



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale

A.a. 2021/2022

Sessione di Laurea Ottobre 2022

**Prestazione energetica degli edifici
nel contesto dei cambiamenti
climatici: effetto delle vetrate
avanzate e delle schermature solari.**

Relatori:

Prof. Vincenzo Corrado

Correlatrice:

Ph.D. Mamak P. Tootkaboni

Candidati:

Martina Barbera

Luisa De Rito

Sommario

1. Introduzione.....	1
2. La resilienza climatica e il raffrescamento degli edifici	4
2.1 IEA EBC Annex 80: Resilience Cooling.....	6
2.2 Strategie di raffrescamento	9
3. Casi studio.....	12
2.1 Descrizione	13
2.2 Modellazione.....	21
4. Soluzioni tecnologiche	39
3.1 Vetrate avanzate	41
3.2 Schermature solari	49
5. Analisi dei risultati.....	61
5.1 Fabbisogno termico utile di raffrescamento	61
5.1.1 Risultati delle vetrate avanzate.....	64
5.1.2 Risultati delle schermature solari	69
5.2 Energia elettrica di raffrescamento	73
5.2.1 Risultati delle vetrate avanzate.....	76
5.2.2 Risultati delle schermature solari	79
5.3 Comfort adattivo.....	82
5.3.1 Risultati delle vetrate avanzate.....	86
5.3.2 Risultati finali delle schermature solari.....	90
6. Conclusioni.....	94
Lista delle figure.....	97

Lista delle tabelle	101
Bibliografia	105

Abstract

Oggi ci si trova di fronte ad uno dei più gravi problemi che il nostro pianeta può riscontrare, ovvero il cambiamento climatico. Ciò comporta diversi effetti visibili sul territorio quali: l'aumento eccessivo delle temperature, lo scioglimento dei ghiacciai e ondate di calore. Per tale motivo, è importante prestare attenzione al settore edilizio in quanto una parte del consumo energetico è dovuto proprio agli edifici.

Nel seguente lavoro di tesi è stata affrontata, appunto, la tematica del raffrescamento. Sono quindi, stati analizzati due edifici: un Condominio e una Casa Plurifamiliare, entrambi situati a Roma.

In un primo momento è stata attenzionata la fase di trasformazione dell'edificio da convenzionale ad un edificio ad energia quasi zero, *nZEB*, apportando delle modifiche sull'intero involucro edilizio e dal punto di vista impiantistico, rendendolo così ad alta prestazione energetica.

In un secondo momento sono state scelte due soluzioni tecnologiche di raffrescamento, quali le vetrate avanzate e le schermature solari. Esse sono state proposte nel progetto internazionale "*IEA EBC Annex 80*".

Nel caso delle vetrate avanzate sono state selezionate due diverse configurazioni tramite il software *Glass Configurator*, un vetro con rivestimento basso-emissivo e uno con rivestimento basso-emissivo e selettivo.

Invece, nel caso delle schermature solari, sono state selezionate tre diverse configurazioni con l'aiuto del database "*European Solar Shading Database*", si tratta di tre tende applicate esternamente al vetro, una color carbone, una ultravision bianca e una bianca.

La parte di modellazione è stata effettuata attraverso il software *Design Builder*, mentre la parte di analisi con l'utilizzo del software *EnergyPlus*. Queste ultime sono state fatte in modo accurato per valutare: il fabbisogno termico di raffrescamento, l'energia elettrica di raffrescamento e il comfort termico con il metodo adattivo.

Il tutto è stato valutato a partire dall'anno 2020 per poi passare a previsioni future nel 2050 e nel 2080.

Dalla ricerca condotta è emerso che i risultati ottenuti sono utili per definire quali siano le scelte migliori da adottare per migliorare l'impatto delle strategie di raffrescamento adottate.

Abstract

Today we are faced with one of the most serious problems that our planet can encounter, the climate change. This has several visible effects on the area such as: the excessive increase of temperatures, the melting of glaciers and heat waves. For this reason, it is important to pay attention to the construction sector, in fact part of the energy consumption is due to the buildings.

In the following thesis, the issue of cooling was dealt with. Therefore, two buildings were analyzed: an apartment block and a multi-family house, both located in Rome.

At first, attention was paid to the transformation phase of the building from conventional to a nearly zero energy building, nZEB, by making changes to the entire building envelope and from the plant engineering point of view, thus making it high energy performance.

Two technological cooling solutions were subsequently chosen, such as advanced glazing and solare shading. They were proposed in the international project "IEA EBC Annex 80".

In the case of the advanced glazing, two different configurations were selected using the Glass Configurator software, a glass with a low-emissive coating and one with a low-emissive and selective coating.

Instead, in the case of solar shading, three different configurations were selected with the help of the "European Solar Shading Database", these are three curtains applied externally to the glass, one carbon-colored, one ultraviolet white and one white.

The modeling part was carried out through the Design Builder software, while the analysis part was carried out using the EnergyPlus software. The analysis have been done accurately to assess: the cooling thermal needs, cooling electricity and thermal comfort with the adaptive method.

Everything was evaluated starting from the year 2020 and then moving on to futere forecasts in 2050 and 2080.

From the research condupted, it emerged that the results obtained are useful for defining the best choices to be adopted to improve the impact of the cooling strategies adopted.

1. Introduzione

Una tra le più grandi avversità che l'uomo oggi si trovi ad affrontare riguarda la tematica delle temperature dell'atmosfera e delle emissioni di calore di origine antropica, il cui aumento, per effetto dell'umanità, negli ultimi 150 anni hanno causato un surriscaldamento globale dagli effetti disastrosi.

Gli effetti del cambiamento climatico sono già visibili con un conseguente aumento nelle previsioni future; tra le osservazioni rientrano fenomeni meteorologici estremi come ondate di calore, siccità e alluvioni, trasformazione delle proprietà degli oceani tra cui temperatura, salinità, livello del mare e contenuto di carbonio, lo scioglimento dei ghiacciai e delle calotte polari.

Per capire come adattarsi ai cambiamenti climatici bisogna cercare di prevedere il sistema climatico nei prossimi decenni. La proiezione climatica è la risposta del sistema climatico alle emissioni o agli scenari di concentrazione di gas serra, spesso basati su simulazioni da modelli climatici. Gli ultimi scenari sono stati pubblicati dall'IPCC nel 2015 e si chiamano SSP¹ (*Shared Socio-economic Pathway*). In essi, in funzione delle diverse adozioni socioeconomiche, i livelli di attenuazione dei cambiamenti climatici e l'interesse nel controllare le emissioni di gas inquinanti mutano i livelli di emissione di calore. Questo implica che più CO₂ si emette in atmosfera, più viene limitata la capacità di assorbimento naturale.

A causa dell'innalzamento della temperatura media globale, è stato quindi introdotto dall'IPCC il sesto rapporto di valutazione, che si basa su un insieme di simulazioni climatiche di ultima generazione, chiamato CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 del World Climate Research Programme*)².

¹ Comprendono ipotesi con: alte emissioni di gas serra (SSP3-7.0 e SSP5-8.5) ed emissioni di CO₂ che raddoppiano entro il 2100 o il 2050 rispetto ai valori attuali; valori intermedi di emissione di gas serra (SSP2-4.5) con emissioni di CO₂ che rimangono ai livelli attuali fino alla metà del secolo; emissioni basse o molto basse di gas serra (SSP1-1.9 e SSP1-2.6) con emissioni di CO₂ che vanno verso l'obiettivo di zero emissioni nette intorno al 2050 o dopo, con diversi livelli di emissioni negative di CO₂.

² È un programma internazionale di cui fanno parte istituti, laboratori e università di vari paesi che hanno stessi obiettivi scientifici e ne mettono a disposizione i risultati.

Il Sesto Rapporto di Valutazione definisce che per più del 50%, la temperatura media globale supera 1,5 °C negli anni successivi al 2030, ovvero prima rispetto a quanto valutato dall'IPCC nel 2018, come mostrato nel grafico sottostante fornito dall'ISPI³. Inoltre, secondo gli scenari SSP3-7.0 e SSP6-8.5 la soglia di riscaldamento globale di 2 °C verrà superata durante XXI secolo. Se però, si avrà una riduzione delle emissioni di CO₂ tendenti allo zero dal 2020 in poi, allora è probabile che il riscaldamento globale rimanga sotto di 1,5 °C.

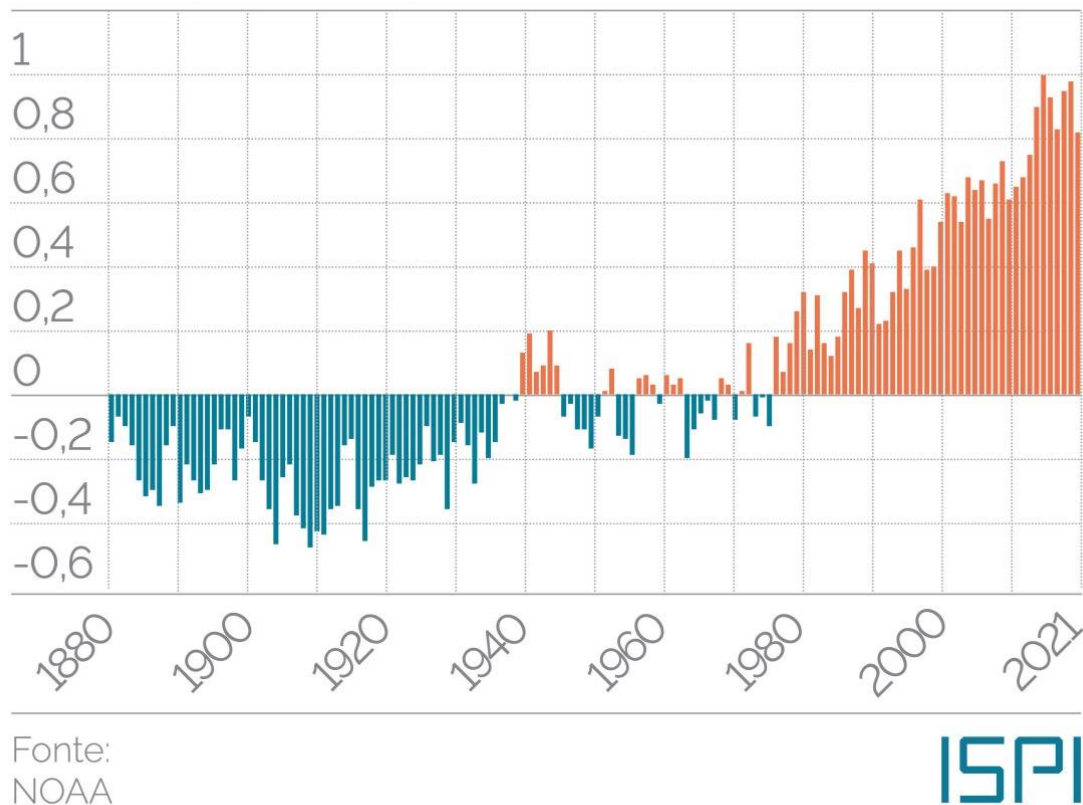


Figura 1: Variazione (in °C) della temperatura media annua della superficie terrestre rispetto ai livelli preindustriali.

L'obiettivo di questa tesi è la definizione di "Resilience Cooling" proponendo i criteri che possono essere utilizzati per valutare la resilienza di una strategia di raffrescamento.

Si tratta di una tesi di ricerca, in correlazione all'Annex 80 dell'Agenda internazionale per l'energia (AEI) *Energy in Buildings and Communities Program* (EBC), nella quale

³ Istituto per gli Studi di Politica Internazionale.

verranno effettuate delle simulazioni in funzione dell'applicazione di soluzioni tecnologiche atte a dimostrare l'efficienza energetica degli edifici medi e a costo zero sia attualmente che tra 50 anni. Si presuppone che dalle analisi che verranno effettuate gli edifici ad energia quasi zero (nZEB) diano dei risultati migliori, rispetto agli edifici medi, in quanto si tratta di costruzioni ad elevata prestazione energetica, che mitigano i consumi legati al riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione e produzione di ACS (acqua calda sanitaria).

Tali argomenti sono stati trattati esaminando due diversi casi studio di edifici residenziali, situati entrambi a Roma: un *Apartment Block* e un *Multi-family house*.

Per la simulazione e l'extrapolazione dei risultati finali, in riferimento all'impatto del cambiamento climatico sulle scelte tecnologiche per il raffrescamento dell'edificio, sono stati utilizzati i software *EnergyPlus* e *Design Builder*.

I risultati ottenuti hanno confermato come le variazioni dei parametri climatici dovuti al cambiamento climatico influenzano o meno le scelte tecnologiche oggi e negli anni a venire. Per tale motivo, questo studio potrebbe far riflettere se le soluzioni proposte potrebbero essere efficienti e in grado di garantire un miglioramento prestazionale dal punto di vista energetico.

La tesi è strutturata in 5 capitoli, i primi due includono dei contenuti generici in riferimento agli edifici in esame e sono stati quindi trattati da entrambe le candidate. Il capitolo 3, riguardante le soluzioni tecnologiche, è suddiviso in due parti: la prima, sulle vetrate avanzate, è stata analizzata dalla tesista Martina Barbera, la seconda, invece, sulle schermature solari, è stata oggetto di studio per la tesista Luisa De Rito.

2. La resilienza climatica e il raffrescamento degli edifici

La risposta al cambiamento climatico implica un duplice approccio ossia le misure di adattamento e le misure di mitigazione. Le prime rafforzano la capacità di resistere degli individui e della comunità nel suo complesso e tengono in considerazione che il clima sta già cambiando e che tali cambiamenti aumenteranno nel corso degli anni; le seconde puntano alla stabilizzazione dei livelli di gas serra nell'atmosfera tramite la decarbonizzazione e il passaggio alle energie da fonti rinnovabili.

Aumenta, quindi, il numero di enti pubblici che hanno come obiettivo quello di rendere resilienti i territori adottando delle strategie in grado di resistere agli eventi climatici estremi.

Le strategie proposte dalla Commissione Europea puntano, oltre alla ricerca e al progresso, all'adozione di soluzioni efficaci in modo da rendere l'Europa in grado di resistere ad un mondo più caldo e imprevedibile.

Gli obiettivi prefissati si distinguono in tre fasi: preparazione, progettazione e dimostrazione. La prima fase riguarda il concetto di rendere noto a tutti i cittadini europei quali sono i rischi climatici attuali e futuri entro il 2030 e che sappiano quali sono le soluzioni che hanno a disposizione per mitigare tali rischi. La seconda fase non solo prefigge le soluzioni per ridurre i rischi, ma anche dei metodi per assicurarsi una vita sana e migliore. L'ultima fase è quella di attuazione di parte dei piani previsti come soluzioni innovative per raggiungere la resilienza climatica entro il 2030. Tra questi, per esempio, rientrano l'aumento del verde pubblico e l'incentivazione dei tetti verdi, l'aumento dell'azione dei fiumi e delle zone umide tali da evitare inondazioni, la costruzione di edifici più solidi e l'introduzione di soluzioni tecnologiche che puntino al raffrescamento degli edifici.

Tra le misure adottate per evitare il problema del surriscaldamento all'interno di un edificio, vi è un intervento preventivo che riguarda la tematica del raffrescamento passivo che punta a progettare l'edificio in accordo con il paesaggio circostante.

Tra gli accorgimenti per avere un sistema di raffrescamento passivo vi sono: quello di garantire un isolamento termico delle pareti adeguato e favorire la ventilazione naturale. Nel primo caso si interviene installando materiali isolanti per tutti componenti opachi che definiscono l'edificio e componenti trasparenti comprensivi di schermature tali da proteggere l'ambiente interno, riducendo così le dispersioni di calore. Nel secondo caso, la ventilazione naturale rappresenta un ingresso volontario di aria esterna che avviene attraverso l'apertura di porte e finestre.

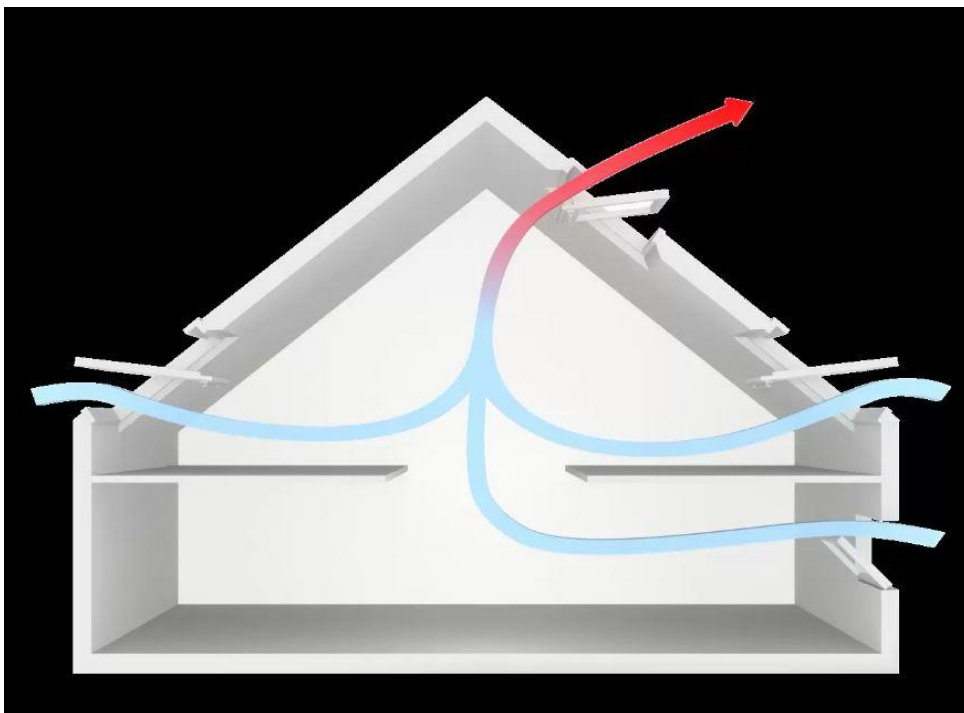


Figura 2: Immissione ed estrazione dell'aria. Fonte: Mansarda.it

I sistemi di raffrescamento passivo comportano una diminuzione del 50% dei consumi energetici, favorendo così il benessere termico.

La tematica del raffrescamento è stata oggetto di studio per l'*Annex 80* che ha come obiettivo il miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio rispetto al problema del surriscaldamento globale.

2.1 IEA EBC Annex 80: Resilience Cooling

Numerosi sono i progetti di ricerca dell'IEA che trattano il tema del raffrescamento a bassa energia e a bassa emissione di carbonio e si basano su tecnologie ben specifiche. Il nuovo progetto, ossia Annex 80: Resilience Cooling, si concentra proprio sui risultati di questi allegati. Si tratta di un progetto di ricerca internazionale che mira a esaminare le possibili scelte di raffrescamento resiliente e combattere i problemi connessi alla temperatura.

Prima di affrontare gli obiettivi dell'Annex 80 è bene concentrarsi nel definire il concetto di resilienza. Come definito dall'IPCC ⁴, si riferisce alla *"capacità di un sistema e delle sue parti componenti di anticipare, assorbire, accogliere o recuperare dagli effetti di un evento pericoloso in modo tempestivo ed efficiente, anche assicurando la conservazione, il ripristino o il miglioramento dei suoi elementi essenziali di base strutture e funzioni"*. Il concetto di resilienza è molto ampio e abbraccia diversi ambiti, in particolare nel contesto dell'ambiente edilizio fa riferimento a costruzioni adattive nell'edilizia sostenibile e alla capacità degli edifici e dei loro sistemi di adattarsi di fronte ai rischi dovuti al cambiamento climatico.

Compito del progettista è conoscere, valutare e progettare un edificio che trae pieno vantaggio dalle condizioni climatiche del sito su cui è costruito (edificio energeticamente efficiente) e contemporaneamente garantire il soddisfacimento delle esigenze degli occupanti. È importante, quindi, valutare questi due aspetti. Per definire un edificio energeticamente efficiente è fondamentale studiare il clima e le sue variabili mentre un ambiente si definisce confortevole quando non più di 10-15 persone su 100 dichiarano di trovarsi a disagio. Quindi, è importante che gli edifici mantengano condizioni termiche sicure durante eventi estremi, come le ondate di calore.

⁴ *Intergovernmental Panel on Climate Change* è il principale organismo internazionale che si occupa di preparare relazioni di valutazioni complete sullo stato delle conoscenze scientifiche socioeconomiche e tecniche sul cambiamento climatico, sui suoi impatti, rischi futuri e sulle opzioni per ridurre il tasso.

In meteorologia, con il termine di ondate di calore ci si riferisce a qualcosa la cui precisione viene definita attraverso delle statistiche. Oltre a definire ciò, l'uso di indici permette anche di osservare l'andamento nel corso dei decenni.

Secondo le proiezioni climatiche, è possibile che l'intensità delle ondate di calore sia aumentata in gran parte dell'Europa, Australia e Asia. L'Italia è stata colpita da ondate di calore negli ultimi anni. Le maggiori sono state rilevate nel 2003, 2006, 2012, 2015, 2019 e 2021. Da maggio 2018, il Ministero della Salute⁵ ha coordinato un sistema di allarme giornaliero per prevedere il rischio che si verificano ondate di calore nelle città italiane. L'estate 2021 è stata considerata la sesta più calda e secca della storia. Dal grafico⁶ sottostante si può osservare il forte aumento delle ondate di calore nelle diverse zone italiane con un'anomalia di +1,8 °C e la variazione della temperatura media estiva con un aumento smisurato nel corso degli anni. Tali ondate di calore sono state in totale circa quattro; una nella seconda metà di giugno, due a luglio e una ad agosto, quest'ultima è stata la più intensa, fino a raggiungere un totale di 37 giornate di caldo su 92.

ANOMALIE STAGIONALI – ESTATE 2021		
	TEMPERATURA (°C)	PRECIPITAZIONI
ITALIA	+1.4	-32%
Nord-Ovest	+1.0	-22%
Nord-Est	+1.2	-38%
Centro	+1.4	-46%
Sud	+1.9	-16%
Sicilia	+1.7	+25%
Sardegna	+1.4	-52%

Figura 3: Anomalie calcolate rispetto alla media climatica del trentennio 1981-2010. Fonte: Meteo Expert – IconaClima

⁵ Il Ministero della Salute interviene poiché le ondate di calore comportano problemi di salute per la popolazione come l'affaticamento da calore, i colpi da calore e la disidratazione che possono includere sintomi come vertigini, mal di testa e svenimenti.

⁶ Fonte: Meteo Expert è una struttura privata di ricerca applicata e di previsione in ambito meteorologico e climatologico. Nato nel 1995, oggi rappresenta una delle strutture più accreditate d'Europa in questo campo. Articolo "Estate 2021 in Italia: la seconda più calda al Sud, e la più secca in assoluto al Nord-Est" di Alberto Abelli in data 09/09/2021.

Ciò ha contribuito a rinforzare le temperature già da inizio anno, fino a raggiungere un incremento di +0,7 °C da gennaio e un allontanamento rispetto alla media della quantità di pioggia fino a raggiungere il -8%.

ANOMALIE DA GENNAIO 2021		
	TEMPERATURA (°C)	PRECIPITAZIONI
ITALIA	+0.7	-8%
Nord-Ovest	+0.5	-5%
Nord-Est	+0.4	-11%
Centro	+0.7	-17%
Sud	+0.9	+4%
Sicilia	+0.8	+10%
Sardegna	+0.9	-15%

Figura 4: Anomalie calcolate rispetto alla media climatica del trentennio 1981-2010. Fonte: Meteo Expert – IconaClima

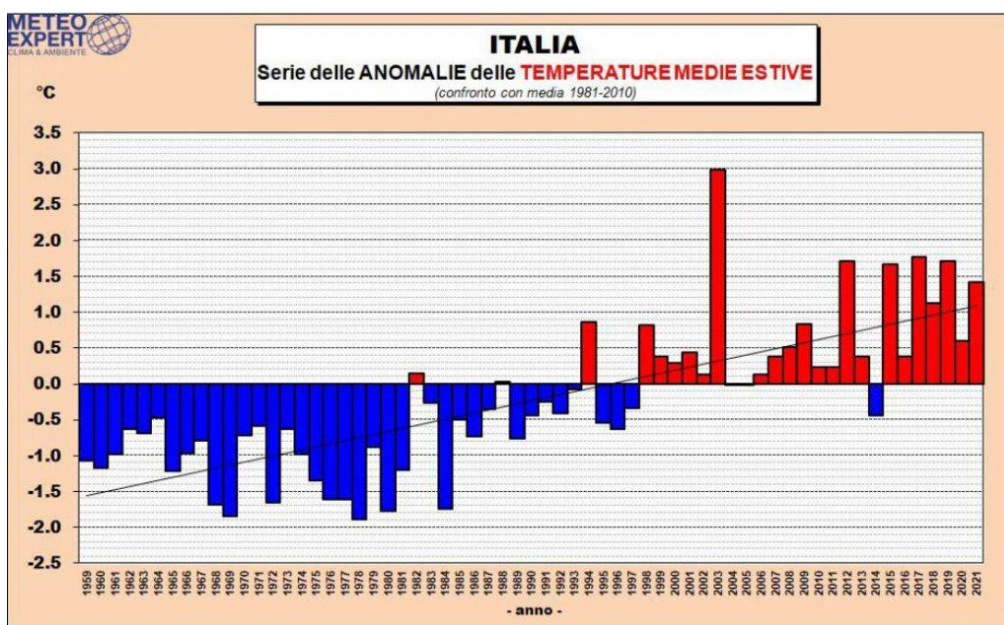


Figura 5: Temperatura estiva media in Italia, dal 1959 al 2021. Fonte: Meteo Expert – IconaClima

Dal grafico soprastante si nota l'aumento graduale della temperatura media estiva registrato dal 1959 fino al 2021 passando da un'anomalia minima di -1,8 °C ad una massima di +3 °C.

A causa della loro lunga vita utile, gli edifici saranno soggetti a climi più caldi e ad ondate di calore più intense che possono avere un effetto negativo sulle condizioni di comfort, a causa dell'aumento del rischio di surriscaldamento. Quest'ultimo comporta un aumento significativo del consumo di energia per il raffrescamento. Questo è il motivo per cui l'Annex 80 ha come obiettivo primario di ricerca quello di rendere gli edifici resilienti al raffrescamento, in modo tale da prevenire gli effetti negativi del surriscaldamento.

2.2 Strategie di raffrescamento

L'Annex 80 include quattro categorie di strategie di raffrescamento resiliente sia attive che passive:

- A. Ridurre i guadagni di calore indotti dall'esterno negli ambienti interni;
- B. Migliorare il comfort personale oltre a raffrescare interi spazi;
- C. Rimuovere il calore sensibile dagli ambienti interni;
- D. Controllare il calore latente (umidità) degli ambienti interni.

La prima strategia riguarda il guadagno solare, il quale indica l'aumento della temperatura che avviene quando l'energia del sole attraversa porte o finestre. Esso può essere considerato benefico o dannoso in funzione del clima o delle stagioni, può quindi massimizzare il comfort e minimizzare i costi energetici degli edifici. Una soluzione di raffrescamento passivo per la protezione dei guadagni di calore è dato dalla scelta dell'orientamento e della forma dell'edificio. Invece, per quanto riguarda le soluzioni che ne fanno parte rientrano: tecnologie avanzate di schermature solare e vetrate avanzate, materiali per raffrescamento dell'involucro (CEM), tetti, facciate verdi e laghetti sul tetto, tetti e facciate ventilate, sistema di accumulo di massa termica (TES).

- L'accoppiamento di schermatura solare e vetrata viene considerata una tecnologia avanzata in quanto il singolo vetro permette alla luce diurna e al calore del sole di penetrare all'interno, ma con l'aggiunta della schermatura

solare è possibile ridurre il fenomeno di abbagliamento e surriscaldamento all'interno dell'ambiente;

- I CEM sono quei materiali applicati ai componenti opachi dell'edificio e ad essi conferiscono una superficie solare-opaca che garantisce la riduzione del guadagno di calore radiativo. Inoltre, questi materiali includono una elevata riflettanza solare statica (colore chiaro o bianco ultraluminoso), una elevata riflettanza statica nello spazio dell'infrarosso (colore freddo) e un'alta riflettanza solare sensibile alla temperatura (termocromico);
- I tetti, le facciate verdi e i laghetti sul tetto comportano l'evaporazione verso l'esterno dell'involucro edilizio e rappresenta un'efficace tecnica di raffrescamento. La distinzione primaria tra tetti e facciate verdi è legata al deflusso verticale dell'acqua che amplifica il trasferimento termico dovuto all'aumento di calore sensibile e convettivo nel flusso d'acqua;
- I tetti e le facciate ventilate rappresentano un elemento adattivo in grado di accumulare calore in inverno e dissipare calore in estate. Si tratta di un rivestimento opaco o trasparente che consente il passaggio dell'aria per raffreddare il lato esterno del componente opaco quando necessario;
- I TES sono dei sistemi che assorbono, immagazzinano e rilasciano energia termica ciclicamente, con lo scopo di regolare la temperatura interna e garantire il comfort termico ambientale.

La seconda strategia riguarda il comfort termico, ossia quello stato di benessere termico che suscita nella maggior parte degli individui una sensazione di soddisfazione per l'ambiente termico. Il metodo di Fanger⁷ è lo standard principale a cui ci si rifà per la valutazione del comfort termo-igrometrico, ma in alcune situazioni in particolare, per ambienti climatizzati meccanicamente, si adotta il modello del comfort adattativo. In quest'ultimo caso, l'individuo non è più considerato un soggetto passivo, come nel

⁷ Il metodo di Fanger è stato sviluppato negli anni 60 e ad esso si rifanno le principali norme tra cui la UNI EN ISO 7730 (norma indicata nei CAM per la valutazione del comfort termo-igrometrico). Esso deriva da studi statistici condotti in laboratorio e dalla teoria dei bilanci termici applicate al corpo umano.

metodo di Fanger, ma un soggetto attivo che si mantiene in equilibrio termico con l'ambiente attraverso processi di termoregolazione. Si basa su una media mobile dei sette giorni precedenti di temperatura esterna e sulla base di questo valore si determina una temperatura ottimale interna e un intervallo di accettabilità e si contano le ore in cui la temperatura è più alta rispetto a questo intervallo. Si distinguono 3 leve adattive, le quali permettono l'individuo di adattarsi alle condizioni climatiche e si distinguono in:

- Comportamentale sono quelle azioni che l'individuo mette in atto per modificare i parametri che regolano il bilancio termico del proprio corpo fisiologico;
- Fisiologico prevede che una maggiore esposizione alle condizioni climatiche ne aumenta la tollerabilità;
- Psicologico sono intuizioni del clima dovute ad esperienze passate o prospettive.

Le soluzioni tecnologiche utili al miglioramento del comfort termico sono: raffrescamento ventilato, raffrescamento adiabatico/evaporativo, refrigerazione a compressione di vapore, raffrescamento geotermico, raffrescamento radiativo del cielo, sistema di raffrescamento ad alta temperatura: raffrescamento radiante.

La terza e la quarta strategia riguardano il calore sensibile e il calore latente presenti all'interno di un edificio. Il primo indica qualsiasi apporto/dispersione di calore (per convenzione, conduzione, irraggiamento) che deve essere rimosso o fornito dall'impianto di climatizzazione per mantenere l'aria dell'ambiente interno ad una temperatura prefissata. Il secondo invece, indica qualsiasi apporto/sottrazione di vapore acqueo proveniente da persone, processi, ventilazione e infiltrazione deve essere rimosso o fornito dall'impianto di climatizzazione per mantenere costante l'umidità relativa dell'aria all'interno dell'ambiente. Una soluzione per poter ridurre il calore latente negli ambienti interni è quella della deumidificazione che è un metodo

importante, soprattutto in climi caldi e umidi per poter ridurre e aumentare il carico di raffrescamento per il benessere umano.

3. Casi studio

In riferimento agli obiettivi dell'Annex 80 sopra citati, il seguente lavoro di tesi può essere sintetizzato tramite uno schema esplicativo che ingloba le diverse fasi che sono state eseguite per raggiungere i risultati finali.

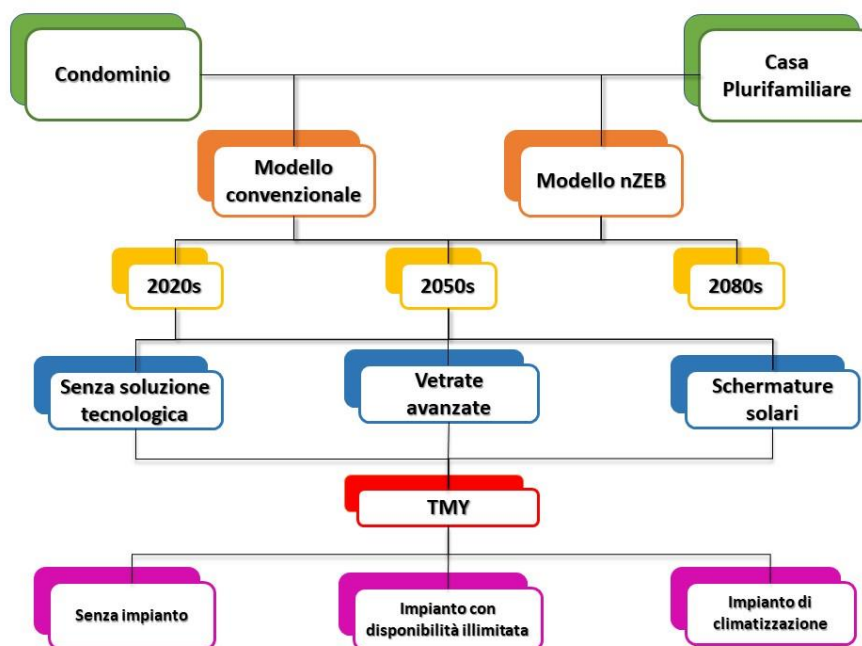


Figura 6: Schema rappresentativo dell'obiettivo tesi

Come mostrato in figura, sono stati analizzati due casi studio ossia un condominio e una casa plurifamiliare, situati a Roma. Per entrambi sono stati distinti due modelli, un modello convenzionale che a sua volta è stato reso *nZEB* attraverso la modifica dei componenti di involucro e del sistema impiantistico. Le analisi vengono svolte sulla base di dati climatici riferite agli anni 2020, 2050 e 2080; considerando inoltre che dapprima non si è tenuta conto di nessuna soluzione tecnologica per poi passare alla scelta di due dispositivi innovativi quali vetrate avanzate e schermature solari. Sulla

base dell'anno tipico meteorologico (TMY)⁸ sono state effettuate simulazioni in primis senza impianto, poi con una sua disponibilità limitata per poi concludere con l'installazione dell'impianto di climatizzazione.

2.1 Descrizione

Gli edifici trattati sono un Condominio e una Casa Plurifamiliare, entrambi situati a Roma. Essi sono stati modellati con *Design Builder*, che rappresenta l'interfaccia del software *EnergyPlus* che ha permesso di creare dei modelli che, dal punto di vista grafico, sono molto semplici infatti, si tratta di assemblare più blocchi che, nel primo caso, definiscono i diversi piani; mentre, nel secondo caso, le unità immobiliari che compongono l'edificio.

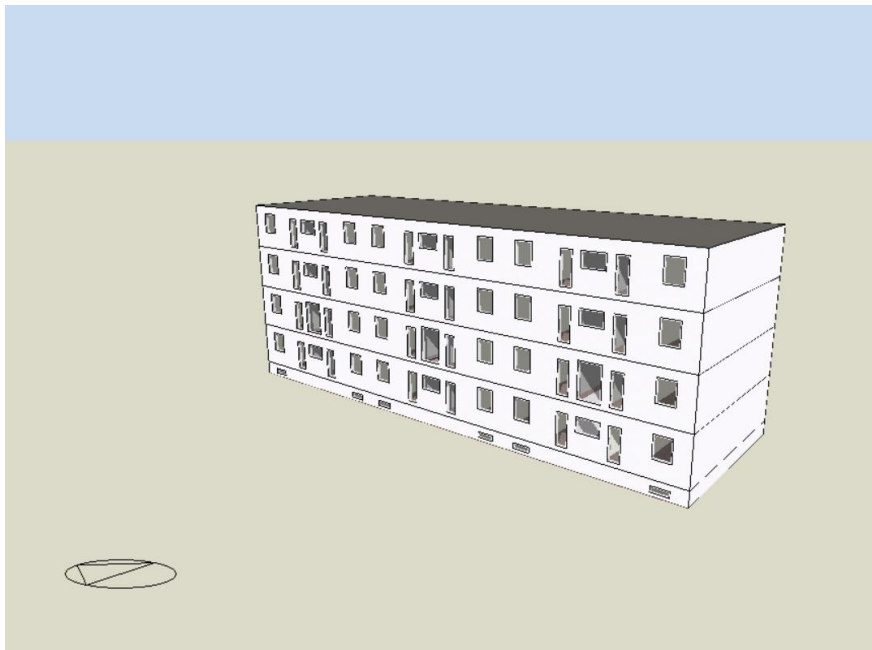


Figura 7: Condominio

⁸ È una raccolta di dati meteorologici riferiti ad una specifica località che contiene i valori orari della radiazione solare e degli elementi meteorologici di un intero anno.

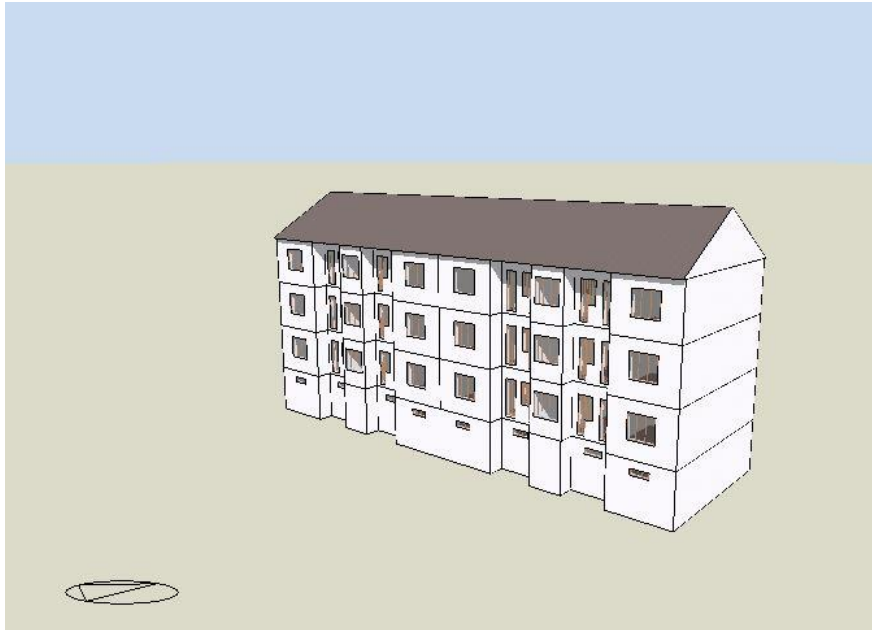


Figura 8: Modello Casa plurifamiliare

Come mostrato nella *figura 7*, il Condominio è suddiviso in quattro piani fuori terra e da cantina ed è inoltre caratterizzato da copertura piana. Quest'ultima lo contraddistingue dalla Casa plurifamiliare che è invece caratterizzato da una copertura a falde, come mostrato in *figura 8*. In questo caso l'edificio è suddiviso in quattro piani fuori terra comprensivi di cantina, ciascuno, a sua volta, diviso in quattro unità immobiliari. Sia nel primo che nel secondo caso, l'accessibilità è consentita dalla presenza del vano scala.

In entrambi gli edifici i componenti finestrati sono esposti ad Est ed Ovest.

Per la valutazione delle prestazioni energetiche dei due edifici, si è ritenuto opportuno fare un'ulteriore distinzione tra il modello convenzionale e quello nZEB.

La *Direttiva Europea 31/2010/UE* definisce un edificio ad energia quasi zero (nZEB-*nearly Zero Energy Building*) un edificio ad altissima prestazione energetica tale per cui riduce i consumi sul riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione e produzione di ACS⁹, mediante l'utilizzo di tecnologie innovative come l'isolamento termico e fonti rinnovabili. Attraverso il *Decreto Legislativo 10 Giugno 2020 n.48* si

⁹ Acqua calda sanitaria.

è giunti all'attuazione della *Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 Maggio del 2018*, che modifica la *Direttiva 2010/31/UE* sulla prestazione energetica dell'edilizia e la *Direttiva 2012/27/UE* sull'efficienza energetica.

Il decreto-legge n.63 del 2013, convertito alla legge n.90 del 2013, stabilisce i criteri per la generazione degli standard prestazionali degli edifici (involucro, impianti e fonti rinnovabili) con lo scopo di raggiungere gli obiettivi precedentemente definiti al livello europeo. Sulla base di ciò, tale decreto impone che i nuovi edifici, dall'inizio del 2019 per il settore pubblico e dall'inizio del 2021 per tutti gli altri settori, siano edifici ad energia quasi zero.

Affinché un edificio venga considerato nZEB, deve rispettare i seguenti requisiti tecnici:

- Coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente (H'_T);
- L'area solare equivalente estiva per unità di superficie utile ($A_{sol,est}$);
- L'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale (EP_H), l'indice di prestazione termica utile per la climatizzazione estiva compreso il controllo dell'umidità (EP_C), l'indice di prestazione energetica globale espresso in energia primaria (EP_{gl}), sia totale che non rinnovabile.
- I rendimenti dell'impianto di climatizzazione invernale (η_H), di climatizzazione estiva (η_C) e di produzione di acqua calda sanitaria (η_W).

Per il calcolo di H'_T si utilizza la seguente formula:

$$H'_T = H_{tr,adj} / \sum_k A_K \quad [W/m^2K]$$

Dove:

- $H_{tr,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione dell'involucro calcolato con la UNI/TS 11300-1 (W/K);
- A_K è la superficie del k-esimo componente (opaco o trasparente) costituente l'involucro (m²).

Il valore di H'_T deve essere inferiore al valore massimo ammissibile riportato in *Tabella 1* in funzione della zona climatica e del rapporto S/V [m⁻¹].

Tabella 1: Valore massimo ammissibile del coefficiente globale di scambio termico (Appendice A)

Numero Riga	RAPPORTO DI FORMA (S/V)	Zona climatica				
		A e B	C	D	E	F
1	$S/V \geq 0,7$	0,58	0,55	0,53	0,50	0,48
2	$0,7 > S/V \geq 0,4$	0,63	0,60	0,58	0,55	0,53
3	$0,4 > S/V$	0,80	0,80	0,80	0,75	0,70
Numero Riga	TIPOLOGIA DI INTERVENTO	Zona climatica				
		A e B	C	D	E	F
4	Ampliamenti e Ristrutturazioni importanti di secondo livello per tutte le tipologie edilizie	0,73	0,70	0,68	0,65	0,62

Per il calcolo di $A_{sol,est}$ si utilizza la seguente formula:

$$A_{sol,est} = \sum_k F_{sh,ob} \times g_{gl+sh} \times (1 - F_F) \times A_{w,p} \times F_{sol,est}$$

Dove:

- $F_{sh,ob}$ è il fattore di riduzione per ombreggiature relativo agli elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie vetrata k-esima, riferito al mese di luglio;
- g_{gl+sh} è la trasmittanza di energia solare totale della finestra calcolata nel mese di luglio, quando la schermatura solare è utilizzata;
- F_F è la frazione di area relativa al telaio, rapporto tra l'area proiettata del telaio e l'area proiettata totale del componente finestrato;
- $A_{w,p}$ è l'area proiettata totale del componente vetrato (area del vano finestra);

- $F_{sol,est}$ è il fattore di correzione per l'irraggiamento incidente, ricavato come rapporto tra l'irradianza media nel mese di luglio, nella località e sull'esposizione considerata, e l'irradianza media annuale di Roma, sul piano orizzontale.

Il valore $A_{sol,est}$ rapportato all'area della superficie utile deve essere inferiore al valore massimo ammissibile riportato in *Tabella 2*.

Tabella 2: Valore massimo ammissibile del rapporto tra area solare equivalente estiva dei componenti finestrati e a l'area della superficie utile $A_{sol,est}/A_{sup,utile}$

#	Categoria edificio	Tutte le zone climatiche
1	Categoria E.1 fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3)	$\leq 0,030$
2	Tutti gli altri edifici	$\leq 0,040$

I fabbisogni di energia primaria E_p dell'edificio di riferimento¹⁰ sono calcolati secondo la normativa tecnica di cui all'art. 3 del *DM 26/06/2015*. Per le prestazioni energetiche di climatizzazione invernale (EP_H) e climatizzazione estiva (EP_C) si utilizzano i seguenti parametri:

Tabella 3: Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra

Zona climatica	U (W/m ² K)
	2019/2021
A e B	0,43
C	0,34
D	0,29
E	0,26
F	0,24

¹⁰ Edificio virtuale geometricamente equivalente a quello di progetto ma dotato dei parametri energetici e delle caratteristiche termiche minime vigenti.

Tabella 4: Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno, di ambienti non climatizzati o contro terra

Zona climatica	U (W/m ² K)
	2019/2021
A e B	0,44
C	0,38
D	0,29
E	0,26
F	0,24

Tabella 5: Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno degli ambienti non climatizzati

Zona climatica	U (W/m ² K)
	2019/2021
A e B	0,35
C	0,33
D	0,26
E	0,22
F	0,20

Tabella 6: Trasmittanza termica U delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati

Zona climatica	U (W/m ² K)
	2019/2021
A e B	3,00
C	2,20
D	1,80
E	1,40
F	1,10

Tabella 7:Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali e orizzontali di separazione tra edifici o unità immobiliari confinati

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2019/2021 ⁽²⁾
Tutte le zone	0,8	0,8

Tabella 8:Valore del fattore di trasmissione solare totale per componenti finestrati con orientamento da Est a Ovest passando per Sud

Zona climatica	g _{gl+sh}	
	2015 ⁽¹⁾	2019/2021 ⁽²⁾
Tutte le zone	0,35	0,35

Poiché i due edifici in esame sono situati a Roma, la zona climatica di riferimento è la D, per cui i valori massimi della trasmittanza termica U da rispettare sono quelli evidenziati di colore rosso.

Le efficienze medie η_u di emissione/erogazione, regolazione, distribuzione e dell'eventuale accumulo sono definite nella *tabella 9*, mentre quelle dei sottoinsiemi di generazione sono definite nella *tabella 10*.

Efficienza dei sottosistemi di utilizzazione η_u :	H	C	W
Distribuzione idronica	0,81	0,81	0,70
Distribuzione aeraulica	0,83	0,83	-
Distribuzione mista	0,82	0,82	-

Tabella 9:Efficienze medie del sottoinsieme di utilizzazione dell'edificio di riferimento per i servizi di H, C, W.

Tabella 10: Efficienze medie dei sottosistemi di generazione dell'edificio di riferimento per la produzione di energia termica per i servizi di H, C, W e per la produzione di energia elettrica in situ.

	Produzione di energia termica			Produzione di energia elettrica in situ
	H	C	W	
Sottosistemi di generazione:				
- Generatore a combustibile liquido	0,82	-	0,80	-
- Generatore a combustibile gassoso	0,95	-	0,85	-
- Generatore a combustibile solido	0,72	-	0,70	-
- Generatore a biomassa solida	0,72	-	0,65	-
- Generatore a biomassa liquida	0,82	-	0,75	-
- Pompa di calore a compressione di vapore con motore elettrico	3,00	(*)	2,50	-
- Macchina frigorifera a compressione di vapore a motore elettrico	-	2,50	-	-
- Pompa di calore ad assorbimento	1,20	(*)	1,10	-
- Macchina frigorifera a fiamma indiretta	-	$0,60 \times \eta_{gm}$ (**)	-	-
- Macchina frigorifera a fiamma diretta	-	0,60	-	-
- Pompa di calore a compressione di vapore a motore endotermico	1,15	1,00	1,05	-
- Cogeneratore	0,55	-	0,55	0,25
- Riscaldamento con resistenza elettrica	1,00	-	-	-
- Teleriscaldamento	0,97	-	-	-
- Teleraffrescamento	-	0,97	-	-
- Solare termico	0,3	-	0,3	-
- Solare fotovoltaico	-	-	-	0,1
- Mini eolico e mini idroelettrico	-	-	-	(**)
NOTA: Per i combustibili tutti i dati fanno riferimento al potere calorifico inferiore				
(*) Per pompe di calore che prevedono la funzione di raffrescamento di considera lo stesso valore delle macchine frigorifere della stessa tipologia				
(**) si assume l'efficienza media del sistema installato nell'edificio reale				

Sulla base dei requisiti minimi appena descritti, per i due edifici sono stati effettuati dei controlli sui componenti dell'involucro edilizio, al fine di rispettare i valori relativi alla zona climatica D.

2.2 Modellazione

Questo paragrafo descrive la modellazione degli edifici, distinguendo:

- Il fabbricato
- L'utenza
- Gli impianti tecnici

Modellazione del fabbricato

A partire dalle strutture opache verticale rivolte verso l'esterno, ambienti non climatizzati o contro terra sono state scelte le seguenti stratigrafie con relative proprietà termo-fisiche del materiale:

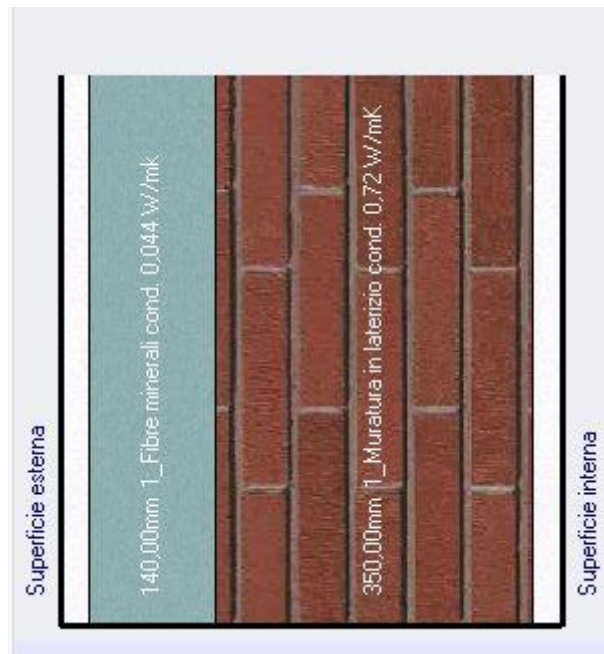


Figura 9: Stratigrafia delle strutture opache verticali della Casa plurifamiliare

Tabella 11: Proprietà termo-fisiche del materiale

Chiusura verticali						
STRATIGRAFIA	Spessore s (cm)	Spessore totale s (cm)	Trasmittanza termica U (W/(m ² K))	Conducibilità termica (W/(mK))	Calore specifico (J/(kgK))	Densità (kg/m ³)
1	intonaco esterno	1	0,259	0,9	840	1800
2	fibre minerali	14		0,04	840	35
3	muratura in laterizio	35		0,72	840	1800
4	intonaco interno	1		0,9	840	1800

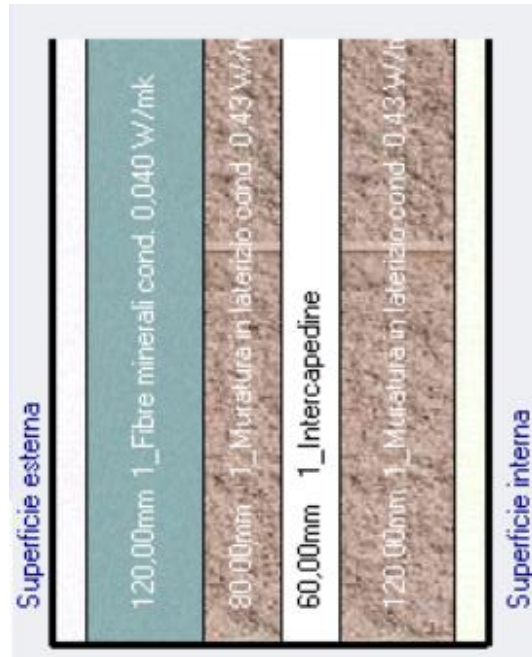


Figura 10: Stratigrafia delle strutture opache verticali del Condominio

Tabella 12: Proprietà termo-fisiche del materiale

Chiusura verticale							
STRATIGRAFIA	Spessore s (cm)	Spessore totale s (cm)	Trasmittanza termica U (W/(m ² K))	Conducibilità termica (W/(mK))	Calore specifico (J/(kgK))	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
1	intonaco esterno	2	0,259	0,9	840	1800	
2	fibre minerali	12		0,04	840	55	
3	muratura in laterizio	8		0,43	840	1200	
4	intercapedine	6		-	-	-	0,18
4	muratura in laterizio	12		0,43	840	1200	
4	intonaco interno	2		0,7	840	1400	

Sia per il Condominio e la Casa plurifamiliare, nonostante la diversa stratigrafia, è rispettato il valore della trasmittanza termica U pari a:

$$0,259 \leq 0,29 [W/m^2K]$$

Per le pareti verticali contro terra relative al Condominio, la trasmittanza termica U è verificata e risulta pari a:

$$0,26 \leq 0,29 [W/m^2K]$$

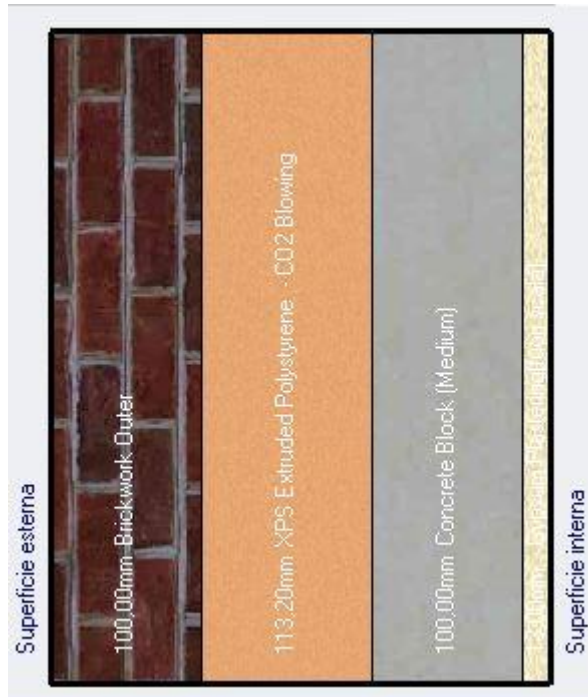


Figura 11: Stratigrafia delle strutture opache verticali contro terra del Condominio e della Casa plurifamiliare

Tabella 13: Proprietà termo-fisiche del materiale

Chiusura verticale controterra						
STRATIGRAFIA	Spessore s (cm)	Spessore totale s (cm)	Trasmittanza termica U (W/(m ² K))	Conducibilità termica (W/(mK))	Calore specifico (J / (kgK))	Densità (kg/m ³)
1	muratura esterna	1	0,26	0,84	800	1700
2	polistirene xps	11		0,03	1400	35
3	blocco di cemento	1		0,51	1000	1400
4	cartongesso	13		0,4	1000	1000

Per le strutture opache orizzontali di pavimento verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati o contro terra, sono stati scelte le seguenti stratigrafie per entrambi gli edifici:



Figura 12: Stratigrafia delle strutture opache orizzontali di pavimento contro terra di entrambi gli edifici

Tabella 14: Proprietà termo-fisiche del materiale

Chiusura orizzontale inferiore						
STRATIGRAFIA	Spessore s (cm)	Spessore totale s (cm)	Trasmittanza termica U (W/(m ² K))	Conducibilità termica (W/(mK))	Calore specifico (J/(kgK))	Densità (kg/m ³)
1	isolante termico	13	0,25	0,04	1400	10
2	getto di calcestruzzo	10		1,13	1000	2000
3	massetto di pavimento	7		0,41	840	1200
4	pavimento in legno	3		0,14	1200	650

Il valore della trasmittanza termica U è verificato ed è pari al valore:

$$0,25 \leq 0,29 [W/m^2K]$$

Per le strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati, è stato stabilito per il lavoro di tesi che i due edifici abbiano una copertura differente: una inclinata per la Casa plurifamiliare e una piana per il Condominio.

La copertura inclinata presente la seguente stratigrafia, con valore della trasmittanza termica U verificato e pari a:

$$0,16 \leq 0,26 [W/m^2K]$$



Figura 13: Stratigrafia delle strutture opache inclinate di copertura della Casa plurifamiliare

Tabella 15: Proprietà termo-fisiche del materiale

Chiusura superiore inclinata						
STRATIGRAFIA	Spessore s (cm)	Spessore totale s (cm)	Trasmittanza termica U (W/(m ² K))	Conducibilità termica (W/(mK))	Calore specifico (J/(kgK))	Densità (kg/m ³)
1	coppi	2,5	0,16	0,81	840	1700
2	lana di roccia	24		0,04	840	30
3	feltro di copertura	0,5		0,19	837	960

Per l'inserimento della copertura piana si è fatto riferimento alla *TABULA sulle tipologie edilizie italiane*¹¹. In essa, ciascun edificio, rappresenta un preciso periodo di costruzione e una specifica dimensione, il tutto per evidenziare la prestazione energetica e i valori di risparmio energetico che si possono ottenere attraverso la riqualificazione dell'involucro edilizio e degli impianti termici. L'edificio in esame rientra tra gli edifici costruiti tra il 1946 e il 1960, come mostrato in *figura 14*.

¹¹ Il progetto TABULA (*Typology Approach for BUiLding stock energy Assessment 2009-2012*) finanziato dal programma europeo *Intelligent Energy Europe*, è stato rivolto a creare una struttura armonizzata delle tipologie edilizie residenziali europee.




DESCRIZIONE	IMMAGINE	PERIODO DI MAGGIORE DIFFUSIONE		U [W/(m ² K)]
Tetto a falde con struttura e tavolato in legno		-	1950	1,80
Tetto a falde in laterizio		1930	1975	2,20
Tetto piano in latero-cemento		1930	1975	1,85

Figura 14: Tipologie costruttive dell'involucro opaco- Tetto piano in latero-cemento, in riferimento alla TABULA 2009-2012

Per quanto detto precedentemente, la stratigrafia scelta per l'edificio in esame è stata quella di un tetto piano in latero-cemento con un valore di trasmittanza termica U tale da rispettare quello mostrato in figura 14.

$$1,299 \leq 1,85 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$



Figura 15: Stratigrafia delle strutture opache inclinate di copertura del Condominio

Tabella 16: Proprietà termo-fisiche del materiale

Chiusura superiore piana							
STRATIGRAFIA	Spessore s (cm)	Spessore totale s (cm)	Trasmittanza termica U (W/(m ² K))	Conducibilità termica (W/(mK))	Calore specifico (J/(kgK))	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
1	asfalto	1,5	1,29	1,2	1700	2300	-
2	massetto in calcestruzzo	12		1,16	1100	2400	-
3	pannello EPS	0,5		0,033	1400	15	-
4	laterocemento	20		-	-	-	0,33
5	intonaco interno	1		0,7	840	1400	-

Per le strutture opache orizzontali di separazione tra edifici o unità immobiliari confinanti, è stata scelta la stessa stratigrafia per entrambi i modelli, riportata in figura 14, con valore di trasmittanza termica U pari a:

$$0,632 \leq 0,8 [W/m^2K]$$



Figura 16: Stratigrafia delle strutture opache orizzontali di separazione di entrambi gli edifici

Tabella 17: Proprietà termo-fisiche del materiale

Partizione orizzontale							
STRATIGRAFIA	Spessore s (cm)	Spessore totale s (cm)	Trasmittanza termica U (W/(m ² K))	Conducibilità termica (W/(mK))	Calore specifico (J/(kgK))	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
1	pannello eps	2,9	0,632	0,033	1400	15	-
2	laterocemento	22		-	-	-	0,33
3	massetto in cls	6		0,65	1100	2400	-
4	mattonelle	1		1	850	1700	-

Per quanto riguarda le chiusure tecniche trasparenti e opache, comprensive degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati è stata scelta la seguente stratigrafia in riferimento alla porta esterna, con trasmittanza termica U pari a:

$$1,4 \leq 1,8 [W/m^2K]$$



Figura 17: Stratigrafia chiusura tecnica opaca per entrambi gli edifici

Tabella 18: Proprietà termo-fisiche del materiale

Chiusura tecnica						
STRATIGRAFIA	Spessore s (cm)	Spessore totale s (cm)	Trasmittanza termica U (W/(m ² K))	Conducibilità termica (W/(mK))	Calore specifico (J/(kgK))	Densità (kg/m ³)
1	legno di abete	2	1,4	0,12	2700	450
2	pannello EPS	0,5		0,04	1400	15
3	legno di abete	3		0,12	2700	450

Invece, per i componenti finestrati è stata effettuata un'analisi più approfondita in quanto rappresentano l'elemento su cui ci si focalizza per l'applicazione delle soluzioni tecnologiche scelte, infatti, in tal caso sono stati stabiliti dei parametri da rispettare in riferimento ai requisiti minimi.

Nel caso del modello *nZEB* sono stati scelti dei vetri doppi che abbiano le seguenti caratteristiche:

Tabella 19: Dati di input del Modello *nZEB*

PARAMETRI		
Trasmittanza termica	U (W/m ² K)	1,2
Fattore solare	g _{gl} (%)	59
Trasmissione solare	τ _s (%)	21
Trasmissione luminosa	τ _v (%)	80

con l'applicazione di schermature solari, in tal caso le veneziane, tali da rispettare i seguenti parametri:

- Trasmissione solare del dispositivo di protezione τ_s=40%;
- Riflettanza solare del dispositivo di protezione ρ_s=12%.

Invece, per il modello convenzionale si è optato per un vetro singolo in assenza di schermatura, senza però preoccuparsi di rispettare i valori massimi ammissibili imposti dal *DM 26/06/2015*. Lo stesso ragionamento è stato effettuato anche in riferimento ai componenti opachi. Quindi, i parametri riferiti al singolo vetro sono i seguenti:

Tabella 20: Dati di input del Modello Convenzionale

PARAMETRI		
Trasmittanza termica	U (W/m ² K)	4,9
Fattore solare	g _{gl} (%)	85
Trasmissione solare	τ _s (%)	90

Utenza

In Design Builder, in particolare nella finestra “Attività”, sono contenuti tutti i dati relativi: al periodo di utilizzo dell’impianto, l’occupazione, gli apporti termici interni, la ventilazione, condizioni termo-igrometriche di set-point e la durata giornaliera dell’accensione dell’impianto. A tal proposito è stato fornito un file Excel contenente i dati da inserire in funzione di quanto descritto dalle norme.

Per quanto riguarda, il periodo di utilizzo dell’impianto si è fatto riferimento alla norma *UNI EN 16798-1*¹², secondo la quale l’impianto deve essere utilizzato 24 h/d per 7 giorni settimanali.

Per l’occupazione si fa sempre riferimento alla stessa norma, secondo la quale si ipotizza che per un appartamento monolocale o con una sola camera da letto si considera un numero di occupanti pari a 2, per ogni camera da letto aggiuntiva se la superficie è inferiore a 14 m² si tiene conto di una sola persona in più, se invece è uguale o superiore a 14 m² se ne considerano 2 in più. Nel caso in esame, quindi, sono state considerate 3 persone sia per il Condominio che per la Casa plurifamiliare.

In funzione del numero di occupanti è necessario stilare un profilo di occupazione. Nelle ore in cui esso assume un valore pari ad 1 l’edificio contiene il massimo numero di occupanti; nelle restanti ore del giorno tale valore andrà a regredire.

¹² Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica.

Tabella 21: Profilo di occupazione ad uso residenziale

h	Profilo di occupazione - Uso residenziale, appartamenti		
	Giorni feriali	Sabato	Domenica/Festività
1	1,0	1,0	1,0
2	1,0	1,0	1,0
3	1,0	1,0	1,0
4	1,0	1,0	1,0
5	1,0	1,0	1,0
6	1,0	1,0	1,0
7	0,5	0,8	0,8
8	0,5	0,8	0,8
9	0,5	0,8	0,8
10	0,1	0,8	0,8
11	0,1	0,8	0,8
12	0,1	0,8	0,8
13	0,1	0,8	0,8
14	0,2	0,8	0,8
15	0,2	0,8	0,8
16	0,2	0,8	0,8
17	0,5	0,8	0,8
18	0,5	0,8	0,8
19	0,5	0,8	0,8
20	0,8	0,8	0,8
21	0,8	0,8	0,8
22	0,8	0,8	0,8
23	1,0	1,0	1,0
24	1,0	1,0	1,0



Figura 18: Andamento del profilo di occupazione



Figura 19: Andamento del profilo di occupazione

Per gli apporti termici interni ci si è concentrati principalmente su quello relativo agli occupanti che comprende una parte sensibile (radiativa e convettiva) e una parte latente dando come valore complessivo 118 W. Per carico termico sensibile s'intende la potenza termica fornita o sottratta in relazione al controllo della temperatura tramite riscaldamento o raffrescamento, invece per carico termico

latente si intende la potenza termica in relazione al controllo dell'umidità tramite umidificazione o deumidificazione.

La stessa norma è stata utilizzata per il calcolo della portata di ventilazione minima per la qualità dell'aria attraverso la seguente formula:

$$q_{tot} = n \times q_p + A_{cf} \times q_B$$

Dove:

- n è il numero di persone presenti nell'ambiente;
- q_p è il tasso di ventilazione per occupazione per persona, assunto pari a 7 l/ (s persona);
- A_{cf} è la superficie calpestabile;
- q_B è il tasso di ventilazioni per le emissioni dell'edificio, assunto pari a 0 l/ (s m²).

A calcoli effettuati il valore della portata di ventilazione minima per la qualità dell'aria è pari a 21 l/ (s persona) per entrambi gli edifici.

In seguito, sono stati inseriti i valori termo-igrometrici di set-point di riscaldamento e raffrescamento per gli ambienti interni climatizzati, considerando come durata giornaliera dell'accensione dell'impianto quella del regime di funzionamento continuo, che prevede quindi, una durata di 24 h/d.

Tutti i dati appena descritti sono stati imposti e assegnati alle diverse zone termiche di cui sono dotati i due edifici in esame.

Per *zona termica* si intende un ambiente interno con condizioni termiche sufficientemente uniformi per consentire un calcolo del bilancio termico. Essa può essere assegnata o per destinazione d'uso, o per tipologia impiantistica o per esposizione. In tal caso, per entrambi gli edifici, esse sono state assegnate per destinazione d'uso.

In modo particolare per il Condominio ne sono state previste 4, una per piano; per la Casa plurifamiliare ne sono state previste 3, sempre considerandone una per ogni

piano, come mostrato nella figura sotto riportata, non tenendo conto delle zone non riscaldate ovvero cantine, vano scala e sottotetto.

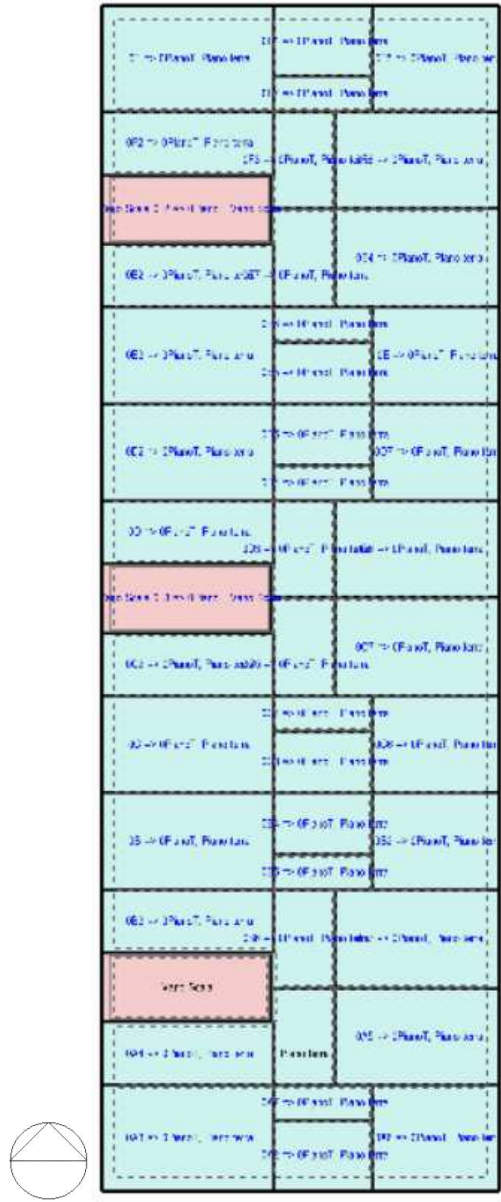


Figura 20: Esempio di zona termica per il condominio

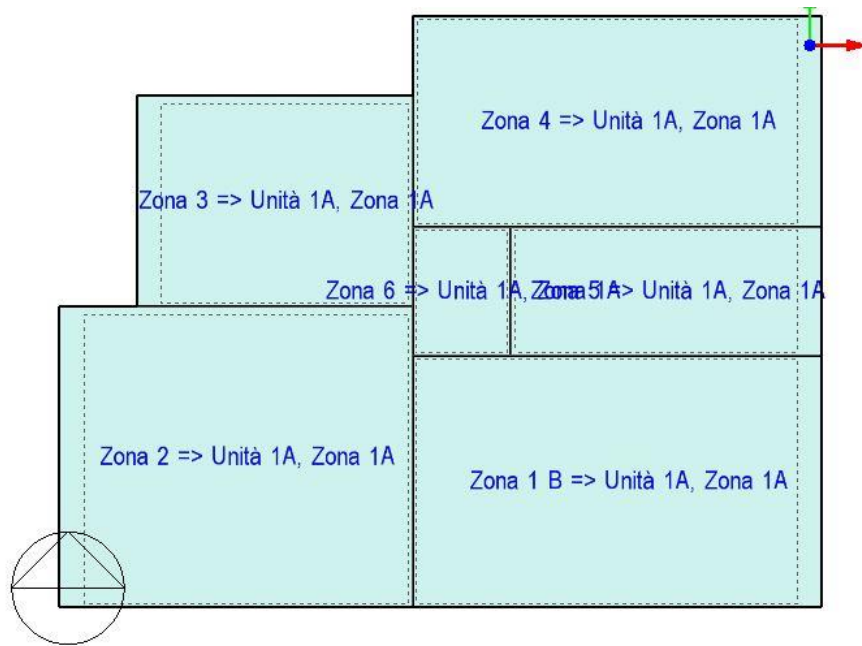


Figura 21: Esempio di zona termica per la casa plurifamiliare

Impianti tecnici

Sempre in riferimento alle zone termiche, importante nello studio di tesi condotto, è stata la modellazione impiantistica. Si è partiti con un impianto convenzionale che puntasse al solo riscaldamento dell'edificio. Esso è stato installato, appunto, soltanto nelle zone termiche, appena descritte, in entrambi gli edifici, non tenendo conto degli ambienti non riscaldati quali cantina, vano scala e sottotetto.

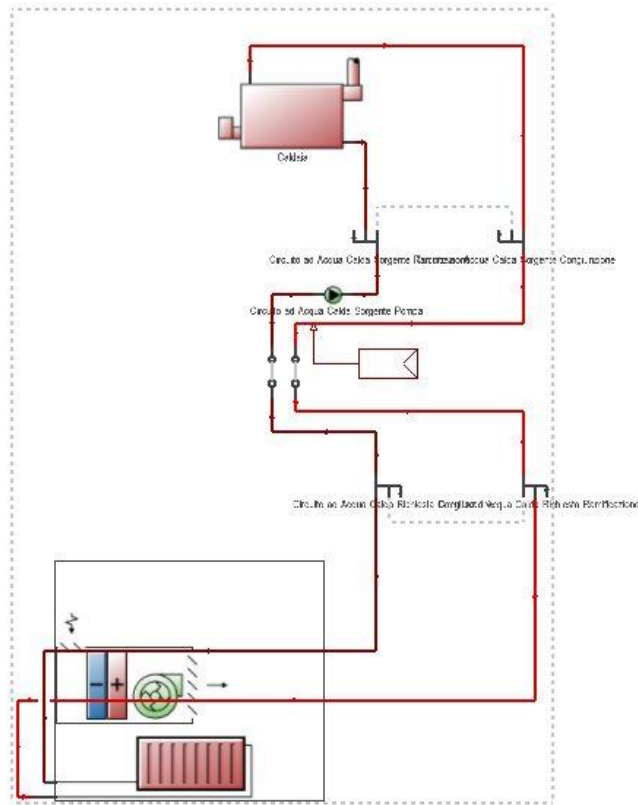


Figura 22: Schema funzionale dell'impianto di riscaldamento

Come mostrato in figura, lo schema funzionale comprende una caldaia che fornisce acqua calda ai radiatori disposti nelle diverse zone termiche. Dal punto di vista della modellazione, in Design Builder sono stati mantenuti in funzione 24 h/d i radiatori per il solo riscaldamento infatti, l'impianto è caratterizzato da due batterie, una di riscaldamento la quale è stata mantenuta accesa 24 h/d e una di raffreddamento la quale invece, è stata mantenuta spenta. Inoltre, è stato previsto un sistema PTAC (*packaged terminal air conditioner*) che segue il profilo di funzionamento dell'impianto regime continuo e lavora per raffrescare l'ambiente.

I modelli sono stati resi nZEB anche attraverso la modellazione dell'impianto.

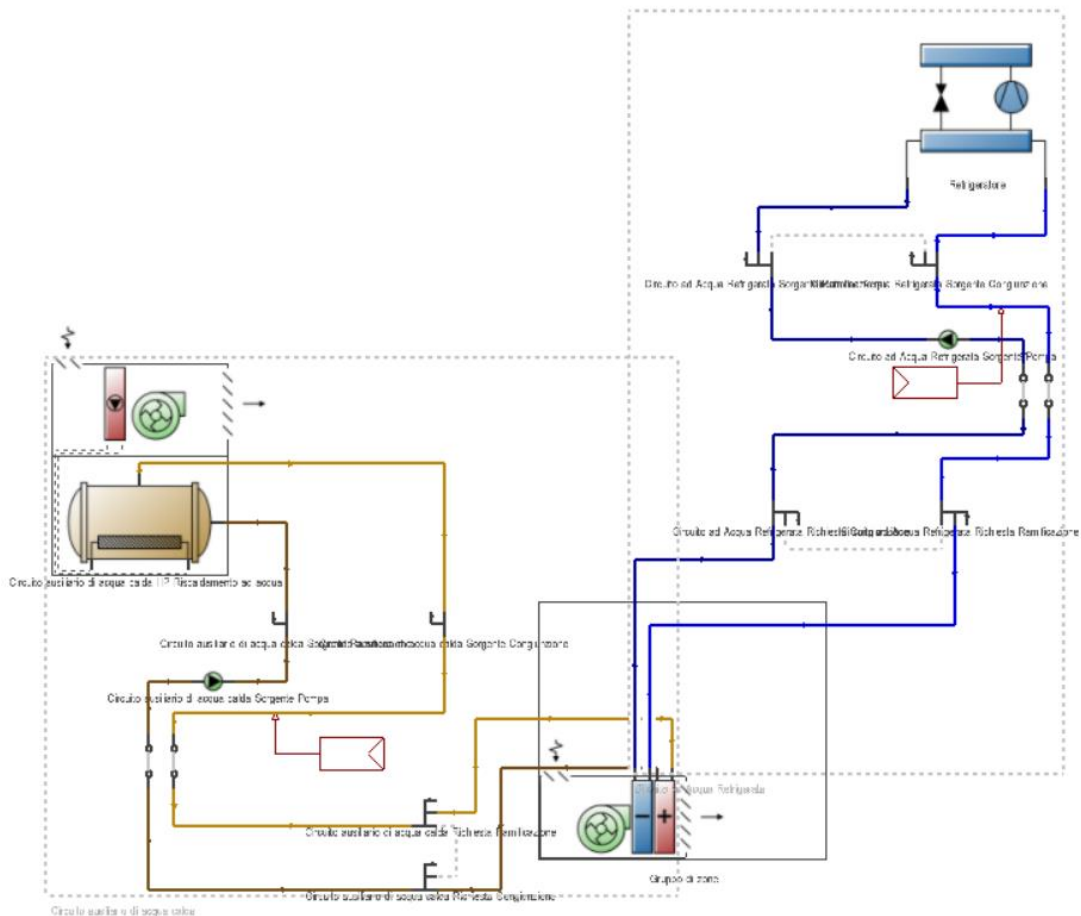


Figura 23: Schema funzionale dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento

Lo schema funzionale mostrato in figura è costituito da due parti ovvero il circuito ad acqua refrigerata e il circuito ausiliario di acqua calda.

Il primo è costituito da un refrigeratore ad aria, il quale fornisce acqua refrigerata alle batterie di raffreddamento. Il sistema è dotato di una pompa impostata a velocità variabile, il cui funzionamento può essere continuo o intermittente.

Invece, il secondo include una pompa di calore con sorgente aria in grado di riscaldare l'acqua e fornirla ai *fancoil*, utilizzando come fonte di calore primaria l'aria di zona, l'aria esterna o una combinazione tra i due. Essa è costituita da una batteria di calore aria-acqua ad espansione diretta, che calcola la capacità di raffreddamento sensibile e latente lato aria per ogni istante della simulazione, e da un ventilatore di immissione

(UTA)¹³. La pompa di calore ha, inoltre, un funzionamento continuo durante la giornata e per tutto l'anno.

La durata del periodo di riscaldamento segue il profilo imposto dal *D.P.R 26-08-1993, n. 412*, in funzione della zona climatica in esame.

Zona A: ore 6 giornaliere dal 1° dicembre al 15 marzo;
Zona B: ore 8 giornaliere dal 1° dicembre al 31 marzo;
Zona C: ore 10 giornaliere dal 15 novembre al 31 marzo;
Zona D: ore 12 giornaliere dal 1° novembre al 15 aprile;
Zona E: ore 14 giornaliere dal 15 ottobre al 15 aprile;
Zona F: nessuna limitazione.

Figura 24: Limite di esercizio dell'impianto di riscaldamento fornito dal D.P.R n. 412 del 1993

¹³ Unità Trattamento Aria

4. Soluzioni tecnologiche

Per la scelta della soluzione tecnologica adottata nello studio di tesi, richiamando le quattro categorie del *paragrafo 1.1*, relative alle strategie di raffrescamento, ci si è concentrati solo sulle prime due che mirano, come già detto, a: ridurre i guadagni di calore indotti dall'esterno negli ambienti interni e a migliorare il comfort personale oltre a raffreddare interi spazi.

È stato quindi consultato un articolo, estratto della rivista "*Energy and Buildings*"¹⁴, che si focalizza sulla descrizione delle quattro categorie con relative soluzioni che ne fanno parte.

Il seguente elaborato di tesi studia, in particolar modo, due soluzioni tecnologiche, ossia:

1. Vetrate avanzate;
2. Schermature solari.

Entrambe rientrano in quella che è la *categoria A* e insieme rappresentano il pacchetto "finestra" che, nonostante comprenda solo una piccola frazione dell'intero involucro edilizio, influisce notevolmente sul raffrescamento degli ambienti interni e quindi sul comfort degli occupanti.

Come è già noto, la finestra è caratterizzata dalla vetrata che è spesso accompagnata da sistemi di ombreggiamento, ovvero le schermature; tali componenti infatti, contribuiscono a gestire il carico termico prodotto dalla radiazione solare, il quale viene sfruttato soprattutto nel periodo invernale, ma anche al controllo nei mesi estivi di eventuali fenomeni di abbagliamento e di discomfort locale.

Ancor prima di introdurre le soluzioni tecnologiche scelte, sono stati definiti i dati di input per distinguere il modello convenzionale da quello nZEB, per poi applicare le diverse configurazioni su di essi, come mostrato nelle tabelle sottostanti.

¹⁴ *Energy and Buildings* (Vol. 251, 15 Novembre 2021) è una rivista internazionale che si occupa della pubblicazione di articoli prettamente scientifici, in particolare sull'uso dell'energia negli edifici, con l'obiettivo di presentare nuovi risultati di ricerca e nuove soluzioni adottate per ridurre il fabbisogno energetico di un edificio e migliorarne la qualità dell'ambiente interno.

Tabella 22: Dati di input del modello convenzionale (vetro + schermature)

MODELLO CONVENZIONALE		
TIPOLOGIA	DATI DI INPUT	
Vetro singolo	U (W/m ² K)	4,9
	g (%)	85
	τ_v (%)	90
Schermatura solare	nessuna	

Tabella 23: Dati di input del modello nZEB (vetro + schermature)

MODELLO nZEB		
TIPOLOGIA	DATI DI INPUT	
Vetro doppio	U (W/m ² K)	1,2
	g (%)	59
	τ_v (%)	80
	τ_s (%)	21
Schermatura solare: veneziane	τ_s (%)	40
	ρ_s (%)	12

Come si può notare, una differenza sostanziale è attribuibile alla trasmittanza termica U che risulta pari a 4,9 W/m²K per il convenzionale e 1,2 W/m²K per l'nZEB. Quest'ultimo valore rientra, tra i valori di U definiti dall' *Appendice A del DPR 25-06-2015* che in base alla zona climatica in esame, risulta essere minore di 1,8 W/m²K.

Per quanto riguarda il fattore solare g, in entrambi i casi, risulta molto alto rispetto ai limiti richiesti dall'Appendice A, però mentre, nel caso convenzionale, non è un fattore rilevante, nel caso dell'nZEB, per tale motivo è stato opportuno inserire delle schermature solari, ovvero le veneziane che avessero le proprietà ottiche elencate in tabella.

3.1 Vetrate avanzate

La tecnologia delle vetrate avanzate gestisce i carichi di raffrescamento dal guadagno solare trasmettendo, riflettendo e assorbendo l'energia solare, attraverso i materiali adottati per la costruzione del vetro.

Il singolo vetro trasparente ha una trasmissione solare molto elevata, ciò spiega il motivo per cui ultimamente si ricorre all'utilizzo di vetrate isolanti composte da due o più vetri caratterizzati da tinte e rivestimenti utili per l'assorbimento e la riflessione solare, fino a fornire una grande capacità termica.

Si tratta di vetri speciali, la cui tecnologia ha permesso di unire il miglioramento del comfort al risparmio energetico, al contenimento dei consumi e ai benefici ambientali. Tali vetri hanno, inoltre, altre funzioni quali: il controllo della radiazione solare, l'aerazione, il guadagno termico passivo, l'antiabbagliamento, la salvaguardia della vista e della privacy e l'aumento dell'illuminazione naturale.

Tra i parametri più importanti da tenere conto nella scelta di un vetro rientrano:

- Trasmittanza termica (U_g);
- Trasmissione luminosa (τ_v);
- Fattore solare del vetro (g_{gl}).

La trasmittanza termica U_g ¹⁵ è un parametro inversamente proporzionale all'isolamento termico quindi più bassa risulta la trasmittanza, maggiore sarà l'isolamento e viceversa.

Approfondire questo valore significa valutare la bontà dell'infisso nell'andare ad isolare un ambiente interno da quello esterno. Per cui, affinché ci sia un buon isolamento termico, la trasmittanza termica dovrebbe essere compresa tra questi valori:

¹⁵ Si intende il flusso di calore medio trasmesso tra due ambienti a diversa temperatura passando attraverso la superficie del vetro, calcolata al metro quadro per essere standardizzata

- Tra $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ se l'edificio in esame si trovasse in città o in zone non particolarmente fredde;
- Tra $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ se l'edificio in esame si trovasse in montagne o in zone molto fredde.

Nel caso in esame poiché gli edifici sono situati a Roma, in riferimento all'*Appendice A del DM 26-06-2015*, si è stabilito il valore massimo di $U_g \leq 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Una buona trasmissione luminosa τ_v per un vetro doppio è 70%, ottima è 80%, la parte restante viene respinta e riflessa verso l'esterno.

Nel caso in esame si è, infatti, stabilito un valore di $\tau_v \geq 60 \%$.

Il fattore solare g_{gl} indica la percentuale di trasmissione energetica totale riferita alla radiazione solare che passa attraverso il vetro, ciò implica che più alto è il valore di g_{gl} maggiore sarà il calore presente all'interno dell'ambiente. In Italia, dove non è presente alcuna protezione schermante, i vetri dovrebbero avere un valore del fattore solare uguale o minore del 50%, ma la norma nazionale DM 26/06/2015 fissa un limite del 35% per il g_{gl+sh} , che comprende l'effetto di vetro e schermatura.

Da ciò spiegato perché nel caso in esame si è stabilito un valore di $g_{gl} \leq 30\%$.

Il rapporto tra questi due parametri identifica la selettività del vetro e raramente supera il valore pari a 2, infatti se considero un vetro con trasmissione luminosa del 60% e fattore solare del 30% il loro rapporto mi darà un risultato pari a 2.

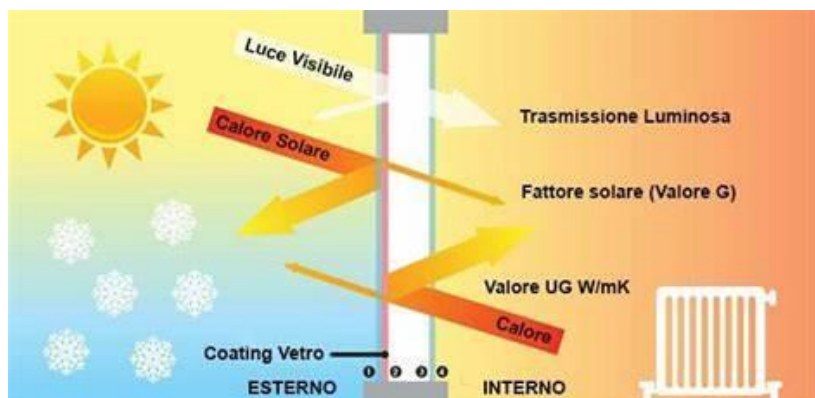


Figura 25 - Schema esplicativo del rapporto tra la trasmissione luminosa e il fattore solare. Fonte: GuidaFinestra.

Da questa immagine si può notare il legame tra la trasmissione luminosa e il fattore solare, infatti quest'ultimo è definito come il rapporto tra il flusso dovuto alla radiazione solare, complessivamente entrante in ambiente (dato dalla somma tra il flusso trasmesso direttamente più quello assorbito e ceduto all'ambiente interno per convezione e irraggiamento) e la radiazione solare incidente.

Vetri basso emissivi e selettivi

Come già detto, i vetri vengono rivestiti e quindi sottoposti a trattamenti isolanti ovvero quelli basso emissivi e quelli selettivi.

Per **vetri selettivi** si intende quella tipologia di vetro che trasmette molto bene la radiazione visibile ma respinge il primo infrarosso.

I **vetri basso emissivi** hanno le stesse caratteristiche di quelli selettivi, ma l'unica differenza ricade nell'applicazione del rivestimento che può avvenire in una posizione diversa. Mentre il primo, è applicato all'interno tramite un processo elettromagnetico poiché resiste poco agli agenti atmosferici, il secondo è applicato all'esterno tramite un processo pirolitico, essendo più resistente. Lo scopo principale di questa tipologia di vetri è quello di ridurre le dispersioni di calore all'interno dell'ambiente.

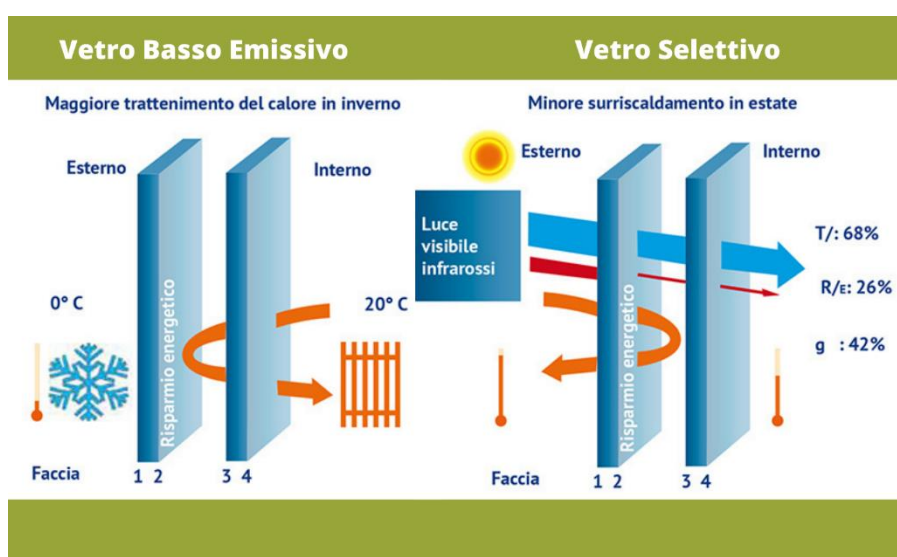


Figura 26 - Differenza grafica tra vetro selettivo e vetro basso – emissivo. Fonte: Rivas 1984.

Risulta inoltre importante distinguere i vetri in singolo, doppi e tripli.

Il vetro singolo (*float*) è una lastra che non ha subito ulteriori lavorazioni dopo la sua realizzazione.

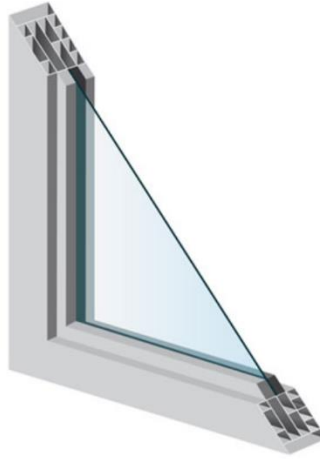


Figura 27: Tipologia di finestra con vetro singolo. Fonte: Solarfilm.

La differenza tra gli altri due elencati, invece, dipende, appunto, dal numero di vetri e vetrocamere¹⁶: infatti, mentre i vetri doppi sono caratterizzati da una doppia lastra di vetro una camera d'aria e una vetrocamera, i vetri tripli sono composti da tre lastre di vetro, due camere d'aria e due vetrocamere. E così via aumentando il numero di lastre di vetro in una qualunque finestra.

¹⁶ *Vetrocamera*: vetrata isolante formata da due o più vetri accoppiati, separati tra loro da un'intercapedine di aria o altri gas. Il suo perimetro è generalmente composto da un sottile telaio in metallo sottoposto a doppia sigillatura.



Figura 28 – Stratigrafia di finestra con vetro doppio e triplo. Fonte: Tigullio Design - Finestre e Porte.

Tale distinzione comporta anche delle differenze sui parametri sopra elencati; per esempio la trasmissione luminosa di un vetro doppio basso emissivo è alta e in genere oscilla tra 77% e 82%, dovuto ai trattamenti applicati alle lastre e al loro spessore, mentre per quelli tripli varia tra 73% e 77%, valori più bassi poiché il vetro triplo è da considerarsi meno luminoso rispetto a quello doppio.

Un altro esempio da poter fare è quello riferito al fattore solare g che risulta alto per vetri doppi basso emissivi e si riduce progressivamente per vetri tripli basso emissivi o con trattamenti particolari.

Nel primo caso risulta opportuna come soluzione, quella di applicare dei sistemi di ombreggiamento alle vetrate, ovvero i sistemi oscuranti, in modo da evitare ambienti interni troppo caldi.

Configurazioni delle vetrate avanzate

Per entrambi i modelli in esame, sono state scelte delle configurazioni relative alle soluzioni tecnologiche prima citate. Nel caso delle vetrate avanzate ne sono state selezionate due, differenti tra loro sia per tipologia di vetrata, nonché per prestazione, e quindi anche per i diversi valori dei parametri su detti (trasmissione termica, trasmissione solare e fattore solare del solo vetro).

La selezione è stata effettuata attraverso il software *Glass Configurator*¹⁷ che ha permesso di fare una ricerca in base alle prestazioni del vetro. Infatti, si è imposto:

- Una trasmittanza termica $0,8 \text{ W/m}^2\text{K} \leq U_g \leq 1,8 \text{ W/ m}^2\text{K}$
- Una trasmissione luminosa $\tau_v \geq 60 \%$
- Un fattore solare (FS) $g_{gl} \leq 30\%$

Tra le configurazioni che il software ha elencato, ne sono state estrapolate appunto due:

1. Prima configurazione di un vetro con rivestimento basso-emissivo;
2. Seconda configurazione di un vetro con rivestimento basso-emissivo e selettivo.

Si è ritenuto importante che avessero i parametri diversi tra loro, in particolar modo si è tenuto conto della differenza sulla trasmittanza termica in modo tale che una fosse massima e l'altra minima con l'obiettivo di ottenere dei risultati ben diversi e un'analisi completa. E inoltre ne è stata selezionata una che fosse comprensiva sia di vetro basso - emissivo, sia di quello selettivo e un'altra che invece avesse il solo rivestimento basso - emissivo, in entrambi i casi conferitogli dal tipo di *coating* presente, come mostrano le due immagini sottostanti.

¹⁷ *Glass Configurator* è una piattaforma di calcolo completamente integrata, sviluppata da AGC Glass Europe. Esso è utilizzato dai trasformatori di vetro, dai progettisti, dagli architetti e dai produttori di facciate e finestre per calcolare le prestazioni di luce, sicurezza ed energia.

Configurazione con rivestimento solo basso-emissivo (Pure Comfort 10)

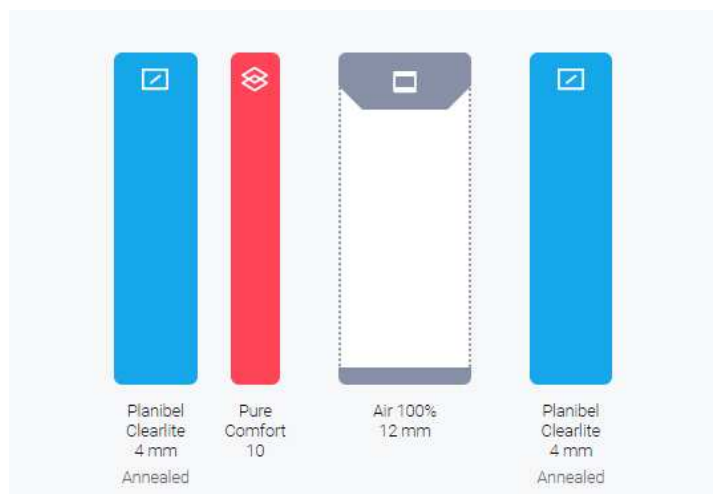


Figura 29 - Configurazione 1: Vetro con rivestimento basso-emissivo.

Si tratta di una configurazione con rivestimento solo basso – emissivo (*Pure Comfort 10*) che riveste il vetro internamente.

Pure Comfort 10 è, anche in questo caso, un vetro trasparente con un rivestimento pirolitico a bassa emissività applicato alla sua superficie ad alta temperatura attraverso una deposizione chimica da vapore (CVD) durante la produzione del vetro float. Tale trattamento superficiale offre un’ottima resistenza ai graffi facilitandone la produzione e la manutenzione. Quando l’applicazione avviene su un semplice vetro monolitico, in più, si ha un buon isolamento termico, un’eccellente trasmissione della luce e una bassa riflessione.

In tal caso i valori relativi ai parametri di riferimento sono ben diversi, infatti presenta:

- Una trasmittanza termica massima pari a $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- Una trasmissione luminosa pari a 74%;
- Un fattore solare pari a 65 %.

Come è possibile notare, mentre i primi due parametri rispettano i range prima definiti, l’ultimo no poiché supera di molto il valore massimo ammissibile del 30%.

Questo è plausibile in quanto, come detto pocanzi, per i vetri doppi basso – emissivi tale valore cresce notevolmente, il che implica che ci siano maggiori radiazioni solari che colpiscono il vetro della finestra e di conseguenza l’ambiente interno sarà più caldo quindi è giusto intervenire introducendo, solo in tal caso, una schermatura solare esterna in modo che in parte possa salvaguardare l’ambiente dai raggi solari.

Vetro quadruplo con rivestimento sia basso-emissivo (Planibel G) che riveste la parte esterna del vetro, che selettivo (Stopray Ultra – 70)

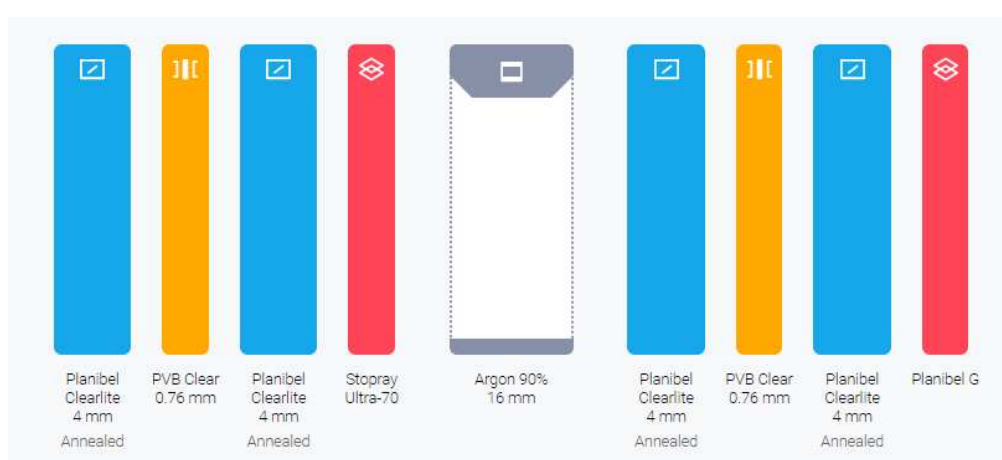


Figura 30 - Configurazione 2: Vetro con rivestimento basso-emissivo e selettivo.

In tal caso, si tratta di un vetro quadruplo con rivestimento sia basso-emissivo (*Planibel G*) che riveste la parte esterna del vetro, che selettivo (*Stopray Ultra – 70*) che riveste invece il vetro verso l’interno.

Planibel G è un vetro trasparente con un rivestimento pirolitico *Low-E* applicato ad alta temperatura mediante deposizione chimica da vapore (CVD) sulla superficie del vetro durante il processo di produzione del vetro float. Esso, inoltre, offre prestazioni eccellenti e soddisfa una moltitudine di requisiti del settore per elettrodomestici, refrigerazione commerciale, vetri riscaldati e altro ancora.

Stopray Ultra – 70 è un prodotto in vetro con rivestimento morbido caratterizzato da un triplo strato d’argento che permette di massimizzare la trasmissione luminosa riducendo, contemporaneamente, l’apporto di calore. Esso, inoltre, garantisce alte prestazioni grazie al basso grado di riflessione sia interna che

esterna, ad una trasmissione luminosa del 70%, ad un fattore solare del 33% e ad una selettività pari a 2,10.

I parametri caratterizzanti tale configurazione sono i seguenti:

- Una trasmittanza termica minima di 0.9 W/m²K;
- Una trasmissione luminosa minima pari a 60 %;
- Un fattore solare massima del 30%.

Tali parametri risultano rispettare i range prima definiti.

3.2 Schermature solari

I dispositivi di schermature solari sono dei sistemi utilizzati per ridurre i consumi energetici, ma non solo, controllano anche le radiazioni solari, riducendo i fenomeni di surriscaldamento e abbagliamento all'interno dell'ambiente. Pertanto, garantiscono un'ottimizzazione energetica e qualità ambientale efficiente.

I sistemi di schermature solari, nel corso del tempo sono stati oggetto di una profonda evoluzione, a partire dall'epoca greca e romana conosciuti con il nome di *tentorium* e *velarium* all'epoca attuale. Si è passati, dunque, da una funzione di sola protezione, per esempio di persone, animali o pioggia, al controllo della ventilazione, dell'illuminazione, del rumore e della radiazione solare.

Le schermature solari creano ombra sulle superfici esterne dell'involucro edilizio, quindi è bene progettarle contemporaneamente all'involucro e ai componenti vetrati, ma possono essere inseriti anche in un secondo momento in base alle esigenze e agli obiettivi da soddisfare. Inoltre, sono classificati come componenti passivi atti a sfruttare l'energia solare senza utilizzare sistemi alimentati da fonti energetiche esterne.

Vista l'importanza del controllo delle prestazioni energetiche degli edifici, la legge di stabilità n. 190 del 23/12/2014 ha esteso queste valutazioni anche alle schermature solari, riconoscendone l'importanza e gli effetti che essi hanno sull'intero edificio.

La progettazione dei sistemi schermanti segue un'accurata analisi sulle problematiche dell'edificio, in particolare facendo riferimento agli edifici adiacenti, i quali potrebbero creare ombra sulle facciate; l'orientamento dell'edificio per valutare l'incidenza solare sulle facciate e la zona climatica che, nel caso in esame è la D.

Classificazione

Prima di svolgere le analisi che valutano l'efficienza energetica dei dispositivi è importante catalogarli. Secondo la normativa, l'allegato M del d.Lgs. n. 311/2006 definisce i sistemi di schermature solari come *“i dispositivi che, applicati all'esterno di una superficie vetrata trasparente, permettono una modulazione variabile e controllata dei parametri energetici e ottico luminosi in risposta alle sollecitazioni solari”*. Quindi, hanno come obiettivo quello di migliorare le prestazioni energetiche degli infissi, che nella maggior parte dei casi peggiora la coibentazione dell'edificio.

È importante scegliere il sistema di ombreggiamento più consono al contesto, alle condizioni climatiche e allo scopo da raggiungere. A seconda della tipologia, si possono distinguere le schermature dalle chiusure oscuranti, in quanto cambia la quantità di luce o calore in grado di passare.

Per tanto, i requisiti da rispettare in funzione della norma sopra citata, stabiliscono che le schermature o chiusure oscuranti devono essere applicati in modo solidale con l'involucro edilizio e non liberamente montabili e smontabili dall'utente; devono proteggere la superficie vetrata e devono essere installate all'esterno o all'interno della superficie vetrata.

Oltre alla differenza di luce o calore passante, ciò che li distingue è l'orientamento ammissibile, infatti per le schermature solari sono esclusi gli orientamenti a nord, nord-est e nord-ovest¹⁸, mentre sono permessi quelli da est a ovest e sud, per le chiusure oscuranti sono ammessi tutti gli orientamenti.

¹⁸ si tratta di orientamenti che non ricevono raggi solari diretti, se non parzialmente nella stagione estiva per pochissimo tempo.

Distinte le due tipologie di dispositivi di protezione, quella oggetto di approfondimento nella tesi seguente tratta delle schermature solari.

Dal punto di vista dell'installazione, il primo passo per la catalogazione delle schermature è la posizione rispetto al corpo finestrato, per cui si hanno:

1. Schermature solari interne;
2. Schermature solari integrate;
3. Schermature solari esterne.

Schermature solari interne

Le schermature solari interne vengono generalmente installate all'interno dell'abitazione e solitamente sono meno efficienti di quelle esterne e integrate in quanto riescono ad impedire l'ingresso della radiazione solare solo dopo che essa è entrata dal componente vetrato. Questo comporta che una parte di radiazione solare rimarrà tra lo schermo e il vetro, provocando un accumulo di flusso di calore durante il periodo estivo e l'altra parte verrà ceduta all'esterno. Una delle caratteristiche di questi dispositivi è che sono facili da installare e hanno un costo molto basso, inoltre vengono applicate per zone temperate di edifici residenziali o edifici con poche finestre.

Schermature solari integrate

Le schermature solari integrate vengono installata all'interno dell'intercapedine delle due lastre vetrate. È una tipologia di schermatura che deve essere valutata in fase progettuale, per tanto si adatta poco agli edifici esistenti eccetto nel caso in cui si voglia cambiare l'intera struttura dell'infisso.

In base alla loro funzionalità essi a sua volta si dividono in flessibili e rigidi.

Le prime, durante le ore diurne estive, vengono poste in modo tale da impedire l'ingresso dei raggi solari mentre nelle ore notturne vengono lasciate aperte affinché si generi raffrescamento; in inverno invece funzionano al contrario in quanto l'obiettivo è quello di riscaldare l'ambiente.

Le seconde invece, data la particolarità di essere schermi trasparenti, consentono la visibilità esterna e al contempo stesso proteggono l'edificio da raggi solari diretti.

Schermature solari esterne

Le schermature solari esterne rispetto alle altre due, sono quelle che rispondono meglio alle prestazioni energetiche da soddisfare, soprattutto in estate in quanto installate esternamente al componente vetrato, impediscono l'ingresso delle radiazioni solari prima ancora che essa entra all'interno dell'ambiente, evitando così l'aumento della temperatura e il discomfort ambientale.

L'efficacia di questi sistemi è dovuta al fatto che la radiazione solare incidente sui componenti trasparenti dell'edificio genera effetto serra, il quale in inverno rappresenta un beneficio, in quanto riscalda l'ambiente, in estate invece provoca un innalzamento del carico termico con conseguente incremento dei consumi elettrici dovuti all'impianto di climatizzazione.

Per evitare il surriscaldamento è bene che i componenti opachi abbiano uno spessore elevato in modo tale da trattenere il calore proveniente dall'esterno fino a sera, in seguito con l'apertura dei componenti trasparenti il calore trattenuto durante il giorno viene così dissipato. In questo modo, le schermature solari esterne evitano che le radiazioni solari si irradiano nell'ambiente, garantendo così il comfort termico.

A sua volta si distinguono in fisse e mobili.

Le prime comprendono sia elementi strutturali, quali balconi e aggetti delle coperture, che non strutturali ossia tende esterne e frangisole. Due delle caratteristiche fondamentali, da tenere in considerazione sulla soluzione di ombreggiamento migliore, sono l'orientamento e la forma dell'apertura da proteggere da radiazione solare. Pertanto, bisogna scegliere in funzione dell'esposizione dell'edificio ai raggi solari che lo colpiscono nelle diverse direzioni: diretta, riflessa o diffusa. Sono dei dispositivi solidali alla facciata dell'involucro e oltre a garantire delle buone prestazioni energetiche definiscono un'ottima qualità architettonica. Le schermature fisse possono essere sia orizzontali che verticali; nel primo caso solitamente vengono

installate a sud perché proteggono dai raggi solari in estate e in inverno garantiscono il riscaldamento interno invece, per quelle verticali l'esposizione migliore è ad est o ad ovest in quanto sono adatte a bloccare la radiazione solare con inclinazione elevata che si ha principalmente nelle prime e ultime ore del giorno.

Le schermature mobili, rispetto a quelle fisse, hanno un comportamento dinamico e flessibile facilmente adattabile alle condizioni climatiche esterne e per tale motivo sono considerate più efficienti nonostante necessitino di manutenzione più accurata. Anche esse si distinguono in orizzontali e verticali; i primi hanno il vantaggio di evitare sovraccarichi, che ci sia sempre ombra e che non venga ostacolata la visibilità esterna. Quelli verticali sono efficienti se sono utilizzati insieme a sistemi meccanici, i quali regolano l'inclinazione delle lamelle in funzione dell'inclinazione solare.

Norme di riferimento

Tra le tre tipologie di schermature sopra esplicitate è fondamentale fare un'ulteriore classificazione. Nel rispetto delle norme di riferimento contenute nell'allegato M del d.Lgs. n. 311/2006, bisogna rispettare i requisiti termici tali da garantire il comfort termico e le prestazioni energetiche degli edifici in questione.

La *UNI EN 14501* richiede di specificare la classe di schermature solari in funzione del fattore di trasmissione solare totale g_{tot} . Questo valore è il più importante fra tutti in quanto definisce le prestazioni globali d'insieme. Per fattore di trasmissione solare totale si intende l'indice percentuale utile a valutare la quantità di energia solare incidente che penetra all'interno dell'ambiente e si distingue dal fattore solare della vetrata g_{gl} in quanto fa riferimento al componente finestrato comprensivo di schermatura. La norma quindi, identifica 5 classi di schermature ovvero:

Tabella 24: Classificazione prestazionale e influenza di g_{tot} sul comfort termico

Classe 0	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
$g_{tot} \geq 0,5$	$0,35 \leq g_{tot} < 0,5$	$0,15 \leq g_{tot} < 0,35$	$0,10 \leq g_{tot} < 0,15$	$g_{tot} < 0,10$
Effetto molto piccolo	Effetto piccolo	Effetto moderato	Effetto buono	Effetto molto buono

in riferimento a quanto espresso dalla *Tabella 17* le configurazioni scelte, riportate nel paragrafo successivo rientrano: la prima nella classe 4, la seconda e la terza nella classe 2.

La norma *UNI EN ISO 52022-1* specifica un metodo semplificato, basato sul calcolo della trasmittanza termica e della trasmittanza di energia solare totale riferito alla vetrata e sul calcolo della trasmittanza e riflettanza del dispositivo di protezione solare, al fine di stimare la trasmittanza di energia solare totale comprensiva del dispositivo solare e vetrata.

Calcolo del g_{tot}

Il calcolo del fattore solare totale si distingue nell'applicazione della metodologia dettagliata e semplificata. Quest'ultima è applicabile quando la trasmittanza di energia solare del vetro è compresa tra 0,15 e 0,85. Inoltre, si assume che le schermature solari siano applicate all'edificio in modo tale da evitare penetrazione di radiazione solare diretta. Poiché il tipo di dispositivo scelto è una schermatura solare esterna, lo spazio tra lo schermo e il vetro non deve essere ventilato.

Prima di poter calcolare il fattore solare totale è fondamentale conoscere i fattori di trasmissione e riflessione solare $\tau_{e,B}$ e $\rho_{e,B}$, i quali secondo la stessa norma devono rientrare negli intervalli pari a:

$$0 \leq \tau_{e,B} \leq 0,5$$

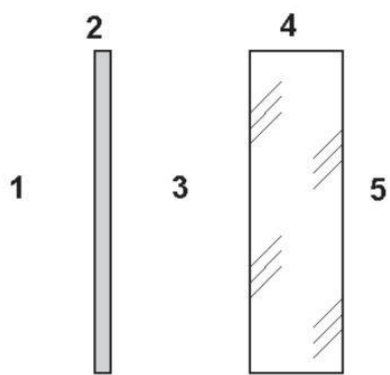
$$0,1 \leq \rho_{e,B} \leq 0,8$$

per poi ricavare tramite la formula esplicitata in figura il fattore di assorbimento solare $\alpha_{e,B}$. Infine, come ultimo step per l'applicazione della formula, bisogna conoscere il fattore solare della sola vetratura scelta g_{gl} .

Tende esterne e configurazioni schermanti

In riferimento all'edificio oggetto di studio, sulla base di ciò che è stato detto, il fattore solare totale è stato calcolato attraverso la formula riportata nella figura sottostante.

Dispositivo di protezione solare esterno
Fattore di trasmissione solare totale


$$g_{\text{tot}} = \tau_{e,B} \cdot g + \alpha_{e,B} \frac{G_{\text{ext}}}{G_2} + \tau_{e,B} (1 - g) \frac{G_{\text{ext}}}{G_1}$$

dove:

$$\alpha_{e,B} = 1 - \tau_{e,B} - \rho_{e,B};$$
$$G_1 = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K});$$
$$G_2 = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K});$$
$$G_{\text{ext}} = \left(\frac{1}{U_g} + \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right)^{-1}$$

Figura 31: Calcolo del fattore solare totale

Per quanto riguarda il calcolo e la valutazione delle prestazioni energetiche, esso prevede che la scelta del dispositivo di protezione ricada nell'utilizzo delle tende da sole, le quali sono state modellate e applicate in tutti i componenti finestrati che definiscono l'edificio.

Le tende da sole inizialmente venivano utilizzate come tettuccio, tende per terrazza o per i balconi; oggi invece vengono utilizzati anche come dispositivo di protezione al surriscaldamento applicato alle superfici vetrate dei diversi edifici. Grazie a questa evoluzione, esse hanno garantito in modo significativo il comfort ambientale dell'edificio nelle ore più calde del giorno. In base ad alcune ricerche condotte da FAKRO¹⁹ le tende da sole esterne risultano essere 8 volte più efficienti rispetto alle classiche tende da sole installate internamente, tale per cui, nel caso in esame, sono state scelte quelle esterne piuttosto che interne in quanto riducono la temperatura interna di 10 °C.

¹⁹ Azienda internazionale, seconda player mondiale nel settore delle finestre da tetto.

Affinché esse siano energicamente efficienti sono stati valutati i requisiti termici imposti dalle norme sopra esplicitate. Dapprima, è stata eseguita un'accurata ricerca su tre tipi di configurazioni di tende da poter poi inserire nel software, sfruttando il *database europeo di schermature solare ES-SDA*²⁰. Mediante il database è stato possibile determinare il livello di prestazione energetica, i regolamenti edilizi nazionali e le informazioni sulla modellazione degli edifici.

Per entrambi i modelli (convenzionale e *nZEB*) sono stati scelti rispettivamente tre configurazioni:

1. Prima configurazione: Tenda color carbone;
2. Seconda configurazione: Tenda bianco ultravision;
3. Terza configurazione: Tenda bianca.

Le schede tecniche sono state riportate come allegati e sono state fornite da tre aziende differenti: *Helioscreen*²¹, *Copaco Screenweavers*²² e *Mermet*²³. Tra le diverse configurazioni proposte dalle aziende sono state selezionate quelle sotto riportate, aventi tre tipi di tessuti con tipologia e colore differente e caratteristiche prestazionali diverse.

Tabella 25: Dati energetici forniti dalle schede tecniche

MODELLO CONVENZIONALE					
TENDA+VETRO SINGOLO					
Tipologia	U	τ_v	τ_s	g_{tot}	ρ_s
COPACO SCREENWEAVERS (Carbone)	5,8	0,0870	0,0960	0,2679	0,0527
MERMET (Ultravision Bianco)	5,8	0,3514	0,3769	0,3663	0,5192
HELIOSCREEN (Bianco)	5,8	0,1821	0,1882	0,2024	0,6681

²⁰ L'organizzazione europea (ES-SO) ha creato un database per le schermature solari includendo dati energetici riferiti a tessuti per tende, materiali e prodotti che seguono gli standard europei.

²¹ È sviluppatore e produttore di **tessuti per schermi in fibra** di vetro di alta qualità che risultano essere innovativi e funzionali per ambienti professionali, commerciali e residenziali.

²² È un produttore europeo leader di mercato di tessuti per la protezione solare

²³ È un produttore di tessuti tecnici e decorativi per la protezione solare, progetta e produce tessuti conformi alla norma *EN 14501* rispettando quindi, i requisiti prestazionali energetici.

Tabella 26: Dati energetici forniti dalle schede tecniche

MODELLO NZEB					
TENDA+VETRO DOPPIO					
Tipologia	U	τ_v	τ_s	g_{tot}	ρ_s
COPACO SCREENWEAVERS (Carbone)	1,2	0,0776	0,0960	0,1387	0,0527
MERMET (Ultravision Bianco)	1.2	0,2188	0,3769	0,1716	0,5192
HELIOSCREEN (Bianco)	1.2	0,1238	0,1882	0,0933	0,6681

Di quest'ultimi sono stati scelti quelli più significativi richiesti per effettuare le simulazioni, mentre gli altri dati, non meno importanti, sono riportati negli allegati.

In riferimento alle schede tecniche fornite, la trasmittanza termica delle due tipologie di vetri risulta essere diversa, in particolare, per il convenzionale è pari a $5,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ per l'nZEB. Quest'ultimo valore rientra, tra i valori di U definiti dall'Appendice A del DPR 25-06-2015 che in base alla zona climatica in esame, risulta essere minore di $1,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Un'altra differenza necessaria riguarda il fattore solare del solo vetro che è pari a 85% per il convenzionale e 59% per l'nZEB. La scelta di tali valori è esplicitata nel sottocapitolo riferito ai vetri avanzati.

Procedendo con un'analisi più accurata, altri dati prestazionali da valutare sono stati le proprietà ottiche, quali il fattore di trasmissione e riflessione solare e luminosa.

Una volta definite le proprietà ottiche e scelta una schermatura solare esterna, per le tre configurazioni si è considerato che il valore di trasmissione luminosa, sia maggiore del 10% altrimenti non si tratta più di una schermatura solare ma di una chiusura oscurante. Per tale motivo, come mostrato nelle tabelle, sono stati selezionati tessuti aventi una τ_v maggiore del 10% e aventi un valore distinguibile di molto tra le diverse configurazioni.

Questa scelta implica che anche i valori di τ_s e ρ_v si distinguano tra alti, medi e bassi.

Per il valore della τ_s è stata svolta un'ulteriore valutazione, infatti, affinché il valore di g_{tot} rientri nel range stabilito dal DPR 25-06-201, ovvero che sia pari o inferiore a 0.35,

il fattore di trasmissione solare per il modello nZEB non deve superare il valore di 0.25, tale per cui questo valore rappresenta il limite massimo.

Il fattore solare totale riportato nelle tabelle è quello riferito alle schede tecniche scelte, ma non corrisponde a quello utilizzato per effettuare le simulazioni sui due modelli, ma per valutare se le scelte effettuate rispettino o meno le norme imposte.

Una volta scelti i dati di input ed effettuate le rispettive verifiche prestazionali, è stato possibile calcolare il valore di g_{tot} effettivo per i due modelli (convenzionale e nZEB). Partendo dal modello convenzionale, tali calcoli sono stati riportati nelle tabelle sottostanti.

Tabella 27: Configurazioni delle tende solari esterne scelte del modello convenzionale

SCHERMATURE SOLARI MODELLO CONVENZIONALE					
TIPOLOGIA 1 (CARBONE)		TIPOLOGIA 2 (ULTRAVISION BIANCO)		TIPOLOGIA 3 (BIANCO)	
$G1(W/(m^2 k))$	5	$G1(W/(m^2 k))$	5	$G1(W/(m^2 k))$	5
$G2(W/(m^2 k))$	10	$G2(W/(m^2 k))$	10	$G2(W/(m^2 k))$	10
$U_g(W/(m^2 k))$	4,9	$U_g(W/(m^2 k))$	4,9	$U_g(W/(m^2 k))$	4,9
$G(W/(m^2 k))$	-0,5	$G(W/(m^2 k))$	-0,5	$G(W/(m^2 k))$	-0,5
$\tau_{e,B}$	0,096	$\tau_{e,B}$	0,3769	$\tau_{e,B}$	0,1882
$\rho_{e,B}$	0,0527	$\rho_{e,B}$	0,5192	$\rho_{e,B}$	0,6681
$\alpha_{e,B}$	0,8513	$\alpha_{e,B}$	0,1039	$\alpha_{e,B}$	0,1437
g_{glass}	0,85	g_{glass}	0,85	g_{glass}	0,85
g_{tot}	0,038	g_{tot}	0,310	g_{tot}	0,150
$\tau_{e,V}$	0.0870	$\tau_{e,V}$	0.3514	$\tau_{e,V}$	0.1821

Per il modello *nZEB*, i calcoli sono riportati nelle tabelle a seguire.

Tabella 28: Configurazioni delle tende solari esterne scelte del modello *nZEB*

SCHERMATURE SOLARI MODELLO NZEB					
TIPOLOGIA 1 (CARBONE)		TIPOLOGIA 2 (ULTRAVISION BIANCO)		TIPOLOGIA 3 (BIANCO)	
$G1(W/(m^2 k))$	5	$G1(W/(m^2 k))$	5	$G1(W/(m^2 k))$	5
$G2(W/(m^2 k))$	10	$G2(W/(m^2 k))$	10	$G2(W/(m^2 k))$	10
$U_g(W/(m^2 k))$	1,2	$U_g(W/(m^2 k))$	1,2	$U_g(W/(m^2 k))$	1,2
$G(W/(m^2 k))$	0,13	$G(W/(m^2 k))$	0,13	$G(W/(m^2 k))$	0,13
$\tau_{e,B}$	0,096	$\tau_{e,B}$	0,3769	$\tau_{e,B}$	0,1882
$\rho_{e,B}$	0,0527	$\rho_{e,B}$	0,5192	$\rho_{e,B}$	0,6681
$\alpha_{e,B}$	0,8513	$\alpha_{e,B}$	0,1039	$\alpha_{e,B}$	0,1437
g_{glass}	0,59	g_{glass}	0,59	g_{glass}	0,59
g_{tot}	0,069	g_{tot}	0,228	g_{tot}	0,115
$\tau_{e,V}$	0.0776	$\tau_{e,V}$	0.2188	$\tau_{e,V}$	0.1715

5. Analisi dei risultati

Come già accennato, il software utilizzato è stato *EnergyPlus*, ovvero il programma di simulazione energetica più impiegato a livello mondiale, creato dal Dipartimento per l'efficienza energetica e l'energia rinnovabile del Governo degli Stati Uniti (EERE).

Per poter procedere con l'utilizzo del software, dapprima, i file di *Design Builder* sono stati esportati in un formato *.idf* e convertiti nella versione coincidente con quella scaricata di *EnergyPlus*.

Nel caso in esame, attraverso tale software, ci si è occupati di analizzare il fabbisogno termico utile di raffrescamento, il consumo di energia elettrica delle apparecchiature primarie che costituiscono l'impianto e la temperatura operativa necessaria poi per effettuare i calcoli per il comfort termoigrometrico attraverso il metodo adattativo.

Il tutto è stato valutato per entrambi gli edifici nel solo periodo estivo, a partire quindi dal 1° Giugno fino al 31 Agosto, in funzione dei dati climatici del 2020, 2050, 2080, forniti dal Comitato Tecnico Italiano (CTI), in modo tale da valutare la situazione non solo a livello attuale ma effettuando anche delle previsioni future.

5.1 Fabbisogno termico utile di raffrescamento

Il fabbisogno termico utile di raffrescamento è stato valutato attraverso il dato di input "*Zone HVAC: Ideal Loads Air System*" di *EnergyPlus* il quale definisce l'impianto come un'unità ideale, quindi, senza alcuna modifica in esso, e permette di valutare le prestazioni dell'edificio. Gli output ottenuti sono stati "*Zone Ideal Loads Zone Sensible Cooling Rate*" e "*Zone Operative Temperature*" di *EnergyPlus* al fine di ottenere le temperature di *Setpoint* all'interno delle zone termiche, ovvero di 26°C nel caso di raffrescamento e 20°C nel caso di riscaldamento. L'impianto ideale miscela l'aria della zona con quella esterna aggiungendo o rimuovendo calore e umidità per ottenere un'efficienza al 100%.

Per ricavare un impianto ideale, è stato specificato su *EnergyPlus* che l'impianto non avesse capacità e portata illimitate.

I sotto paragrafi, sotto riportati, mostrano i risultati relativi ai due edifici in esame nel caso convenzionale e nZEB e con l'installazione delle due soluzioni tecnologiche.

Tabella 29: Dati relativi agli anni 2020, 2050, 2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale e nZEB nel condominio

2020												
Giugno				Luglio				Agosto				
	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
CONV.	12,19	12,89	12,86	13,12	38,29	40,43	40,39	39,28	20,83	22,21	22,13	20,98
nZEB	11,56	11,19	11,19	11,49	37,48	36,60	36,56	35,87	20,52	19,79	19,72	18,76
2050												
Giugno				Luglio				Agosto				
	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
CONV.	3,78	4,41	4,41	5,67	21,90	24,16	24,08	25,38	23,16	25,23	25,12	25,15
nZEB	3,22	3,04	3,04	4,11	20,83	20,25	20,22	21,94	22,70	22,13	22,05	22,40
2080												
Giugno				Luglio				Agosto				
	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
CONV.	22,05	23,56	23,49	22,79	59,23	62,48	62,41	59,19	77,53	81,28	81,17	75,81
nZEB	21,49	20,93	20,90	20,34	59,23	58,39	58,31	55,48	78,11	77,07	76,92	71,90

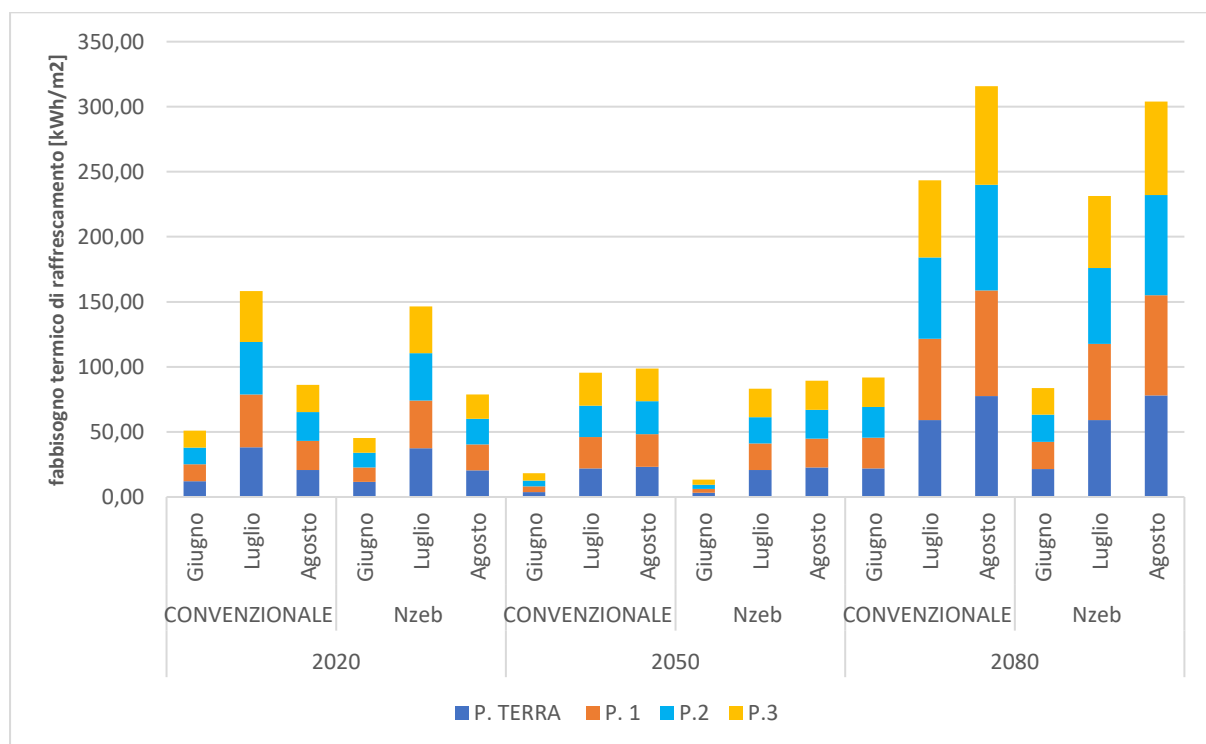


Figura 32: Fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale e nZEB del condominio

Tabella 30: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale e nZEB nella casa plurifamiliare.

		2020								
		Giugno			Luglio			Agosto		
		UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
CONV.		13,43	13,76	14,41	43,18	43,71	45,12	23,19	23,68	24,11
nZEB		11,17	11,13	10,75	37,26	37,41	36,97	20,28	20,23	19,79
		2050								
		Giugno			Luglio			Agosto		
		UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
CONV.		4,60	4,93	5,49	25,86	26,68	28,09	27,07	27,70	28,87
nZEB		2,91	2,86	2,54	20,23	20,28	19,75	22,41	22,51	22,27
		2080								
		Giugno			Luglio			Agosto		
		UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
CONV.		24,56	25,07	25,73	67,34	67,58	69,43	88,20	87,96	90,29
nZEB		20,99	21,03	20,47	59,34	59,82	59,87	78,45	78,99	79,47

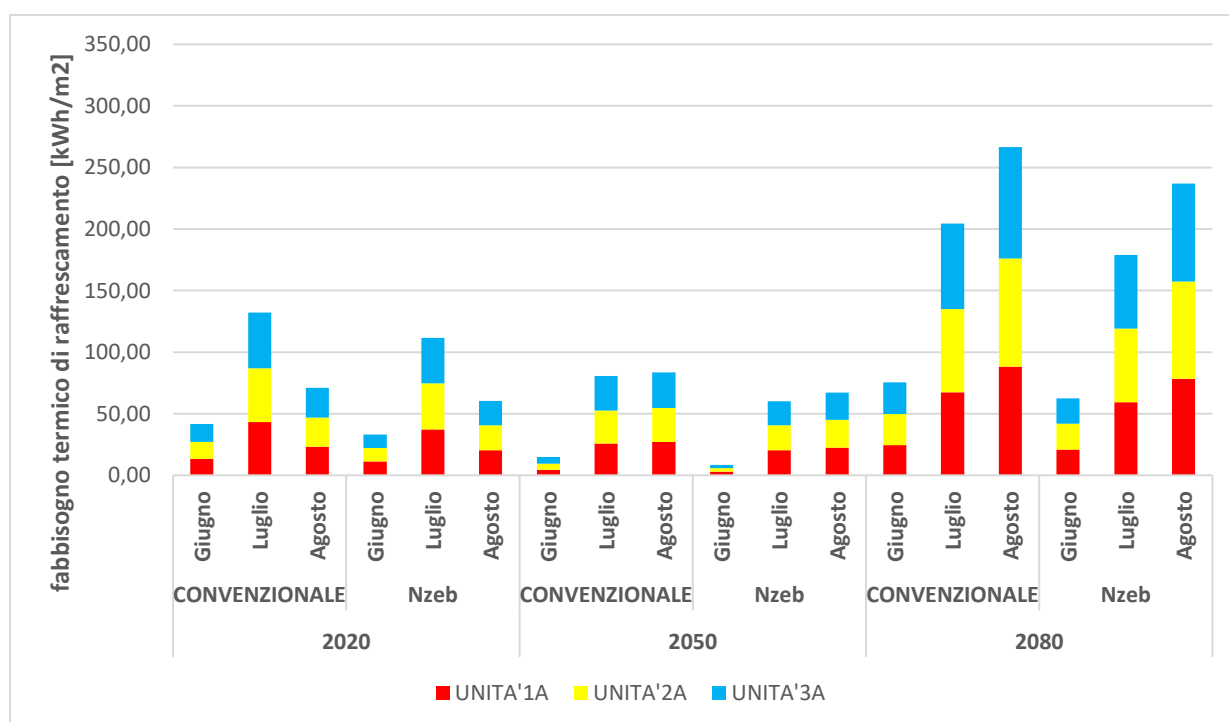


Figura 33:Fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale e nZEB della casa plurifamiliare.

Considerando i due edifici in esame, come si può notare dai grafici sopra riportati, mettendo a confronto il convenzionale con l'nZEB, si può notare che in entrambi i casi, nell'anno 2020, precisamente nel mese di Luglio, è presente un picco, il che vuol dire che è richiesta una quantità di energia termica maggiore per raffrescare il fabbricato al fine di mantenere le condizioni di temperatura di setpoint pari a 26°, rispetto ai mesi di Giugno e Agosto in cui questa quantità risulta minore. Nell'anno 2050, invece, nel mese di giugno si può evidenziare un calo di valori, per poi aumentare e mantenersi pressoché costante nei mesi di Luglio e Agosto. Infine, l'anno 2080 è caratterizzato da un andamento crescente a partire dal mese di Giugno fino a raggiungere un picco nel mese di Agosto. Poiché l'nZEB è un edificio ad elevata efficienza energetica, rispetto al convenzionale, assume dei valori di fabbisogno termico più bassi.

5.1.1 Risultati delle vetrate avanzate

Tabella 31: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le due configurazioni del convenzionale nel condominio.

		2020											
		Giugno				Luglio				Agosto			
		P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
1 CONF.		10,86	11,60	11,60	12,04	35,07	37,44	37,48	36,95	18,84	20,29	20,29	19,45
2 CONF.		9,74	10,30	10,30	10,86	32,20	34,11	34,15	34,38	17,04	18,19	18,19	17,77
		2050											
		Giugno				Luglio				Agosto			
		P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
1 CONF.		2,74	3,30	3,33	4,56	18,57	20,98	21,02	22,93	20,45	22,70	22,70	23,16
2 CONF.		2,07	2,33	2,37	3,41	15,77	17,38	17,42	19,99	18,03	19,76	19,79	20,87
		2080											
		Giugno				Luglio				Agosto			
		P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
1 CONF.		19,90	21,49	21,53	21,16	55,48	59,31	59,31	56,66	73,55	78,03	77,99	73,17
2 CONF.		18,16	19,38	19,38	19,34	51,76	55,67	55,71	53,87	69,57	74,51	74,47	70,37

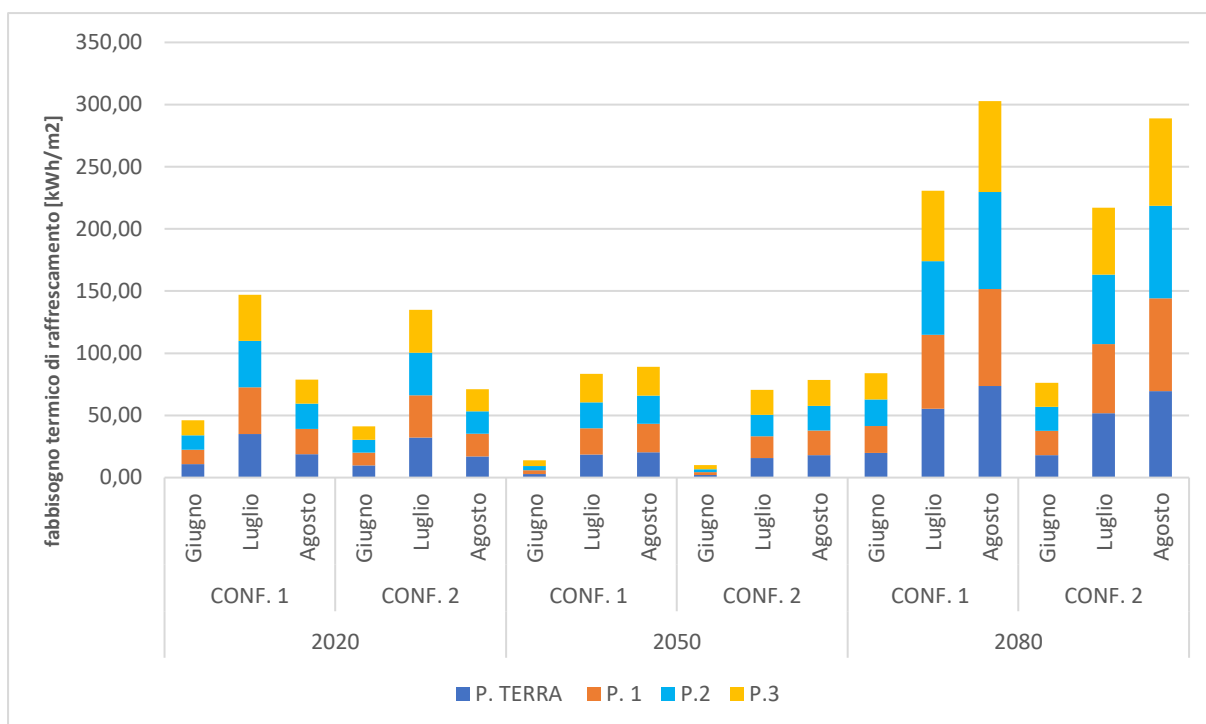


Figura 34: Fabbisogno termico di raffreddamento per il convenzionale del condominio con applicazione delle due configurazioni.

Tabella 32: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffreddamento per le due configurazioni del nZEB nel condominio

	2020											
	Giugno				Luglio				Agosto			
	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
	1 CONF.	11,86	11,49	11,49	11,75	38,13	37,33	37,29	36,45	20,90	20,25	20,18
2 CONF.	10,63	10,23	10,23	10,60	35,07	34,04	34,00	33,88	18,95	18,19	18,11	17,50
	2050											
	Giugno				Luglio				Agosto			
	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
	1 CONF.	3,22	3,04	3,04	4,11	20,83	20,25	20,22	21,94	22,70	22,13	22,05
2 CONF.	2,56	2,33	2,33	3,26	18,38	17,42	17,38	19,64	20,75	19,83	19,76	20,60
	2080											
	Giugno				Luglio				Agosto			
	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
	1 CONF.	21,90	21,42	21,38	20,75	59,88	59,15	59,08	56,13	78,79	77,84	77,72
2 CONF.	19,97	19,34	19,27	19,01	56,66	55,67	55,55	53,37	75,62	74,43	74,28	69,87

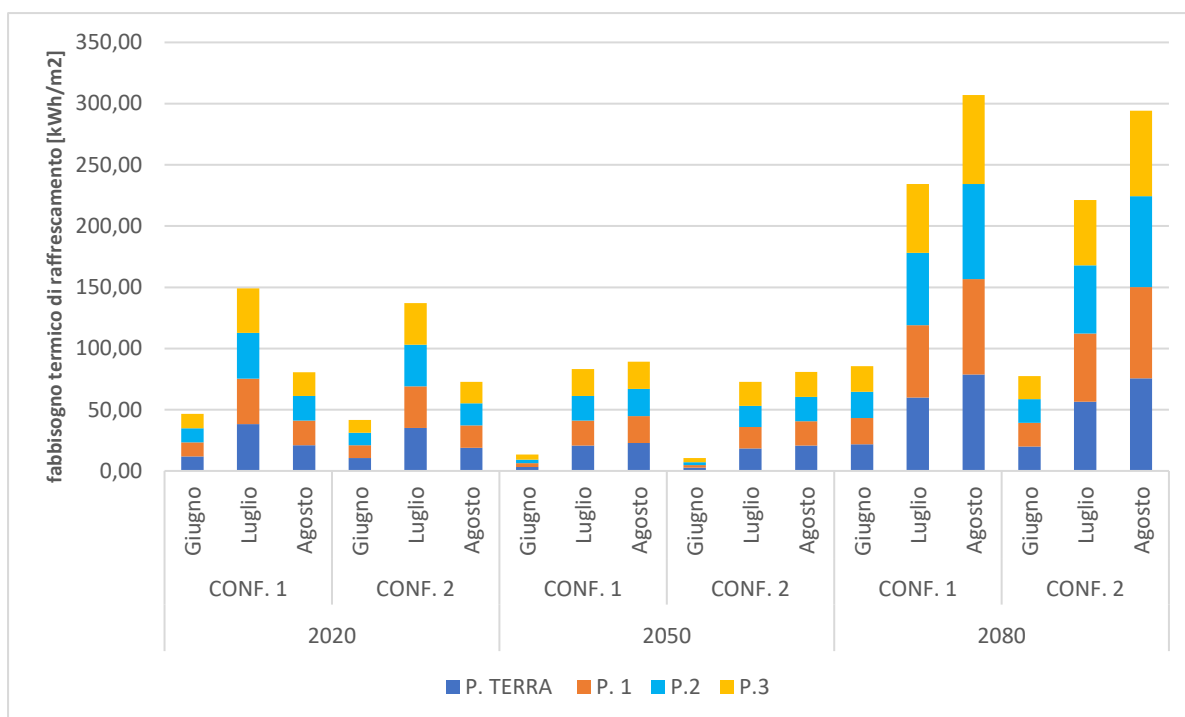


Figura 35: Fabbisogno termico di raffrescamento per l'nZEB del condominio con applicazione delle due configurazioni.

Tabella 33: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le due configurazioni del convenzionale nella casa plurifamiliare

		2020								
		Giugno			Luglio			Agosto		
		UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
1	CONF.	12,07	12,35	13,05	39,83	40,37	41,87	21,40	21,83	22,37
2	CONF.	10,94	11,08	11,93	37,16	37,70	39,35	19,70	19,89	20,67
		2050								
		Giugno			Luglio			Agosto		
		UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
1	CONF.	3,71	3,94	4,55	22,17	22,90	24,45	23,34	23,97	25,18
2	CONF.	2,77	2,91	3,52	19,36	19,84	21,69	21,20	21,59	23,05
		2080								
		Giugno			Luglio			Agosto		
		UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
1	CONF.	22,21	22,68	23,48	58,51	59,19	60,84	72,97	73,60	75,30
2	CONF.	20,38	20,71	21,69	56,13	56,52	58,46	70,83	71,22	73,16

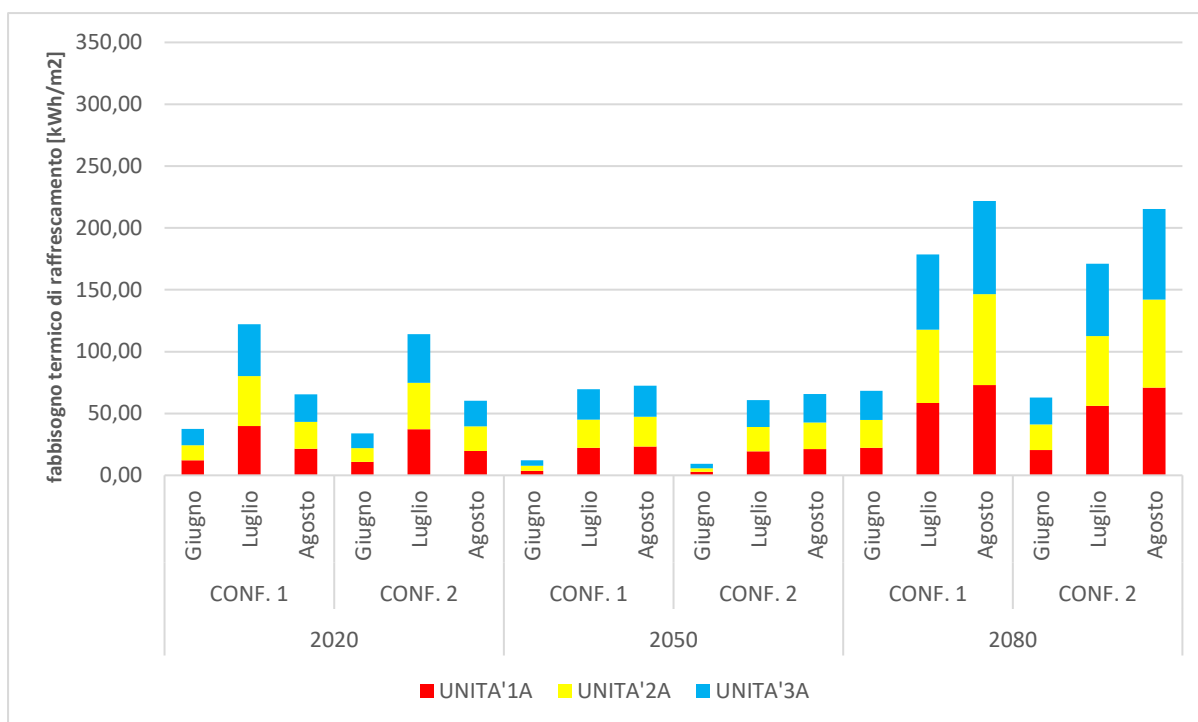


Figura 36: Fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale della casa plurifamiliare con applicazione delle due configurazioni.

Tabella 34: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le due configurazioni del nZEB nella casa plurifamiliare

	2020								
	Giugno			Luglio			Agosto		
	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
1 CONF.	11,22	11,22	10,80	37,45	37,70	37,26	20,62	20,57	20,18
2 CONF.	9,95	10,00	9,77	34,35	34,54	34,35	18,58	18,53	18,24
	2050								
	Giugno			Luglio			Agosto		
	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
1 CONF.	3,10	3,05	2,72	20,23	20,38	19,79	21,78	21,93	21,69
2 CONF.	2,16	2,16	1,93	17,03	17,13	16,84	19,31	19,41	19,36
	2080								
	Giugno			Luglio			Agosto		
	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
1 CONF.	21,03	21,13	20,56	55,41	56,18	56,18	69,23	70,30	70,69
2 CONF.	19,02	19,11	18,73	52,69	53,32	53,51	66,81	67,83	68,31

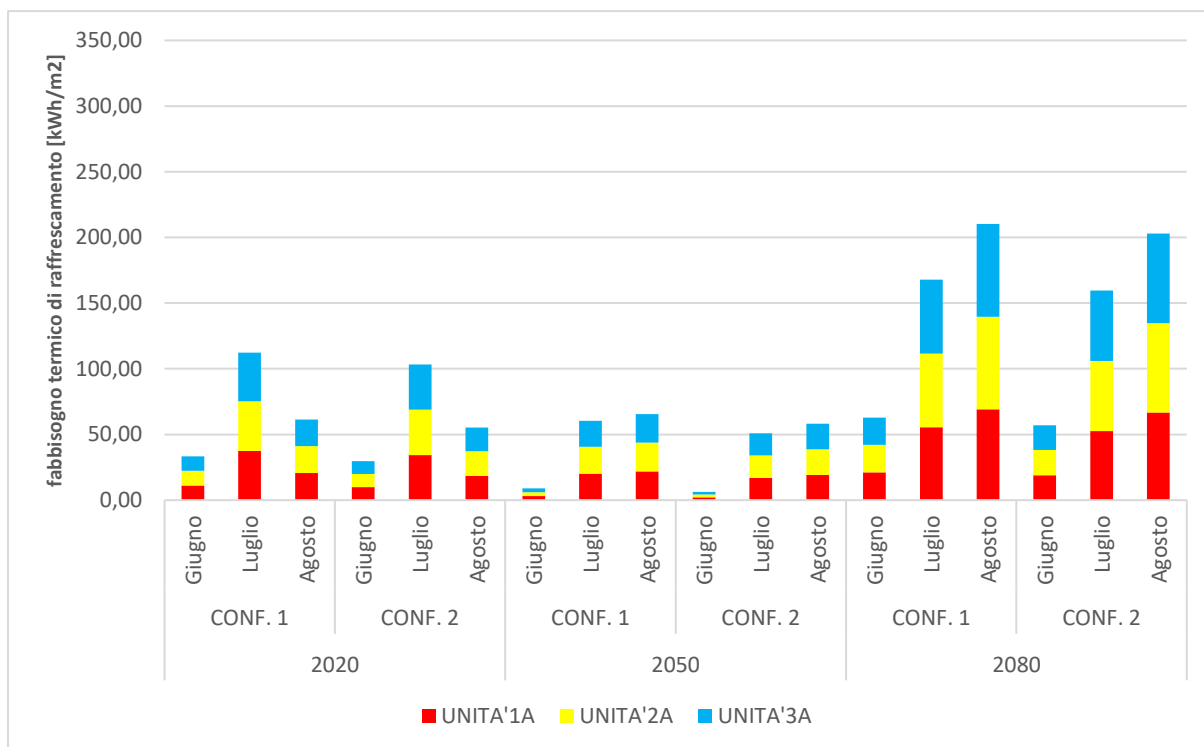


Figura 37: Fabbisogno termico di raffrescamento per nZEB della casa plurifamiliare con applicazione delle due configurazioni.

Facendo riferimento al convenzionale del condominio e della casa plurifamiliare, applicando in essi le due configurazioni scelte per le vetrate avanzate, si può notare che la seconda configurazione, ovvero quella di un vetro basso-emissivo e selettivo, risponde meglio dal punto di vista del fabbisogno termico di raffrescamento rispetto alla prima e rispetto al classico convenzionale, in quanto i valori sono più bassi. Lo stesso ragionamento vale per l'nZEB. Queste considerazioni valgono negli anni 2020, 2050 e 2080 e i valori seguono lo stesso andamento esplicitato nel paragrafo precedente.

5.1.2 Risultati delle schermature solari

Tabella 35: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le tre configurazioni del convenzionale nel condominio

	2020											
	Giugno				Luglio				Agosto			
	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
1 CONF.	11,82	12,71	12,75	13,04	37,37	40,01	40,09	39,13	20,25	21,94	21,94	20,90
2 CONF.	11,82	12,71	12,75	13,04	37,37	40,01	40,09	39,13	20,25	21,94	21,94	20,90
3 CONF.	11,82	12,71	12,75	13,04	37,41	40,05	40,12	39,09	20,25	21,94	21,98	20,87
	2050											
	Giugno				Luglio				Agosto			
	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
1 CONF.	3,37	4,19	4,22	5,52	20,67	23,55	23,62	25,04	22,17	24,73	24,77	24,89
2 CONF.	3,41	4,19	4,26	5,56	20,75	23,62	23,66	25,08	22,24	24,81	24,81	24,92
3 CONF.	3,41	4,19	4,22	5,52	20,67	23,55	23,62	25,04	22,17	24,77	24,77	24,89
	2080											
	Giugno				Luglio				Agosto			
	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
1 CONF.	21,42	23,27	23,31	22,64	58,20	62,10	62,10	59,00	76,54	80,90	80,90	75,62
2 CONF.	21,45	23,27	23,31	22,68	58,23	62,10	62,14	59,00	76,54	80,94	80,90	75,62
3 CONF.	21,42	23,27	23,31	22,64	58,20	62,10	62,10	59,00	76,50	80,90	80,90	75,62

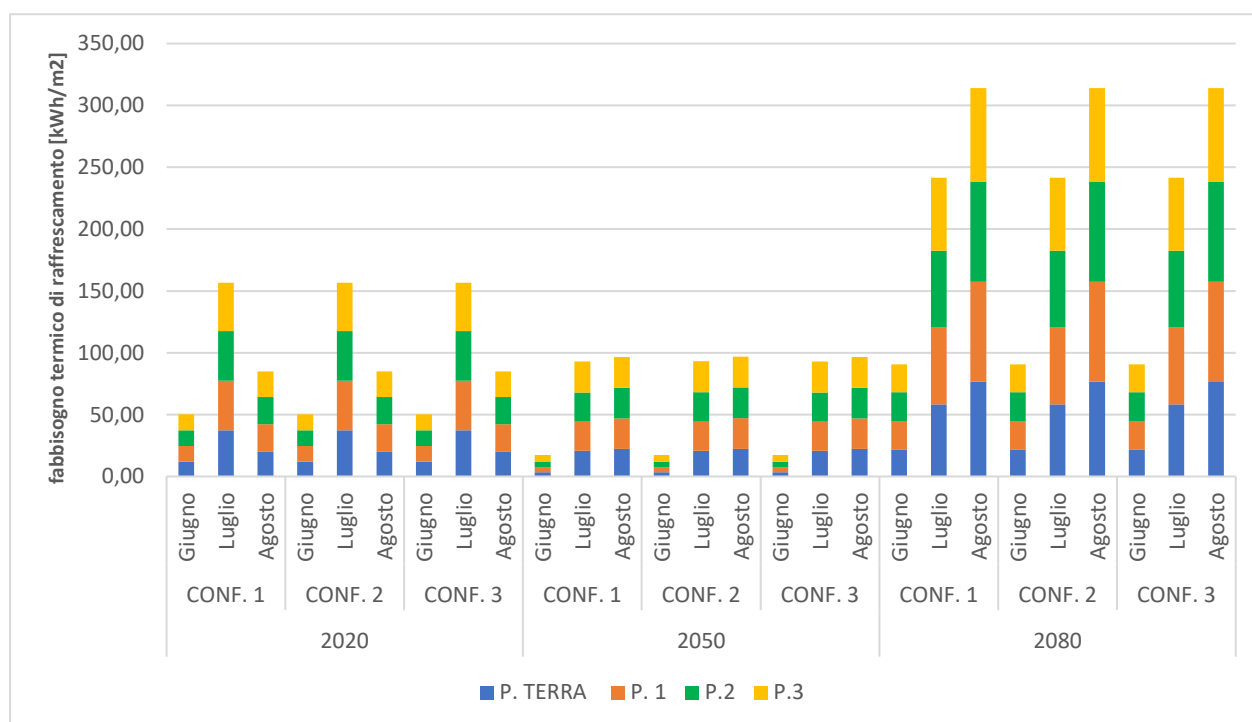


Figura 38: Fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale del condominio con applicazione delle tre configurazioni.

Tabella 36: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le tre configurazioni del nZEB nel condominio.

	2020											
	Giugno				Luglio				Agosto			
	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
1 CONF.	11,56	11,19	11,19	11,49	37,44	36,56	36,53	35,84	20,48	19,79	19,72	18,76
2 CONF.	11,56	11,23	11,23	12,15	37,52	36,60	36,72	32,47	20,52	19,79	19,79	19,30
3 CONF.	11,56	11,19	11,19	11,49	37,44	36,56	36,56	35,84	20,48	19,79	19,72	18,76
	2050											
	Giugno				Luglio				Agosto			
	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
1 CONF.	3,22	3,04	3,04	4,11	20,71	20,18	20,14	21,90	22,63	22,05	24,77	24,89
2 CONF.	3,22	3,04	3,08	4,08	20,83	20,25	20,41	16,92	22,70	22,13	22,28	18,30
3 CONF.	3,22	3,04	3,04	4,11	20,98	20,22	20,18	21,90	22,63	22,09	22,01	22,40
	2080											
	Giugno				Luglio				Agosto			
	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3	P.T	P.1	P.2	P.3
1 CONF.	21,45	20,90	20,86	20,34	59,19	58,39	58,27	55,48	78,07	77,03	76,92	71,90
2 CONF.	21,49	20,93	20,90	20,53	59,23	58,43	58,73	47,74	78,14	77,07	77,49	62,45
3 CONF.	21,45	20,90	20,90	20,34	59,15	58,39	58,31	55,48	78,07	77,03	76,92	71,90

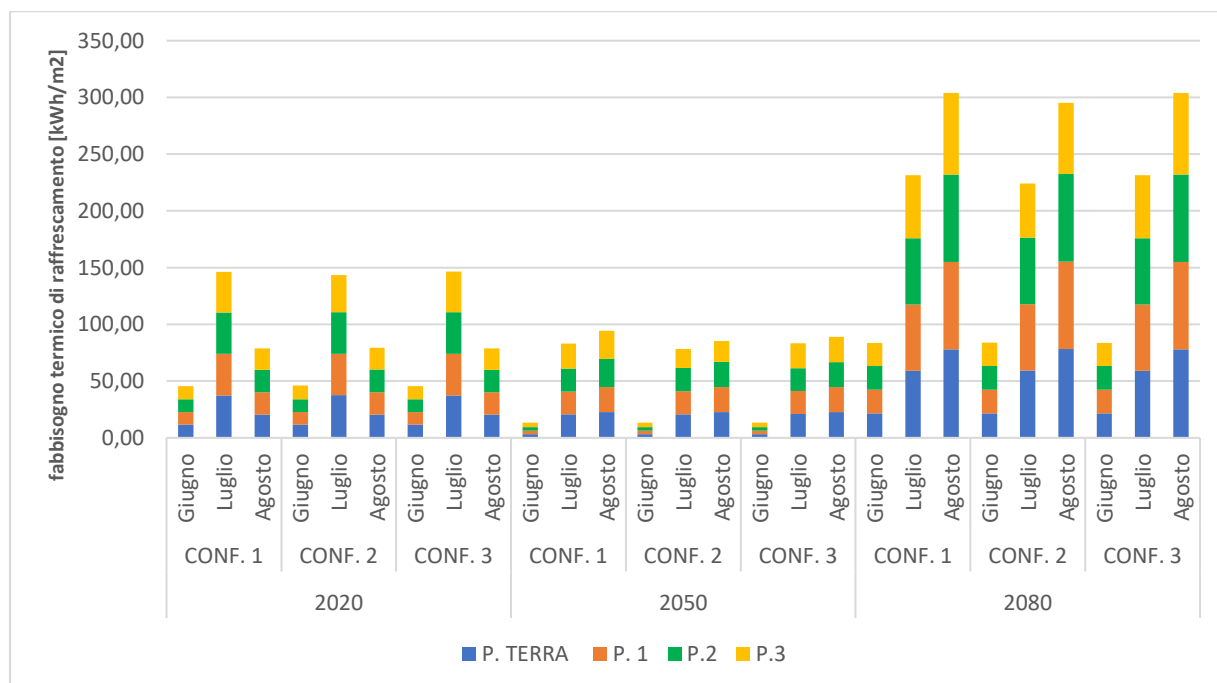


Figura 39: Fabbisogno termico di raffrescamento per nZEB del condominio con applicazione delle tre configurazioni.

Tabella 37: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le tre configurazioni del convenzionale nella casa plurifamiliare.

	2020								
	Giugno			Luglio			Agosto		
	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
1 CONF.	13,24	13,52	14,18	42,69	43,23	44,64	22,90	23,39	23,82
2 CONF.	13,38	13,71	14,37	43,03	43,57	45,02	23,14	23,63	24,02
3 CONF.	13,38	13,66	14,32	42,99	43,52	44,98	23,09	23,58	24,02
	2050								
	Giugno			Luglio			Agosto		
	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
1 CONF.	13,24	13,52	14,18	42,69	43,23	44,64	22,90	23,39	23,82
2 CONF.	4,51	4,84	5,40	25,57	26,44	27,85	26,88	27,51	28,67
3 CONF.	4,46	4,84	5,40	25,52	26,34	27,75	26,83	27,46	28,62
	2080								
	Giugno			Luglio			Agosto		
	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
1 CONF.	24,23	24,74	25,45	66,81	67,05	68,89	87,67	87,43	89,71
2 CONF.	24,46	24,98	25,68	67,20	67,44	69,33	88,11	87,82	90,14
3 CONF.	24,46	24,98	25,68	67,20	67,44	69,33	88,11	87,82	90,14

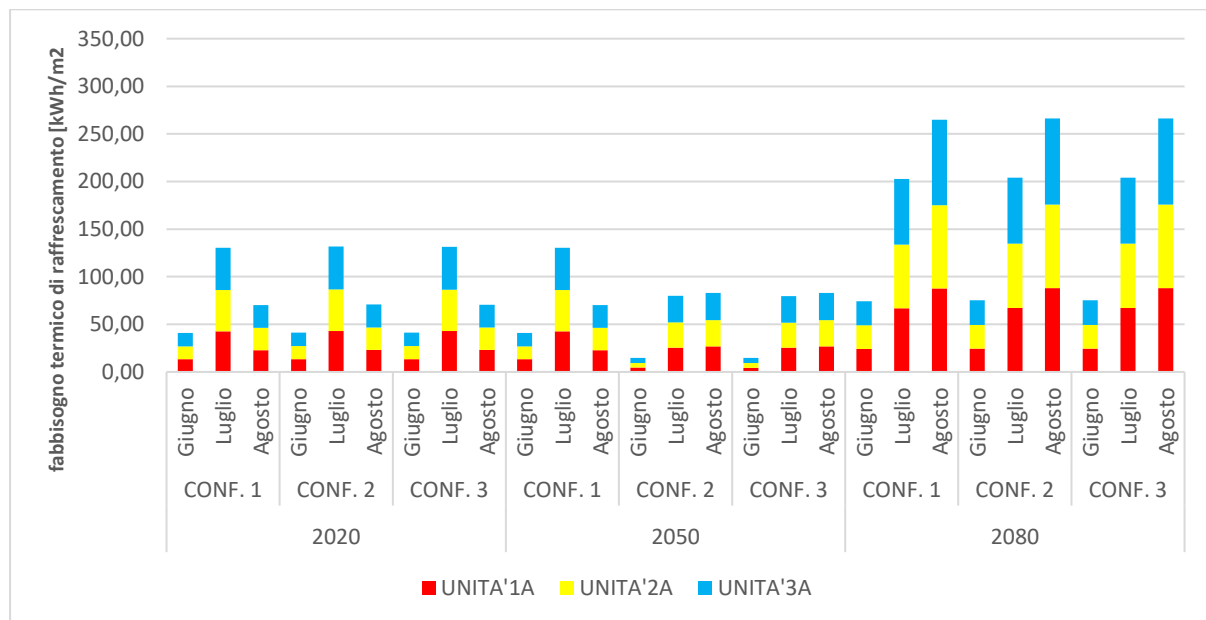


Figura 40: Fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale della casa plurifamiliare con applicazione delle tre configurazioni.

Tabella 38: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le tre configurazioni del nZEB nella casa plurifamiliare

	2020								
	Giugno			Luglio			Agosto		
	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
1 CONF.	10,85	10,85	10,47	36,58	36,78	36,39	19,99	20,47	19,60
2 CONF.	11,17	11,13	10,75	37,26	37,41	37,02	20,28	20,23	19,79
3 CONF.	11,13	11,13	10,75	37,21	37,36	36,97	20,28	20,18	19,79
	2050								
	Giugno			Luglio			Agosto		
	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
1 CONF.	2,82	2,77	2,49	19,31	19,46	18,92	21,06	21,20	21,01
2 CONF.	2,91	2,86	2,54	20,23	20,33	19,75	22,41	22,51	22,27
3 CONF.	2,86	2,82	2,54	20,18	20,23	19,70	22,37	22,46	22,22
	2080								
	Giugno			Luglio			Agosto		
	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3	UNITA'1	UNITA'2	UNITA'3
1 CONF.	20,42	20,47	20,00	54,58	55,31	55,36	68,46	69,52	69,91
2 CONF.	20,99	21,03	20,47	59,38	59,82	59,87	78,50	78,99	79,47
3 CONF.	20,99	20,99	20,42	59,34	59,77	59,82	78,45	78,94	79,42

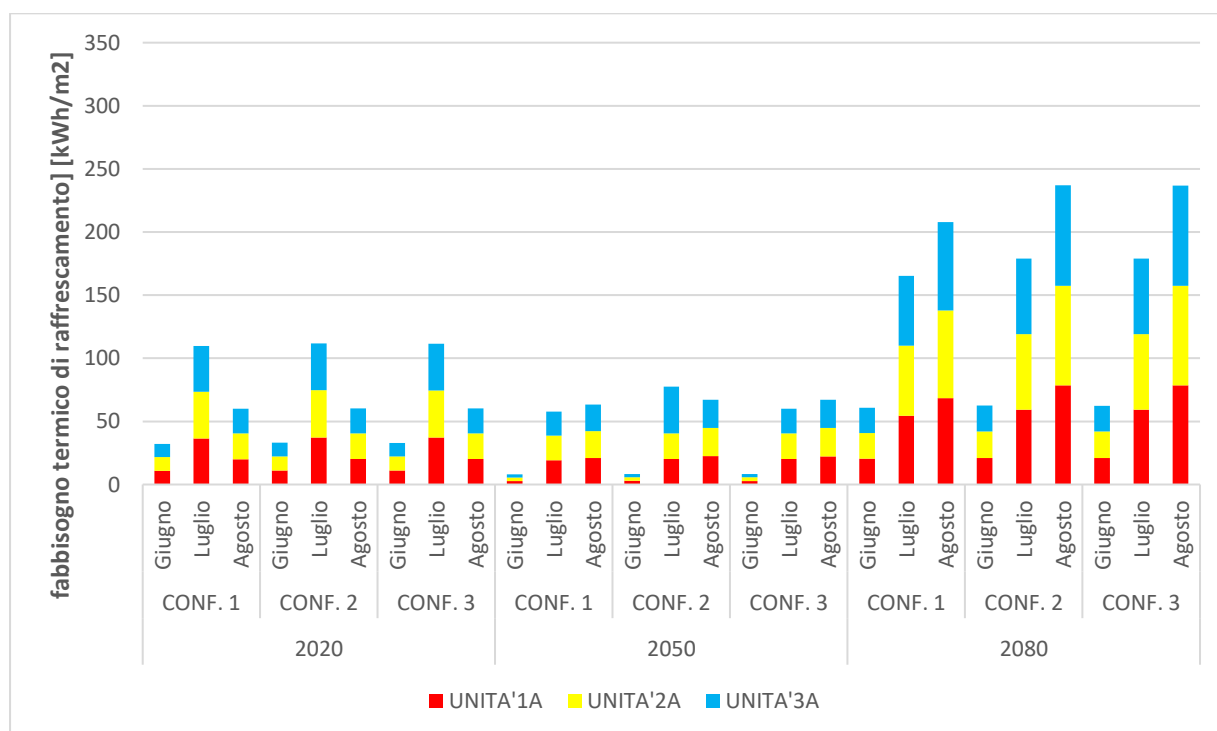


Figura 41: Fabbisogno termico di raffrescamento per l'nZEB della casa plurifamiliare con applicazione delle tre configurazioni.

Lo stesso avviene nel caso delle schermature solari, ovvero che l'andamento dei valori del fabbisogno termico di raffrescamento nell'*nZEB* del condominio e della casa plurifamiliare, risulta più basso rispetto al convenzionale. Per quanto riguarda la scelta delle tre configurazioni, nel condominio, pur prevalendo la tenda color carbone, accade che nel convenzionale e nell'anno 2020, la tenda ultravision bianca presenta gli stessi valori della tenda color carbone, mentre negli anni 2050 e 2080, la tenda bianca nella maggior parte dei casi presenta gli stessi valori della tenda color carbone. Lo stesso vale nel caso dell'*nZEB*. Invece, nella casa plurifamiliare per il convenzionale e per l'*nZEB* si ha la prevalenza solo della tenda color carbone. Inoltre, anche in questo caso, negli anni, l'andamento dei valori segue quello anticipato per il classico convenzionale e *nZEB*.

5.2 Energia elettrica di raffrescamento

L'energia elettrica di raffrescamento è un tema oggi particolarmente discusso, in quanto punta a valutare il risparmio energetico, che risulta la soluzione migliore contro il cambiamento climatico.

Per poter soddisfare il fabbisogno di raffrescamento estivo degli ambienti interni e combattere il surriscaldamento globale è bene adottare soluzioni impiantistiche che sostituiscano i tradizionali condizionatori, i quali producono un eccessivo consumo di elettricità con effetti negativi sull'ambiente.

Sulla base di ciò, nello studio di tesi è stata valutata l'energia elettrica di raffrescamento, estrapolata mediante *EnergyPlus*, considerando entrambi gli edifici muniti di impianto, per poi ottenere l'output "*End use Energy Consumption Electricity Monthly*".

I valori ottenuti riferiti ai componenti *Fans, Pumps e Cooling*, calcolati nei tre mesi estivi, sono poi stati sommati e confrontati negli anni 2020, 2050 e 2080, in relazione ai dispositivi tecnologici adottati, così come mostrano le tabelle e grafici sottostanti. Vengono anche riportate le tabelle con i rispettivi grafici del convenzionale e *nZEB* confrontati tra di loro negli anni.

Tabella 39: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello convenzionale e nZEB del condominio estrapolati da EnergyPlus

	2020			2050			2080		
	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS
CONV.	153,7	2,67	0,0059	79,23	1,46	0,0032	315,03	5,35	0,000690
nZEB	74,79	18,75	1,3	55,46	18,76	0,754	132,28	16,99	0,789

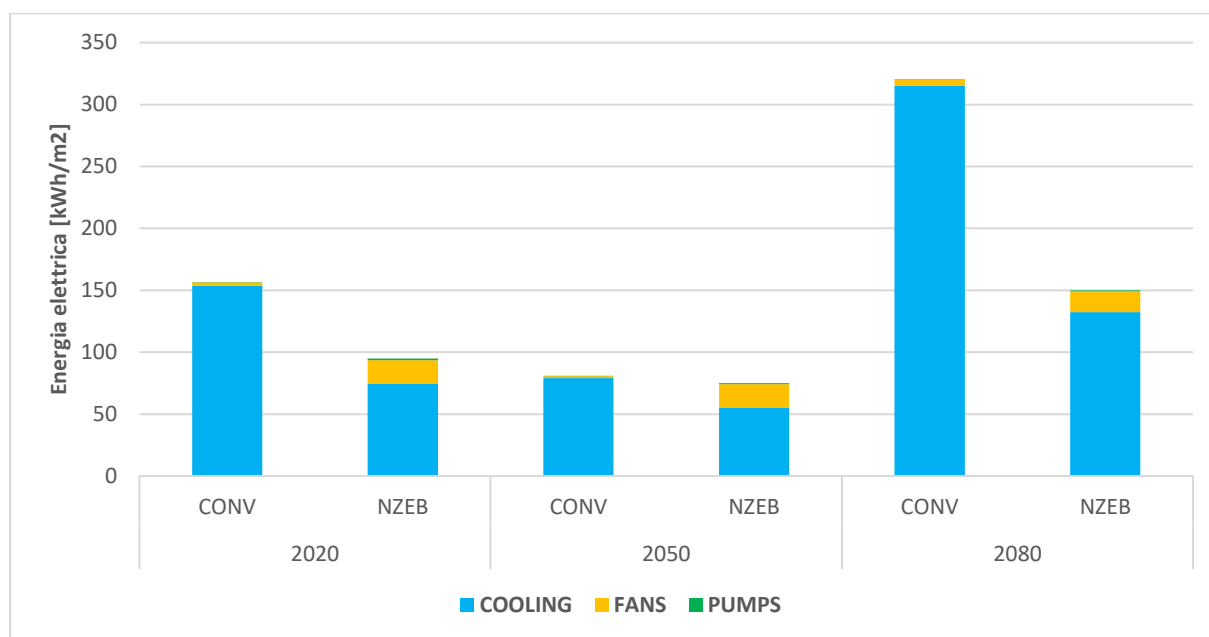


Figura 42: Risultati grafici del modello convenzionale e nZEB del condominio

Tabella 40: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello convenzionale e nZEB della casa plurifamiliare estrapolati da EnergyPlus

	2020			2050			2080		
	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS
CONV.	115,9	2,32	0,0043	59,8	1,27	0,00235	240,74	4,7	0,000476
nZEB	59,72	11,53	0,33	42,01	11,53	0,136	87,51	11,53	0,618

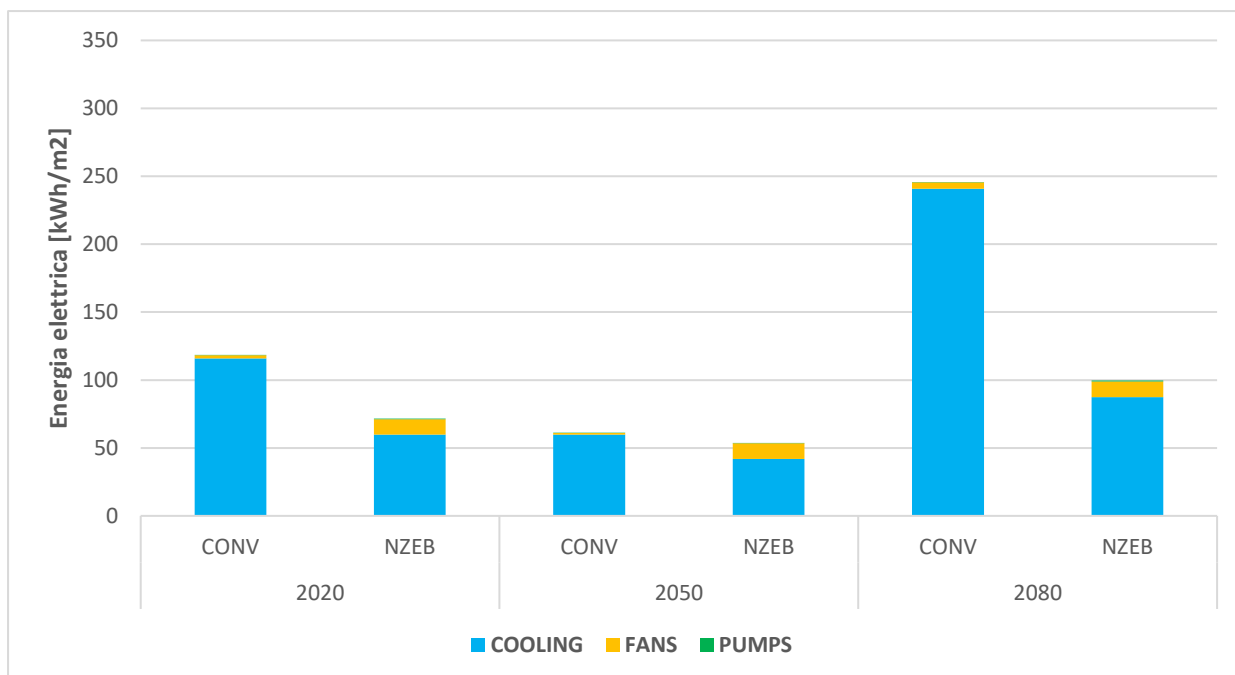


Figura 43: Risultati grafici del modello convenzionale e nZEB della casa plurifamiliare

Come si può notare, per entrambi gli edifici di tipo *nZEB*, il valore relativo al *Cooling Electricity* risulta più basso rispetto al convenzionale. Ciò è dovuto al fatto che si tratti di un edificio ad alta prestazione energetica, data dall'insieme di soluzioni innovative sia a livello impiantistico, sia tecnologico e dell'involucro opaco. Invece, i Fans e i Pumps, presentano dei valori più alti nell'*nZEB* di entrambi gli edifici, questo è dovuto al fatto che l'impianto installato nell'edificio di tipo *nZEB* svolge la molteplice funzionalità di riscaldare e raffrescare, quindi vi è un maggiore consumo di potenza. Mentre, l'impianto installato nell'edificio convenzionale svolge la sola funzione di riscaldare, tale per cui le potenze di Fans e Pumps assumono valori più bassi. Ma essendo il raffrescamento è garantito dal sistema PTAC installato produce un maggiore consumo di energia elettrica.

Dal grafico sopra riportato, si può inoltre notare che, l'andamento del *Cooling Electricity* è variabile negli anni, in particolare dal 2020 al 2050 i valori decrescono per poi aumentare fino a raggiungere il picco nel 2080.

5.2.1 Risultati delle vetrate avanzate

Tabella 41: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello convenzionale del condominio con applicazione delle due configurazioni estrapolati da EnergyPlus.

	2020			2050			2080		
	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS
1 CONF.	153,67	2,67	0,0059	79,13	1,46	0,0032	314,99	5,35	0,000695
2 CONF.	151,47	2,63	0,006	76,99	1,42	0,0033	311,42	5,29	0,000720

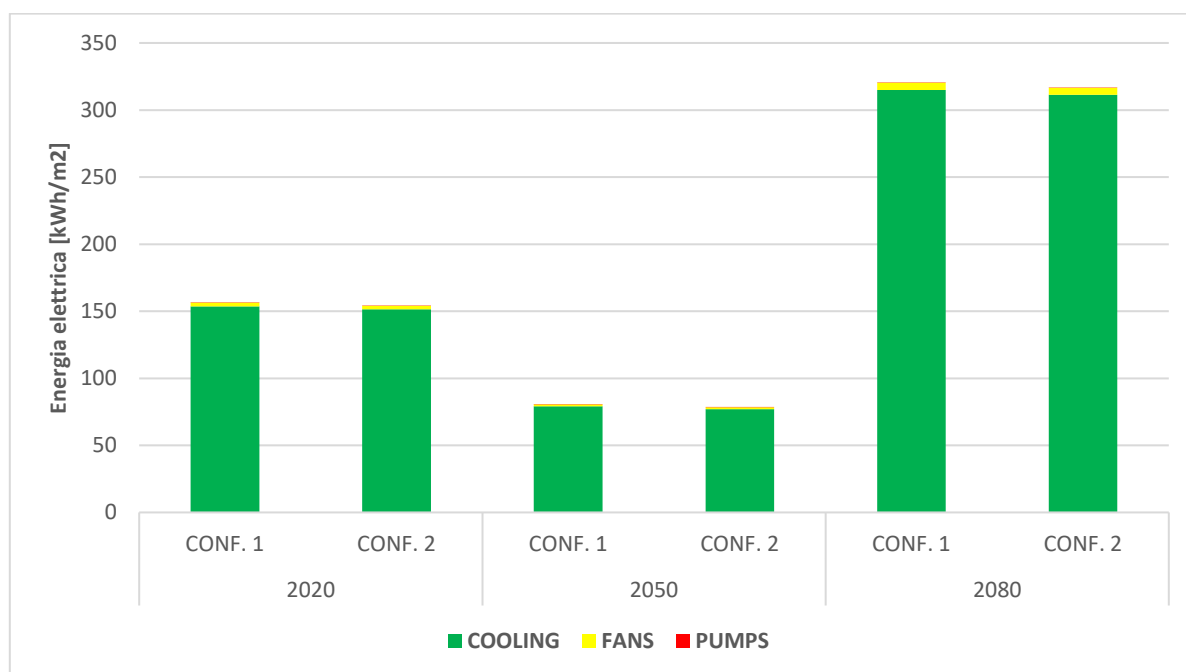


Figura 44: Risultati grafici del modello convenzionale del condominio con l'applicazione delle due configurazioni.

Tabella 42: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello nZEB del condominio con applicazione delle due configurazioni estrapolati da EnergyPlus.

	2020			2050			2080		
	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS
1 CONF.	75,08	18,76	1,3	55,72	18,767	0,752	132,75	17	0,791
2 CONF.	73,86	18,75	1,31	54,54	18,751	0,767	130,78	16,98	0,782

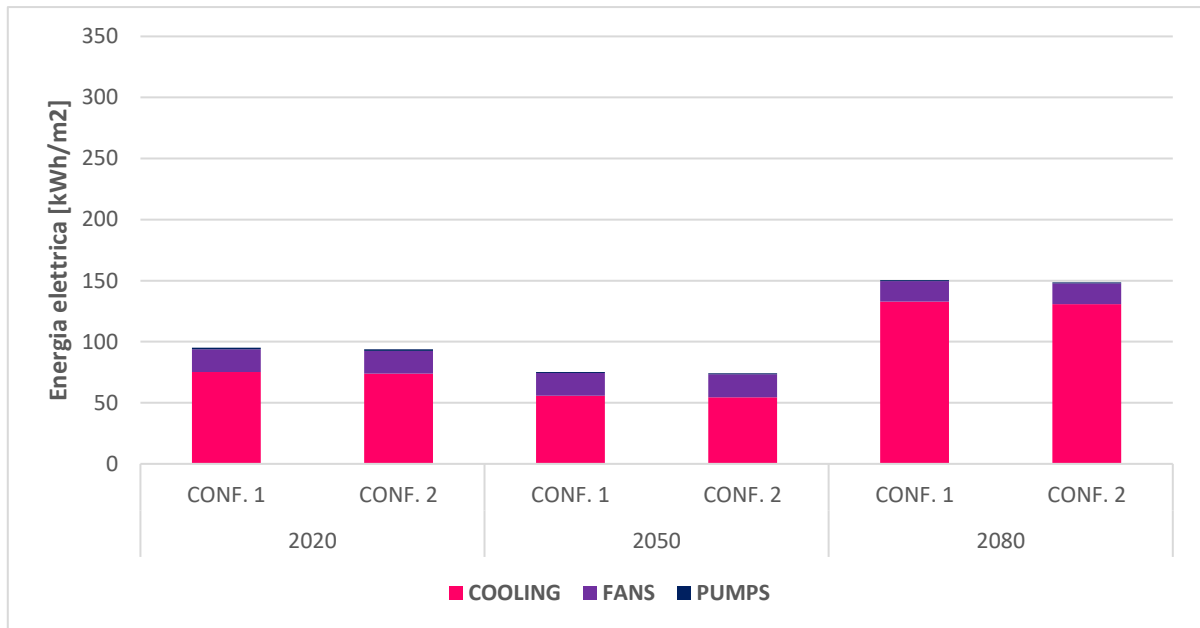


Figura 45: Risultati grafici del modello nZEB del condominio con l'applicazione delle due configurazioni.

Tabella 43: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello convenzionale della casa plurifamiliare con applicazione delle due configurazioni estrapolati da EnergyPlus.

	2020			2050			2080		
	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS
1 CONF.	114,97	2,3	0,0043	58,89	1,25	0,00237	239,27	4,67	0,000476
2 CONF.	113,89	2,27	0,0044	57,79	1,23	0,00243	237,61	4,63	0,000489

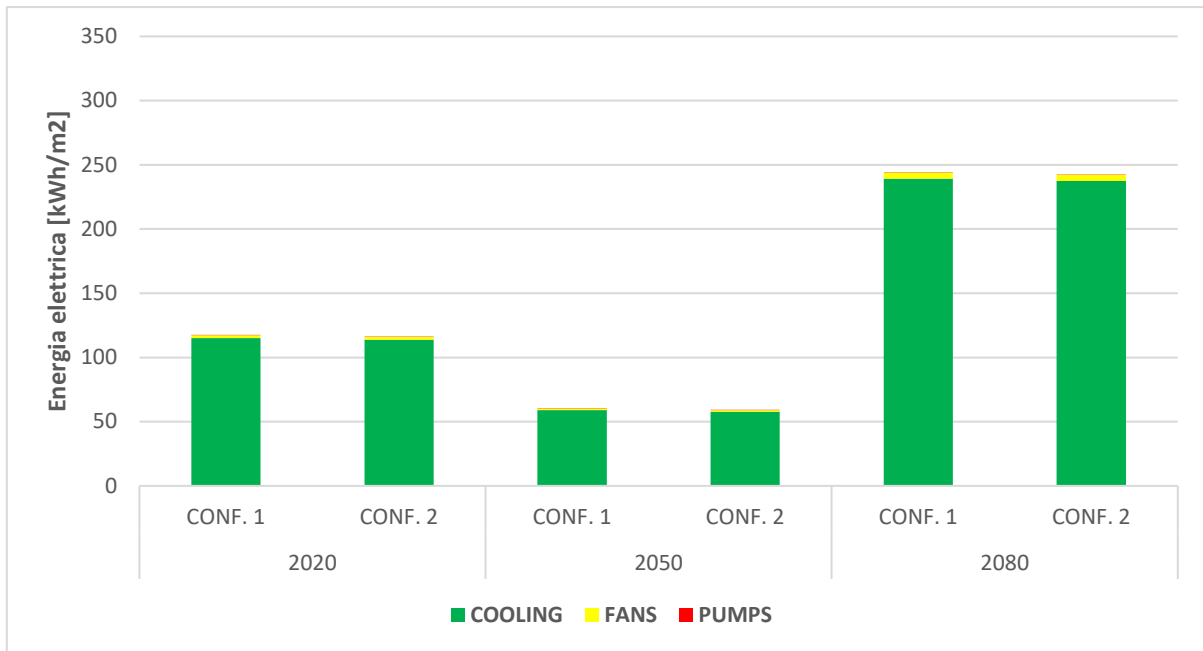


Figura 46: Risultati grafici del modello convenzionale della casa plurifamiliare con l'applicazione delle due configurazioni.

Tabella 44: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello nZEB della casa plurifamiliare con applicazione delle due configurazioni estrapolati da EnergyPlus.

	2020			2050			2080		
	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS
1 CONF.	59,95	11,54	0,33	42,22	11,54	0,137	87,79	11,54	0,62
2 CONF.	59,02	11,52	0,32	41,3	11,52	0,134	86,61	11,52	0,611

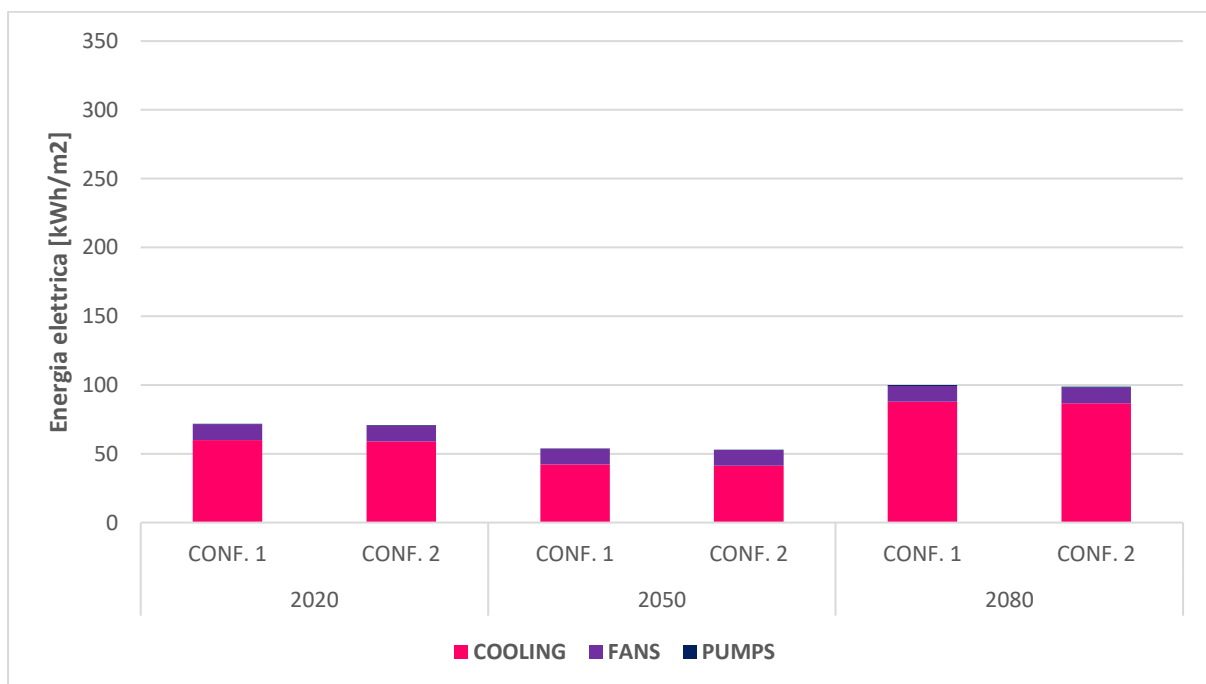


Figura 47: Risultati grafici del modello nZEB della casa plurifamiliare con l'applicazione delle due configurazioni.

Confrontando le due configurazioni scelte, sia per il convenzionale che per l'nZEB di entrambi gli edifici, risulta migliore la seconda configurazione ovvero quella di un vetro con rivestimento selettivo e basso-emissivo. L'andamento dei valori risulta variabile negli anni come detto pocanzi e inoltre, è importante evidenziare che, come ci si aspettava, le prestazioni energetiche dell'nZEB sono migliori rispetto al convenzionale in quanto i valori confrontati risultano più bassi.

5.2.2 Risultati delle schermature solari

Tabella 45: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello convenzionale del condominio con applicazione delle tre configurazioni estrapolati da EnergyPlus.

	2020			2050			2080		
	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS
1 CONF.	137,7	2,39	0,004	75	1,39	0,0024	275,65	4,67	0,0005
2 CONF.	153,67	2,67	0,006	79,16	1,46	0,0032	315	5,35	0,0007
3 CONF.	153,66	2,67	0,006	79,13	1,46	0,0032	314,99	5,35	0,0007

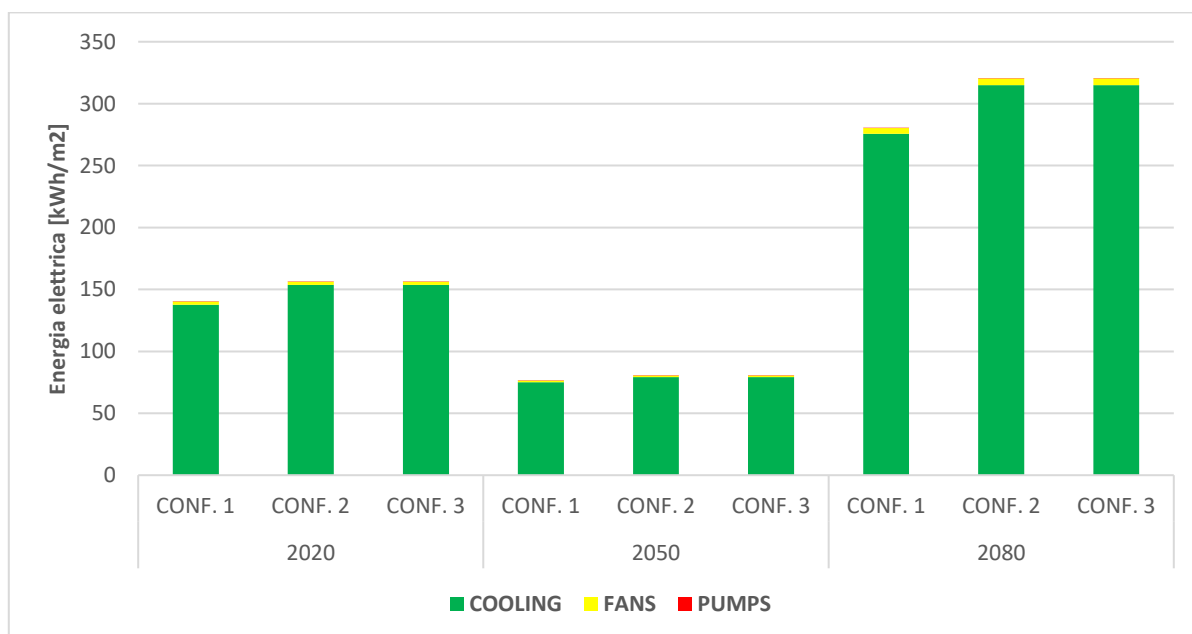


Figura 48: Risultati grafici del modello convenzionale del condominio con l'applicazione delle tre configurazioni

Tabella 46: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello nZEB del condominio con applicazione delle tre configurazioni estrapolati da EnergyPlus

	2020			2050			2080		
	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS
1 CONF.	74,76	18,75	1,304	55,43	18,76	0,7543	132,24	16,9858	0,7888
2 CONF.	74,79	18,75	1,304	55,46	18,76	0,7539	132,29	16,9857	0,789
3 CONF.	74,77	18,75	1,3039	55,44	18,76	0,7543	132,25	16,9858	0,7889

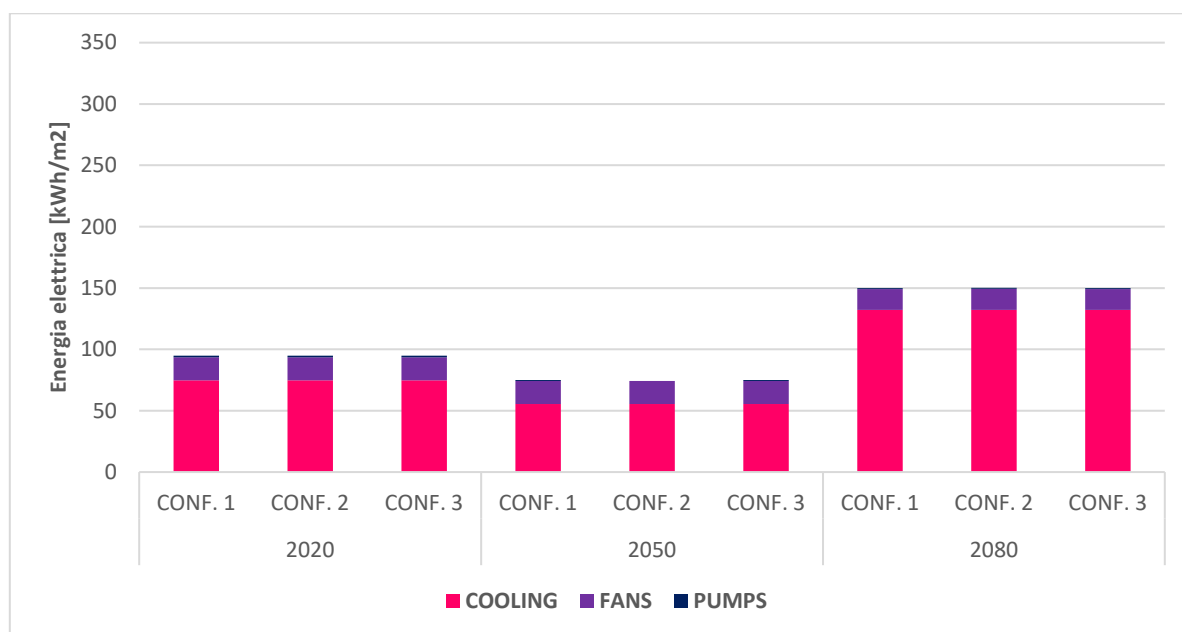


Figura 49: Risultati grafici del modello nZEB del condominio con l'applicazione delle tre configurazioni

Tabella 47: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello convenzionale della casa plurifamiliare con applicazione delle tre configurazioni estrapolati da EnergyPlus

	2020			2050			2080		
	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS
1 CONF.	115,85	2,32	0,0043	59,689	1,269	0,0024	240,65	4,699	0,0005
2 CONF.	115,77	2,31	0,0043	59,643	1,268	0,0024	240,51	4,696	0,0005
3 CONF.	115,85	2,32	0,0043	59,691	1,269	0,0024	240,65	4,699	0,0005

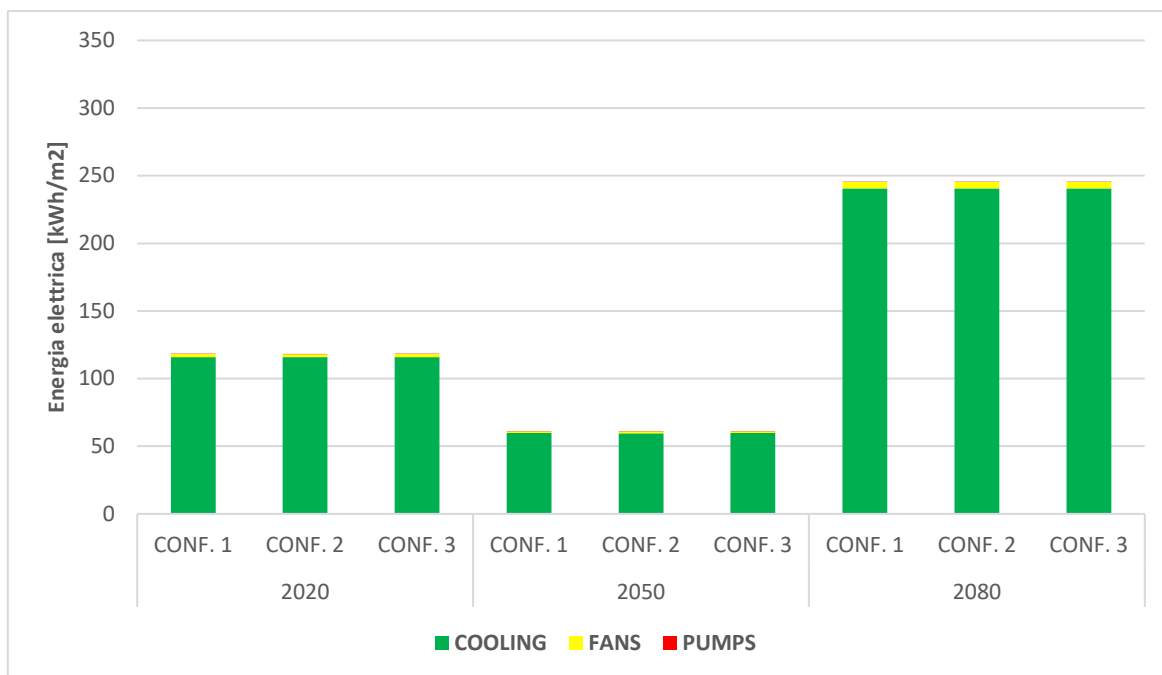


Figura 50: Risultati grafici del modello convenzionale della casa plurifamiliare con l'applicazione delle tre configurazioni

Tabella 48: Risultati degli anni 2020, 2050 e 2080 del modello nZEB della casa plurifamiliare con applicazione delle tre configurazioni estrapolati da EnergyPlus

	2020			2050			2080		
	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS	COOLING	FANS	PUMPS
1 CONF.	59,7	11,53	0,3263	41,98	11,53	0,1361	87,47	11,53	0,6174
2 CONF.	59,73	11,53	0,3266	42,01	11,53	0,1362	87,51	11,53	0,6176
3 CONF.	59,71	11,53	0,3264	41,99	11,53	0,1361	87,49	11,53	0,6175

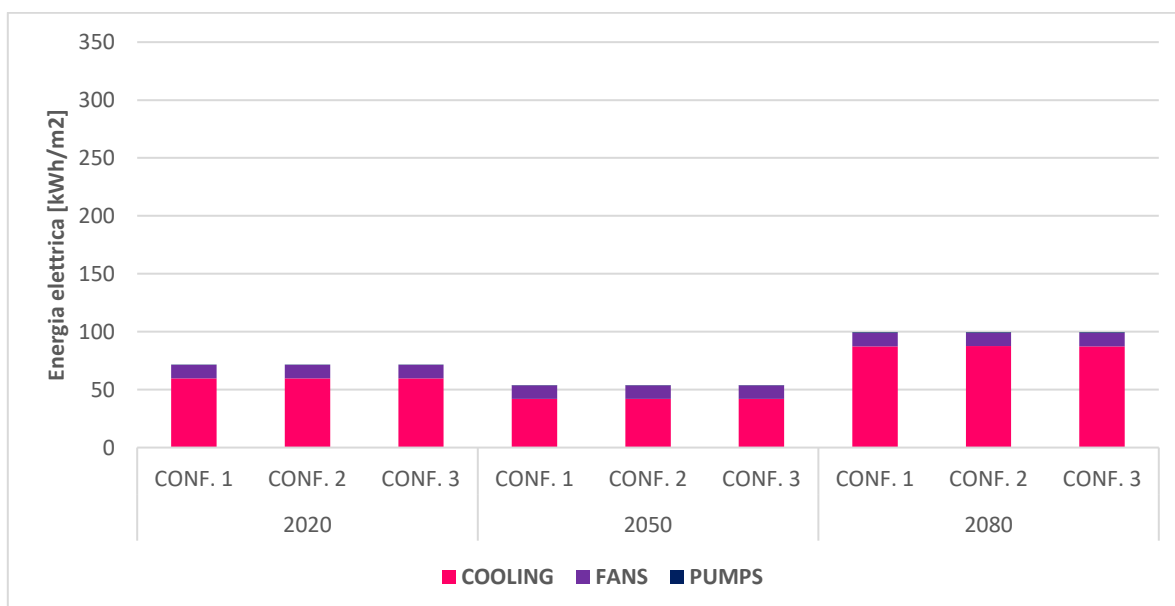


Figura 51: Risultati grafici del modello nZEB della casa plurifamiliare con l'applicazione delle tre configurazioni

Confrontando le tre configurazioni scelte, si nota che per il condominio di tipo convenzionale, risulta migliore la prima configurazione ovvero l'applicazione di una tenda color carbone. Invece, per la casa plurifamiliare di tipo convenzionale, risulta più prestante la seconda configurazione ovvero quella di una tenda bianca ultravision, mentre per l'nZEB la più prestante è la prima configurazione. Anche per le schermature solari, l'andamento dei valori del *Cooling Electricity* è variabile negli anni come esplicitato nelle vetrature avanzate; inoltre i dati dell'nZEB risultano minori rispetto al convenzionale, ciò implica che questo abbia delle prestazioni energetiche migliori ed efficienti.

È importante valutare questo parametro in quanto si ricollega a quello valutato precedentemente, ovvero il fabbisogno termico di raffrescamento. Mentre quest'ultimo non è altro che la quantità di calore fornita o sottratta ad un ambiente climatizzato affinché si mantengano le temperature desiderate per un dato periodo di tempo, per energia elettrica di raffrescamento si intende invece il consumo di energia elettrica tale da mantenere le condizioni di comfort, motivo per cui si andrà a valutare quest'ultimo output.

5.3 Comfort adattivo

Il modello di comfort adattivo riprende la definizione di benessere dell'individuo, capace di adattarsi all'ambiente in cui si trova, tenendo conto delle variabili di riferimento climatiche. In particolare, questo metodo permette di calcolare i limiti del comfort sulla base della temperatura operativa.

Attraverso *EnergyPlus* è stato possibile estrapolare le temperature di ogni zona termica, per tutto il periodo estivo e su base oraria, andando innanzitutto a considerare entrambi gli edifici privi di impianto, in quanto l'individuo ha la possibilità di raggiungere più facilmente una condizione di acclimatazione mediante strategie di

raffrescamento passive, per poi ottenere come dato di output “*Zone operative temperature*”.

Per poter garantire il benessere termoigrometrico, bisogna assicurarsi che l’individuo non lamenti sensazioni di caldo o freddo nel suo complesso e quindi che non ci sia discomfort interno. Per tale motivo, una volta estrapolati da *EnergyPlus*, i valori di temperatura, riferiti ad ogni zona termica, si è passati alla valutazione del soddisfacimento del benessere ambientale.

Dapprima, sono stati estrapolati i valori di temperatura esterna θ_{outdoor} , in riferimento ai file contenenti i dati metereologici del 2020, 2050 e 2080, mediante lo strumento *Elements* del software *Big Ladder software*²⁴ e riportati poi in *Excel*. Grazie a questo software è possibile gestire, modificare e visualizzare i dati climatici riferiti a molti paesi del mondo, pertanto risultano fondamentali per la modellazione energetica degli edifici e considerati quindi, come dati di input.

Il modello del comfort adattivo introduce la temperatura media esterna θ_{rm} , la quale rappresenta una media ponderata dei valori di temperatura esterna degli ultimi 7 giorni pesata sul peso relativo ai giorni precedenti; ottenuta moltiplicando le temperature, estrapolate da *EnergyPlus*, per i rispettivi fattori di peso, come mostrato dalla formula seguente:

$$\theta_{\text{rm}} = \frac{(\theta_{\text{ed}-1} + 0,8\theta_{\text{ed}-2} + 0,6\theta_{\text{ed}-3} + 0,5\theta_{\text{ed}-4} + 0,4\theta_{\text{ed}-5} + 0,3\theta_{\text{ed}-6} + 0,2\theta_{\text{ed}-7})}{3,8}$$

Dopodiché sono stati calcolati i limiti di temperatura operativa mediante la formula sottostante:

²⁴ È uno strumento software utilizzato per la creazione e modifica di file meteorologici utili per la simulazione energetica degli edifici, per poi valutare i consumi energetici.

$$\theta_c = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8$$

Secondo la *EN 15251:2007* individua tre categorie di comfort in funzione del tipo di edificio, in particolare, quella a cui è stata fatta riferimento è la categoria II poiché entrambi gli edifici sono ad uso residenziale. Quest'ultima definisce il discostamento tra la temperatura operativa e la temperatura operativa limite, infatti, per ottenere il limite massimo è stato sommato, alla formula precedentemente esplicitata, il valore +3, mentre nel caso in cui si volesse ottenere il limite inferiore (che non è riferito al caso in esame), si sarebbe sottratto il valore pari a -4.

Una volta fatto ciò, è stato possibile individuare il grado di discomfort presente all'interno dell'ambiente sulla base oraria. In particolare, sono stati confrontati le temperature operative ottenute tramite EnergyPlus con la temperatura operativa limite. È stato assegnato alla zona in esame, un valore pari ad 1 se la temperatura operativa di ogni zona è maggiore della temperatura limite, invece nel caso contrario si è assegnato un valore pari a 0, quest'ultimo indica che la zona in esame, di quel determinato giorno ed ora, sia in discomfort.

In conclusione, da ciò si ottiene una percentuale totale delle ore di discomfort valutate nei tre mesi estivi.

Prima di confrontare i due edifici convenzionale e *nZEB* con le rispettive configurazioni scelte, sia riferite alle vetrate avanzate e sia alle schermature solari, sono stati messi a confronto i due edifici convenzionale e *nZEB* privi di soluzioni tecnologiche.

Tabella 49: Valutazione del discomfort per il condominio di tipo convenzionale e nZEB negli anni 2020,2050 e 2080.

	2020		2050		2080	
	CONV.	nZEB	CONV.	nZEB	CONV.	nZEB
P.T	57%	100%	99%	100%	68%	100%
P.1	100%	100%	100%	100%	100%	100%
P.2	100%	100%	100%	100%	100%	100%
P.3	75%	80%	97%	100%	89%	92%

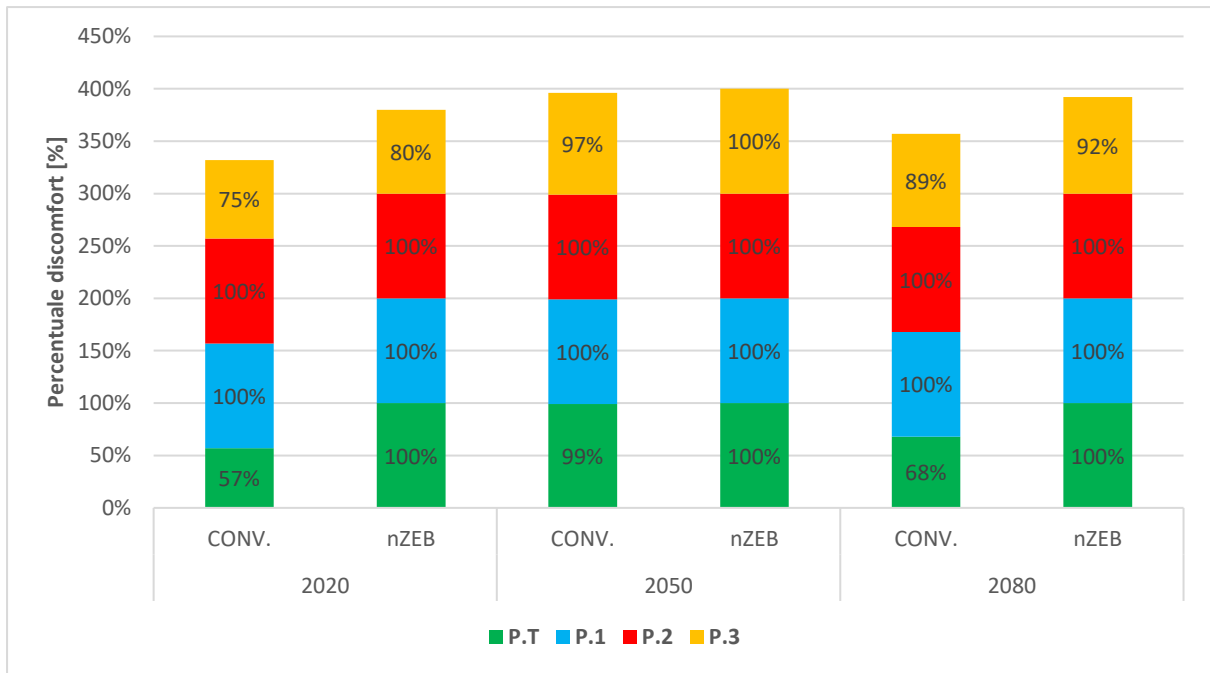


Figura 52: Risultati grafici ogni trent'anni del condominio di tipo convenzionale e nZEB.

Tabella 50: Valutazione del discomfort per la casa plurifamiliare di tipo convenzionale e nZEB negli anni 2020,2050 e 2080.

	2020		2050		2080	
	CONV.	nZEB	CONV.	nZEB	CONV.	nZEB
UNITA'1	58%	100%	88%	100%	78%	100%
UNITA'2	75%	100%	97%	100%	93%	100%
UNITA'3	66%	100%	91%	100%	86%	100%

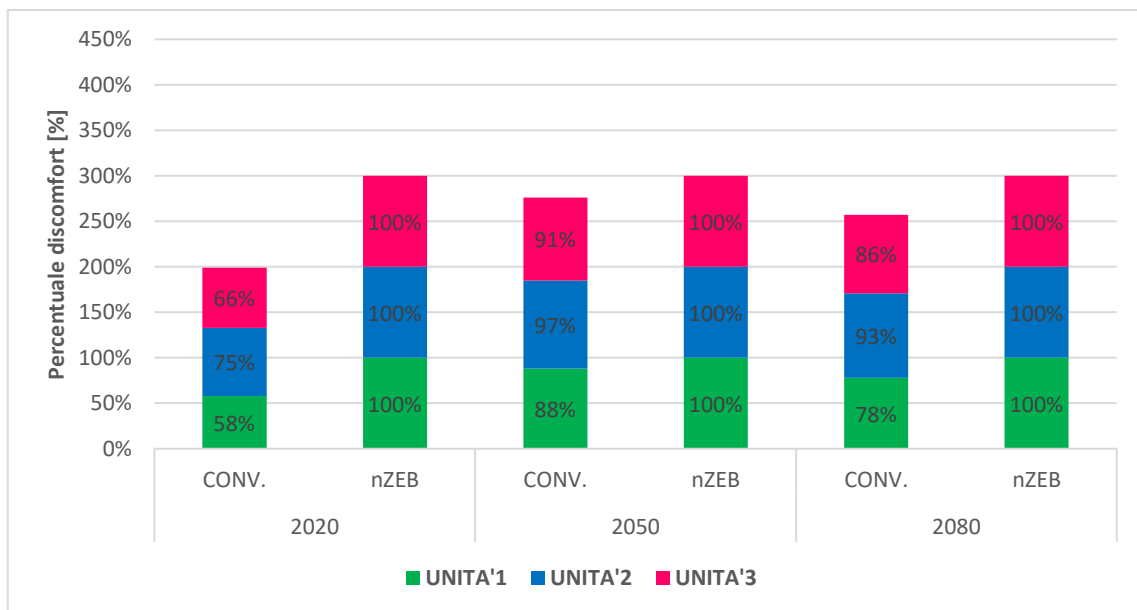


Figura 53: Risultati grafici ogni trent'anni della casa plurifamiliare di tipo convenzionale e nZEB.

Dai confronti sopra riportati si può notare che, considerando il condominio di tipo convenzionale, in particolare nei piani primo e secondo, si raggiunge il 100% di discomfort, in quanto essendo piani intermedi sono meno disperdenti. Questo vale per tutti gli anni analizzati. Invece, nell'*nZEB*, le percentuali risultano più alte raggiungendo nella maggior parte dei casi il 100% di discomfort, questo perché l'edificio presenta su tutto l'involucro opaco l'isolante, il quale svolge la funzione di isolare, come dice il termine stesso, quindi in questo caso il calore interno non si disperde.

Anche nella casa plurifamiliare si possono fare le stesse considerazioni, in quanto, l'Unità 2, appartenente all'edificio di tipo convenzionale, raggiunge delle percentuali di discomfort più alte rispetto alle altre due unità. Mentre nel caso dell'*nZEB* le percentuali di discomfort raggiunte, sono pari al 100% in tutte e tre le unità per le stesse motivazioni sopra citate.

5.3.1 Risultati delle vetrate avanzate

Nelle tabelle e nei grafici sottostanti sono stati riportati i valori di discomfort in percentuale riferiti alle due configurazioni di vetrate avanzate scelte applicate al condominio di tipo convenzionale e *nZEB*.

Considerando le due configurazioni si può notare che per la prima valgono le stesse considerazioni fatte precedentemente cioè il 100% di discomfort per i piani intermedi del convenzionale e il 100% di discomfort nella maggior parte dei casi dell'*nZEB*. Inoltre, l'andamento annuo è di tipo variabile, infatti si alternano momenti di incremento con momenti di decremento.

Per quanto riguarda, invece, la seconda configurazione, risulta migliore dal punto di vista del comfort termico e visibile sia nel convenzionale che nell'*nZEB*, tanto che nel convenzionale si raggiungono anche dei valori di discomfort, in particolare nel piano terra, anche pari allo 0%.

Tabella 51: Valutazione del discomfort per il condominio di tipo convenzionale con l'applicazione delle due configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.

	2020		2050		2080	
	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 1	CONF. 2
P.T	20%	0%	97%	0%	10%	0%
P.1	100%	7%	100%	89%	100%	5%
P.2	100%	47%	100%	100%	100%	53%
P.3	72%	21%	97%	73%	84%	26%

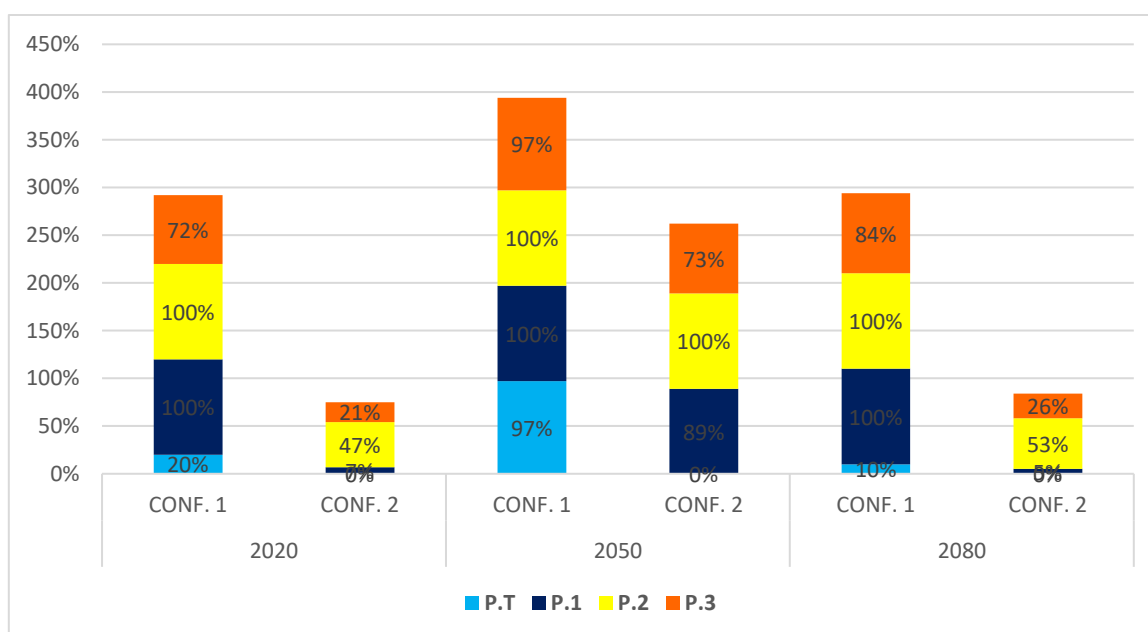


Figura 54: Risultati grafici ogni trent'anni del condominio di tipo convenzionale con l'applicazione delle due configurazioni.

Tabella 52: Valutazione del discomfort per il condominio di tipo nZEB con l'applicazione delle due configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.

	2020		2050		2080	
	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 1	CONF. 2
P.T	100%	67%	100%	100%	100%	76%
P.1	100%	72%	100%	100%	100%	89%
P.2	100%	72%	100%	100%	100%	82%
P.3	81%	44%	100%	86%	93%	58%

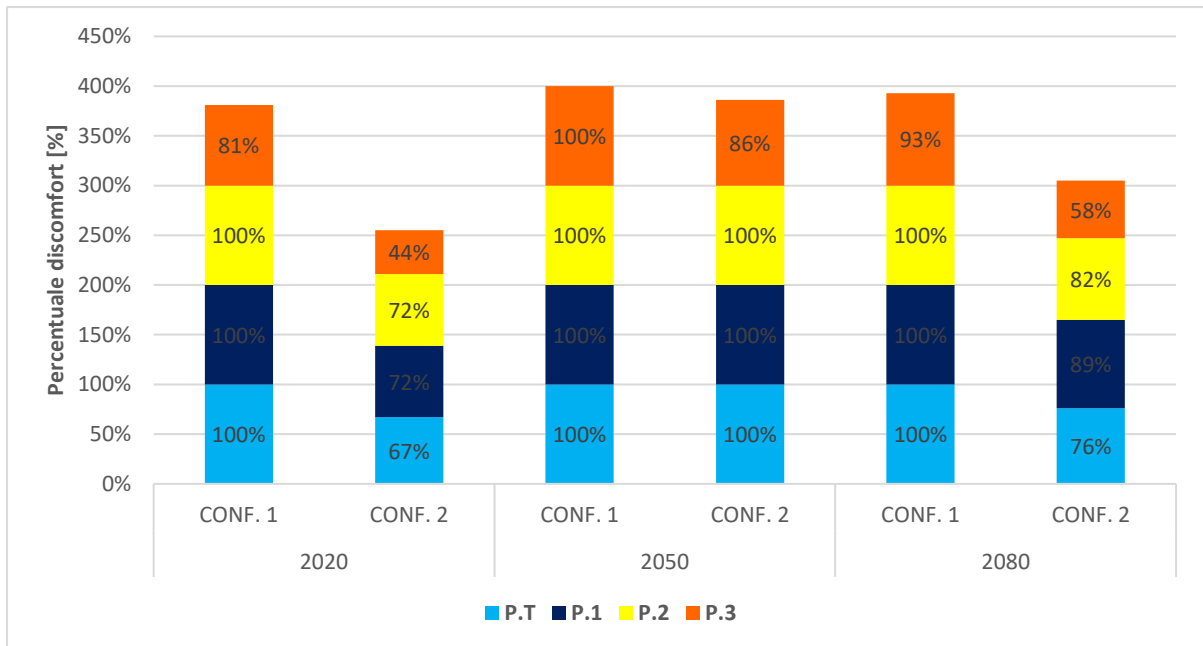


Figura 55: Risultati grafici ogni trent'anni del condominio di tipo nZEB con l'applicazione delle due configurazioni.

Lo stesso metodo di rappresentazione è stato fatto per la casa plurifamiliare, riportando i valori di discomfort in percentuale riferiti alle due configurazioni di vetrate avanzate scelte.

Considerando entrambe le configurazioni si può notare che le stesse considerazioni fatte precedentemente valgono anche in questo caso, cioè valori più alti di discomfort per l'Unità 2 del convenzionale e il 100% di discomfort in tutti i casi dell'nZEB per la prima configurazione, mentre la seconda presenta dei valori più bassi e variabili. Inoltre, si mantiene lo stesso andamento negli anni definito precedentemente.

Per quanto riguarda, invece, le configurazioni, la seconda risulta migliore dal punto di vista del comfort termico e visibile sia nel convenzionale che nell' nZEB, tanto che nel convenzionale si raggiungono anche dei valori di discomfort, in particolare nell'Unità 1, anche pari allo 0%.

Tabella 53: Valutazione del discomfort per la casa plurifamiliare di tipo convenzionale con l'applicazione delle due configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.

	2020		2050		2080	
	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 1	CONF. 2
UNITA' 1	50%	0%	77%	37%	64%	13%
UNITA' 2	68%	44%	94%	60%	87%	61%
UNITA' 3	58%	32%	85%	54%	80%	58%

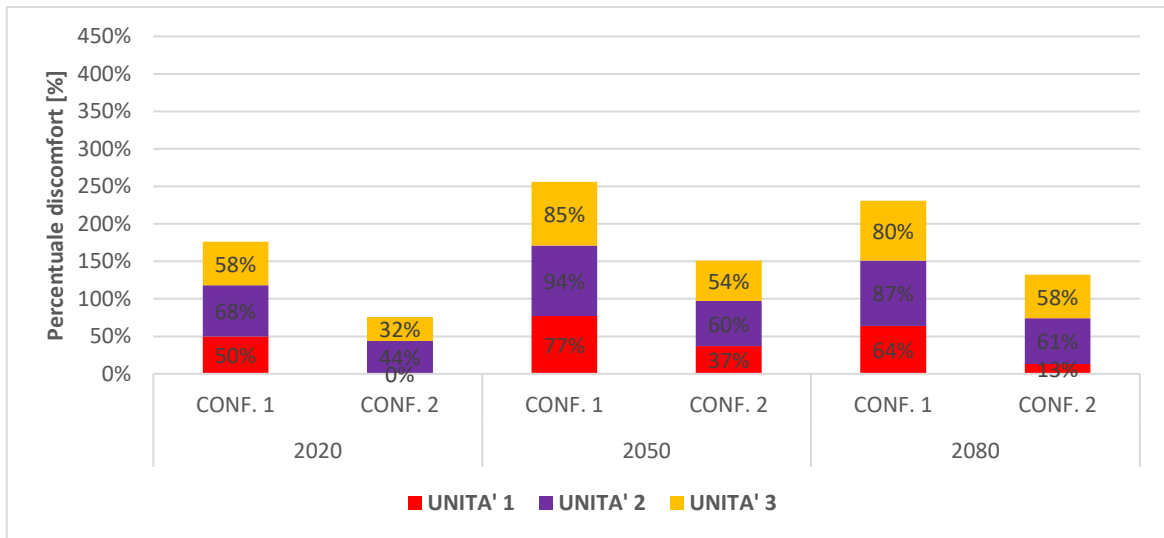


Figura 56: Risultati grafici ogni trent'anni della casa plurifamiliare di tipo convenzionale con l'applicazione delle due configurazioni.

Tabella 54: Valutazione del discomfort per la casa plurifamiliare di tipo nZEB con l'applicazione delle due configurazioni negli anni 2020, 2050 e 2080.

	2020		2050		2080	
	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 1	CONF. 2
UNITA' 1	100%	79%	100%	97%	100%	88%
UNITA' 2	100%	86%	100%	98%	100%	91%
UNITA' 3	100%	81%	100%	97%	100%	89%

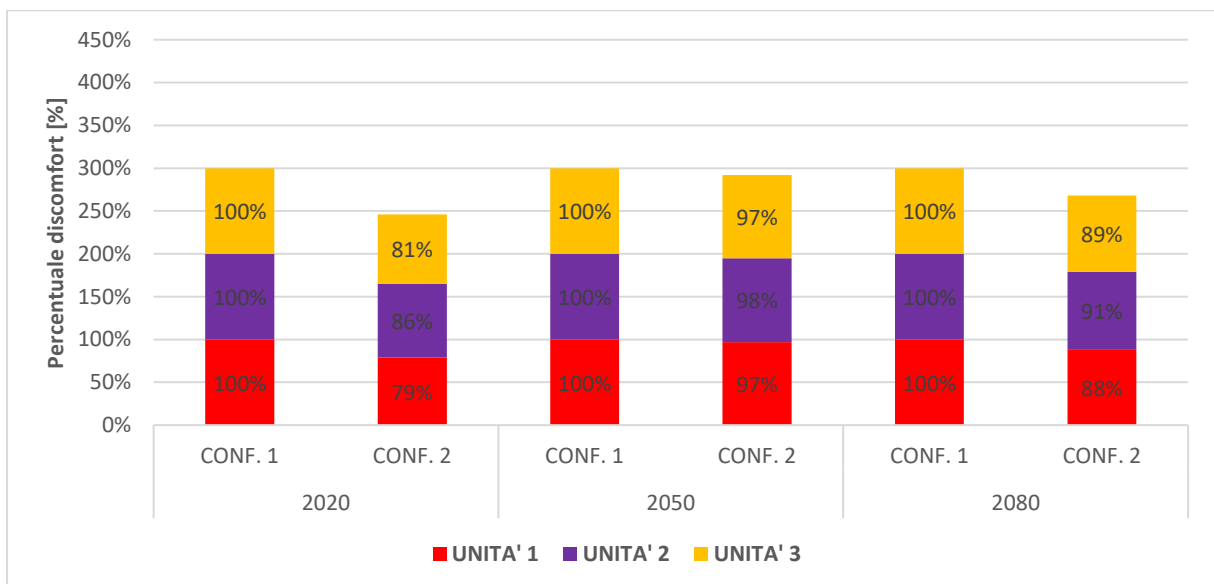


Figura 57: Risultati grafici ogni trent'anni della casa plurifamiliare di tipo nZEB con l'applicazione delle due configurazioni.

5.3.2 Risultati finali delle schermature solari

Nelle tabelle e nei grafici sottostanti sono stati riportati i valori di discomfort in percentuale riferiti alle tre configurazioni di schermature solari scelte applicate al condominio di tipo convenzionale e nZEB.

Considerando le tre configurazioni si può notare che le stesse considerazioni fatte precedentemente valgono anche in questo caso, cioè il 100% di discomfort per i piani intermedi del convenzionale e il 100% di discomfort nella maggior parte dei casi dell'nZEB. Inoltre, si mantiene lo stesso andamento negli anni, di tipo variabile, definito precedentemente.

Per quanto riguarda, invece, le configurazioni, la seconda, ovvero la tenda ultravision bianca, risulta migliore dal punto di vista del comfort termico e visibile nel solo convenzionale, in quanto i valori di discomfort risultano più bassi, invece in riferimento all'nZEB si può dire che la più prestante è la tenda color carbone, ovvero la prima configurazione.

Tabella 55: Valutazione del discomfort per il condominio di tipo convenzionale con l'applicazione delle tre configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.

	2020			2050			2080		
	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 3	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 3	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 3
P.T	57%	56%	55%	98%	58%	98%	66%	66%	66%
P.1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
P.2	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
P.3	75%	75%	75%	97%	72%	97%	88%	88%	88%

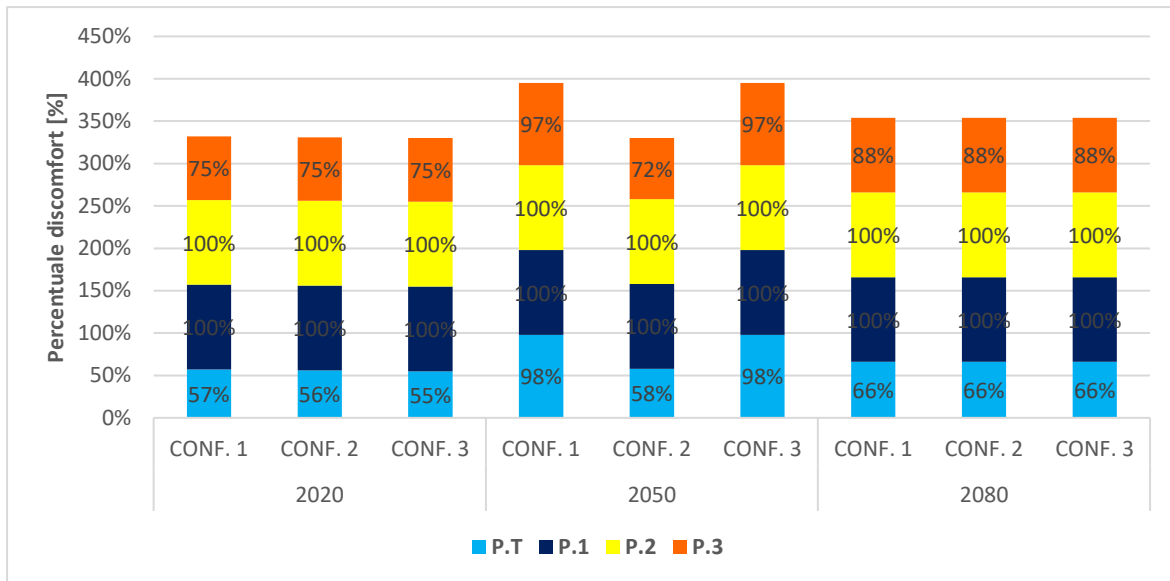


Figura 58: Risultati grafici ogni trent'anni del condominio di tipo convenzionale con l'applicazione delle tre configurazioni.

Tabella 56: Valutazione del discomfort per il condominio di tipo nZEB e con l'applicazione delle tre configurazioni negli anni 2020, 2050 e 2080.

	2020			2050			2080		
	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 3	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 3	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 3
P.T	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
P.1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
P.2	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
P.3	79%	80%	21%	100%	100%	100%	91%	92%	91%

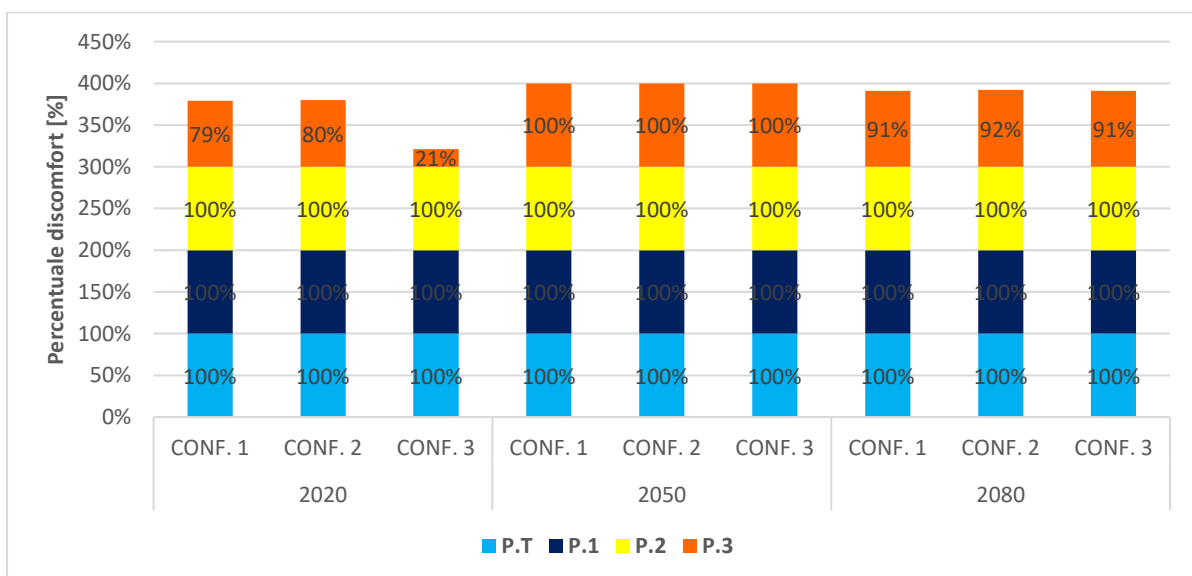


Figura 59: Risultati grafici ogni trent'anni del condominio di tipo nZEB e con l'applicazione delle tre configurazioni

Lo stesso metodo di rappresentazione è stato fatto per la casa plurifamiliare, riportando i valori di discomfort in percentuale riferiti alle tre configurazioni di schermature solari scelte.

In riferimento alle tre configurazioni si può notare che le stesse considerazioni fatte precedentemente valgono anche in questo caso, cioè valori più alti di discomfort per l'Unità 2 del convenzionale e il 100% di discomfort in tutti i casi dell'nZEB. Inoltre, si mantiene lo stesso andamento variabile negli anni, definito precedentemente.

Per quanto riguarda, invece, la soluzione migliore tra le tre configurazioni, dal punto di vista del comfort termico risulta la tenda color carbone, ovvero la prima configurazione ed è visibile nel solo convenzionale, in quanto la percentuale di discomfort risulta più bassa.

Tabella 57: Valutazione del discomfort per la casa plurifamiliare di tipo convenzionale con l'applicazione delle tre configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.

	2020			2050			2080		
	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 3	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 3	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 3
UNITA'1	54%	57%	57%	82%	86%	85%	73%	77%	77%
UNITA'2	71%	74%	74%	96%	97%	97%	91%	93%	93%
UNITA'3	61%	65%	65%	88%	90%	89%	83%	85%	85%

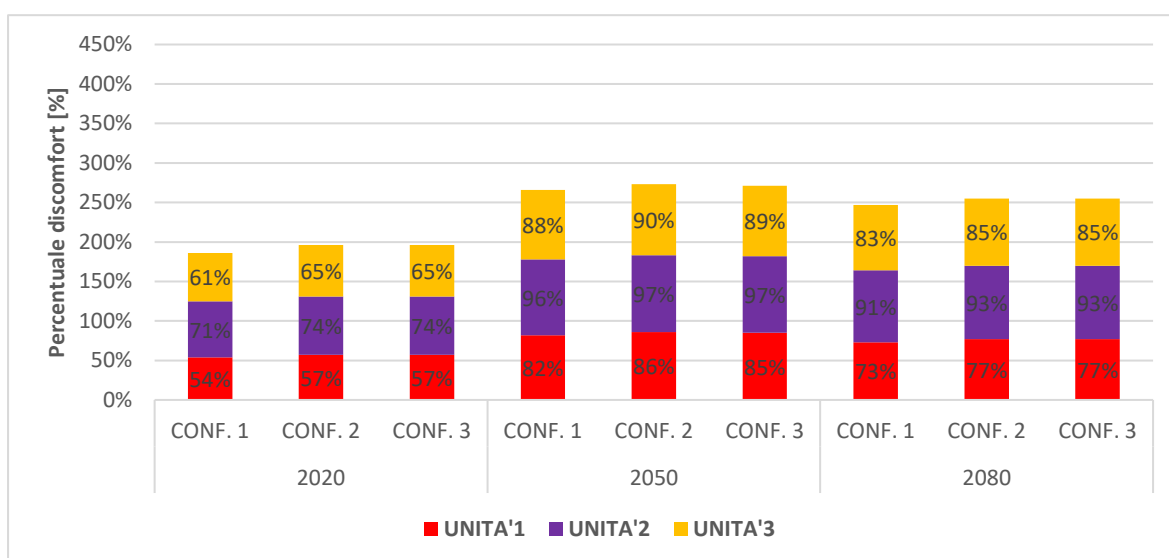


Figura 60: Risultati grafici ogni trent'anni della casa plurifamiliare di tipo convenzionale e con l'applicazione delle tre configurazioni.

Tabella 58: Valutazione del discomfort per la casa plurifamiliare di tipo nZEB con l'applicazione delle tre configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.

	2020			2050			2080		
	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 3	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 3	CONF. 1	CONF. 2	CONF. 3
UNITA'1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
UNITA'2	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
UNITA'3	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

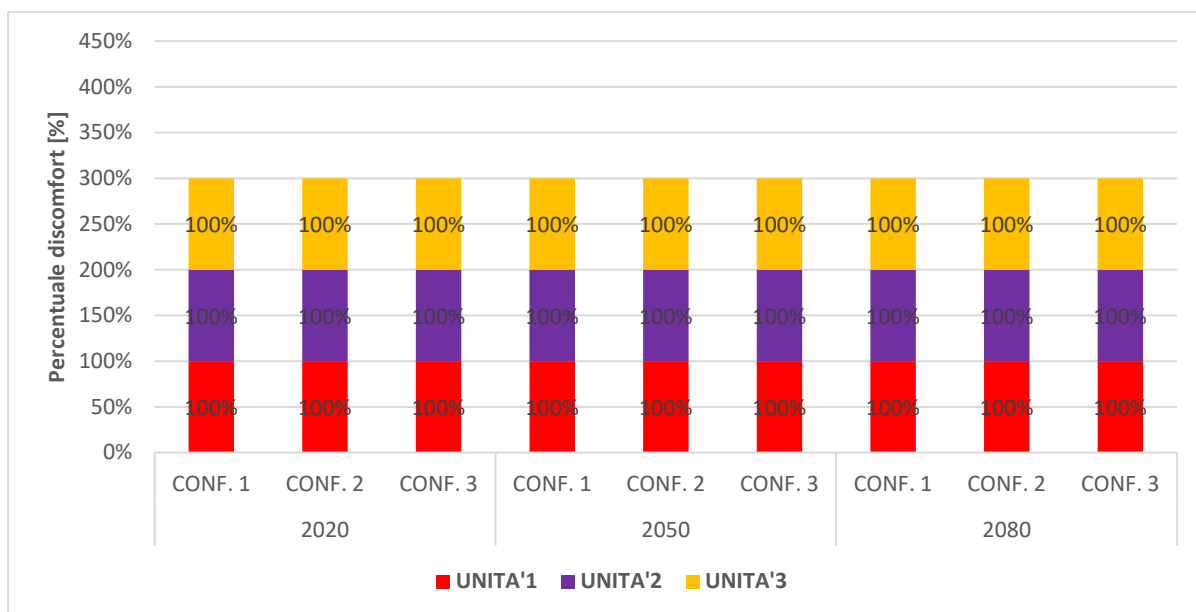


Figura 61: Risultati grafici ogni trent'anni della casa plurifamiliare di tipo nZEB e con l'applicazione delle tre configurazioni.

6. Conclusioni

Come detto nei primi capitoli, lo scopo della seguente tesi è stato quello di valutare il comportamento dei due edifici, oggetto di studio, in relazione ai cambiamenti climatici dei prossimi decenni e analizzarne i benefici a seguito dell'applicazione di soluzioni tecnologiche quali, le vetrate avanzate e le schermature solari.

Sono, quindi, state effettuate delle analisi dinamiche su due edifici, quali un condominio e una casa plurifamiliare, entrambi ad uso residenziale e a sua volta resi edifici *nZEB*, ovvero ad alte prestazioni energetiche e a basso consumo, attraverso interventi di riqualificazione energetica.

Gli edifici sono entrambi siti a Roma, in zona climatica D, e le loro prestazioni sono state valutate a partire dal 2020 e a seguire ogni trent'anni fino al 2080.

La scelta delle soluzioni di raffrescamento ha subito un impatto significativo per effetto della variazione dei dati climatici nel tempo, ciò è dovuto non solo allo scenario futuro ma anche alle soluzioni tecnologiche applicate, alla tipologia di edificio e al contesto in cui quest'ultimo si trova.

È stato importante scegliere, in modo accurato, soluzioni tecnologiche ad alte prestazioni energetiche, differenti anche tra di loro, per poter studiare e prevedere quale sarebbe stato il loro effetto sulla mitigazione e sul cambiamento. L'edificio è stato, quindi, studiato al fine di valutare il fabbisogno termico di raffrescamento, capirne i consumi elettrici prodotti dall'edificio nei tre mesi estivi per poi definirne il benessere degli occupanti al suo interno.

Il primo è stato definito attraverso l'applicazione di un impianto di tipo ideale ottenendo dei risultati che dimostrano come l'*nZEB* assuma dei valori più bassi, quindi migliori, rispetto al classico convenzionale, inoltre per quanto riguarda le soluzioni tecnologiche adottate, alla fine dello studio, risulta migliore una finestra dotata di vetro quadruplo con rivestimento basso-emissivo e selettivo e dotato di una tenda il cui colore e prestazione varia in base al fattore di riduzione dell'ombreggiamento,

dove 1 corrisponde ad un effetto di schermatura nullo e 0 alla totale schermatura. Da ciò viene fuori che la tenda color carbone risulta la più prestante, poiché i valori del fabbisogno termico si presentano più bassi.

Una volta aver ottenuto la potenza termica necessaria per raffrescare l'edificio, si è passati all'analisi dei consumi elettrici, considerando, in tal caso, l'applicazione di un impianto di tipo reale che varia a seconda del tipo di edificio, sia che esso sia convenzionale, sia *nZEB*. Confermando che, anche in questo caso, l'*nZEB* dia dei risultati più bassi, quindi migliori, rispetto al convenzionale, le soluzioni tecnologiche più prestanti risultano, nel corso del tempo, il vetro con rivestimento basso-emissivo e selettivo con applicazione di una tenda color carbone.

In conclusione, è stato importante valutare il benessere dell'individuo all'interno dell'ambiente studiandone il grado di discomfort su base oraria, attraverso il metodo adattivo e in *free floating*, ovvero senza l'applicazione di alcun tipo di impianto. Si riscontra che l'*nZEB*, in tal caso, presenta una percentuale di discomfort nella maggior parte dei casi del 100%, data la presenza di elementi di involucro ad alta efficienza energetica che rendono gli ambienti meno disperdenti. Anche in questo caso per quanto riguarda la vetrata risulta migliore quella con rivestimento basso-emissivo e selettivo mentre per le schermature solari è la tenda color carbone. Ciò è evidente nel solo convenzionale ed è valido per tutto il corso del tempo analizzato.

È fondamentale, inoltre, evidenziare l'andamento dei tre output studiati nel corso del tempo, infatti come si può notare nel grafico della temperatura esterna, riportato in basso, presenta un andamento variabile rispetto alla temperatura termo-igrometrica di setpoint di raffrescamento di 26 °C riportata. In esso, i valori raggiungono una temperatura di 28,11 °C nel mese di Luglio del 2020, diminuiscono fino ad ottenere una temperatura di 22,47°C nel mese di Giugno del 2050 per poi aumentare nuovamente e mantenersi pressoché costante dal mese di Luglio del 2050 fino al mese di Giugno del 2080 e raggiungere infine un picco di 33,73 °C in corrispondenza del mese di Agosto del 2080.

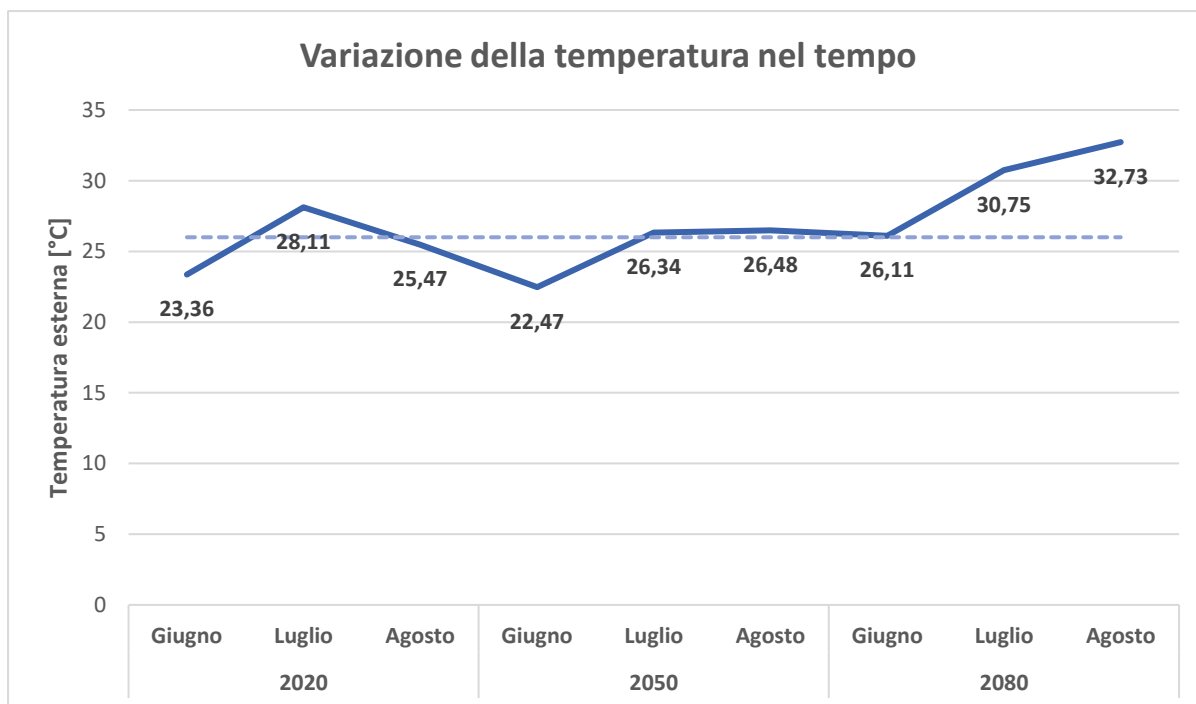


Figura 62: Andamento della temperatura esterna rispetto alla temperatura di setpoint

Per concludere, è importante evidenziare che tali risultati non sono da considerare assoluti poiché variano in funzione del tipo di edificio analizzato, dei dati climatici utilizzati, delle soluzioni tecnologiche adottate, della tipologia impiantistica e dell'esposizione. Ma, a prescindere da ciò, risultano utili per poter capire, nel migliore dei modi, quali siano le scelte più giuste da adottare per migliorare l'impatto della strategia di raffrescamento esaminata, al fine di essere utilizzata come strumento per progettisti futuri nell'ambito della resilienza climatica per l'ambiente costruito.

Lista delle figure

Figura 1: Variazione (in °C) della temperatura media annua della superficie terrestre rispetto ai livelli preindustriali.....	2
Figura 2: Immissione ed estrazione dell'aria. Fonte: Mansarda.it	5
Figura 3: Anomalie calcolate rispetto alla media climatica del trentennio 1981-2010. Fonte: Meteo Expert – IconaClima.....	7
Figura 4: Anomalie calcolate rispetto alla media climatica del trentennio 1981-2010. Fonte: Meteo Expert – IconaClima.....	8
Figura 5: Temperatura estiva media in Italia, dal 1959 al 2021. Fonte: Meteo Expert – IconaClima	8
Figura 6: Schema rappresentativo dell'obiettivo tesi	12
Figura 7: Condominio	13
Figura 8: Modello Casa plurifamiliare	14
Figura 9: Stratigrafia delle strutture opache verticali della Casa plurifamiliare	21
Figura 10: Stratigrafia delle strutture opache verticali del Condominio	22
Figura 11: Stratigrafia delle strutture opache verticali contro terra del Condominio e della Casa plurifamiliare	23
Figura 12: Stratigrafia delle strutture opache orizzontali di pavimento contro terra di entrambi gli edifici	24
Figura 13: Stratigrafia delle strutture opache inclinate di copertura della Casa plurifamiliare	25
Figura 14: Tipologie costruttive dell'involucro opaco- Tetto piano in latero-cemento, in riferimento alla TABULA 2009-2012.....	26
Figura 15: Stratigrafia delle strutture opache inclinate di copertura del Condominio	26
Figura 16: Stratigrafia delle strutture opache orizzontali di separazione di entrambi gli edifici.....	27
Figura 17: Stratigrafia chiusura tecnica opaca per entrambi gli edifici.....	28
Figura 18: Andamento del profilo di occupazione	32

Figura 19:Andamento del profilo di occupazione	32
Figura 20: Esempio di zona termica per il condominio	34
Figura 21: Esempio di zona termica per la casa plurifamiliare	35
Figura 22: Schema funzionale dell'impianto di riscaldamento	36
Figura 23: Schema funzionale dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento	37
Figura 24: Limite di esercizio dell'impianto di riscaldamento fornito dal D.P.R n. 412 del 1993	38
Figura 25 - Schema esplicativo del rapporto tra la trasmissione luminosa e il fattore solare. Fonte: Guidafinestra.	42
Figura 26 - Differenza grafica tra vetro selettivo e vetro basso – emissivo. Fonte: Rivas 1984.	43
Figura 27:Tipologia di finestra con vetro singolo. Fonte: Solarfilm.	44
Figura 28 – Stratigrafia di finestra con vetro doppio e triplo. Fonte: Tigullio Design - Finestre e Porte.	45
Figura 29 - Configurazione 1: Vetro con rivestimento basso-emissivo.....	47
Figura 30 - Configurazione 2: Vetro con rivestimento basso-emissivo e selettivo.....	48
Figura 31: Calcolo del fattore solare totale	56
Figura 32:Fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale del condominio	62
Figura 33:Fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale della casa plurifamiliare.	63
Figura 34: Fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale del condominio con applicazione delle due configurazioni.	65
Figura 35: Fabbisogno termico di raffrescamento per l'nZEB del condominio con applicazione delle due configurazioni.	66
Figura 36: Fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale della casa plurifamiliare con applicazione delle due configurazioni.	67
Figura 37: Fabbisogno termico di raffrescamento per nZEB della casa plurifamiliare con applicazione delle due configurazioni.	68

Figura 38: Fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale del condominio con applicazione delle tre configurazioni.....	69
Figura 39: Fabbisogno termico di raffrescamento per nZEB del condominio con applicazione delle tre configurazioni.....	70
Figura 40: Fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale della casa plurifamiliare con applicazione delle tre configurazioni.	71
Figura 41: Fabbisogno termico di raffrescamento per l'nZEB della casa plurifamiliare con applicazione delle tre configurazioni.....	72
Figura 42: Risultati grafici del modello convenzionale e nZEB del condominio	74
Figura 43: Risultati grafici del modello convenzionale e nZEB della casa plurifamiliare	75
Figura 44: Risultati grafici del modello convenzionale del condominio con l'applicazione delle due configurazioni.	76
Figura 45: Risultati grafici del modello nZEB del condominio con l'applicazione delle due configurazioni.	77
Figura 46: Risultati grafici del modello convenzionale della casa plurifamiliare con l'applicazione delle due configurazioni.	78
Figura 47: Risultati grafici del modello nZEB della casa plurifamiliare con l'applicazione delle due configurazioni.	78
Figura 48: Risultati grafici del modello convenzionale del condominio con l'applicazione delle tre configurazioni.....	79
Figura 49: Risultati grafici del modello nZEB del condominio con l'applicazione delle tre configurazioni	80
Figura 50: Risultati grafici del modello convenzionale della casa plurifamiliare con l'applicazione delle tre configurazioni.....	81
Figura 51: Risultati grafici del modello nZEB della casa plurifamiliare con l'applicazione delle tre configurazioni.....	81
Figura 52: Risultati grafici ogni trent'anni del condominio di tipo convenzionale e nZEB.	85

Figura 53: Risultati grafici ogni trent'anni della casa plurifamiliare di tipo convenzionale e nZEB.	85
Figura 54: Risultati grafici ogni trent'anni del condominio di tipo convenzionale con l'applicazione delle due configurazioni.	87
Figura 55: Risultati grafici ogni trent'anni del condominio di tipo nZEB con l'applicazione delle due configurazioni.	88
Figura 56: Risultati grafici ogni trent'anni della casa plurifamiliare di tipo convenzionale con l'applicazione delle due configurazioni.	89
Figura 57: Risultati grafici ogni trent'anni della casa plurifamiliare di tipo nZEB con l'applicazione delle due configurazioni.	89
Figura 58: Risultati grafici ogni trent'anni del condominio di tipo convenzionale con l'applicazione delle tre configurazioni.....	91
Figura 59: Risultati grafici ogni trent'anni del condominio di tipo nZEB e con l'applicazione delle tre configurazioni.....	91
Figura 60: Risultati grafici ogni trent'anni della casa plurifamiliare di tipo convenzionale e con l'applicazione delle tre configurazioni.....	92
Figura 61: Risultati grafici ogni trent'anni della casa plurifamiliare di tipo nZEB e con l'applicazione delle tre configurazioni.....	93
Figura 62: Andamento della temperatura esterna rispetto alla temperatura di setpoint	96

Lista delle tabelle

Tabella 1: Valore massimo ammissibile del coefficiente globale di scambio termico (Appendice A)	16
Tabella 2: Valore massimo ammissibile del rapporto tra area solare equivalente estiva dei componenti finestrati e a l'area della superficie utile $A_{sol, est}/A_{sup, utile}$	17
Tabella 3: Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra	17
Tabella 4: Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno, di ambienti non climatizzati o contro terra	18
Tabella 5: Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno degli ambienti non climatizzati	18
Tabella 6: Trasmittanza termica U delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati ..	18
Tabella 7: Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali e orizzontali di separazione tra edifici o unità immobiliari confinati	19
Tabella 8: Valore del fattore di trasmissione solare totale per componenti finestrati con orientamento da Est a Ovest passando per Sud	19
Tabella 9: Efficienze medie del sottoinsieme di utilizzazione dell'edificio di riferimento per i servizi di H, C, W	19
Tabella 10: Efficienze medie dei sottosistemi di generazione dell'edificio di riferimento per la produzione di energia termica per i servizi di H, C, W e per la produzione di energia elettrica in situ	20
Tabella 11: Proprietà termo-fisiche del materiale	21
Tabella 12: Proprietà termo-fisiche del materiale	22
Tabella 13: Proprietà termo-fisiche del materiale	23
Tabella 14: Proprietà termo-fisiche del materiale	24
Tabella 15: Proprietà termo-fisiche del materiale	25
Tabella 16: Proprietà termo-fisiche del materiale	27

Tabella 17: Proprietà termo-fisiche del materiale	28
Tabella 18: Proprietà termo-fisiche del materiale	28
Tabella 19: Dati di input del Modello nZEB	29
Tabella 20: Dati di input del Modello Convenzionale	29
Tabella 21: Profilo di occupazione ad uso residenziale.....	31
Tabella 22: Dati di input del modello convenzionale (vetro + schermature)	40
Tabella 23: Dati di input del modello nZEB (vetro + schermature).....	40
Tabella 24: Classificazione prestazionale e influenza di g_{tot} sul comfort termico.....	54
Tabella 25: Dati energetici forniti dalle schede tecniche	57
Tabella 26: Dati energetici forniti dalle schede tecniche	58
Tabella 27: Configurazioni delle tende solari esterne scelte del modello convenzionale	59
Tabella 28: Configurazioni delle tende solari esterne scelte del modello nZEB	60
Tabella 29: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale e nZEB nel condominio	62
Tabella 30: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per il convenzionale e nZEB nella casa plurifamiliare.	63
Tabella 31: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le due configurazioni del convenzionale nel condominio.	64
Tabella 32: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le due configurazioni del nZEB nel condominio.....	65
Tabella 33: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le due configurazioni del convenzionale nella casa plurifamiliare	66
Tabella 34: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le due configurazioni del nZEB nella casa plurifamiliare	67
Tabella 35: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le tre configurazioni del convenzionale nel condominio	69

Tabella 36: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le tre configurazioni del nZEB nel condominio.	70
Tabella 37: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le tre configurazioni del convenzionale nella casa plurifamiliare.	71
Tabella 38: Dati relativi agli anni 2020,2050,2080 del fabbisogno termico di raffrescamento per le tre configurazioni del nZEB nella casa plurifamiliare	72
Tabella 39: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello convenzionale e nZEB del condominio estrapolati da EnergyPlus.....	74
Tabella 40: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello convenzionale e nZEB della casa plurifamiliare estrapolati da EnergyPlus	74
Tabella 41: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello convenzionale del condominio con applicazione delle due configurazioni estrapolati da EnergyPlus.....	76
Tabella 42: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello nZEB del condominio con applicazione delle due configurazioni estrapolati da EnergyPlus.	76
Tabella 43: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello convenzionale della casa plurifamiliare con applicazione delle due configurazioni estrapolati da EnergyPlus. .	77
Tabella 44: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello nZEB della casa plurifamiliare con applicazione delle due configurazioni estrapolati da EnergyPlus. .	78
Tabella 45: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello convenzionale del condominio con applicazione delle tre configurazioni estrapolati da EnergyPlus.	79
Tabella 46: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello nZEB del condominio con applicazione delle tre configurazioni estrapolati da EnergyPlus	80
Tabella 47: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello convenzionale della casa plurifamiliare con applicazione delle tre configurazioni estrapolati da EnergyPlus....	80
Tabella 48: Risultati degli anni 2020,2050 e 2080 del modello nZEB della casa plurifamiliare con applicazione delle tre configurazioni estrapolati da EnergyPlus....	81
Tabella 49: Valutazione del discomfort per il condominio di tipo convenzionale e nZEB negli anni 2020,2050 e 2080.	84

Tabella 50: Valutazione del discomfort per la casa plurifamiliare di tipo convenzionale e nZEB negli anni 2020,2050 e 2080.	85
Tabella 51: Valutazione del discomfort per il condominio di tipo convenzionale con l'applicazione delle due configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.	87
Tabella 52: Valutazione del discomfort per il condominio di tipo nZEB con l'applicazione delle due configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.	87
Tabella 53: Valutazione del discomfort per la casa plurifamiliare di tipo convenzionale con l'applicazione delle due configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.	88
Tabella 54: Valutazione del discomfort per la casa plurifamiliare di tipo nZEB con l'applicazione delle due configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.	89
Tabella 55: Valutazione del discomfort per il condominio di tipo convenzionale con l'applicazione delle tre configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.	90
Tabella 56: Valutazione del discomfort per il condominio di tipo nZEB e con l'applicazione delle tre configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.	91
Tabella 57: Valutazione del discomfort per la casa plurifamiliare di tipo convenzionale con l'applicazione delle tre configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.	92
Tabella 58: Valutazione del discomfort per la casa plurifamiliare di tipo nZEB con l'applicazione delle tre configurazioni negli anni 2020,2050 e 2080.	93

Bibliografia

Legislazione

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del mare, Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti, Ministero della semplificazione e la pubblica amministrazione, Decreto del Presidente della Repubblica 26 Agosto 1993, n. 412. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 Gennaio 1991, n. 10.

Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea. Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia, (2010). Testo coordinato con Direttiva 2018/844/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 Maggio 2018.

Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 Maggio del 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.

ENEA, IRSE, CTI, Ministero dello sviluppo economico. PANZEB - Piano d' Azione Nazionale per incrementare gli edifici di energia quasi zero. (2015) 3-4.

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del mare, Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti, Ministero per la semplificazione e la pubblica amministrazione, Decreto interministeriale 26 Giugno 2015 - Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, Gazzetta Ufficiale (2015).

ENEA - AGENZIA NAZIONALE EFFICIENZA ENERGETICA - Schermature solari e chiusure oscuranti. Art.14 del Decreto Legislativo 63/2013 e ss.mm.ii

Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia. - Allegato M del DECRETO LEGISLATIVO 29 dicembre 2006, n. 311.

Normativa tecnica

Ente Italiano di Normazione, UNI EN 16798-1:2018. Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica. - Modulo M1-6.

Ente Italiano di Normazione, UNI EN 13561:2015. Tende esterne e tendoni - Requisiti prestazionali compresa la sicurezza.

Ente Italiano di Normazione, UNI EN 13659:2015. Chiusura oscuranti e tende alla veneziana esterne - Requisiti prestazionali compresa la sicurezza.

Ente Italiano di Normazione, UNI EN 14501:2021. Tende e chiusure oscuranti - Benessere termico e visivo - Caratteristiche prestazionali e classificazione.

Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 55022-1:2018. Prestazione energetica degli edifici - Proprietà termiche, solari e luminose di componenti ed elementi edilizi. Parte 1: Metodo di calcolo semplificato delle caratteristiche luminose e solari per dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate.

Articoli scientifici

Balocco, V. - Cambiamento climatico: cos'è, cause, conseguenze e soluzioni del Climate Change. NETWORK DIGITAL 360 (2021).

Betti, G. - Le ondate di calore in Italia, oggi e negli anni a venire. Il Mulino (2021).

Abelli, S. - Estate 2021 in Italia: la seconda più calda al Sud, e la più seccata in assoluto a Nord-Est. ICONA CLIMA (2021).

David R., Guidi A., - Fact-checking: i cambiamenti climatici in 10 grafici. ISPI – Istituto per gli studi di politica internazionale (2021) 2-11.

Tamellini L., - Resilienza climatica: le città. – Mi Post Division of Mondo Internazionale APS (2021) 3-5.

Bartoli, B. - Strategie di protezione dei guadagni termici (2017).

Zhang, C., Kazanci, O.B., Levinson, R., Heiselberg, P., Olesen, B.W., Chiesa, G., Sodagar, B., Ai, Z., Selkowitz, S., Zinzi, M., Mahdavi, A., Teufel, H., Kolokotroni, M., Salvati, A., Bozonnet, E., Chtioui, F., Salagnac, P., Rahif, R., Attia, S., Lemort, V., Elnagar, E., Breesch, H., Sengupta, A., Wang, L.L., Qi, D., Stern, P., Yoon, N., Bogatu, D.I., Rupp, R.F., Arghand, T., Javed, S., Akander, J., Hayati, A., Cehlin, M., Sayadi, S., Forghani, S., Zhang, H., Arens, E., Zhang, G. - Resilient cooling strategies – a critical review and qualitative assessment. Energy and Buildings 251 (2021) 2-5.

Incarnato, M. - Differenza tra vetrocamera, basso - emissivo e selettivo. LAVORINCASA.IT (2022).

De Luca, G. - Schermature solari: quali sono le migliori soluzioni. BibLus-net (2021) 2-4.

Zinzi, M., Agnoli, S., Fasano, G. - Comparazione tra standard e strumenti di calcolo per le prestazioni solari e luminose di componenti vetrati con accoppiamento di schermature solari. ENEA, Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile. (2014) 5-15.

Casalena, A.U., - Indici di Comfort Termico: Fanger PMV, Modello Adattivo e Diagramma Bioclimatico di Givoni. MyGreenBuildings.org. (2022).

Azzolino M.C., Piccablotto G., Gruppo A., Piccirillo B., - Valutazione del comfort adattivo in un edificio residenziale in assenza di climatizzazione estiva. neo – Eubios 73. (2020) Settembre.

Documenti

Commissione europea – Missione adattamento ai cambiamenti climatici compresa la trasformazione della società. Accelerare la transizione verso un'Europa preparata e resiliente al clima.

Annex 80 IEA EBC. 2018. IEA EBC Annex 80 on Resilient Cooling for Residential and Small Non-Residential Buildings - Annex Text, 1-13.

Corrado, V., Ballarini, I., Corgnati, S.P. - Building Typology Brochure - Italy - Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana (2014) 21-22.

Infissi & Persiane. Come scegliere i vetri per gli infissi di casa. 2-5, 8-11.

AGC Glass Europe. PLANIBEL AND IPLUS, glass for home appliances and commercial refrigeration equipment. 5-7.

Quintavalle, C. - Catalogazione delle schermature solari, analisi della loro influenza su un modello ideale e su un edificio esistente con validazione dei metodi di calcolo - Tesi di laurea Magistrale (2011).

Poggi, C. - Le dimensioni dell'ombra. Progettazione di schermi solari in area climatica mediterranea. - Tesi di laurea Magistrale (2011).

Zecca, D. - Le schermature solari per l'efficienza energetica- ISTITUTO GIORDANO.

Sitografia

Hausfather, Z. - Explainer: How “Shared Socioeconomic Pathways” explore future climate change. - <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change/>

Ippcc focal point for Italy - CLIMATE CHANGE 2021 - Le basi fisico-scientifiche: il rapporto spiegato dagli scienziati italiani. - <https://ipccitalia.cmcc.it/climate-change-2021-il-rapporto-spiegato-dagli-scientziati-italiani/>

ENEA – Agenzia Nazionale Efficienza Energetica – Sistema di raffrescamento passivo. - <https://www.energiaenergetica.enea.it/servizi-per/cittadini/interventi-di-efficienza-e-risparmio-energetico-nelle-abitazioni/impianti/raffrescamento/tecnologie-e-etichetta-energetica-raffrescamento/sistemi-di-raffrescamento-passivo.html>

IEA EBC Annex 80 - Resilient Cooling for Buildings - <https://annex80.iea-ebc.org/>

Design Builder - <https://designbuilder.co.uk/>

Glass Configurator - <https://www.agc-yourglass.com/configurator/app/request>

AGC Glass Europe - <https://www.agc-glass.eu/en>

Semonella, M. - Vetro Basso-Emissivo: caratteristiche, prezzi e come riconoscerlo - <https://www.finestreantirumore.it/vetro-basso-emissivo/>

Iommi Architetti - Sull’evoluzione delle schermature solari - <http://www.iommiarchitetti.it/schermature-solari-01>

Nextville: Energie Rinnovabili ed Efficienza Energetica - Involucro degli edifici: schermature solari - https://www.nextville.it/Involucro_degli_edifici/76/Schermature_solari

ES-SDA European Solar Shading Database - <https://www.es-so-database.com/index.php>

MERMET: SUN CONTROL TEXTILES - <https://www.sunscreen-mermet.com/who-are-we.html>

HELIOSCREEN - <https://www.helioscreen.com/en/home/>

Copaco: Screenweavers - <https://www.copaco.be/>

EnergyPlus - <https://energyplus.net/>

Bigladder software - <https://bigladdersoftware.com/projects/elements/>

Ringraziamenti

Due ragazze qualunque, una calabrese e una siciliana, ritrovatesi un giorno per caso nella stessa casa per studenti...chi lo avrebbe mai detto che da allora non ci saremmo più separate?

Due ragazze opposte, una calma e paziente, l'altra ansiosa e frettolosa ma comunque due lati caratteriali che si sono incastrati perfettamente. Un legame che difficilmente il tempo potrà sciogliere perché per quasi 10 anni delle nostre vite siamo state l'una la famiglia dell'altra passando da una città vicino casa ad una dall'altra parte dell'Italia, Torino, che ha scombuscolato completamente le nostre abitudini. Entrambe sapevamo che sarebbe stato difficile, in particolare perché siamo state lontane dai nostri affetti più cari, la famiglia, i nipoti, gli amici e l'amore, lontane dal nostro mare che tanto amiamo e dalle nostre belle Terre. Questo non ci ha permesso di mollare, sapevamo di essere insieme e che la nostra tenacia, prontezza e sostegno ci avrebbero portate fino alla fine. Questa non è stata altro che una sfida per noi, ci siamo messe in gioco e, nonostante non siamo riuscite a godercelaa pieno in presenza, abbiamo continuato a lavorare insieme, non solo in merito alle materiema anche alla tesi finale. È stato un percorso lungo e faticoso ma che non abbiamo mai mollato grazie all'aiuto che ci siamo date l'una all'altra, materia dopo materia, ostacolo dopo ostacolo ma noi sempre in piedi e forti. Il tutto lo dobbiamo anche alle nostre famiglie che ci sono sempre state accanto, dandoci il sostegno giusto per andare avanti, se non fosse stato per loro non saremmo arrivate fin qui.

Oggi il nostro percorso universitario giunge al capolinea e, nonostante da adesso in poi le nostre strade si divideranno, sapremo sempre di poter contare l'una sull'altra. Dedichiamo quindi a noi e alla nostra tenacia nel non mollare mai, questo incredibile traguardo, che sia la conclusione di un percorso importante e l'inizio di un mondo nuovo e pieno di soddisfazioni come sappiamo di meritare.

Ovunque saremo la parola "INSIEME" ci accompagnerà sempre.

Martina & Luisa