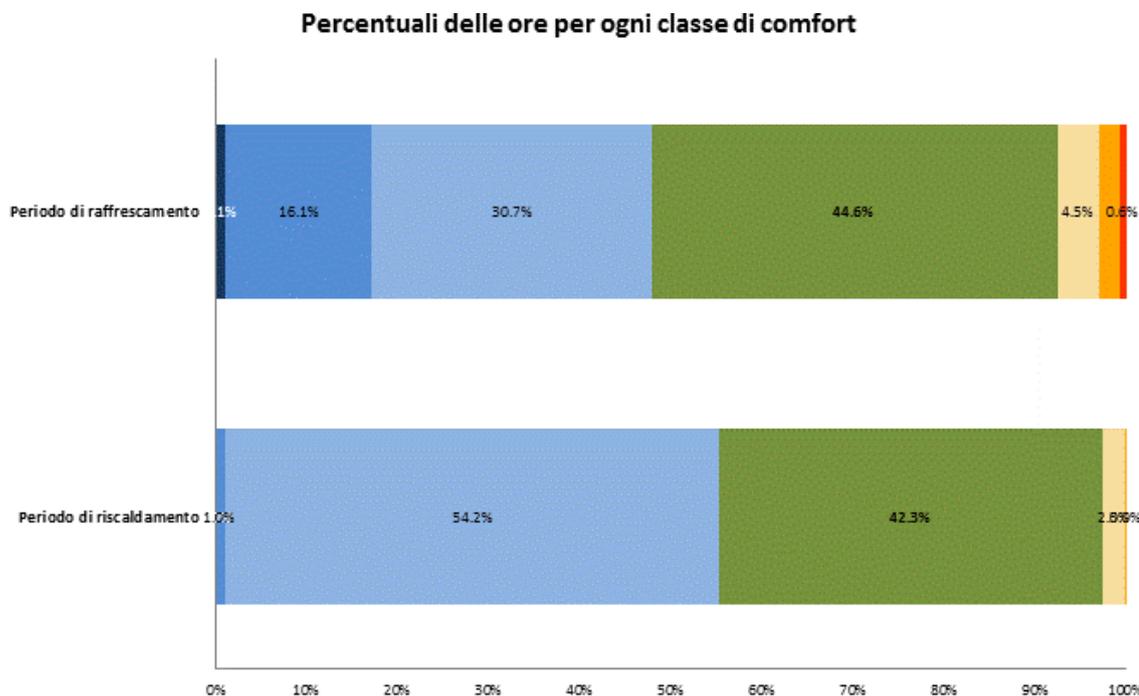


figura VI.316: Diagramma di comfort per le aule a nord

Senza raffrescamento, raggiungiamo quindi un valore di consumo di energia utile per il riscaldamento di 5,9kWh/m²an. Questo valore vale per l'associazione corridoio/aula nord. Ricordiamo che il costo ne è il costo totale dell'edificio, ma che prende solamente in considerazioni il costo dei parametri che abbiamo considerati variabili, e descritti precedentemente, e il costo

dell'energia.

1) Aule didattiche a sud

Finestra tetto			Finestra muro				Sp. isolante		ricam- bio d'aria	Consumo			
Tipo	Area	sch.	Rc	Tipo	Area	sch.	Rc	tetto		muro	Costo	Energia	Indice
1	16	0.1	260	0	2	0	260	0.25	0.25	0.5	7.87	10.79	1.005
1	16.8	0.1	260	0	2	0	260	0.25	0.25	0.5	7.91	10.75	1.006
1	17.6	0.1	270	0	2	0.1	240	0.25	0.25	0.5	7.96	10.73	1.008
1	18	0.1	270	0	2	0.1	250	0.25	0.25	0.5	7.98	10.71	1.008
1	17.6	0.1	270	0	2	0	260	0.25	0.25	0.5	7.96	10.74	1.009
1	17.6	0.1	270	0	2	0	250	0.25	0.25	0.5	7.96	10.74	1.009
1	18	0.1	270	0	2	0	250	0.25	0.25	0.5	7.98	10.72	1.009
1	17.6	0.1	270	0	2	0	240	0.25	0.25	0.5	7.96	10.74	1.009
1	18	0.1	270	0	2	0	240	0.25	0.25	0.5	7.98	10.72	1.009
1	15.6	0.1	250	0	2	0	240	0.25	0.25	0.5	7.88	10.87	1.009
1	17.2	0.1	260	0	2	0	260	0.25	0.25	0.5	7.95	10.77	1.010
1	17.6	0.1	260	1	2	0	240	0.25	0.25	0.5	7.97	10.76	1.010
1	17.6	0.1	260	0	2	0.1	260	0.25	0.25	0.5	7.97	10.75	1.010
1	17.6	0.1	260	0	2	0.1	240	0.25	0.25	0.5	7.97	10.75	1.010
1	17.6	0.1	260	1	2	0	250	0.25	0.25	0.5	7.97	10.76	1.010
1	17.6	0.1	260	0	2	0	260	0.25	0.25	0.5	7.97	10.76	1.010
1	18.4	0.1	270	0	2	0	240	0.25	0.25	0.5	8.01	10.71	1.010
1	17.6	0.1	260	0	2	0.1	230	0.25	0.25	0.5	7.97	10.76	1.010
1	18.8	0.1	260	1	2	0	250	0.25	0.25	0.5	8.02	10.70	1.011
...
0	19.2	0.2	390	0	10	0.3	220	0.35	0.35	1	18.28	24.77	2.321
0	0.8	0.1	250	0	2	0	240	0.45	0.25	1.5	16.22	28.05	2.344
1	48	0.3	280	0	24	0.1	290	0.3	0.3	0.5	18.55	25.25	2.361

figura VI.317: Estratto della tabella riepilogativa dei risultati ottenuti per le aule a nord

Per l'aula a sud, i risultati sono sorprendentemente simili a quelli dell'aula a sud, in termini di dimensioni trasparenti., benché sia in accordo con lo studio teorico. E la finestra di dimensione minima che avrà il consumo più basso. Per questo motivo, seguiremo lo stesso ragionamento che per le aule a nord.

Possiamo notare che il consumo più basso è ottenuto con una finestra verticale a triplo vetro, molto trasparente ai raggi energetici. (Corrisponde alla 19ima linea, con un consumo energetico globale di 10,70 kWh/m²an.)

Seguendo lo stesso discorso che precedentemente, non considereremo i risultati che hanno una schermatura delle finestre verticali totale. Il risultato ottimale sarà quindi ottenuto per i parametri della linea evidenziata.

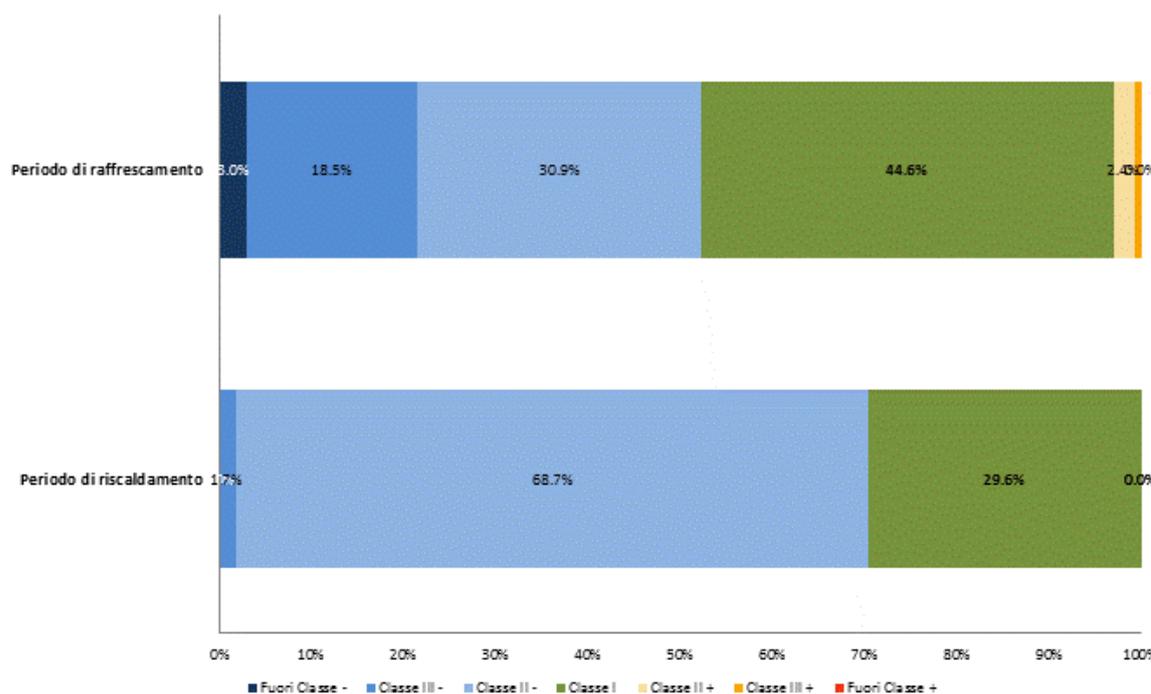


figura VI.318: Diagramma di comfort per le aule a sud

Il comfort ottenuto è ottimale. Facciamo notare che il problema principale è sempre un problema di riscaldamento durante il periodo in cui non è possibile di riscaldare.

Il consumo di energia utile per il riscaldamento è 4,4 kWh/m²an.

2) Servizi igienici

Finestra tetto			Finestra muro				Sp. isolante		ricam- bio d'aria		Consumo		Indice
Tipo	Area	scher.	Rc	Tipo	Area	scher.	Rc	tetto	muro	Costo	Energia		
1	22.8	0.1	250	0	2	0.2	250	0.3	0.25	0.5	16.04	21.56	1.008
1	21.6	0.1	260	0	2	0.1	270	0.25	0.35	0.5	16.13	21.50	1.010
1	22.8	0.1	250	0	2	0	240	0.3	0.3	0.5	16.18	21.45	1.010
1	23.2	0.1	250	0	2	0	240	0.3	0.3	0.5	16.23	21.42	1.010
1	22.4	0.1	250	0	2	0.2	290	0.25	0.3	0.5	16.12	21.59	1.011
1	22.4	0.1	250	0	2	0.1	280	0.25	0.3	0.5	16.12	21.59	1.011
1	22.4	0.1	250	0	2	0.1	260	0.25	0.3	0.5	16.12	21.59	1.011
1	22.4	0.1	250	0	2	0.1	250	0.25	0.3	0.5	16.12	21.59	1.011
1	22	0.1	250	0	2	0.1	270	0.25	0.3	0.5	16.08	21.66	1.012
1	22	0.1	250	0	2	0.2	280	0.25	0.3	0.5	16.08	21.66	1.012
1	22	0.1	250	0	2	0.1	280	0.25	0.3	0.5	16.08	21.66	1.012
1	22	0.1	250	0	2	0.2	290	0.25	0.3	0.5	16.08	21.66	1.012
1	22	0.1	250	0	2	0.1	260	0.25	0.3	0.5	16.08	21.66	1.012
1	22	0.1	250	0	2	0.1	280	0.35	0.25	0.5	16.06	21.72	1.012
1	21.6	0.1	250	0	2	0	240	0.3	0.3	0.5	16.11	21.70	1.013
1	21.6	0.1	250	0	2	0	230	0.3	0.3	0.5	16.11	21.70	1.013

figura VI.319: Estratto della tabella riepilogativa dei risultati ottenuti per le aule a sud

In questo caso, abbiamo considerato che non ci sarà nessuno nei servizi igienici. La temperatura di consegna del riscaldamento, com'è stato indicato dall'ASL di Sondrio, è di 20°C. Questo spiega il fatto che il consu-

mo (di riscaldamento) sia molto più alto che negli altri casi, benché la finestra orizzontale sia di dimensione molto grande (80% della superficie). Per motivi strutturali, non rispetteremo questo valore.

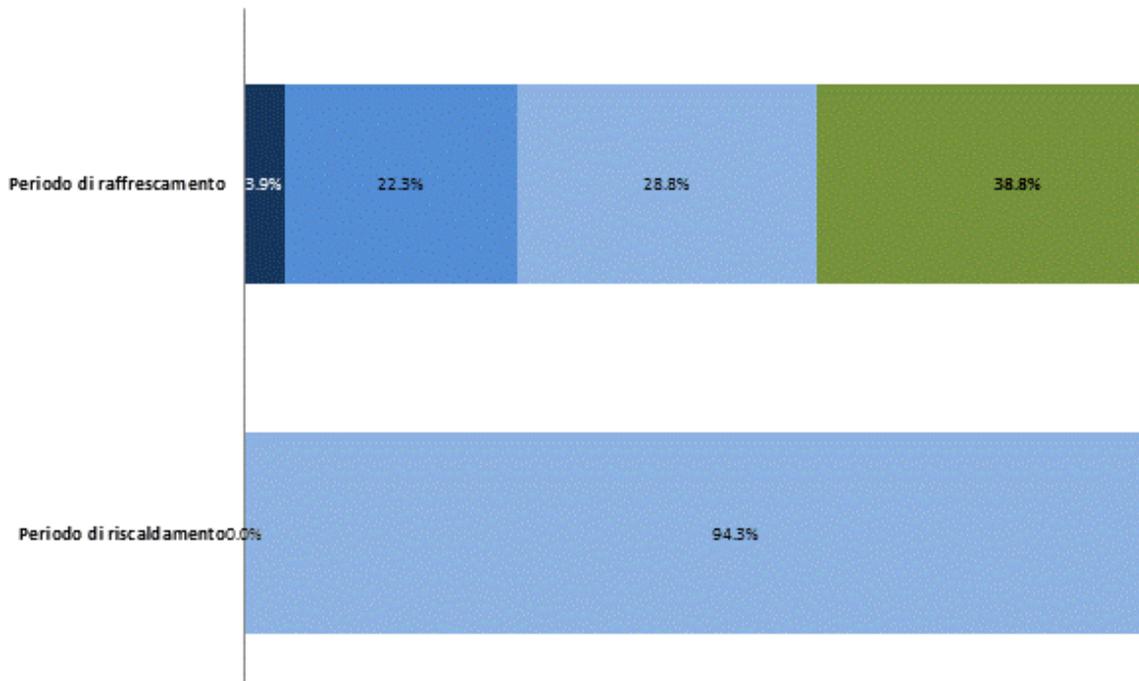


figura VI.320: Diagramma di comfort per i servizi igienici

Per i servizi igienici, vediamo che il comfort estivale è meno buono. La presenza di una grande vetrata sul tetto per minimizzare il consumo di riscaldamento è la causa del surriscaldamento che possiamo osservare. Mentre l'assenza di carichi termici dovuti alla presenza di persona non è sempre compensata dalla dimensione della finestra durante il periodo di raffrescamento.

La quantità molto importante di ore nella classe II (troppo freddo) è dovuta al fatto che la temperatura raccomandata dalla norma, 20°C, corrisponde a questa classe.

Il consumo più basso è di 16 kWh/m²an.

b) Conclusione

Grazie a questo studio, abbiamo potuto determinare i parametri che influenzano i consumi energetici, ed ottimizzarli, conservando un comfort termico soddisfacente. Questo lavoro ci ha anche permesso, al tempo stesso, di estrarre i parametri di cui l'influenza è minimale (o inesistente) sul consumo energetico.

C. CASO DELLE FINESTRE DELL'EDIFICIO ESISTENTE

La valutazione dei parametri ottimi legati alla posizione delle finestre e alla ventilazione della parte esistente, dove non c'è la serra, dell'edificio si farà secondo un metodo simile. Infatti, è difficile di gestire delle variazioni geometrici con GenOpt, mentre la configurazione è quasi identica a quella del modulo. La differenza è la posizione delle parete divisorie, che considereremo adiabatiche, come l'abbiamo fatto per il modulo.

Il calcolo non va fatto per tutte le aule, ma solamente per le aule rappresentative, in funzione del loro orientamento, della possibilità di avere delle superficie trasparenti e della loro destinazione d'uso.

Le aule studiate sono:

- l'ufficio 1 (S)
- l'aula 6 (NE)
- l'aula 7 (SE)
- l'aula 9 (NO)
- il laboratorio di estetica (N)

Per quanto riguarda i locali a nord, senza possibilità di finestra sul tetto, sappiamo che la dimensione minima di parte trasparente sarà ottima. L'ottimizzazione non sarà quindi effettuata.

Il calcolo per le altre aule si farà a partire di questi risultati, considerando che la variazione delle dimensioni ottimali vetrate è proporzionale alla variazione del volume dell'aula.

Per non aggiungere pagine inutile, i risultati non sono stati riprodotti qui. La dimensione dei serramenti sarà visibile nella parte architettonica, mentre le caratteristiche di ventilazione saranno precise nella parte di valutazione dell'impianto.

D. POSIZIONAMENTO DELLE FINESTRE

Dato che non c'è nessun ombreggiamento delle facciate del modulo, la posizione dei serramenti su una stessa facciata non influisce sul consumo energetico.

I criteri di definizione della posizione dei serramenti saranno architettonici, illuminotecnici, e strutturali. Saranno quindi valutati nelle parti corrispondenti.

VII. ARCHITETTURA

A. DEFINIRE L'IMMAGINE.....	245
1. High-Tech.....	245
a) Metallo e Vetro, simboli di modernità.....	245
b) Tetto piano, morfologia moderna dell'architettura.....	245
c) Tecnologia attraverso pannelli solari e fotovoltaici.....	246
2. Rispetto del contesto.....	247
a) Legno.....	247
b) Conservazione dei volumi esistenti.....	248
c) Conservazione dell'inclinazione dei tetti.....	248
d) Rivestimento del tetto.....	248
B. GIOCHI DI LUCE.....	251
1. Serre.....	251
a) Spazio sereno.....	251
b) Spazio di convivialità.....	251
2. Finestre.....	253
a) Verticale.....	253
b) Orizzontale.....	253
3. Pozzi di luce.....	253
4. Le ombre.....	253
5. Riga di luce.....	253
C. UN MODULO PER L'ESPANSIONE DELLA SCUOLA.....	254
D. PROGETTAZIONE FUNZIONALE.....	255
1. Distribuzione.....	255
2. Amministrazione.....	255
3. Mensa.....	255
4. Aule didattiche.....	255
5. Laboratori.....	256
6. Spogliatoi.....	256
E. ELABORATI GRAFICI.....	257
1. Masterplan.....	257
2. Piante.....	259
3. Sezioni.....	269
4. Prospetti.....	275
5. Render.....	277

A. DEFINIRE L'IMMAGINE

1. HIGH-TECH

Una delle prime richieste del direttore per quanto riguarda l'estetica era di dare un'immagine *high-tech* alla scuola. Vorrebbe un edificio moderno e tecnologico perché gli studenti sono « il futuro di domani ».

a) Metallo e Vetro, simboli di modernità

Gli edifici high-tech ricorrono spesso al uso di strutture in vetro e acciaio, prendendo esempio dall'architettura moderna e dagli edifici commerciali di Mies van der Rohe. L'architettura high-tech ha sviluppato un linguaggio tecnico libero dagli ornamenti storicisti dell'architettura moderna.



figura VII.321: Fotografia - Padiglione di Barcellona di Mies van der Rohe

Anche se il direttore non voleva necessariamente una scuola nello stile high-tech, si capisce che questi due materiali rappresentano l'idea di un edificio moderno e tecnologico.



figura VII.322: Fotografia - The Hans van Heeswijk's Rieteiland House [Fonte: Keller Wintergardens & Windows]

Siccome il metallo e il vetro rappresentano la modernità nel progetto, abbiamo deciso di utilizzare questi materiali nei volumi che aggiungiamo in contrasto con i volumi esistenti della scuola che verranno rive-

stiti di legno. Permette una chiarezza del linguaggio architettonico.

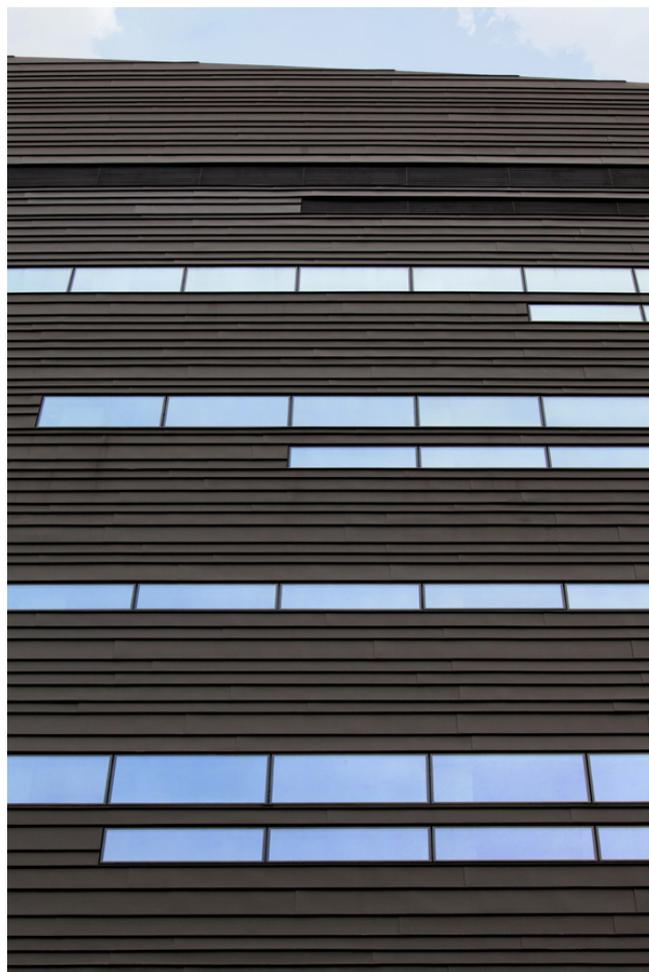


figura VII.323: Fotografia - ANTHRA-ZINC® di VMZINC per il campus Ca' Foscari [Fonte: Arketipo Magazine]

b) Tetto piano, morfologia moderna dell'architettura

I tetti inclinati, che sono l'archetipo delle case tradizionali verranno tolti per aumentare la superficie sfruttabile con costi ragionevoli e per dare una morfologia più moderna all'edificio.

Siccome lo spazio intorno all'edificio è già completamente usato e non c'è spazio libero per i tempi di pausa, questo tetto piano ci permette di risolvere il problema di mancanza di spazi di aggregazione sfruttando una bella vista panoramica sulle montagne di Sondrio. Inoltre questo nuovo spazio permette di tener completamente al riparo dalle macchine.



figura VII.324: Render del progetto: vista del tetto praticabile

c) Tecnologia attraverso pannelli solari e fotovoltaici

Usando dei pannelli solari e fotovoltaici, si capisce direttamente dall'esterno che l'edificio è tecnologicamente avanzato. Siccome l'immagine all'esterno della scuola è molto importante, si deve trasmettere semplicemente e efficacemente l'idea di un progetto tecnologico.

La nostra idea era di usare queste tecnologie come schermature per le nostre serre. Infatti, le due serre sono esposte a sud e il problema del surriscaldamento durante l'estate e nei mesi intermedi può diventare significativo se non si progettano bene le schermature.

Anche se si studiano bene le schermature per ricevere il massimo di guadagni solari durante l'inverno e il minimo di guadagni durante l'estate, impediscono comunque ad alcuni raggi solari di entrare quando servono. Con dei pannelli solari termici o fotovoltaici, tutta l'energia si capta e si trasmette in un'altra maniera. Prende il ruolo dell'accumulatore di calore che si trova generalmente in una serra, nel nostro caso si può controllare perfettamente il modo di restituzione del calore.

Così ci permette di sfruttare i guadagni solari che non useremo con una tecnologia passiva, ma con una tecnologia attiva per il riscaldamento, la produzione di elettricità e la produzione di acqua calda.

Per valutare la quantità di pannelli abbiamo fatto delle simulazioni dell'edificio cercando la quantità di schermature fisse che ci permetterebbe di avere un comfort estivo e inverno con dei consumi di riscaldamento minimi e senza raffrescamento. Le percentuali di schermature per i due tipi di serre sono uguali con un valore di 20%.

Per evidenziare che la scuola è composta da due serre con due funzioni diverse, vorremo usare una tecnologia diversa per ogni tipo di serra: una con delle schermature fatte di pannelli solari e l'altra con dei pannelli fotovoltaici. Prima di posizionare le diverse tecnologie, vorremo verificare se la nostra idea è adeguata al progetto. Per questo motivo abbiamo studiato il fabbisogno di acqua calda e di elettricità per il funzionamento dell'edificio. Vedremo nei dettagli la scelta delle tecnologie nella parte "XII. Progetto impiantistico".



figura VII.325: Render del progetto: vista della facciata sud

2. RISPETTO DEL CONTESTO

L'edificio si colloca al confine tra Sondrio, i terrazzamenti e le loro viti, vicino la frazione Colda. Il contesto architettonico e ambientale del progetto è più simile ad quello di un villaggio antico che a quello del capoluogo di una provincia.

a) Legno

1) Simbolo delle viti

Sondrio si colloca nel paese della Valtellina, molto famosa per il suo vino. Il comune di Sondrio si compone di tanti campi di vite. Subito sopra il progetto ce n'è uno. Per ricordare queste viti e per inserirci nel contesto visivo e culturale di Sondrio abbiamo deciso di usare il legno come materiale.



figura VII.326: Fotografia - Vite della comune di Sondrio

Esistono tanti tipi di legno diversi per l'architettura, e tante maniere di integrarlo nel progetto. Il legno come elemento verticale permette di ricordare le viti. Il riferi-

mento seguente mostra il tipo di rivestimento scelto per il nostro progetto:



figura VII.327: Fotografia - Palestra in Sargans [Fonte: Detail inspiration]

La scansione orizzontale grazie agli elementi metallici ricorda la coltivazione a terrazze situata dietro l'edificio.

Inoltre la combinazione del legno con il metallo, da un aspetto molto moderno all'edificio nonostante il legno sia un materiale tradizionale nella regione. Questa combinazione permette una buona integrazione nel contesto molto tradizionale di Sondrio mentre risponde alla domanda di aver un edificio moderno.

2) Materiale bioclimatico

Nel volontà di fare un progetto che rispettoso dell'ambiente, la scelta del legno corrisponde perfettamente alla nostra sfida architettonica.

Prima di tutto, il legno utilizzato nella costruzione non si produce nella Lombardia. Però la scuola è molto vicina della Svizzera che è un grande produttore

di legno per la costruzione. Poter trovare il materiale in vicinanza del progetto permette di ridurre notevolmente l'energia grigia del progetto legata al trasporto de materiali di costruzione.

Inoltre, il legno vivo è un materiale che trasforma il CO₂ (gas a effetto serra) in O₂. Non solo i boschi, ma anche le opere edili o i mobili in legno rappresentano una preziosa riserva di carbonio che offre un contributo essenziale alla riduzione del contenuto di CO₂ nell'atmosfera.

Per i riferimenti, ci siamo interessati ai recuperi nei climi freddi e più precisamente in montagna. Uno che ci ha colpito è il recupero di una scuola di agricoltura nelle Alpi austriache. Ha ricevuto il premio internazionale per le ristrutturazioni e costruzioni sostenibili nelle Alpi. Questa scuola si integra molto bene nel paesaggio usando il legno, però la sua immagine è molto moderna.



figura VII.328: Fotografia - Scuola di altmünster [Fonte: Catalogo costruttive Alps]

b) Conservazione dei volumi esistenti

Conserviamo tutta la struttura dell'edificio esistente tranne l'edificio davanti alla scuola che serviva d'ingresso. Questo ci permette di ottenere un edificio più compatto e risolvere in parte il problema di circolazione all'interno di quest'ultimo.

Conservare il volume dell'edificio esistente vuol dire, conservare la sua identità ma anche realizzare un progetto sostenibile da un punto di vista economico ed energetico.

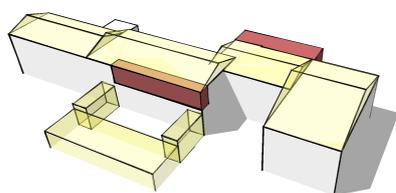


figura VII.329: Schema gialli/rossi progettuale sui volumi

c) Conservazione dell'inclinazione dei tetti

I tetti inclinati delle serre permettono di ricordare la morfologia classica dell'edificio esistente. Con questa morfologia, l'edificio si integra bene nel paesaggio di Sondrio.

Inoltre permette di ricevere più raggi solari.

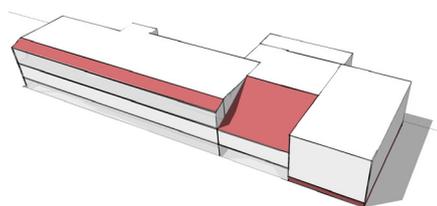


figura VII.330: Schema progettuale dei tetti delle serre

d) Rivestimento del tetto

Il tetto del corpo est essendo ancora in buono stato, il riutilizzo del rivestimento del tetto per il basamento dell'edificio permette di risolvere il problema di risalita dell'acqua sulla facciata e anche di buttare via un materiale che è ancora utilizzabile.

Inoltre, per ricordare questo tetto, sulla terrazza sarà utilizzato lo stesso tipo di pietre ma con un trattamento per che non sia scivoloso.

3. ENTRATA

Abbiamo deciso di togliere l'edificio davanti alla scuola per motivi energetici, di circolazione e d'immagine della scuola. Quest'edificio serviva di entrata alla scuola. Per questo motivo, ridefinire l'entrata è diventato un punto importante del progetto.

Infatti, l'edificio essendo seminterrato, la risoluzione della problematica dell'accessibilità è complessa. L'idea è di evidenziare l'entrata della scuola per renderla accogliente e dinamica. Per problemi di luce nei spazi interrati abbiamo deciso di scavare una parte davanti all'edificio. Così abbiamo creato uno spazio esterno, però coperto. Questo cortile diventa un passaggio fra interno ed esterno.

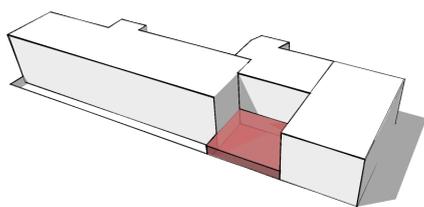


figura VII.331: Schema della definizione dell'ingresso

Scavando davanti all'edificio non permette di creare un'entrata, si deve attirare lo sguardo e le persone in un luogo riconoscibile e piacevole.

Per rendere lo spazio più accogliente, abbiamo messo una grande scala larga come la piazza. Questa grande scala permette di mostrare la transizione fra l'esterno e questo spazio intermedio, la piazza. È un luogo dove il ritmo cambia. Si arriva alla scuola velocemente, con l'autobus o la macchina, e quando si scende la scala si ci ferma per discutere con gli amici o, nei giorni di pioggia, si affretta ad arrivare in un luogo coperto per fermarsi dopo.

Inoltre questa scala è un invito per fermarsi: con la sua larghezza e una rampa che scende dolcemente ci si può sedere aspettando l'inizio delle lezioni o i genitori che sono in ritardo.



figura VII.332: Fotografia - Piazza di Spagna a Roma



figura VII.333: Render del progetto: vista del cortile d'ingresso

4. LA MENSA, CENTRO DELLA SCUOLA

La mensa è il luogo dove tutti gli allievi, i professori e le persone dell'amministrazione si ritrovano tutti i giorni per pranzo. È il luogo di esercitazione pratica per gli indirizzi di servizio bar e di cucina. Quando la scuola si apre al pubblico o alle famiglie tutti si ritrovano in questo luogo.

Per questi motivi abbiamo voluto fare di questo spazio, lo specchio della scuola per gli esterni. Abbiamo deciso di evidenziarla perché diventi l'immagine rappresentante della scuola.

Con questo scopo, abbiamo deciso di lasciare la mensa al suo posto originale, al centro della scuola, sulla facciata sud, però ampliandola e legandola con la serra grande. Questo nuovo volume sporge del volume intero dell'edificio, ed è stato girato quanto possibile (rispetto alla variazione dei consumi) in modo tale da diventare più evidente. Diventa così il primo elemento del progetto che si vede dall'esterno. La grande vetrata orientata verso l'accesso dell'edificio permette di rendere questo volume ancora più visibile e anche di fare di questo spazio significativo un luogo molto piacevole dove si può godere del sole e della vista panoramica.

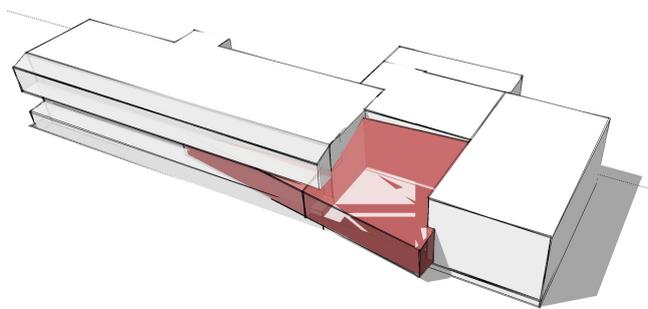


figura VII.334: Schema della rotazione del volume della mensa



figura VII.335: Render del progetto: vista della mensa

B. GIOCHI DI LUCE

1. SERRE

L'aggiunta di una serra ha due motivi diversi: il primo è la volontà di usare l'energia solare per riscaldare l'edificio, il secondo è la necessità di risolvere la mancanza di spazi aggregativi per permettere agli allievi di raggrupparsi durante i tempi di pausa.

Uno dei nostri riferimenti per la serra è il quartiere BedZED costruito in 2002 a London. E' un esempio di un quartiere innovativo, sostenibile, che consuma zero energia.



figura VII.336: Fotografia - quartiere BedZED

A secondo dell'umore e della voglia dei studenti, possono trovare due ambienti diversi.

a) Spazio sereno

Il primo tipo di serra è quello collocato sia al livello seminterrato, sia al primo piano. È un spazio davanti alle aule didattiche che si raggiunge per studiare, leggere o discutere tranquillamente. Questo spazio è dotato di tavoli per poter studiare da soli o in gruppo.

Le grandi vetrate rendono lo spazio piacevole grazie al soleggiamento importante e alla vista.



figura VII.337: Render - Harmony tower in Seoul by Studio Daniel Libeskind [Fonte: www.libeskind.com]

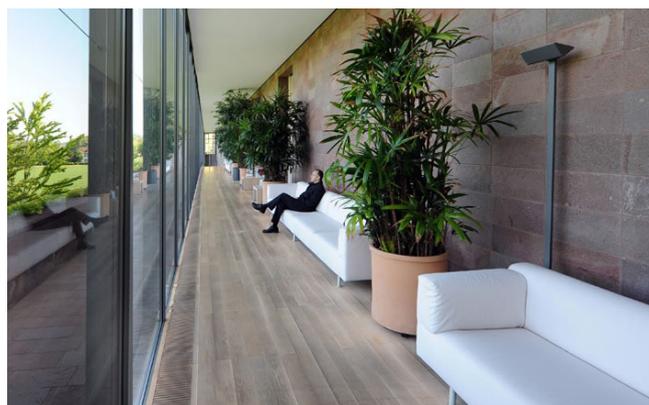


figura VII.338: Fotografia - Fondazione Beyeler di Renzo Piano

b) Spazio di convivialità

Il secondo tipo di serra è quello che prolunga la mensa sopra il cortile d'ingresso. Questa serra è collegata al bar e alla mensa. La mensa e il bar possono estendersi dentro durante le belle giornate per approfittare del soleggiamento, senza aver freddo nei mesi invernali. È un luogo di convivialità.

Siccome ci sono due tipi di serre diversi, diventa importante di distinguerle. Per questo motivo, abbiamo scelto di usare due passi diversi per le sotto-strutture della superficie vetrata. Inoltre le due tipi di serre hanno due orientazione diverse, una è orientata verso sud mentre la seconda è stata ruotata seguendo l'angolo della mensa verso ovest. L'ultimo dettaglio diverso è l'uso delle tende interne: ne abbiamo aggiunto nella mensa e la grande serra a causa del rischio di surriscaldamento, invece nelle altre serre, non era necessario.



figura VII.339: Render del progetto: vista della piccola serra



figura VII.340: Render del progetto: vista della grande serra

2. FINESTRE

a) Verticale

Nel progetto si possono trovare delle finestre con due funzioni diverse. Le prime classiche che permettono di raggiungere un comfort visivo a secondo delle norme illuminotecniche. Le seconde che non sono necessarie dal punto di vista del comfort illuminotecnico, ma che permettono agli utenti di guardare fuori e di non sentirsi imprigionati.

Abbiamo fatto la scelta architettonica di distinguere questi due tipi di finestre. Per il secondo tipo, abbiamo deciso di mettere le finestre casualmente sulla facciata della copertura per fare un gioco di luce dentro e fuori. L'idea è di rendere trasparente il processo architettonico.



figura VII.341: Fotografia - Scuola di architettura di Umea - Henning Larsen Architects

b) Orizzontale

Oltre a permettere di migliorare il comfort termico e visivo nella scuola, la presenza di lucernari nelle aule a come scopo di suscitare l'interesse degli allievi per un modo diverso di far entrare la luce in un edificio.

3. POZZI DI LUCE

La luce è una caratteristica importante del progetto. Permette di rendere un spazio più confortevole da un punto di vista visuale o termico. Nel caso dell'ingresso del progetto, che è seminterrato, la mancanza di luce naturale ci ha fatto considerare la possibilità di aggiungere dei pozzi di luce. L'obiettivo è che il processo dell'entrata nell'edificio non sia una diminuzione continua della presenza di luce naturale, e di renderlo più attraente.

A livello architettonico era importante che questi pozzi di luce siano visibile e riconoscibile. Per questo motivo sporgono dal tetto per diventare arredi della terrazza.

Questi pozzi di luce servono anche agli utenti per entrare in interazione con l'edificio.

4. LE OMBRE

Quando si parla di giochi di luce, si parla evidentemente di giochi delle ombre. I diversi tipi di schermature che usiamo per l'edificio intero permettono di creare delle ombre diverse. A secondo del posto dove ci troviamo nell'edificio e dell'ora del giorno vedremo delle ombre diverse. Queste ombre sono anche una maniera di entrare in interazione con l'edificio.

5. RIGA DI LUCE

La riga di luce si colloca nella serra grande e si vede dal cortile prima dell'ingresso. Permette di evidenziare il limite dello spazio mensa se si espande nella serra e di invitare le persone ad entrare nelle edificio. Questa riga è la metafora della conoscenza: la scuola permette di insegnare agli allievi.

C. UN MODULO PER L'ESPANSIONE DELLA SCUOLA

Nella nostra ricerca del volume ideale da un punto di vista energetico, ci siamo interessati all'architettura modulare. Il progetto che ci ha molto interessato è quello della Team di Grenoble per il solar decathlon 2012.



figura VII.342: Fotografia - Padiglione Canopea della Team Rhône-Alpes per il Solar Decathlon Europe 2012

Il progetto era quello di raggruppare delle case individuale in una torre nella città. Tutte le case sono identiche e alla sommità della torre c'è un spazio comune coperto con dei pannelli fotovoltaici. Questo progetto è un accatastamento di moduli.



figura VII.343: Urban planning - Tower Canopea della Team Rhône-Alpes per il Solar Decathlon Europe 2012

Per il nostro progetto abbiamo cercato di creare un modulo che si integra nel progetto con un consumo energetico e un impatto sull'ambiente bassissimi. Siccome la scuola sta crescendo, ogni 10 anni si deve ingrandire, abbiamo pensato di creare un modulo che si potrà copiare quando necessario per ingrandire la scuola.

Con l'ipotesi di ampliamento della scuola, nel modulo le aule sono collocate al nord e al sud con un corridoi centrale che potrà collegarsi ad un altro modulo ad est o ovest.

Inoltre il nostro modulo si colloca sul tetto della scuola esistente per motivo normativo. Secondo il decreto ministeriale del 18 dicembre 1875: "art.2.1.3 L'area coperta dagli edifici non deve essere superiore alla terza parte dell'area totale."

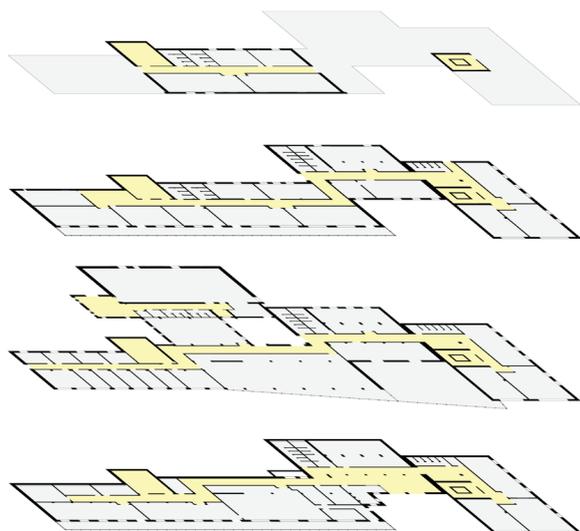
D. PROGETTAZIONE FUNZIONALE

1. DISTRIBUZIONE

La distribuzione dell'edificio esistente era uno dei punti più deboli per due motivi. Primo, la circolazione nell'edificio era labirintica. Qualcuno di esterno non riesce subito a capire come funziona l'edificio a causa dei problemi di collegamenti ai diversi piani e dei numerosi dislivelli. Secondo, le scale non erano a norma antincendio tranne una su quattro vani scale esistenti. Inoltre a causa delle norme antincendio, si deve aggiungere regolarmente delle passerelle esterne che sfigurano qualsiasi edificio.

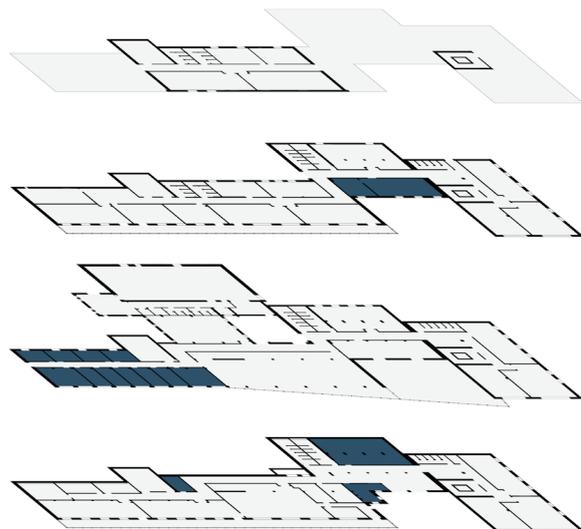
Il primo intervento si è concentrato sui vani scale per ridurre la quantità di distribuzioni verticali e metterli a norma. Ridurre i vani scale ci permette di diminuire la complessità dell'edificio.

Per rendere la circolazione orizzontale più chiara, abbiamo aperto un collegamento al primo piano e abbiamo ridefinito i corridoi per creare una circolazione orizzontale quasi uguale a tutti i piani.



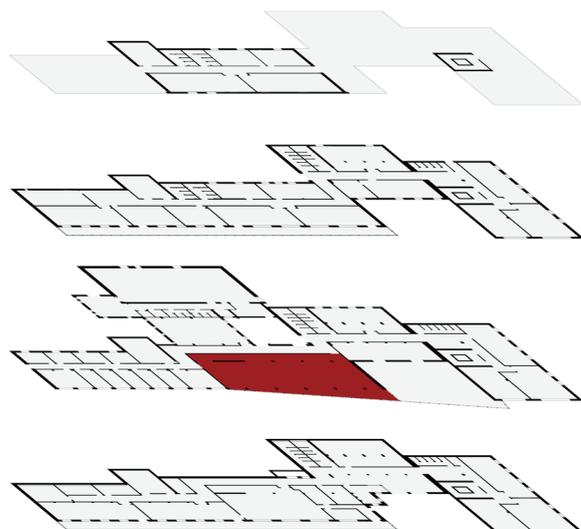
2. AMMINISTRAZIONE

L'amministrazione è una funzione della scuola che si deve trovare in un luogo separato dal resto. Può essere allontanato dai luoghi di insegnamento. Per questo motivo abbiamo raggruppato tutti gli uffici e la sala riunioni nella parte ovest del corpo centrale separandola dal resto con una porta. Si definisce uno spazio dedicato all'amministrazione.



3. MENSA

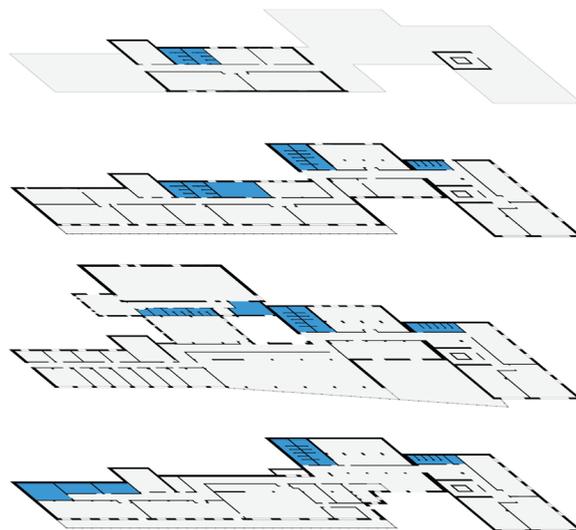
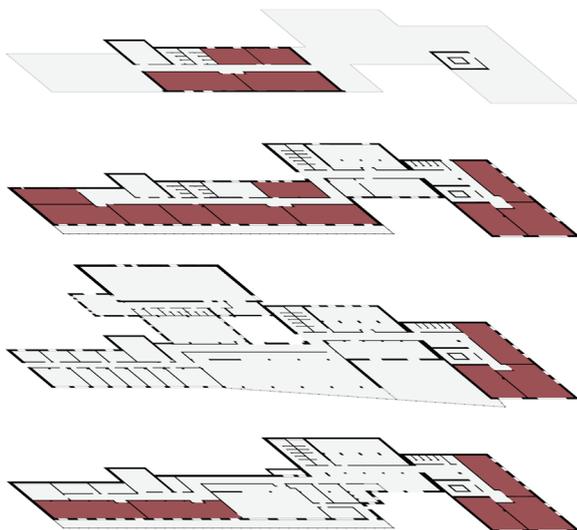
La mensa essendo lo specchio della scuola raggiunta da tutti per pranzo si trova al centro dell'edificio.



4. AULE DIDATTICHE

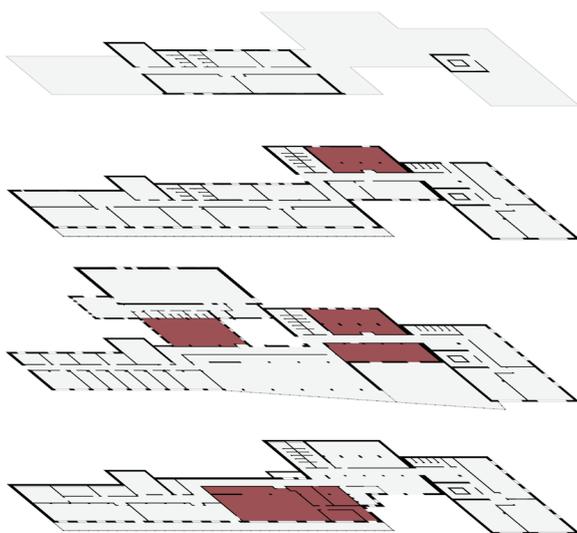
Le aule didattiche si sviluppano, quando possibile, sul lato sud dell'edificio. Così evitiamo di avere delle aule che consumano tanto o che non sono usate a causa del freddo.

Nel corpo est abbiamo copiato la pianta a tutti i piani permettendo una distribuzione più chiara dei spazi.



5. LABORATORI

Invece per i laboratori, non è necessario metterli al sud perché gli studenti si muovono di più e la temperatura di comfort può essere più bassa. Inoltre siccome si usano delle macchine elettriche, l'ambiente si riscalda anche grazie a loro.



6. SPOGLIATOI

Nell'edificio esistente mancavano degli spogliatoi ben definiti. Ne abbiamo aggiunti in delle posizioni idonee per ciascun laboratorio. Ce ne sono per le femmine, per i maschi e per i professori. Gli spogliatoi occupano per la maggior parte una posizione a nord perché non c'è permanenza di persone e quindi non vi è necessità di mantenere delle temperature di comfort come nelle aule.

E. ELABORATI GRAFICI

1. MASTERPLAN



2. PIANTE



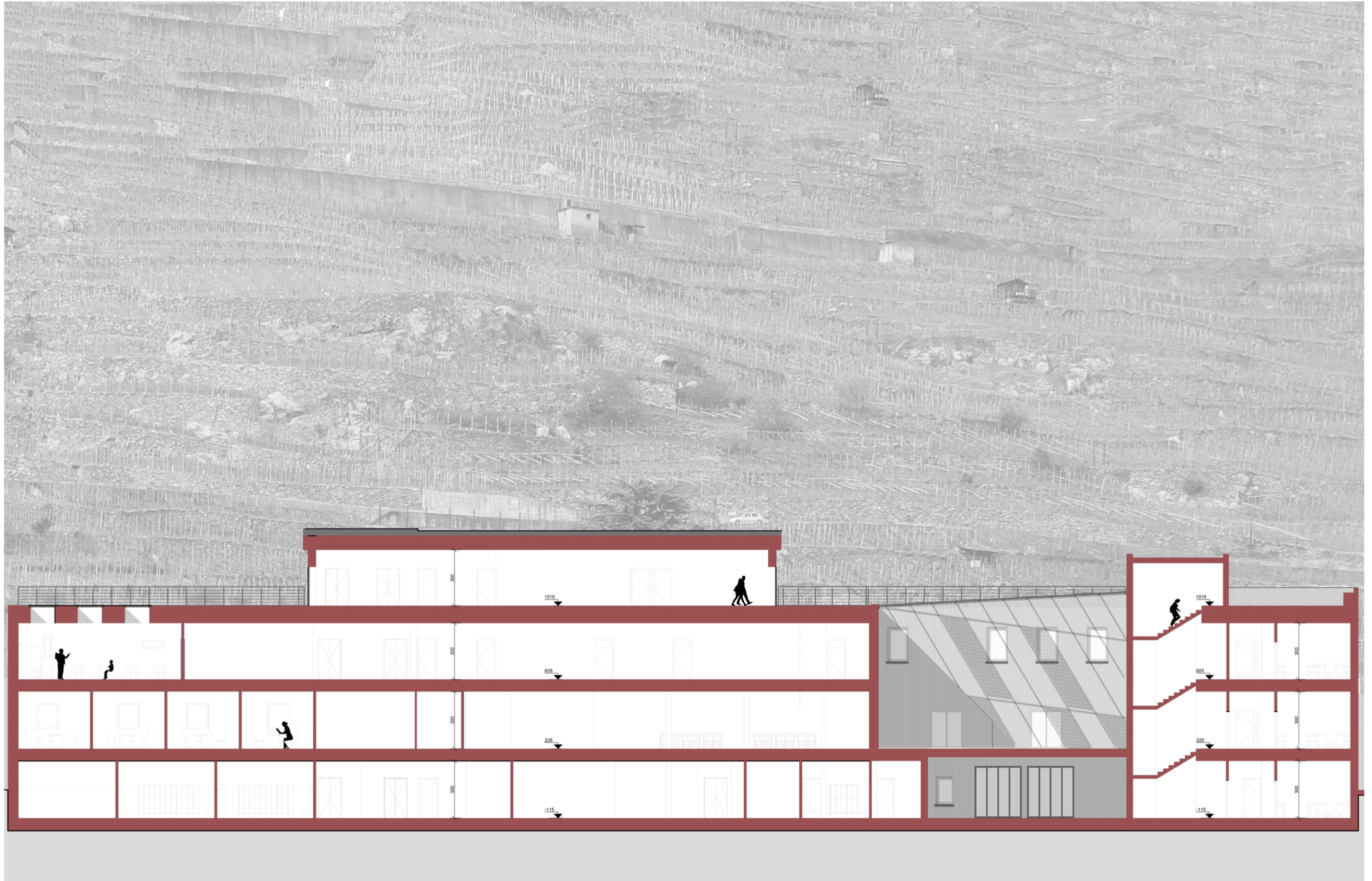




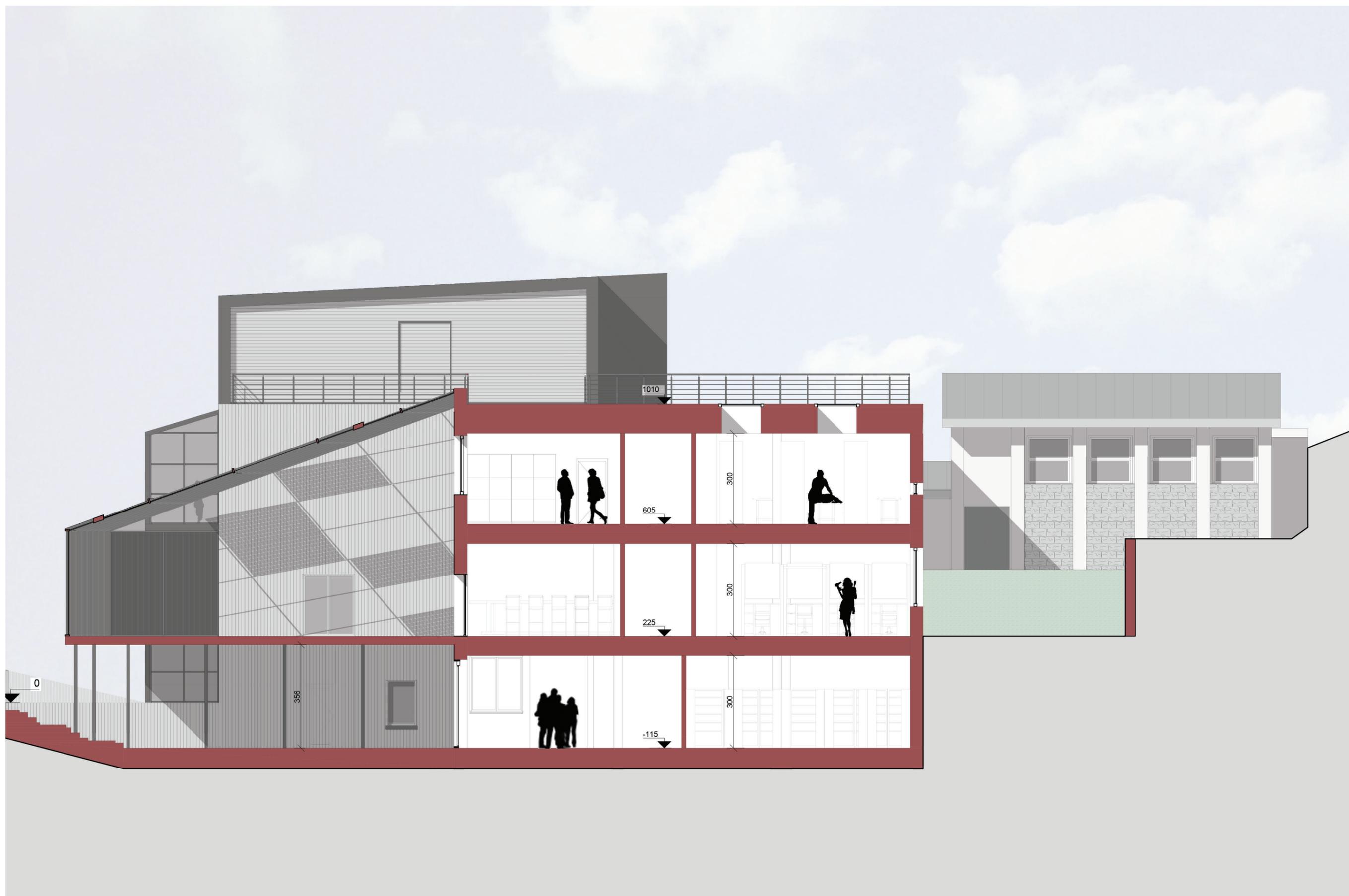




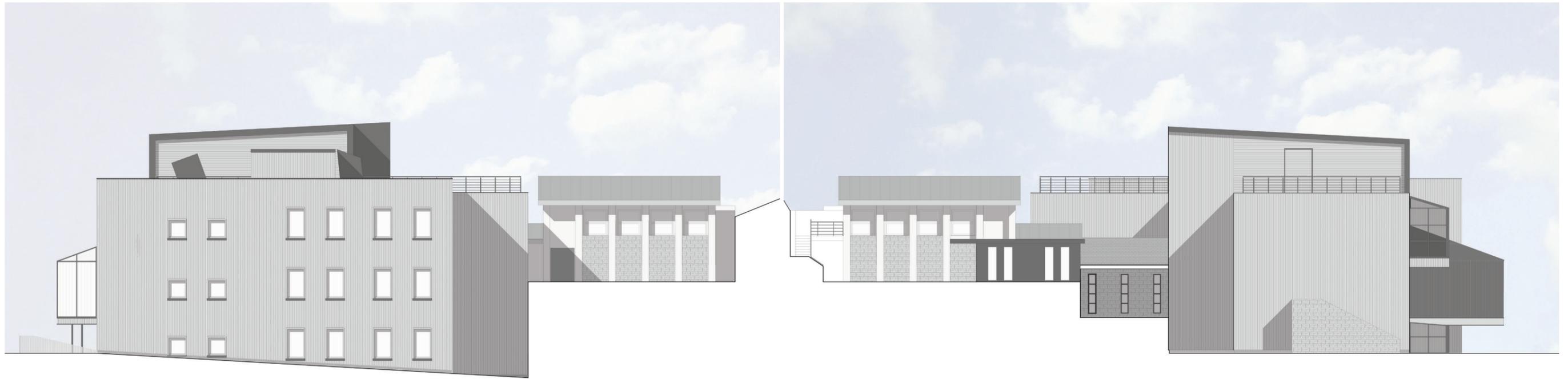
3. SEZIONI







4. PROSPETTI



PROSPETTO EST

SCALA 1:250

PROSPETTO OVEST

SCALA 1:250



PROSPETTO SUD

SCALA 1:200

5. RENDER



figura VII.344: Render dell'aula 14



figura VII.345: Render esteriore

