
Clima di domani: linee guida per l'edilizia Sud delle Alpi precursore

TicinoEnergia



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Ufficio federale delle abitazioni UFAB

Ufficio federale dell'energia UFE



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Un progetto realizzato nel quadro del programma pilota ai cambiamenti climatici, sostenuto dall'Ufficio federale delle abitazioni UFAB e dall'Ufficio federale dell'energia UFE

Colophon

Editore

Ufficio federale delle abitazioni UFAB
Hallwylstrasse 4, 3003 Berna
Tel. +41 58 480 91 11
info@bwo.admin.ch, www.bwo.admin.ch

Download

www.ufab.admin.ch

Ente coordinatore

Associazione TicinoEnergia
Cá Bianca, Via San Giovanni 10, 6500 Bellinzona
www.ticinoenergia.ch

Autori

Luca Pampuri, Associazione TicinoEnergia
Fabrizio Noembrini, Associazione TicinoEnergia
Marta Poretti, IFEC Ingegneria SA
Giorgio Pansa, IFEC Ingegneria SA
Erika Saretta, ISAAC-SUPSI
Davide Zepponi, Veragouth SA

Gruppo di accompagnamento

Michele Fasciana, UACER, Cantone Ticino
Giacomo Veragouth, Veragouth SA
Luigi Conforto, Comune di Locarno
Angelo Bernasconi, IFEC Ingegneria SA
Pierluigi Bonomo, ISAAC-SUPSI
Marco Thomas, Comune di Faido

Finanziamento

Ufficio federale delle abitazioni UFAB
Ufficio federale dell'energia UFE

Citazione

TicinoEnergia (2023). Clima di domani: linee guida per l'edilizia. Sud delle Alpi precursore. Ufficio federale delle abitazioni, Berna.

Note

Questo rapporto è disponibile in italiano. La sintesi è disponibile in italiano, in tedesco e in francese.

Il rapporto espone il parere degli autori. Esso non corrisponde necessariamente a quello dei mandanti.

Illustrazione di copertina

© DDPS

Riassunto

Il progetto "Clima di domani: linee guida per l'edilizia, Sud delle Alpi precursore" ha l'obiettivo principale di indagare possibili risposte in ambito edile al cambiamento climatico in corso. In particolare, oltre a determinare le caratteristiche costruttive che favoriscono l'adattamento nel tempo dell'edificio (nuovo e risanato) ai cambiamenti climatici, si sono individuati nuovi approcci progettuali per adattare le prassi vigenti a climi più caldi rispetto a quelli odierni.

Per raggiungere questo obiettivo sono stati selezionati degli edifici aventi funzionalità e caratteristiche differenti tra loro che, nel loro insieme, risultano essere rappresentativi del parco immobiliare regionale sia a livello architettonico, sia come destinazione d'uso. La metodologia utilizzata ha permesso di modellare circa 350 edifici per ogni categoria (residenziale, scolastico, amministrativa) variandone parametri costruttivi, gestionali e impiantistici. Per ogni edificio sono state effettuate simulazioni con dati meteorologici di tre località distinte. I risultati di queste parametrizzazioni hanno mostrato come una buona performance dal punto di vista energetico e in termini di comfort non dipenda unicamente dalle scelte progettuali effettuate su singoli elementi, ma dalla loro combinazione. Alcuni di questi elementi risultano essere parametri per i quali è stata identificata una marcata sensibilità in relazione ai risultati analizzati. Fra questi le superfici vetrate, la cui quota ridotta, assieme all'utilizzo di protezioni solari esterne automatizzate, favorisce un efficace controllo dei guadagni solari, riducendo quindi il rischio di surriscaldamento durante il periodo estivo e nelle mezze stagioni. Altri parametri, quali un'inerzia termica accresciuta così come una ventilazione notturna, risultano essere degli importanti aiuti nella limitazione dei momenti di discomfort. Infine, pur dedicando l'attenzione necessaria agli altri parametri progettuali, l'installazione di impianti di raffreddamento e deumidificazione risulta spesso necessaria per garantire adeguati livelli di comfort nello scenario climatico futuro per il Sud delle Alpi.

Le diverse caratteristiche devono in ogni caso essere valutate e combinate opportunamente, mantenendo una visione d'insieme e prestando attenzione al contesto progettuale. In questo ambito il periodo estivo avrà un impatto sempre più importante, ridefinendo in parte gli attuali equilibri e i conseguenti approcci. Uno sviluppo in questo senso potrebbe essere il fatto di calcolare il bilancio energetico considerando contemporaneamente sia il fabbisogno estivo che quello invernale.

Zusammenfassung

Das Projekt "Clima di domani: linee guida per l'edilizia, Sud delle Alpi precursore" (Klima von morgen: Leitlinien für das Bauen, Vorläufer südlich der Alpen) hat das Hauptziel, mögliche Reaktionen im Gebäudesektor auf den laufenden Klimawandel zu untersuchen. Neben der Bestimmung von Konstruktionsmerkmalen, die die Anpassung von (neuen und renovierten) Gebäuden an den Klimawandel im Laufe der Zeit begünstigen, wurden insbesondere neue Planungsansätze ermittelt, um die derzeitige Vorgehensweise an wärmere Klimazonen als heute anzupassen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden Gebäude mit unterschiedlichen Nutzungen und Eigenschaften ausgewählt, die in ihrer Gesamtheit sowohl architektonisch als auch in Bezug auf die Nutzung repräsentativ für den regionalen Gebäudebestand sind. Die angewandte Methode ermöglichte es, für jede Kategorie (Wohngebäude, Schulen, Verwaltungsgebäude) etwa 350 Gebäude zu modellieren, indem ihre Bau-, Betriebs- und Gebäudetechnikparameter variiert wurden. Für jedes Gebäude wurden Simulationen mit meteorologischen Daten von drei verschiedenen Standorten durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Parametrisierung haben gezeigt, dass eine gute Performance in Bezug auf Energie und Komfort nicht nur von der Wahl der einzelnen Elemente abhängt, sondern auch von deren Kombination. Einige dieser Elemente erweisen sich als Parameter, für die eine ausgeprägte Sensibilität in Bezug auf die analysierten Ergebnisse festgestellt wurde. Dazu gehören verglaste Flächen, deren geringere Fläche in Verbindung mit dem Einsatz eines automatisierten außenliegenden Sonnenschutzes eine wirksame Kontrolle der Sonneneinstrahlung begünstigt und so die Gefahr einer Überhitzung im Sommer und in der Übergangszeit verringert. Andere Parameter wie eine erhöhte Speichermasse und eine natürliche Nachtauskühlung sind wichtige Hilfsmittel zur Begrenzung der Unbehaglichkeit. Schließlich ist die Installation von Kühl- und Entfeuchtungssystemen oft

unerlässlich, um einen angemessenen Komfort im zukünftigen Klimaszenario für die Alpensüdseite zu gewährleisten, auch wenn den anderen Planungsparametern die nötige Aufmerksamkeit gewidmet wird.

Die verschiedenen Eigenschaften müssen in jedem Fall angemessen bewertet und kombiniert werden, wobei der Gesamtüberblick zu wahren und der Projektkontext zu berücksichtigen ist. In diesem Zusammenhang wird die Sommerperiode immer einschneidendere Auswirkungen haben und die derzeitigen Gleichgewichte und die daraus resultierenden Ansätze teilweise neu definieren. Insbesondere wird davon ausgegangen, dass die Berechnung der Energiebilanz in Zukunft gleichzeitig den Sommer- als auch den Winterbedarf berücksichtigen wird.

Résumé

Le projet "Clima di domani: linee guida per l'edilizia, Sud delle Alpi precursore" vise à développer de nouvelles stratégies de construction et de conception efficaces pour répondre aux futures difficultés de l'habitat liées au changement climatique actuellement en cours. En particulier, en plus de déterminer les caractéristiques de construction qui favorisent l'adaptation des bâtiments (neufs et rénovés) au changement climatique dans le temps, de nouvelles approches conceptuelles ont été identifiées afin d'adapter les pratiques existantes à des climats plus chauds.

Pour atteindre cet objectif, ont été sélectionnés des bâtiments ayant des fonctions, des caractéristiques et des contextes urbains différents, qui, on considère être représentatifs du parc immobilier régional en termes d'architecture et d'utilisation. La méthodologie utilisée a permis de modéliser environ 350 bâtiments pour chaque catégorie (résidentiel, scolaire, administratif) en faisant varier leurs paramètres de construction, de gestion et d'installation. Pour chaque bâtiment, des simulations ont été effectuées avec des données météorologiques provenant de trois endroits distincts. Les résultats de ces paramétrages ont montré qu'une bonne performance en termes d'énergie et de confort ne dépend pas uniquement des choix de conception effectués sur les éléments individuels, mais de leur combinaison. Certains de ces éléments s'avèrent être des paramètres pour lesquels une sensibilité marquée a été identifiée par rapport aux résultats analysés. Il s'agit notamment de surfaces vitrées, dont la surface réduite, associée à l'utilisation de protections solaires extérieures automatisées, favorise un contrôle efficace des apports solaires, réduisant ainsi le risque de surchauffe pendant l'été et la mi-saison. D'autres paramètres, comme l'inertie thermique accrue ainsi que la ventilation nocturne, sont d'importants supports pour limiter le manque de confort. Enfin, tout en consacrant l'attention nécessaire aux autres paramètres de conception, l'installation de systèmes de refroidissement et de déshumidification est souvent indispensable afin de garantir des niveaux de confort adéquats dans le futur scénario climatique aux Sud des Alpes.

Les différentes caractéristiques doivent en tout cas être évaluées et combinées de manière appropriée, en conservant une vue d'ensemble et en prêtant attention au contexte du projet. Dans ce contexte, la période estivale aura un impact de plus en plus incisif, redéfinissant en partie les équilibres actuels et les approches conséquentes. On suppose notamment qu'à l'avenir, le calcul du bilan énergétique devra tenir compte des besoins énergétiques d'été et d'hiver en même temps.

Summary

The aim of the project "Clima di domani: linee guida per l'edilizia, Sud delle Alpi precursore" was developing new efficient building and design strategies to respond to future critical living situations caused by the ongoing climate change. In addition to determining the construction characteristics that favour the adaptation of buildings (new and renovated) to climate change over time, new design approaches were identified to adjust current practices to warmer climates.

For this purpose, buildings with different functions and characteristics were selected which, taken as a whole, are representative of the regional building stock from both an architectural and a destination of use point of view. The used methodology allowed to model about 350 buildings for each category (residential, educational,

administrative) by varying their construction, management and technical parameters. For each building, simulations were made using meteorological data from three different locations.

The results of these parameterisations showed how a good performance in terms of energy and comfort does not depend solely on the design choices made for individual elements, but on their combination. Some of these elements resulted to be parameters with a marked sensitivity with respect to the analysed results. These include transparent surfaces, whose reduced surface area, together with the use of automated external solar shading, allow for an effective control of solar gains, thus reducing the risk of overheating during the summer and mid-seasons.

Other parameters, such as increased thermal inertia as well as night ventilation, are important aids in limiting discomfort. Finally, although dedicating the necessary attention to the other design parameters, the installation of cooling and dehumidification systems is often indispensable to guarantee adequate comfort levels in the future climatic scenario for the Southern Alps.

The different characteristics must in any case be evaluated and combined appropriately, maintaining an overall view and paying attention to the context of the project. Indeed, the summer period will have an increasingly incisive impact, partly redefining the current energy balances and consequent energy saving approaches. In particular, we assume that in the future the calculation of the energy balance will contemplate both summer and winter requirements simultaneously.

Indice

1	Introduzione	8
2	Studi di letteratura.....	10
3	Struttura e metodologia delle simulazioni.....	12
3.1	La metodologia utilizzata	12
3.1.1	La valutazione del comfort: il benessere adattivo.....	13
3.1.2	La valutazione dei consumi energetici.....	15
3.1.3	Machine learning	15
3.1.4	I dati di output (valori giornalieri).....	18
3.2	Le località e il clima.....	19
3.2.1	Clima di riferimento	19
3.2.2	Clima attuale	19
3.2.3	Clima futuro.....	20
3.3	La modellazione degli edifici.....	22
3.3.1	Gli edifici di riferimento e i parametri variati.....	22
3.3.2	Zone termiche	23
3.3.3	Profili di occupazione e carichi interni	24
3.3.4	Le caratteristiche dell'involucro.....	24
3.3.5	La gestione delle protezioni solari	25
3.3.6	La ventilazione	25
3.4	Le correzioni apportate alla simulazione con la rete neurale Multilayer perceptron	26
3.5	Output	28
4	Risultati	30
4.1	Edifici residenziali	31
4.2	Edifici scolastici.....	39
4.3	Edifici Amministrativi	45
5	Innovazioni tecnologiche	50
5.1	Rendere più efficiente il raffreddamento di un edificio	50
5.2	Superfici opache dell'involucro edilizio	50
5.2.1	Tetti freddi	51
5.2.2	Vernici riflettenti	52
5.3	Superfici finestrate	52
5.4	Ventilazione interna	53
5.5	Isolamento termico	53
5.6	Gestione dinamica dello scambio termico negli edifici	53
5.6.1	Vetri a prestazioni dinamiche.....	53
5.6.2	Isolamento a prestazioni variabili	55
5.6.3	Conclusione	56

6	Lessons learned	58
7	Suggerimenti per adeguamenti normativi.....	60
8	Conclusioni	61
9	Possibili sviluppi futuri dello studio	62
	Annessi	63

1 Introduzione

I cambiamenti climatici si manifestano sempre più frequentemente in tutto il globo. Nonostante da alcuni questo tema venga ancora considerato lontano in termini sia geografici che temporali, si tratta invece di un fenomeno che riguarda anche il nostro Paese. Infatti, i dati climatici della regione alpina evidenziano questo mutamento: se la temperatura media globale dalla fine del 19° secolo ad oggi è aumentata di 0.9°C, in Svizzera essa è cresciuta di ben 2.0°C. Le conseguenze di questo incremento sono molteplici: le ondate di caldo e le forti precipitazioni sono più frequenti ed intense, i periodi di freddo più rari e il volume dei ghiacciai si è ridotto drasticamente. Per questi motivi è fondamentale non trascurare il cambiamento climatico in Svizzera; al contrario, è necessaria una risposta politica per mitigare i cambiamenti in atto. A questo scopo, la Confederazione ha avviato nel 2013 il programma pilota "Adattamento ai cambiamenti climatici" che descrive le strategie di adattamento della Svizzera alle variazioni climatiche previste. La prima fase del programma, conclusasi nel 2017, comprendeva un totale di 31 progetti. Nella seconda fase del programma, attualmente in corso, sono stati selezionati 50 progetti collocati su tutto il territorio svizzero, sotto la supervisione ed il sostegno dell'Ufficio federale dell'Ambiente. È in questo contesto che si inserisce il progetto "Clima di domani: linee guida per l'edilizia, Sud delle Alpi precursore", promosso dall'Associazione TicinoEnergia in collaborazione con numerosi partner istituzionali e privati. Questo progetto nasce in quanto, considerando la situazione geo-climatica regionale così come il cambiamento climatico già in atto, le normative attualmente vigenti potrebbero non essere adatte a garantire le migliori condizioni di benessere all'interno degli edifici. Al fine di contenere l'impatto ambientale del parco immobiliare, riducendo i consumi energetici e garantendo al contempo il comfort interno durante il periodo estivo, risulta quindi essenziale sviluppare nuove strategie costruttive e progettuali che rispondano alle future criticità dell'abitare.

Il progetto, della durata di tre anni, ha l'obiettivo di identificare degli approcci progettuali per garantire il benessere interno durante i sempre più caldi mesi estivi contenendone, contestualmente, il fabbisogno energetico. Ciò è stato possibile definendo delle modalità costruttive e di utilizzo sostenibili e durevoli nel tempo che permettano di adeguare l'edificio in funzione del clima regionale, identificando le misure necessarie al mantenimento di un elevato comfort all'interno degli edifici e sviluppando delle indicazioni che, con un approccio intersettoriale, sostengano un adeguamento normativo globale. Più precisamente, il progetto, partendo da un recente studio della scuola Universitaria Professionale di Lucerna¹, mette a confronto una serie di edifici nella situazione climatica odierna, con gli stessi edifici simulati nel clima del futuro, analizzando in che modo i cambiamenti climatici influenzeranno comfort e fabbisogno energetico.

Partendo da questo presupposto sono stati selezionati tre edifici con funzionalità, caratteristiche e contesti urbani differenti tra loro. Per accrescere la rappresentatività delle simulazioni, sono inoltre stati utilizzati dati di differenti stazioni climatiche, rappresentative delle peculiarità del territorio a sud delle Alpi (Piotta, Magadino e Stabio). La selezione di queste tre località è dovuta alla diversificazione delle rispettive caratteristiche meteorologiche mentre i tre edifici sono stati selezionati per rappresentare, in maniera generale, il parco immobiliare regionale sia a livello architettonico, sia come destinazione d'uso. Questi edifici rappresentano il punto di partenza in base al quale vengono modellati i circa 350 edifici definiti per ciascuna categoria di utilizzo (residenziale, scolastico ed amministrativo) aventi parametri costruttivi, gestionali, impiantistici e meteorologici differenti.

Il progetto vuole fornire gli strumenti necessari a tutti gli attori in gioco (progettisti, committenti, enti pubblici) così da meglio gestire l'adattamento degli edifici al cambiamento climatico, soprattutto in considerazione degli importanti interventi di risanamento (manutenzione ordinaria o straordinaria) che il parco immobiliare subirà nel corso dei prossimi anni. A questo scopo il progetto si propone di elaborare delle indicazioni per la progettazione di nuovi edifici o il risanamento di quelli esistenti, così da poter affrontare il cambiamento climatico con anticipo, sfruttando quest'opportunità per garantire il comfort abitativo dell'utenza, diminuendo il fabbisogno energetico suggerendo l'utilizzo di sistemi alimentati da fonti di energia rinnovabili.

¹ www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=46167&Load=true

Il presente rapporto introduce dapprima il progetto “Clima di domani - linee guida per l'edilizia, Sud delle Alpi precursore”, descrivendone gli obiettivi e le componenti principali, analizza i contributi scientifici sul tema dell'impatto del cambiamento climatico a livello abitativo attraverso una ricerca di mercato, descrive la struttura e la metodologia impiegata nelle simulazioni e presenta i risultati ottenuti. Il capitolo 4 è dedicato alla descrizione di soluzioni tecnologiche che nel clima futuro potranno fornire un importante aiuto alla strategia di adattamento al cambiamento climatico, mentre il capitolo 5 illustra i risultati ottenuti in questo progetto. Le lessons learned e i suggerimenti per gli adeguamenti normativi sono invece oggetto di approfondimento nel capitolo 6. Nel capitolo finale delle conclusioni sono riassunte le parti salienti di questo studio.

2 Studi di letteratura

Il tema relativo agli impatti del cambiamento climatico a livello di benessere abitativo è sempre più attuale, grazie alla maggior consapevolezza delle istituzioni che è necessario sviluppare una strategia volta a mitigare le conseguenze dell'innalzamento della temperatura e grazie alla crescente attenzione anche in ambito scientifico in termini di ricerche e studi su questo tema.

Il presente progetto si inserisce in questo contesto e ha come obiettivo lo sviluppo di linee guida per la progettazione e la costruzione di nuovi edifici o il risanamento di quelli esistenti. Alla base di questo progetto e degli altri studi presentati in questo capitolo, c'è l'intenzione di affrontare il cambiamento climatico non solamente attraverso misure di mitigazione e "difesa" dagli effetti negativi, ma anche come un'opportunità da sfruttare al meglio per aumentare il comfort abitativo delle persone, diminuire il fabbisogno energetico e utilizzare in maniera ottimizzata e consistente fonti di energia rinnovabili.

Uno degli studi che hanno fornito le basi per lo sviluppo delle analisi qui presentate è quello condotto dalla Scuola Universitaria Professionale di Lucerna² che mostra l'impatto considerevole che il cambiamento climatico avrà sul comfort abitativo e sul fabbisogno energetico degli edifici. Più precisamente, i risultati dello studio rivelano che, per edifici tipici della Svizzera centrale risalenti alla metà del secolo scorso, il fabbisogno per il riscaldamento si ridurrà del 20-30%, mentre quello per il raffreddamento aumenterà in modo esponenziale, raggiungendo la metà del futuro fabbisogno per il riscaldamento. Il progetto dimostra inoltre che sarà ancora possibile mantenere temperature confortevoli all'interno delle abitazioni attraverso una buona gestione della protezione solare e della ventilazione. Di conseguenza, la progettazione delle finestre (qualità, dimensione, tipo di apertura delle finestre e protezione solare) sarà un aspetto chiave da considerare al fine di avere edifici che ben si adattano alle future condizioni climatiche.

È indubbiamente legittimo presupporre che il clima svizzero futuro subirà importanti mutamenti rispetto allo stato attuale e quello passato. Questo tema è stato dimostrato all'interno dei modelli di sviluppo climatico negli scenari svizzeri CH2018³: si prevede infatti che le temperature medie subiranno un importante aumento in tutte le regioni e durante tutte le stagioni. Se non si raggiunge al più presto la consapevolezza che è necessaria una strategia di contrasto mirata a ridurre in maniera massiccia le emissioni globali di gas serra, entro il 2060 si potrà assistere ad un aumento della temperatura media estiva che varia dai 2.5 ai 4.5°C. Sempre seguendo questa logica, il rapporto indica che senza un'adeguata risposta di contrasto al cambiamento climatico, entro il 2060 il numero di giorni di canicola aumenteranno notevolmente.

È risaputo che il contesto climatico influenza significativamente la progettazione e la costruzione degli edifici. Uno studio dell'Ufficio federale dell'energia⁴ mostra, ad esempio, che il fabbisogno energetico di un edificio è anche influenzato dalla sua compattezza. Tale aspetto è stato confermato dallo studio "Costruire in vista del surriscaldamento climatico"⁵ che evidenzia come, a causa del previsto aumento delle temperature, gli edifici più compatti avranno vantaggi in termini di bilancio energetico complessivo rispetto agli edifici meno compatti.

Infine, contemporaneamente a questo progetto, la Hochschule di Lucerna ha recentemente sviluppato un altro progetto⁶, chiamato "Pronto per il cambiamento climatico? Linee guida per progettisti e proprietari di edifici". Il progetto ha quale obiettivo quello di fornire delle linee guida per la costruzione di edifici residenziali sulla base degli effetti del cambiamento climatico tramite lo sviluppo di due guide separate, una per i progettisti con un focus sulla fase iniziale di progettazione, e uno per i committenti di edifici con delle raccomandazioni relative alle strategie gestionali di implementare allo scopo di considerare in maniera ottimale gli impatti dovuti al cambiamento climatico durante tutta la fase del progetto. Lo studio si è focalizzato su alcuni elementi che

² www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=46167&Load=true

³ CH2018 (2018), Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp

⁴ Gadola, R. et al., 2010. „Gesamtenergieeffizienz von Büro-Bauten; Optimierung des Heizwärme-bedarfs vs. Optimierung der Gesamtenergieeffizienz - Schlussbericht“. Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 102 pp

⁵ Bauen, wenn das Klima wärmer wird, Bundesamt für Energie BFE, 2007

⁶ <https://www.hslu.ch/de-ch/hochschule-luzern/forschung/projekte/detail/?pid=4245>

caratterizzano l'edificio: orientamento delle finestre, superficie vetrata, parapetto delle finestre, numero e forma dei serramenti, aggetti, protezione solare, lucernari, elementi di ombreggiamento, pellicole per finestre, verande e superfici dei locali. Per ognuno di questi elementi sono state sviluppate delle linee guida. Da questo studio è emerso in particolare che, dal punto di vista energetico, sarebbe consigliabile orientare le finestre verso sud, ovest ed est al fine di poter beneficiare di importanti guadagni solari durante il periodo invernale e nelle mezze stagioni, prediligere la presenza di aggetti alle finestre e considerare gli edifici circostanti e le condizioni geografiche locali.

3 Struttura e metodologia delle simulazioni

Come inizialmente affermato, tutte le analisi svolte all'interno del progetto si basano su tre edifici che sono stati più volte modificati così da ottenere un parco immobiliare di circa 350 edifici per ciascuna categoria (residenziale, amministrativa, scolastica), arrivando ad un numero di edifici simulati superiore a 1'000.

Tali simulazioni permettono l'analisi del comportamento degli edifici in termini di comfort interno per gli utenti e di fabbisogno energetico (riscaldamento e raffreddamento) durante tutto l'anno, variando le seguenti caratteristiche:

- sollecitazioni climatiche: si è passati dal clima attuale al clima futuro, secondo gli scenari climatici CH2018 elaborati a livello federale, con particolare riferimento al periodo 2045-2074;
- collocazione dell'edificio: stazione climatica di Piotta, Magadino, Stabio;
- strategie di gestione degli edifici: ad esempio con ventilazione naturale e/o meccanica, con controllo manuale o automatico delle schermature solari, con presenza o assenza di un impianto di raffreddamento estivo;
- caratteristiche progettuali e costruttive: per esempio percentuale vetrata delle facciate, caratteristiche dell'isolamento termico, capacità termica degli spazi interni.

Le simulazioni dinamiche sono state svolte con il software TRNsys, che è in grado di elaborare e fornire la risposta degli edifici con risoluzione oraria sulla base dei dati climatici di input. Per gli scenari climatici futuri, i dati climatici sono disponibili con un livello di dettaglio meno preciso, cioè con risoluzione giornaliera. Altri software di calcolo utilizzati nell'ambito delle simulazioni eseguite all'interno del progetto sono ProFit 7 e Python 2.7.

3.1 La metodologia utilizzata

Uno degli obiettivi del progetto è quello di comprendere la risposta degli edifici ai cambiamenti climatici attesi in futuro, non solo in termini energetici, ma anche in termini di comfort. Per raggiungere questo scopo è stato necessario stabilire un sistema di valutazione delle prestazioni attuali di alcuni edifici di riferimento, evidenziando come essi reagiscono alle molteplici configurazioni. Siccome per il clima futuro non sono disponibili dati a risoluzione oraria, è stato necessario, partendo dai risultati ottenuti dalle simulazioni orarie con il clima di riferimento, estrapolare i risultati per il clima futuro (risoluzione giornaliera) tramite regressione (machine learning). In particolare, sono stati utilizzati i seguenti set di dati climatici:

Denominazione	Durata	Periodo	Risoluzione	Scopo
Clima di riferimento	1 anno tipo (TMY2)	1961-1990	Oraria	Simulazione in Trnsys® di numerose varianti per studiare gli effetti di diverse combinazioni di parametri fisici relativi agli edifici.
Clima attuale	20 anni	1999-2019	Oraria	Simulazione in Trnsys® delle varianti necessarie per l'istruzione/training set della rete neurale, necessaria per ricavare i dati relativi alla risposta degli edifici nel clima futuro.
Clima futuro	30 anni	2045-2074 Scenario RCP 8.5	Giornaliera	Simulazione della risposta degli edifici nel clima futuro (i più rappresentativi del parco edifici attuale e di possibili combinazioni di interventi futuri), con reti neurali

Tabella 1: Set di dati climatici

Si specifica che, ad eccezione dei 3 edifici di partenza (simulati nella rispettiva località di riferimento), si è deciso di simulare tutte le varianti di studio nel clima futuro unicamente nella località di Magadino, in quanto ritenuta più rappresentativa delle condizioni medie del territorio al sud delle Alpi e più significativa in termini di maggiori sollecitazioni future nella determinazione del comfort estivo negli edifici.

L'immagine seguente rappresenta la metodologia utilizzata, che verrà spiegata dettagliatamente in questo capitolo.

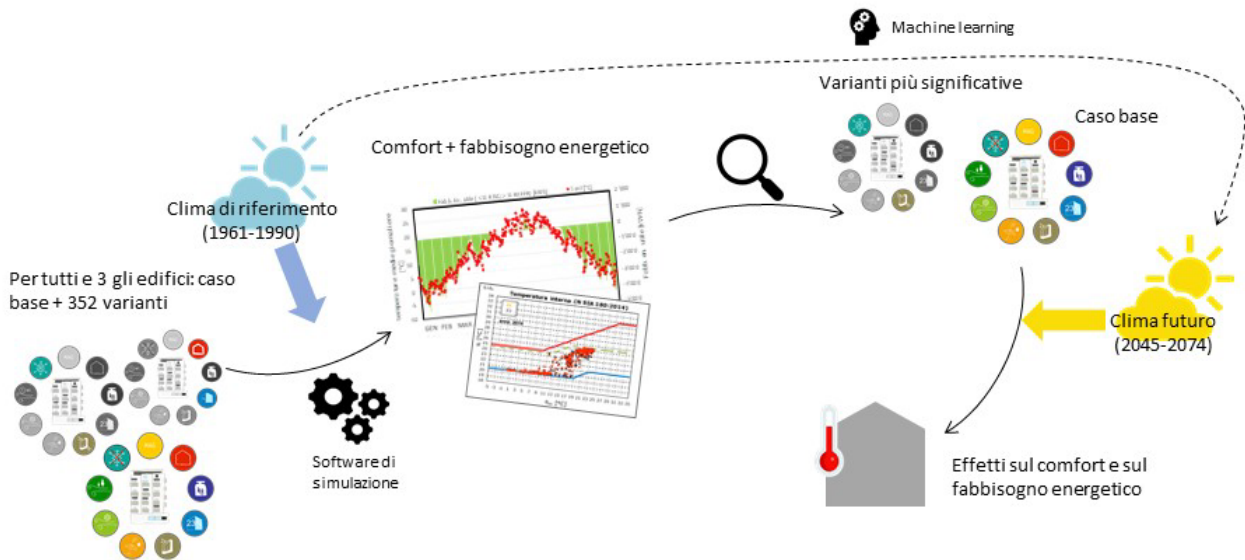


Figura 1: Metodologia utilizzata per lo sviluppo delle simulazioni nel clima attuale e futuro. Partendo da tre edifici base e dalle relative 352 varianti è stato dapprima verificato il fabbisogno energetico e il comfort interno nel clima di riferimento (1961-1990). Sulla base dei risultati ottenuti sono state selezionate le varianti più significative che sono state in seguito simulate nel clima futuro (2045-2074). I dati per il clima futuro sono stati ottenuti usando il set di dati dello scenario climatico RCP8.5 e un processo di machine learning.

3.1.1 La valutazione del comfort: il benessere adattivo

Per valutare il comfort all'interno degli edifici è stato utilizzato il concetto di benessere adattivo esplicitato nei paragrafi 2.2 e 2.3.2 della Norma SIA 180. Questo metodo specifico non solo permette di valutare il comfort interno degli edifici non climatizzati, ma anche di quelli climatizzati che offrono all'utente la possibilità di gestire le condizioni termiche tramite il proprio comportamento.

Il termine adattivo, alla base di questo modello di benessere, indica la possibilità degli utenti di controllare le condizioni termiche tramite l'apertura e/o chiusura delle finestre, la regolazione del proprio metabolismo (attività svolte o da svolgere) e del vestiario a seconda delle temperature esterne ed interne. Il comfort, misurato in termini di temperatura soggettiva è di conseguenza correlato alla media mobile (in riferimento alle 48 ore precedenti) della temperatura esterna media mobile (T_{rm}). Ciò permette di integrare nella valutazione del comfort anche le aspettative dell'utente sul clima esterno.

In correlazione con gli obiettivi del progetto, sono state avanzate le seguenti ipotesi:

- la temperatura dell'aria interna risulta essere la base per il controllo delle condizioni di benessere, assumendo che questa grandezza sia assimilabile alla temperatura operante soggettiva;
- il metodo del benessere adattivo indica come limite superiore di validità del metodo stesso, un valore T_{rm} di 30°C. Per valori di T_{rm} superiori ai 30°C, viene considerato il medesimo limite di comfort;
- durante il passaggio dalla risoluzione oraria al machine learning la validità di questo modello viene mantenuta, con riferimento alla temperatura media giornaliera dei due giorni precedenti ($T_{rm,2d}$) al posto della T_{rm} delle 48 ore precedenti;

- a differenza delle disposizioni della SIA 180, la valutazione del benessere viene effettuata considerando tutte le 24 ore e non solo i periodi di occupazione. Questa scelta è data dal fatto che nelle abitazioni plurifamiliari, nelle ore centrali delle giornate i locali risulterebbero prevalentemente non occupati;

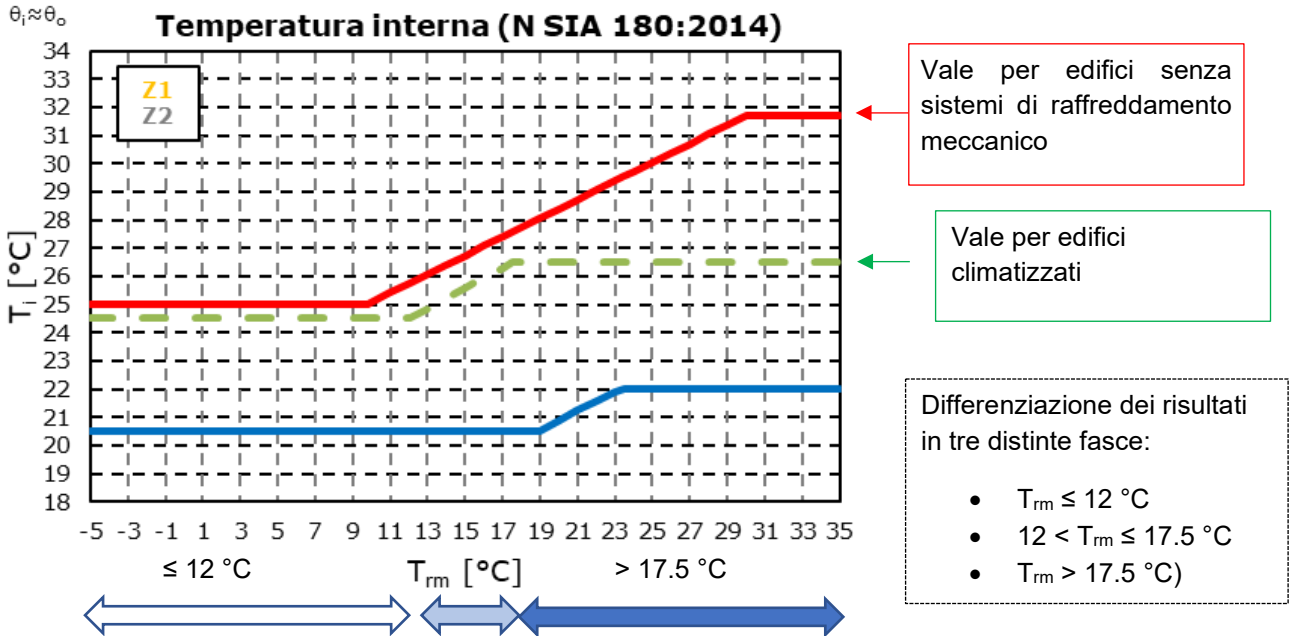


Figura 2: Definizione di comfort secondo Norma SIA 180, basata sul metodo del comfort adattivo. La definizione di tre ulteriori intervalli di valutazione del comfort serve a caratterizzarlo meglio, per comprendere se sia relativo alla stagione invernale ($T_{rm} \leq 12 \text{ °C}$), alle mezze stagioni ($12 < T_{rm} \leq 17.5 \text{ °C}$) o alla stagione estiva ($T_{rm} > 17.5 \text{ °C}$).

- siccome si vuole fornire un parametro sintetico dell'edificio (modellato con due zone termiche distinte, cfr. 3.3.2) vengono considerate la temperatura interna media di discomfort ($T_{i,m,disc}$) e le ore di discomfort medie ($h_{disc,SIA180}$) come medie pesate rispetto alle ore giornaliere di discomfort di ciascuna zona in funzione delle superfici di riferimento energetico delle due zone secondo le seguenti formule:

$$T_{i,m,disc} = \frac{(T_{i,m,disc,Z1} * h_{disc,SIA180,Z1} + T_{i,m,disc,Z2} * h_{disc,SIA180,Z2})}{h_{disc,SIA180,Z1} + h_{disc,SIA180,Z2}}$$

$$h_{disc,SIA180} = \frac{(h_{disc,SIA180,Z1} * AE_{Z1} + h_{disc,SIA180,Z2} * AE_{Z2})}{AE_{Z1} + AE_{Z2}}$$

- la percentuale di ore di discomfort (% $h_{disc,SIA180}$) viene calcolata rapportando il parametro alle ore annuali, esclusi i primi due giorni dell'anno, per i quali a livello di dati di input non è possibile calcolare la temperatura media mobile delle 48 ore precedenti esterne al periodo di simulazione (la base risulta quindi essere 8'712 ore).

Sebbene le simulazioni eseguite permettano di calcolare, sia su base oraria che giornaliera, i valori di umidità relativa dell'aria, le analisi del benessere eseguite non prendono direttamente in considerazione questa grandezza. Altri parametri che potrebbero determinare il livello di comfort quali gli effetti del movimento dell'aria (che può causare, oltre un innalzamento del limite di temperatura soggettiva ammissibile durante il periodo caldo anche un malessere dovuto alle correnti d'aria), l'asimmetria della temperatura radiante, il gradiente id temperatura verticale, la temperatura superficiale del pavimento, ecc. non sono stati considerati per la definizione dei momenti di discomfort.

3.1.2 La valutazione dei consumi energetici

Al fine di garantire il comfort all'interno dell'edificio, in qualsiasi istante e indipendentemente dalle condizioni climatiche esterne, è stato considerato un impianto che presenta delle condizioni di set point prefissate:

- $T_{\text{set-point invernale}} \geq 20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (riscaldamento)
- $T_{\text{set-point estiva}} \leq 26.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (raffreddamento)
- UR $\leq 50 \%$ (deumidificazione, in presenza di raffreddamento)

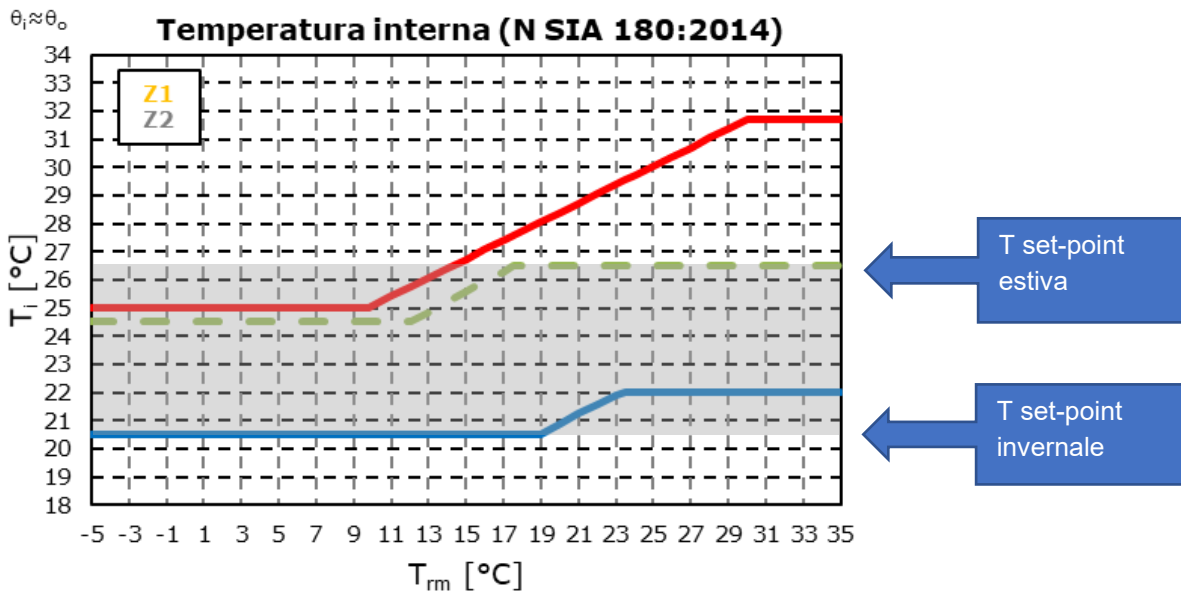


Figura 3: Definizione dei set point di attivazione degli impianti posti in relazione con la definizione della zona di comfort secondo norma SIA 180. La fascia evidenziata in grigio corrisponde all'intervallo di temperatura interna nel quale non si attivano né l'impianto di riscaldamento, né quello di raffreddamento estivo (corrisponde indicativamente alle mezze stagioni e al concetto di impianti correntemente diffuso, che li vede per la maggior parte predisposti a 2 tubi e con temperatura di set point fissa, ovvero in grado di fornire solo caldo o solo freddo, ma non entrambi contemporaneamente).

Grazie alle simulazioni è possibile stimare il fabbisogno termico utile per il riscaldamento, raffreddamento e deumidificazione, da cui sarà possibile in futuro ricavare il relativo fabbisogno energetico finale per ulteriori riflessioni.

3.1.3 Machine learning

Il Machine Learning rappresenta un ramo dell'intelligenza artificiale che descrive l'abilità, da parte di una macchina, di apprendere qualcosa dai dati in maniera autonoma. Per fare ciò viene utilizzato un algoritmo di apprendimento detto processo di regressione che è in grado di riconoscere delle strutture ricorrenti nei dati. Il processo di regressione rappresenta un metodo matematico che permette di predire delle variabili di output sulla base dei valori di input.

Le reti neurali rappresentano la tipologia di algoritmo utilizzato nella regressione. La rete neurale è composta da unità chiamate neuroni, disposti in strati. Ciascun neurone, che rappresenta una variabile portatrice di informazioni, è tipicamente collegato a tutti i neuroni tramite delle connessioni numeriche. La Figura 4 mostra graficamente un esempio di rete neurale: essa può essere immaginata come composta di diversi layer di nodi, ciascuno dei quali è collegato ai nodi del layer successivo.

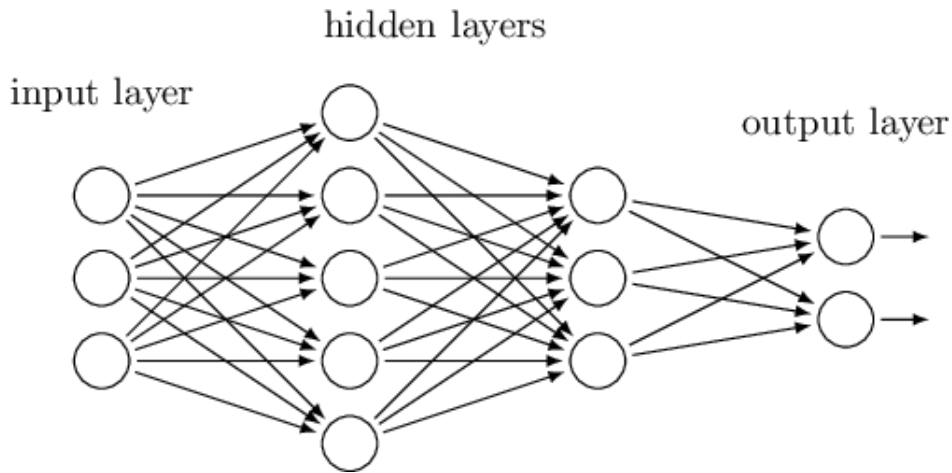


Figura 4: Illustrazione alla base della logica di una rete neurale

Come si può notare dall'immagine, tutte le reti neurali sono composte da minimo tre strati: un input layer, ovvero i dati di ingresso, uno o più hidden layer dove avviene l'elaborazione vera e propria e un output layer contenente il risultato finale. Nell'esempio riportato nella Figura 4 ci sono tre variabili di input, cinque nel primo strato nascosto, tre nel secondo e due variabili nello strato output. Questi strati di neuroni sono collegati tra loro da funzioni, la cui combinazione dà la funzione f che collega tra loro le variabili degli strati input e output.

Ai fini del progetto è stato applicato il modello Multilayer Perceptron (MLP). Si tratta di un modello di rete neurale artificiale che mappa in maniera appropriata insiemi di input in output. La peculiarità di questo tipo di rete neurale sono gli strati multipli di nodi in un grafo diretto, con ogni strato che risulta essere completamente connesso al successivo, l'informazione si propaga quindi sia dallo strato input allo strato output che viceversa in linea diretta, non ci sono dei cicli.

I dati utilizzati vengono suddivisi in training e test set. L'algoritmo viene quindi diviso in due parti, come mostrato dalle rappresentazioni seguenti. L'obiettivo del training set è quello di costruire il modello, determinando quindi la funzione risultante f che collega le coppie di input e output, minimizzando l'errore quadratico medio ottenuto dalla somma delle differenze tra le informazioni di output reali del training set e le informazioni di output calcolate.

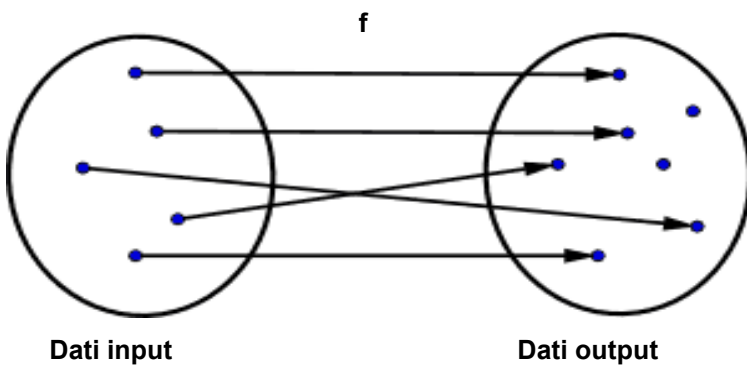


Figura 5: Training set

Fase 1: training set

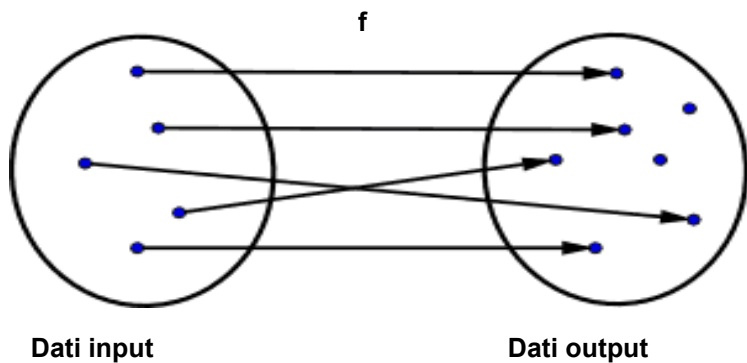
Ambito: simulazioni Trnsys su base oraria con dati climatici utilizzati per l'istruzione

Dati input: dati climatici medi giornalieri (elaborazioni dei dati orari)

Dati output: risultati giornalieri, ottenuti con le simulazioni (orarie).

Obiettivo: istruire la funzione f

Il test set, cioè la seconda parte dell'algoritmo, viene utilizzato per validare la funzione appena determinata. Infatti, la funzione f imparata nella prima fase viene applicata ai dati input del test set per ottenere i risultati, cioè i dati output del test set.



Fase 2: test set

Ambito: applicazione della funzione f per ottenere i dati di output (nel clima futuro)

Dati input: dati climatici medi giornalieri del futuro

Dati output: risultati giornalieri

Obiettivo: ricavare i dati di output

Figura 6: Test set

I dati di input sono i seguenti:

- fase 1 (training set): dati giornalieri di 21 anni di clima utilizzato per l'istruzione (periodo dal 1.1.1999 al 31.12.2019), ricavati dai dati orari usati per le simulazioni in Trnsys (cap. 3.2.2);
- fase 2 (test set): dati giornalieri dei 30 anni dello scenario climatico RCP8.5, dal 1.1.2045 al 31.12.2074 (cap. 3.2.3).

I dati di output (cap. 3.1.4) sono i seguenti:

- fase 1 (training set): corrispondono ai risultati delle simulazioni orarie in Trnsys, aggregati sotto forma di dati medi giornalieri;
- fase 2 (test set): sono l'obiettivo del calcolo.

La caratteristica principale di questa metodologia è che essa fornisce output tra loro indipendenti (e potenzialmente quindi valori non consistenti).

3.1.4 I dati di output (valori giornalieri)

I dati di output sono composti da un totale di 76 variabili (33 variabili per ciascuna delle due zone termiche degli edifici e 10 variabili per l'intero edificio), come riportato nella tabella completa in annesso B. Ciascuna variabile è calcolata per entrambe le zone termiche che compongono l'edificio. Le zone termiche sono Z1 Zona giorno (PT) e Z2 Camere per l'edificio 1 - Casa Anziani, Z1 Aule e Z2 Corridoi (e bagni) per l'edificio 2 – Scuola Faido e Z1 Uffici e Z2 Sala riunioni per l'edificio 3 - Amm. Locarno (cap. 3.3.2). Qui di seguito si riporta un estratto della tabella, contenente solo le grandezze principali:

Variabili calcolate per entrambe le zone termiche che compongono l'edificio	$T_{i,med, Z1 \text{ o } Z2}$	temperatura interna media
	$T_{i,min, Z1 \text{ o } Z2}$	temperatura interna minima
	$T_{i,max, Z1 \text{ o } Z2}$	temperatura interna massima
	$RH_{med, Z1 \text{ o } Z2}$	umidità relativa interna media
	$T_{i,m,disc, Z1 \text{ o } Z2}$	temperatura interna media di discomfort
	$h_{disc,SIA180, Z1 \text{ o } Z2}$	ore di discomfort
Variabili relative all'intero edificio	Q_{heat}	fabbisogno termico per il riscaldamento (somma delle due zone termiche)
	Q_{cool}	fabbisogno termico per il raffreddamento (somma delle due zone termiche)
	Q_{deh}	fabbisogno termico per la deumidificazione (somma delle due zone termiche)
	$P_{max,heat}$	potenza termica massima per il riscaldamento
	$P_{max,cool}$	potenza termica massima per il raffreddamento
	$h_{disc,edificio}$	ore di discomfort nell'edificio
	$h_{attiv,COOL}$	ore di climatizzazione nell'edificio
	$h_{>26.5}$	ore con temperature > 26.5 °C nell'edificio
	$h_{attiv,HEAT}$	ore di riscaldamento nell'edificio
	$h_{attiv,DEHUM}$	ore di accensione impianto deumidificazione nell'edificio

Tabella 2: Variabili progettuali - estratto

È utile precisare che:

- $h_{disc,SIA180,Z1 \text{ o } Z2}$: rappresenta il conteggio giornaliero delle ore in cui il limite di comfort, calcolato sulla base della T_{rm} delle 48 ore precedenti è superato (indipendentemente dall'entità del fenomeno stesso);
- $h_{disc,edificio}$: è il valore massimo giornaliero delle ore di discomfort tra le due zone (non è dunque la somma dei valori delle due zone). Questo valore non è rappresentato nelle schede di riepilogo output, poiché si è scelto di rappresentare il parametro $\%h_{disc,SIA180}$;
- $h_{attiv,HEAT}$, $h_{attiv,COOL}$, $h_{attiv,DEHUM}$: vengono conteggiate le ore con richiesta di riscaldamento, raffreddamento, deumidificazione (in caso di richiesta contemporanea in entrambe le zone, viene considerata un'unica accensione dell'impianto);
- $h_{>26.5}$: vengono conteggiate le ore con temperatura interna registrata > 26.5 °C (in caso ciò avvenga contemporaneamente in entrambe le zone, viene considerata un'unica ora).

I dati citati sono riportati all'interno delle schede di output delle simulazioni (Annesso C).

3.2 Le località e il clima

Come descritto nell'introduzione di questo rapporto, questo progetto si focalizza su 3 località rappresentative delle caratteristiche climatiche del Canton Ticino, nella seguente tabella sono elencate le caratteristiche principali di questi territori:

Località	Numero WMO	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Altitudine [m]
Locarno-Magadino (MAG)	67620	46.1642	8.8778	197
Piotta (PIO)	67530	46.5171	8.6757	1'007
Stabio (SBO)	67710	45.8434	8.9323	353

Tabella 3: Descrizione delle stazioni climatiche considerate nell'analisi. WMO: World Meteorological Organization.

Piotta, è la stazione climatica di riferimento per il Comune di Faido e rappresenta una località montana che nonostante si trovi a 1'000 metri di altitudine s.l.m., durante i mesi estivi è significativamente esposta all'irraggiamento solare; Magadino, in rappresentanza del Comune di Locarno, è una località di pianura a circa 200 metri s.l.m., esposta all'irraggiamento solare in tutte le stagioni dell'anno, mentre Stabio è una località rappresentativa del clima nella parte meridionale della Svizzera, con un'escursione termica particolarmente elevata tra estate e inverno e tra il giorno e la notte durante le mezze stagioni.

3.2.1 Clima di riferimento

Per quanto riguarda il clima di riferimento ci si riferisce al file climatico TMY2. I dati TMY2 sono serie di valori orari per un periodo di tempo di 1 anno, derivati da Meteonorm per il periodo 1961-1990.

Si fa riferimento quindi ad un anno meteorologico medio, cioè rappresentativo delle condizioni tipiche (e non di quelle estreme), che può venir utilizzato durante la simulazione energetica per confrontare le prestazioni di sistemi differenti tra loro. Siccome le condizioni meteorologiche non rappresentano le condizioni estreme di un luogo specifico, non è possibile utilizzare questa tipologia di file climatico per dimensionare e progettare sistemi specifici, come ad esempio gli impianti di climatizzazione.

3.2.2 Clima attuale

Per sviluppare la rete neurale necessaria per le simulazioni, si è estesa la simulazione del periodo attuale (1961-1990) all'ultimo ventennio (1999-2019), utilizzando come base i dati climatici orari (in formato TMY2) elaborati attraverso Meteonorm, sulla base dei dati provenienti dalla rete di rilevamento automatica SwissMetNet di MeteoSvizzera, in maniera da ottenere una base di input rappresentativa per le simulazioni con reti neurali (training set).

Meteonorm fornisce i dati contenenti le seguenti informazioni:

- temperatura dell'aria a bulbo asciutto [°C];
- temperatura di dew-point [°C];
- irradiazione globale sul piano orizzontale [W/m²];
- precipitazioni [mm];
- velocità del vento [m/s];
- direzione del vento [°].

Non è stato invece considerato il giorno aggiuntivo (29.02) in presenza di anni bisestili.

3.2.3 Clima futuro

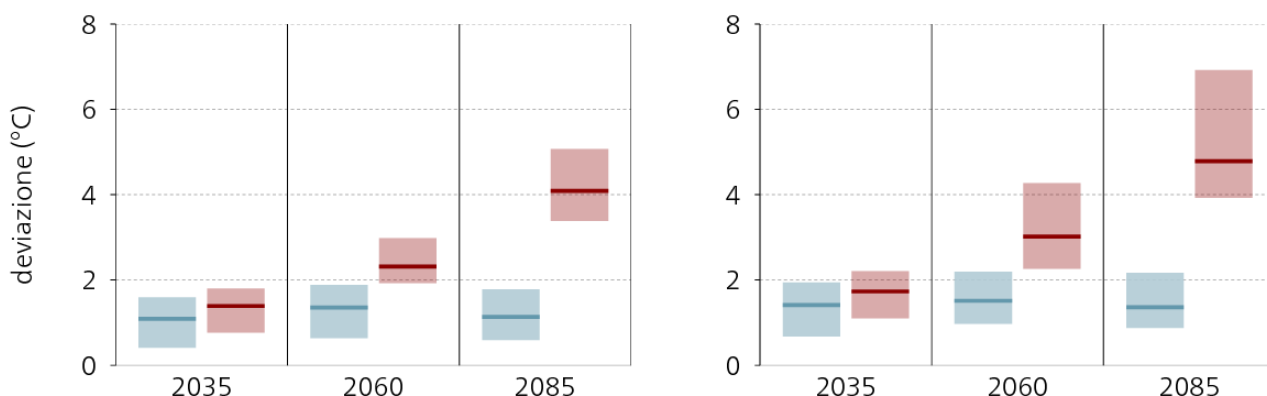
MeteoSvizzera e il Politecnico Federale di Zurigo hanno sviluppato gli scenari climatici CH2018. Essi, quantificano i cambiamenti climatici attesi fino alla fine del secolo in Svizzera. Siccome l'entità delle emissioni future causate dall'uomo dipenderà in maniera determinante dalle decisioni politiche a livello internazionale e dalle innovazioni tecnologiche individuate, come base di riferimento per calcolare il possibile sviluppo del clima sono stati utilizzati diversi scenari di emissione di gas a effetto serra. I due scenari estremi sviluppati sono lo scenario RCP2.6 e lo scenario RCP8.5. Se da una parte lo scenario RCP2.6 parte dal presupposto che la comunità internazionale si accordi in maniera rapida permettendo una riduzione drastica dei gas a effetto serra, dall'altra lo scenario RCP8.5 presuppone che l'aumento delle emissioni continui incondizionatamente anche in futuro. Fra questi due scenari estremi ne esistono degli altri che prendono in considerazione una parziale diminuzione delle emissioni. I modelli climatici che hanno alla base differenti scenari di emissione consentono di quantificare le conseguenze climatiche in base alle scelte politiche e al grado di sviluppo tecnologico. Se, nel prossimo futuro, le emissioni dovessero continuare ad aumentare senza un'adeguata risposta politica (scenario RCP8.5), a sud delle Alpi la temperatura media annuale continuerà ad aumentare e verso fine secolo essa risulterà di oltre 4°C superiore rispetto alla media del periodo di riferimento 1981-2010. Invece, se la risposta politica fosse adeguata (RCP2.6), dopo la prima metà del secolo si potrebbe assistere ad una stabilizzazione della temperatura media attorno ad un aumento di 1.5°C. È importante in ogni caso ricordare che questi valori numerici sono soggetti a incertezze che dipendono dai modelli climatici utilizzati per rappresentare i processi fisici coinvolti.

Sud delle Alpi

inverno

estate

RCP2.6
RCP8.5



© scenari climatici CH2018

Figura 7: Deviazione della temperatura dal periodo normale 1981-2010 al Sud delle alpi in funzione degli scenari climatici futuri secondo CH2018⁷

All'interno di questo progetto si fa riferimento allo scenario climatico RCP8.5, che da un lato risulta essere più rappresentativo dell'andamento attuale e d'altro canto enfatizza la problematica legata ai cambiamenti climatici, evidenziando problematiche altrimenti sottogiacenti. Fra i vari modelli disponibili si è adottato il modello "MIROC-MIROC5_SMHI-RCA4" (considerato il più completo per le località in oggetto e che tra i vari modelli disponibili si situa in una posizione mediana e non estrema in relazione alle temperature estive attese). Per le stazioni climatiche prese in considerazione da questo progetto, cioè Magadino (MAG), Piotta (PIO) e Stabio (SBO) sono disponibili i seguenti valori medi giornalieri, per il periodo dal 01.01.2045 al 31.12.2074:

- $T_{ext,med} - T_{ext,min} - T_{ext,max}$: temperatura esterna media – minima - massima;
- $I_{hor,tot}$: irraggiamento esterno totale sul piano orizzontale;

⁷ www.nccs.admin.ch/nccs/it/home/regioni/grandi-regioni/sud-delle-alpi/scenari-climatici-ch2018-sud-delle-alpi.html

- RH: umidità relativa dell'aria esterna.

Questi valori rappresentano i dati di partenza (input) delle simulazioni machine learning nella fase di test set. Anche in questo caso, il giorno aggiuntivo degli eventuali anni bisestili (29.02) non è stato considerato.

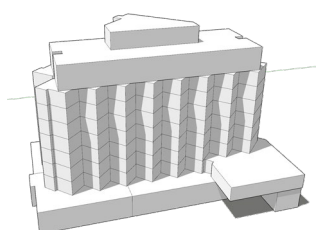
3.3 La modellazione degli edifici

Per modellare gli edifici presi in considerazione nel progetto, è stato utilizzato il software di simulazione energetica dinamica Trnsys. Qui di seguito vengono spiegate le principali ipotesi e assunzioni di calcolo.

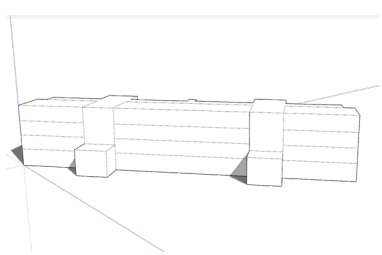
3.3.1 Gli edifici di riferimento e i parametri variati

Gli edifici di riferimento sono stati simulati sulle geometrie ottenute dalla documentazione messa a disposizione dei Comuni di Locarno e Faido, partner di progetto, e sono descritti qui di seguito:

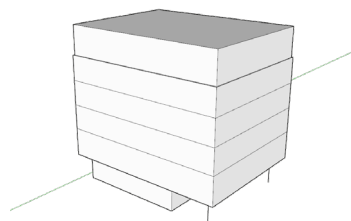
- Le scuole elementari e medie di Faido risalgono all'inizio degli anni Ottanta e hanno una struttura portante con pareti a vista in calcestruzzo armato, un isolamento termico scarso con ponti termici in corrispondenza degli elementi portanti non isolati, aule con grandi superfici vetrate allineate lungo la facciata sud. Le facciate sono molto lineari, senza aggetti particolari e protezioni solari fisse;
- La residenza per anziani San Carlo di Locarno è uno stabile degli anni Settanta, ha muri perimetrali non strutturali con una doppia parete e un isolamento minimo in intercapedine, superfici vetrate di dimensioni contenute rispetto alle facciate (20%) ed un'elevata protezione solare dovuta alla geometria dell'edificio grazie agli aggetti dei balconi e al profilo a scacchiera delle facciate. Questo edificio è stato scelto in quanto rappresenta la maggioranza degli edifici abitativi plurifamiliari costruiti dagli anni Sessanta agli anni Ottanta sul territorio cantonale;
- L'edificio amministrativo situato nel centro di Locarno, risanato secondo lo standard Minergie-P nel 2019, presenta un isolamento esterno a cappotto, serramenti e protezioni solari conformi allo stato della tecnica e con una percentuale vetrata media.



ED.1 – Casa per Anziani S. Carlo, Locarno (cat. I)



ED.2 – Scuole elementari e medie, Faido (cat. IV)



ED.3 – Stabile amministrativo Locarno (cat. III)

Figura 8: Edifici a partire dai quali sono state generate le simulazioni all'interno del progetto. Categorie secondo Norma SIA 380/1.

La caratterizzazione degli edifici e l'individuazione delle varianti più significative è stata ottenuta tramite la combinazione di 3 differenti parametri di base (grado di isolamento opaco medio, superficie vetrata e capacità termica), 5 parametri (variati in maniera indipendente) elencati qui di seguito e la località climatica (MAG, PIO o SBO) scelta.

- protezioni solari esterne (assenti, manuali, automatizzate);
- raffreddamento (assente, raffreddamento, raffreddamento + deumidificazione);
- ventilazione (naturale o meccanica con recupero di calore);
- gestione della ventilazione (sulla base dell'occupazione o continua 24h);
- caratteristiche termiche delle finestre (U_w , g). I dati sono riportati nelle schede di input.

In totale sono quindi stati variati nove parametri, costruttivi, tecnici, gestionali e geografici.

La combinazione di questi parametri è riportata nella Tabella 4. È utile ricordare che l'edificio 3, a differenza degli altri due, già in partenza presenta ottime caratteristiche di coibentazione e, di conseguenza, nelle varianti si trovano livelli di isolamento minori rispetto al caso iniziale.

			ED. 1 Casa Anziani	ED. 2 Scuola Faido	ED. 3 Amm. Locarno			
Variabile		Unità di misura	0 (base)	0 (base)	0 (base)	a	b	c
01	Sup. vetrata	%	x_0	x_0	x_0	30%	50%	70%
02	Isol. medio opaco	W/m^2K	y_0	y_0	y_0	0.15 (0.3)	-	-
03	Capacità termica	Wh/m^2K	z_0	z_0	z_0	$z_1 < z_0$ $(z_1 > z_0)$	-	-
04	Prot. solari esterne	-	0 = a/ b / c	0 = a/ b / c	0 = a/ b / c	nessuna	manuale	automatica
05	Climatizzazione estiva	-	0 = a/ b / c	0 = a/ b / c	0 = a/ b / c	assente	raffresc.	raffresc. + deumid.
06a	Ventilazione naturale	h^{-1}	-	0 = a/ b / c / b24 / c24	-	naturale	naturale1	naturale2
06b	Ventilazione meccanica	h^{-1}	0 = a/ b / c / b24 / c24	-	0 = a/ b / c / b24 / c24	meccanica	meccanica+ estiva1	meccanica+ estiva2
07	Vent. (occupaz/24h)		0 = a / b	0 = a / b	0 = a / b	h occupaz.	h24	
08	Finestre	$(W/m^2K; -, W/m^2K)$	$(U_{g0}; g_0; U_{r0})$	$(U_{g0}; g_0; U_{r0})$	$(U_{g0}; g_0; U_{r0})$	(0.6;0.45;1.3)	$(0.4;0.4;1)$ (1.4;0.6;2.5)	
09	Località	-	0 = a/ b / c	0 = a/ b / c	0 = a/ b / c	MAG	PIO	SBO

Tabella 4: Definizione parametri progettuali (Variabili) e relative varianti investigate (0 / a / b / c) che combinate tra loro hanno permesso di definire le caratteristiche delle 1161 configurazioni simulate. Nelle tre colonne "0 (base)" è riportata per ciascuno dei 3 edifici esistenti l'identificazione di quale dei valori a/b/c corrisponda alla realtà dell'edificio (evidenziata in **grassetto**), mentre nelle colonne a, b e c vengono definite le caratteristiche variate all'interno delle varie simulazioni.

3.3.2 Zone termiche

La seguente tabella mostra quali zone termiche sono state modellate ai fini del progetto:

Ed.	Zona	Superficie di riferimento energetico [m ²]	Profili occupazione (N SIA 2024) Principali caratteristiche
Ed. 1 – Casa Anziani	Z1 - Zona giorno (PT)	1'451	Cat. 6.1 - Ambienti occupati nelle sole ore diurne, ma si assume anche nei fine settimana.
	Z2 - Camere	5'503	Cat. 1.1 - Ambienti occupati nelle ore notturne; ombreggiamenti importanti (dovute alla conformazione geometrica dell'edificio)
Ed. 2 – Scuola Faido	Z1 - Aule	2'158	Cat. 4.1 - Ambienti non occupati durante il fine settimana e durante l'intero mese di luglio. Nel fine settimana si considera unicamente la presenza di apparecchi (regime minimo).
	Z2 - Corridoi (e bagni)	1'893	Cat. 12.1 - Spazi caratterizzati dalla sola presenza (ridotta) di persone.
Ed. 3 – Amm. Locarno	Z1 - Uffici	1'500	Cat. 3.1 - L'intera zona termica è stata considerata come amministrativa (incluso anche gli spazi di circolazione e WC, in posizione baricentrica rispetto al piano).
	Z2 - Sale riunioni	270	Cat. 3.3 - L'ultimo piano dello stabile è stato considerato come destinato a sale riunioni (affollamento maggiore rispetto agli uffici ma concentrato in un minor tempo).

Tabella 5: Zone termiche considerate

Tutti gli edifici presi in considerazione sono caratterizzati da una zona termica non riscaldata, che si trova ai piani interrati e ospita gli spazi tecnici o viene utilizzata come autorimessa. Tale zona non è stata dettagliatamente considerata durante la modellazione, ma è stata semplificata prendendo come riferimento

una temperatura T costante pari a 15°C, in modo da non legarsi alle specifiche caratteristiche tecniche di ogni edificio.

3.3.3 Profili di occupazione e carichi interni

La norma SIA 2044 è stata utilizzata per ricavare i profili di occupazione e i valori di utilizzo dei locali assumendo dei valori standard.

A livello generale, sono state avanzate le seguenti assunzioni:

- il primo giorno della simulazione (sia per le simulazioni nel clima di riferimento che in quello attuale) è un sabato, conformemente alla norma SIA 180:2014. Non si considerano inoltre i giorni festivi;
- i carichi interni (causati dalle apparecchiature e dall'illuminazione) sono stati modellati assumendone l'80% come parte convettiva e il restante 20% come parte d'irraggiamento;
- i dati di potenza elettrica e la durata di accensione dell'illuminazione sono stati ricavati dai valori standard secondo la norma SIA 2044. Il profilo di accensione dell'illuminazione è convenzionalmente assunto come identico a quello degli apparecchi.

Per quanto riguarda invece i singoli edifici, sono state applicate le seguenti assunzioni:

- nella zona giorno (Z.01) dell'Ed.1, si è considerata la presenza di diverse destinazioni d'uso (categorie 3.1, 6.1, 6.3, 7.2, 9.2, 12.1). I rispettivi carichi interni e dati di utilizzo sono stati ponderati rispetto alla specifica superficie di riferimento energetico. Si è assunto per tutta la zona il profilo di occupazione della categoria 6.1 (ristorante), considerando un'occupazione continua durante i giorni della settimana (in accordo con gli utilizzi delle camere);
- le aule dell'edificio scolastico (Ed.2) non sono occupate durante il fine settimana e durante l'intero mese di luglio; viceversa, gli apparecchi sono considerati accesi durante il fine settimana, in regime minimo. I corridoi e bagni sono caratterizzati dalla sola presenza di persone, secondo lo stesso profilo di occupazione annuale delle aule.

Il valore dei carichi interni (sensibile e latente) riportato nelle schede di input delle simulazioni è rapportato alla superficie netta ed è calcolato considerando 1/365 giorni.

Si assume che i carichi interni (apparecchi e luci) restino invariati a seguito del rinnovo così come nel caso della simulazione di nuovi edifici.

3.3.4 Le caratteristiche dell'involucro

L'ottimizzazione dell'edificio è stata ottenuta tramite la combinazione di tre differenti parametri, indicati qui di seguito:

- isolamento opaco medio: si riferisce alle sole parti opache (muri, tetti, pavimenti), escludendo il fattore correttivo della temperatura, ove presente (es. pavimento vs zone non riscaldate);
- la superficie finestrata media: calcolata rispetto alla superficie delle facciate (parti opache e trasparenti). La presenza del telaio è inclusa;
- la capacità termica dei locali: calcolata conformemente alla tabella 21, norma SIA 380:2009, assumendo diversi sistemi costruttivi così come descritto più dettagliatamente nella tabella seguente (Tabella 6)

Capacità termica	C/A _E [MJ/m ² K]	pavimento	soffitto	pareti esterne / interne
Elevata	0.5	massetto cemento o anidrite, con piastrelle o gomma	beton con intonaco (sup. libera ≥ 80%)	beton o muratura, con intonaco
Media-leggera	0.3 .. 0.1	pavimenti in legno massiccio e tappeti su sistemi a secco; pavimenti tecnici	rivestimento a plafone con cartongesso o pannelli in fibre di legno (senza rivestimenti fonici)	rivestimento con cartongesso (2 x 12.5 mm) oppure lastre in gesso-fibra

Tabella 6: Definizione delle varianti di capacità termica

3.3.5 La gestione delle protezioni solari

Nella seguente tabella è riportata la descrizione dettagliata delle variabili relative alla presenza e gestione delle protezioni solari definite nella Tabella 4. In particolare, per ciascuna variante sono indicate le condizioni di temperatura / irraggiamento / presenza di persone per le quali si ha l'attivazione delle schermature solari (intese come tende esterne mobili / lamelle esterne mobili).

I giorni del fine settimana o festivi sono gestiti allo stesso modo dei giorni feriali.

Edificio	Controllo	Condizioni di attivazione
Ed.1	Manuale	Se $T_{int} > 26 \text{ °C}$ e persone = ON (*)
Ed.2	Automatizzate	Se $I_{rr} > 200 \text{ W/m}^2$ e $T_{int} > 24 \text{ °C}$ (**)
Ed.3		

Tabella 7: Definizione delle varianti di protezioni solari

(*) Nell'Ed.2 e nell'Ed.3 le schermature non sono attivate nel fine settimana poiché non sono presenti persone.

(**) Le schermature restano attivate fino a $T_{int} < 24 \text{ °C}$, anche se $I_{rr} < 200 \text{ W/m}^2$.

3.3.6 La ventilazione

La ventilazione è gestita secondo la seguente configurazione, sia che si tratti di ventilazione naturale tramite apertura manuale delle finestre, sia che si tratti di ventilazione meccanica controllata con recupero di calore.

Gestione	Ore	Condizione 1	Condizione 2	Portata termicamente determinante
Presenza/H24	Occupazione	$T_i \leq 20.5$	$T_i > T_e$	igiene x (1-rec. calore)
		$20.5 < T_i < 26.5$	$T_i > T_e$	igiene
		$T_i \geq 26.5$	$T_i > T_e$	igiene + termica addizionale
		$T_i \leq 20.5$	$T_i \leq T_e$	igiene
		$T_i > 20.5$	$T_i \leq T_e$	igiene x (1-rec. calore)
Presenza	Non occupaz.	-	-	0
H24	Non occupaz.	$T_i \geq 26.5$	$T_i > T_e$	igiene + termica addizionale

Tabella 8: Configurazione della ventilazione

Il parametro "rec. calore" indicato nell'ultima colonna, si riferisce all'eventuale presenza di una ventilazione meccanica. Avendo simulato impianti ideali e investigato unicamente il fabbisogno di energia termica utile, l'unico parametro per cui si differenziano la ventilazione meccanica e quella naturale è la presenza del recupero di calore: nel caso di una ventilazione meccanica, nelle simulazioni è stato considerato un valore

di recupero di calore pari a 0.7; nel caso di ventilazione naturale è stato invece considerato nullo. Il calcolo non include il consumo di energia elettrica per la ventilazione meccanica.

Con il parametro "termica addizionale" si intende un incremento della portata di ventilazione volto a smaltire in modo più efficace il carico termico dall'edificio e quindi a migliorare le condizioni di comfort estivo o, rispettivamente, ridurre il fabbisogno di climatizzazione. Sono stati ipotizzati due possibili aumenti della portata, "estiva 1" ed "estiva 2". Come indicato nella seguente tabella, ogni edificio presenta valori specifici, dipendenti dalla destinazione d'uso e quindi dal numero di occupanti.

Portata di ventilazione specifica m ³ /h/m ²			
Ed.1	Ed.2	Ed.3	
0.96	1.65	1.01	igienica
+1.01	+1.04	+1.19	estiva 1
+2.29	+2.20	+2.29	estiva 2

Ventilazione

Meccanica no Naturale si

H24 no Occupazione si

Portata igienica m³/h/m²

Portata termica addiz. (26.5 °C) m³/h/m²

Recupero calore %

Temperatura $T_{imm} = T_{ext}$

Tabella 9: Definizione delle varianti di portata di ventilazione per ciascuno dei 3 edifici. A destra è stato inserito un estratto dalle schede di input

3.4 Le correzioni apportate alla simulazione con la rete neurale Multilayer perceptron

L'output derivato tramite l'algoritmo è una tabella di dati per i parametri output descritti precedentemente (cap. 3.1.4), dove ogni riga *i-esima* rappresenta il giorno *i* nel periodo di 30 anni (2045-2074) dello scenario climatico RCP8.5, utilizzato in questo progetto.

Per risolvere alcune incongruenze che rendevano impossibile effettuare le simulazioni necessarie, sono state apportate le correzioni descritte qui di seguito.

Una di queste correzioni è quella relativa ai valori negativi di ore di attivazione degli impianti o rispettivamente di energia utile, che sono il risultato delle oscillazioni di calcolo della regressione, ma che non hanno consistenza dal punto di vista fisico (per esempio in presenza di valori di input inferiori a quelli simulati in Trnsys, che porterebbero secondo la regressione matematica a valori negativi). Per risolvere questa problematica, i singoli dati che presentavano valori negativi sono stati posti uguali a 0.

		Valore corretto
Correzioni tipo 1 (“semplici”)	SE ($Q_{\text{heat}} \text{ opp. } Q_{\text{cool}} \text{ opp. } Q_{\text{dehum}}$) < 0	0
	SE ($P_{\text{heat}} \text{ opp. } P_{\text{cool}}$) < 0	0
	SE ($h_{\text{heat}} \text{ opp. } h_{\text{cool}} \text{ opp. } h_{\text{dehum}} \text{ opp. } h_{\text{disc}}$) < 0	0
	SE ($h_{\text{heat}} \text{ opp. } h_{\text{cool}} \text{ opp. } h_{\text{dehum}} \text{ opp. } h_{\text{disc}}$) > 24	24
		Valore corretto
Correzioni tipo 2 (“aggregate”)	Somma $h_{\text{predicted}}$ (fasce orarie) > 24	normalizzazione a 24
	SE $Q_{\text{cool}} > 9 \text{ kWh}$ e $Q_{\text{heat}} > 0$	$Q_{\text{heat}} = 0$
	SE $Q_{\text{cool}} > 0$ e $h_{\text{cool}} = 0$	$Q_{\text{cool}} = 0$
	SE $Q_{\text{heat}} > 0$ e $h_{\text{heat}} = 0$	$Q_{\text{heat}} = 0$
	SE $Q_{\text{dehum}} > 0$ e $h_{\text{dehum}} = 0$	$Q_{\text{dehum}} = 0$
	SE $Q_{\text{cool}} = 0$ e $h_{\text{cool}} > 0$	$h_{\text{cool}} = 0$
	SE $Q_{\text{heat}} = 0$ e $h_{\text{heat}} > 0$	$h_{\text{heat}} = 0$
	SE $Q_{\text{dehum}} = 0$ e $h_{\text{dehum}} > 0$	$h_{\text{dehum}} = 0$
		Valore corretto
Implementazioni (nell'algoritmo)	Se $h_{\text{disc}} Z1 < 0.5$	$T_{\text{disc_Z1}} = \text{VOID}$
	Se $h_{\text{disc}} Z2 < 0.5$	$T_{\text{disc_Z2}} = \text{VOID}$

Tabella 10: Correzioni apportate alle simulazioni con reti neurali

Nell'algoritmo, sono inoltre stati considerati i seguenti arrotondamenti per difetto o per eccesso in funzione dell'unità più vicina:

- Ore, energia, potenza > Unità
- T, RH, T_{disc} > 1 decimale

3.5 Output

Per ciascuna delle 1'161 simulazioni sono state elaborate una scheda riassuntiva dei dati di input (valori specifici di ogni singola variabile definita in Tabella 4 e profili d'uso / destinazione d'uso) e una scheda di sintesi dei principali dati di output (aggregati sotto forma di grafici e di parametri minimi/massimi o medi/totali annuali, a seconda delle grandezze). Le schede di input e di output degli edifici di base possono essere consultate nell'Annesso A e nell'Annesso C.

Per ogni dato riportato nella scheda di output viene calcolato un valore principale (valore medio sui 30 anni simulati) e un margine di incertezza di quest'ultimo, che corrisponde alla deviazione standard rispetto al valore medio dei risultati dei 30 anni analizzati.

Scenario climatico	RCP 8.5		
Stazione climatica	Magadino		
Q _{heat}	310'519	+/-	32'572 kWh
Q _{heat}	44.7	+/-	4.7 kWh/m ²
P _{max} (heat)	135.5	+/-	12.1 kW
P _{max} (heat)	19.5	+/-	1.7 W/m ²
h _{heat on}	4'264	+/-	243 h
Q _{cool}	32'900	+/-	12'295 kWh
Q _{cool}	4.7	+/-	1.8 kWh/m ²
P _{max} (cool)	63.5	+/-	16.8 kW
P _{cool} (media)	8.0	+/-	1.8 W/m ²
P _{media} (cool)	1.2	+/-	0.3 kW
h _{cool ON}	1'342	+/-	288 W/m ²
h _{cool ON} (16.04-15.10)	1'337	+/-	288 h
h _{cool ON_out}	5	+/-	7 h
h _{cool ON} (16.04-15.10)	30%	+/-	0 %
Q _{deh} (tot)	23'005	+/-	4'607 kWh
Q _{deh} (tot)	3.3	+/-	0.7 kWh/m ²
h _{deh ON}	1'077	+/-	222 h
T _{i,m,disc}	-	+/-	°C
% h disc	0.1%	+/-	0.0% (*)
h (> 26.5 °C)	0	+/-	0 h
T _{air max} Z1	26.8 °C	+/-	0.1 °C
T _{i,m,disc} , Z1	-	+/-	°C
h disc, Z1	10 h	+/-	1 h
T _{air max} Z2	26.6 °C	+/-	0.1 °C
T _{i,m,disc} , Z2	-	+/-	°C
h disc, Z2	5 h	+/-	0 h

(*) discomfort		
ORE	GIORNI	
0	0	Trm ≤ 12°C
1	0	12 < Trm ≤ 17.5°C
4	0	Trm > 17.5°C

Valore medio (per i 30 anni)	Incetza data dalla deviazione standard
------------------------------	--

- Valori medi (per i 30 anni) delle seguenti grandezze:
- Q_{heat}, Q_{cool}, Q_{deh}: il valore medio del fabbisogno termico annuale di riscaldamento, raffreddamento e deumidificazione;
 - P_{max(heat)}, P_{max(cool)}: il valore medio della potenza massima annuale per il riscaldamento e raffreddamento;
 - P_{media(cool)}: il valore medio della potenza media (annuale) per il raffreddamento;
 - h_{heat}, h_{cool}, h_{deh}: il valore medio della somma annuale delle ore previste per riscaldare, raffreddare e deumidificare l'edificio;
 - T_{air max}Z1 o Z2: il valore medio delle massime temperature, per ciascuna zona;
 - T_{i,m,disc}Z1 o Z2: il valore medio delle temperature interne medie di discomfort, per ciascuna zona;
 - h_{disc} Z1 o Z2: il valore medio della somma annuale delle ore giornaliere di discomfort, per ciascuna zona;
 - T_{i,m,disc}: il valore medio delle temperature medie annuali di discomfort (calcolate in accordo alla formula di cui al cap. 3.1.1.
 - % h_{disc}: il valore medio delle ore di discomfort (calcolate in accordo alla formula di cui al cap. 3.1.1) rapportato alle ore totali annuali di un anno (8'712 h);
 - h_{>26.5}: valore medio delle ore giornaliere annuali con temperature maggiori a 26.5°C.

Tabella 11: Informazioni presenti nella scheda di output

Come anticipato all'interno del capitolo 3.1.1, i principali parametri riepilogativi ($h_{>26.5}$, $h_{\text{attiv.cool}}$, $T_{i,m,\text{disc}}$, Q_{cool} , h_{discZ1} , h_{discZ2} , $h_{\text{disc,SIA180}}$) sono inoltre stati dettagliati in tre fasce, i cui limiti sono dati dalla temperatura media mobile $T_{rm(-2d)}$.

La temperatura media mobile di un giorno i si calcola attraverso la media della temperatura esterna media dei due giorni precedenti: $T_{rm}(-2d)_i = \frac{(T_{mext_{i-1}} + T_{mext_{i-2}})}{2}$

	$T_{rm} \leq 12 \text{ °C}$	$12 < T_{rm} \leq 17.5 \text{ °C}$	$T_{rm} > 17.5 \text{ °C}$	TOT
$h_{>26.5}$	0	0	0	0
$h_{\text{attiv.COOL}}$	71	492	1'466	2'029
$T_{i,m,\text{disc}}$	25.1	26.0	26.5	25.5
Q_{cool}	184	4'376	22'026	26'586
$h_{\text{disc,SIA180_z1}}$	429	828	22	1'279
$h_{\text{disc,SIA180_z2}}$	338	512	16	866
$h_{\text{disc,SIA180}}$	415	780	21	1'216

Tabella 12: Esempio di dettaglio dell'output

Anche i giorni di discomofort sono stati calcolati a partire dai valori di temperatura media giornaliera pronosticata. Per questo calcolo, in caso di edificio climatizzato e temperatura media giornaliera $> 26.5 \text{ °C}$, si è limitata la temperatura media giornaliera ad un valore massimo di 26.5 °C .

4 Risultati

Grazie ad una serie di analisi è stato possibile elaborare alcune considerazioni sulle tre tipologie di edifici considerate (residenziale, scolastico, amministrativo). Nel presente capitolo vengono descritti i principali passaggi così come le considerazioni più rilevanti per ogni tipologia di edificio:

A. Analisi delle simulazioni sul clima di riferimento

Tale analisi è stata condotta consultando le schede di output (Annesso C). Le stesse permettono di sintetizzare per gruppi di simulazioni gli effetti della variazione di alcune caratteristiche costruttive e impiantistiche assegnando una valutazione globale al fabbisogno energetico e al comfort (significativo peggioramento, effetto positivo, non significativo). A favore di sintesi, si riportano solo le considerazioni principali.

B. Identificazione di alcune varianti di edifici da simulare nel clima futuro e analisi dei risultati

Grazie alle osservazioni emerse nell'analisi precedente sul clima di riferimento e a seguito di una serie di considerazioni fatte in seno al gruppo di lavoro, sono state definite un set di varianti di edifici da simulare nel clima futuro. Degli output ottenuti sono stati riportati i risultati e le considerazioni più significative.

C. Analisi dell'influenza delle variabili costruttive e impiantistiche sul clima di riferimento

Al fine di approfondire l'analisi e tentare di identificare i parametri che hanno un'influenza positiva sul fabbisogno energetico e sul comfort, sono stati realizzati specifici diagrammi e grafici per identificare l'influenza della variazione di un singolo parametro (e.g. superficie vetrata, capacità termica e isolamento termico). Nello specifico, ci si è concentrati sull'influenza dei vari parametri in relazione al fabbisogno energetico totale, sul discomfort nelle mezze stagioni e il discomfort estivo (rappresentato dalle ore di accensione dell'impianto di raffreddamento quando l'edificio è dotato di un impianto di questo tipo o dalle ore con temperatura superiore a 26.5°C nel caso in cui l'edificio ne sia privo) per le diverse varianti di edifici.

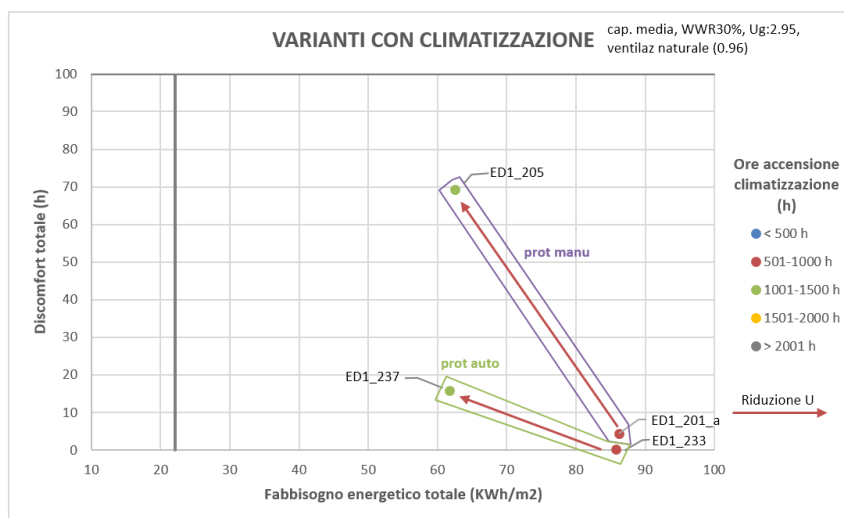


Figura 9: Esempio del grafico per edifici con climatizzazione estiva (raffreddamento + deumidificazione). Le varianti degli edifici simulati con le relative sigle identificative sono rappresentate dai punti in funzione del discomfort e del fabbisogno energetico totale. Il colore dei punti indica, inoltre, il numero di ore nel quale il sistema di climatizzazione è stato acceso. All'interno dei grafici, le frecce indicano infine la variazione di un parametro costruttivo quale, in questo caso, il valore U.

D. Analisi dell'influenza delle variabili costruttive e impiantistiche sul clima futuro

Sulla base dei risultati e delle considerazioni descritte nei paragrafi precedenti, sono state identificate delle nuove varianti di edifici con caratteristiche costruttive ed impiantistiche diverse allo scopo di verificare il loro comportamento in ambito energetico e di comfort nel clima futuro.

4.1 Edifici residenziali

A. Analisi delle simulazioni sul clima di riferimento

Le principali osservazioni sul clima di riferimento per gli edifici residenziali sono di seguito riassunte.

- Le simulazioni eseguite nel clima di riferimento (1961-1990) mostrano come il **risanamento globale** (elementi opachi con un valore U tra 0.15 W/m²K e 0.25 W/m²K e un vetro triplo performante) di edifici che non sono climatizzati e non presentano discomfort estivo comporta **problemi di surriscaldamento estivo e nelle mezze stagioni** (le ore di discomfort passano da 0 a 2'350). **Tali edifici necessitano quindi di misure compensatorie o un impianto di climatizzazione**. Parallelamente le simulazioni indicano una riduzione del fabbisogno utile per riscaldamento fino all'85%.
- Il risanamento globale di edifici climatizzati e senza discomfort estivo, porta già nel clima di riferimento a situazioni di discomfort nelle mezze stagioni (da 0 a 110 ore) e ad un netto aumento del fabbisogno di climatizzazione (raddoppiandolo o triplicandolo). Il fabbisogno utile annuale migliora comunque (-50...70%) ma il fabbisogno per la climatizzazione diventa, rispetto al riscaldamento, significativo.

Inoltre, emergono anche le seguenti considerazioni di dettaglio su specifici aspetti.

- In edifici isolati, il fabbisogno per climatizzazione non cambia significativamente al variare della capacità termica e non subisce un incremento sostanziale all'aumentare della superficie vetrata (finché questa non supera il 50% delle facciate).
- Edifici leggeri climatizzati, se ben isolati e con vetri tripli, non sono peggiori in termini energetici di edifici massicci (a parità di altri parametri) ed in termini di comfort si rivelano anche migliori nelle mezze stagioni.
- Una ventilazione naturale con portata addizionale estiva per smaltire il surriscaldamento (solo nelle ore di presenza delle persone) non ha effetti significativi né sulla riduzione del fabbisogno per climatizzazione né sulla riduzione delle ore di discomfort, soprattutto in edifici massicci (più difficili da «scaricare»). Questa considerazione vale in generale per diverse tipologie costruttive (isolate o non isolate, più o meno finestrate), e per diverse strategie di gestione della ventilazione (p.es. attivazione della stessa a partire da 24°C oppure 26 °C).
- Per edifici leggeri molto vetrati (superficie vetrata superiore a 70%) non c'è alcun vantaggio nell'isolare le parti opache, né in termini energetici, né di comfort.

B. Identificazione di alcune varianti di edifici da simulare nel clima futuro e analisi dei risultati

Dalle simulazioni condotte sul clima di riferimento, emerge che il risanamento globale degli edifici secondo lo stato della tecnica attuale comporta problemi di surriscaldamento estivo e nelle mezze stagioni tali da rendere necessarie l'implementazione di misure compensatorie o di un impianto di climatizzazione estiva. Ciò è in parte dovuto ai guadagni solari così come agli apporti termici interni che anche all'interno degli edifici residenziali risultano essere importanti. La dispersione termica, in particolare attraverso gli elementi opachi risulta in seguito essere più difficoltosa in considerazione dell'isolamento termico particolarmente performante. Quando vi è climatizzazione estiva, inoltre, essa risulta avere un'importanza relativa considerevole (32-56%) rispetto al fabbisogno di riscaldamento. Ciò nonostante, si rileva una riduzione del fabbisogno energetico totale.

Al fine di valutare in maniera più approfondita questo aspetto e la risposta che gli edifici avranno nel clima futuro dal punto di vista energetico e di comfort sono state selezionate tre varianti di edifici con differenti caratteristiche costruttive ed impiantistiche tipiche di differenti epoche storiche.

- L'edificio "caso base" (ED1_000) rappresenta l'edificio di partenza ed è caratterizzato da un rapporto pareti-serramenti intorno al 25%, un isolamento opaco di tipo medio-scarso (U:0.77 W/m²K), delle finestre con doppio vetro, una capacità termica elevata e delle protezioni solari esterne a movimentazione manuali. In aggiunta a queste caratteristiche "standard" l'edificio è dotato di un impianto di raffreddamento e deumidificazione, nonché di un sistema ventilazione meccanica con attivazione durante il periodo di occupazione dell'edificio.

- L'edificio edificato rappresentativo dell'epoca 1990-2010 (ED1_2000) è caratterizzato da una superficie finestrata media del 30%, un isolamento opaco medio ($U:0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$), delle finestre con doppio vetro, una capacità termica elevata, delle protezioni solari esterne a movimentazione manuali, un'assenza di impianti di climatizzazione estiva e ventilazione naturale durante il periodo di occupazione.
- L'edificio edificato successivamente al 2010 (ED1_2010) è invece caratterizzato da una superficie finestrata media del 30%, un isolamento opaco performante ($U:0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$), delle finestre con triplo vetro, una capacità termica elevata, delle protezioni solari esterne a movimentazione automatizzata, un impianto di climatizzazione estiva e una ventilazione meccanica durante il periodo di occupazione.

		ED1_000_a (caso base)	ED1_2000_a	ED1_2010_a
Variabile	Superficie finestrata media	23%	30%	30%
	Isolamento medio opaco [$\text{W/m}^2\text{K}$]	medio-scarso ($U=0.77$)	medio ($U=0.4$)	performante ($U=0.15$)
	Capacità termica	elevata	elevata	elevata
	Protezioni solari esterne (controllo)	manuale	manuale	automat.
	Climatizzazione estiva	raffredd. (+deumid)	nessuna	raffredd. (+deumid)
	Ventilazione naturale	Assente	Naturale	Assente
	Ventilazione meccanica	Meccanica	Assente	Meccanica
	Gestione ventilazione	Durante l'occupazione	Durante l'occupazione	Durante l'occupazione
	Finestre	Vetro doppio scarso ⁽¹⁾	Vetro doppio	Vetro triplo RUn

		riferimento		futuro		riferimento		futuro		riferimento		futuro	
Output	Q_H [$\text{kWh/m}^2\text{a}$]	63.2	44.7	39.8	26.1	9.5	4.3	63.2	44.7	39.8	26.1	9.5	4.3
	$Q_C + Q_D$ [$\text{kWh/m}^2\text{a}$]	2.3	8	-	-	7.9	16.3	2.3	8	-	-	7.9	16.3
	Q_T [$\text{kWh/m}^2\text{a}$]	65.5	52.7	-	-	17.4	20.6	65.5	52.7	-	-	17.4	20.6
	$h_{cool ON}$	630	1'342	-	-	2'222	3'243	630	1'342	-	-	2'222	3'243
	$h > 26.5^\circ\text{C}$	0	0	2'140	3'282	0	0	0	0	2'140	3'282	0	0
	h_{disc}	0	1	8	49	197	125	0	1	8	49	197	125

Tabella 13: Dati di input e output relativi alle simulazioni nel clima di riferimento e nel clima futuro per le tre varianti di edifici residenziali tipiche del parco immobiliare esistente

Dai dati di output riportati nella Tabella 13, emerge che le ore di accensione degli impianti di climatizzazione o, analogamente, le ore in cui si verifica una temperatura superiore a 26.5°C per gli edifici non climatizzati durante il periodo estivo, aumentano sensibilmente passando dal clima di attuale al clima futuro (+31...53%). A livello di fabbisogno di riscaldamento si verifica in tutti i casi una riduzione (da -29 a -55%) mentre il fabbisogno di climatizzazione estiva (raffreddamento e deumidificazione) aumenta significativamente (da 52 a 71%).

Di conseguenza, si è posta l'attenzione sulla possibilità di ridurre l'isolamento opaco per evitare un eccessivo surriscaldamento sia in estate che nelle mezze stagioni. Si è inoltre valutata l'installazione di impianti di raffreddamento e/o deumidificazione per garantire il comfort. Sono di conseguenza state identificate due varianti di edifici residenziali che si ipotizza esser risanati nel 2030 (ED1_2030R) o di nuova costruzione nel 2030 (ED1_2030N) dotati di climatizzazione estiva a cui è stato assegnato un isolamento opaco medio ($U: 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$). Queste due varianti sono caratterizzate dalle seguenti caratteristiche costruttive ed impiantistiche.

- L'edificio risanato entro il 2030 (ED1_2030R) presenta le seguenti caratteristiche costruttive: una percentuale vetrata pari al 30%, finestre con triplo vetro, capacità termica elevata, protezioni solari esterne a movimentazione automatizzata. Inoltre, si suppone un isolamento opaco di tipo medio (per evitare eccessive ore di discomfort), una ventilazione di tipo naturale con portata estiva maggiorata e attivazione durante l'occupazione e che l'edificio sia dotato di impianto di raffreddamento e deumidificazione.
- Un edificio di nuova costruzione realizzato nel 2030 con criteri attuali (ED1_2030N) ha, considerando gli indirizzi architettonici odierni, una percentuale vetrata pari al 50%, finestre con triplo vetro, capacità termica

media e protezioni solari esterne a movimentazione automatizzata. Inoltre, si suppone un isolamento opaco di tipo medio (per evitare eccessive ore di discomfort), una ventilazione di tipo meccanico con portata estiva maggiorata e attivazione automatica sulle 24 ore e un impianto di raffreddamento e deumidificazione.

		ED.1_2030R	ED.1_2030N
Variabile	Superficie finestrata media	30%	50%
	Isolamento medio opaco [W/m ² K]	medio (0.25)	medio (0.25)
	Capacità termica	elevata	media
	Protezioni solari esterne (controllo)	automatizzata	automatizzata
	Climatizzazione estiva	raffredd. (+deumid)	raffredd. (+deumid)
	Ventilazione naturale	Igienica + estiva 1	Assente
	Ventilazione meccanica	Assente	Igienica + Estiva2
	Gestione ventilazione	Durante occ	H24
Finestre	Vetro triplo RUGn	Vetro triplo RUGn	

		riferimento	futuro	riferimento	futuro
Output	Q _H [kWh/m ² a]	22.1	11.6	15.3	8.9
	Q _C + Q _D [kWh/m ² a]	7	15.1	8.5	17.4
	Q _T [kWh/m ² a]	29.1	26.7	23.8	26.3
	h _{cool ON}	1890	2826	1568	2050
	h >26.5 °C	0	0	0	0
	h _{disc}	61	76	132	102

Tabella 14: Dati di input e output relativi alle simulazioni sul clima di riferimento e sul clima futuro per le due varianti di edifici residenziali che si ipotizza esser risanati o costruiti da nuovo nel 2030

Dai risultati delle simulazioni eseguite su tali varianti (Tabella 14) e il confronto con il caso base (ED1_000) emerge che, nonostante l'isolamento opaco non sia performante, si verifica una riduzione del fabbisogno di riscaldamento per le due varianti degli edifici del 2030 quando si passa dal clima attuale al clima futuro. Inoltre si osserva come la presenza di un isolamento globale scarso (U:0.77 W/m²K e finestre con vetro doppio) comporti un minor fabbisogno di climatizzazione estiva (nonostante non vi siano protezioni solari esterne automatizzate) con assenza di discomfort nelle mezze stagioni (grazie alla presenza di un sistema di ventilazione meccanica).

Dall'altro canto, edifici mediamente isolati (U:0.25 W/m²K e vetri tripli) hanno un fabbisogno energetico globale nettamente inferiore ma con comparsa di discomfort nelle mezze stagioni e un fabbisogno di climatizzazione significativo rispetto al fabbisogno di riscaldamento, nonostante vi siano protezioni solari esterne automatizzate e una ventilazione con portate estive maggiorate.

C. Analisi dell'influenza delle variabili costruttive e impiantistiche sul clima di riferimento

Attraverso un'analisi approfondita delle simulazioni effettuate sul clima di riferimento per valutare l'influenza di specifiche caratteristiche sul fabbisogno energetico e sul comfort, sono emerse le seguenti considerazioni in aggiunta alle precedenti osservazioni.

Osservando la Figura 10 emerge che la riduzione dell'isolamento termico delle superfici opache (da U:0.15 W/m²K a U:0.8 W/m²K) comporta un miglioramento del comfort estivo e nelle mezze stagioni, una riduzione del fabbisogno per climatizzazione ma un aumento del fabbisogno per riscaldamento e di conseguenza un incremento del fabbisogno totale.

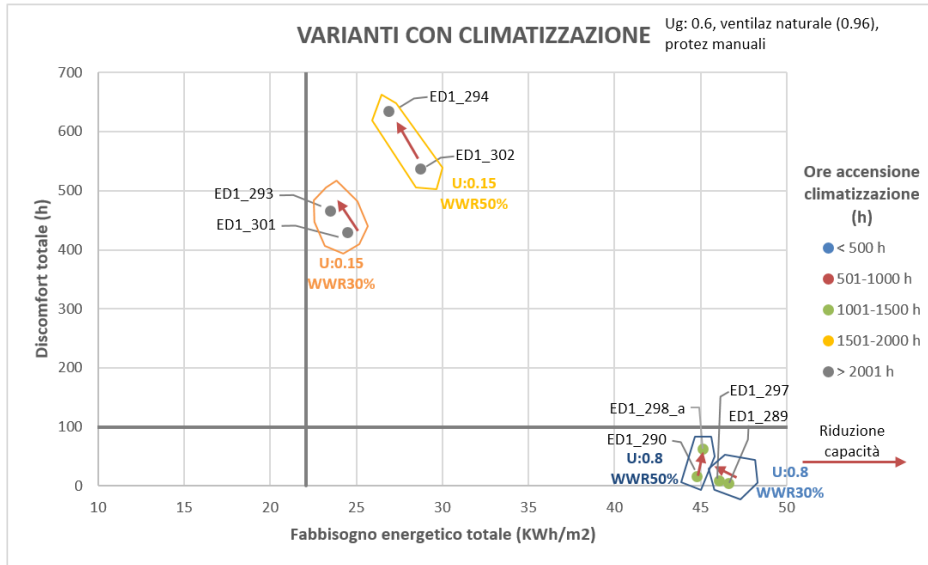


Figura 10: Edifici residenziali con climatizzazione estiva (raffreddamento + deumidificazione) caratterizzati da $U_g:0.6W/m^2K$, protezioni solari manuali e ventilazione naturale con portata igienica. Sono rappresentate le varianti con una percentuale vetrata (WWR) del 30% e del 50%, sia con $U:0.15W/m^2K$ sia con $U:0.8W/m^2K$. La freccia rossa rappresenta la riduzione della capacità termica da elevata a media

Grazie all'osservazione delle figure successive (Figura 11 e Figura 12) emerge inoltre quanto segue.

- La diminuzione della trasmittanza delle superfici vetrate (da $U_g: 2.95 W/m^2K$ a $U_g:0.6...0.4 W/m^2K$) comporta una riduzione del fabbisogno di riscaldamento e del fabbisogno totale, ma anche un peggioramento del comfort estivo e nelle mezze stagioni (più evidente quando la percentuale vetrata è elevata e l'isolamento termico delle superfici opache è performante)
- L'aumento della percentuale vetrata da 30% a 50% comporta un peggioramento del comfort estivo e nelle mezze stagioni (più evidente se edificio ha un involucro performante), un aumento del fabbisogno di climatizzazione, una riduzione del fabbisogno di riscaldamento ma in generale un aumento del fabbisogno totale.

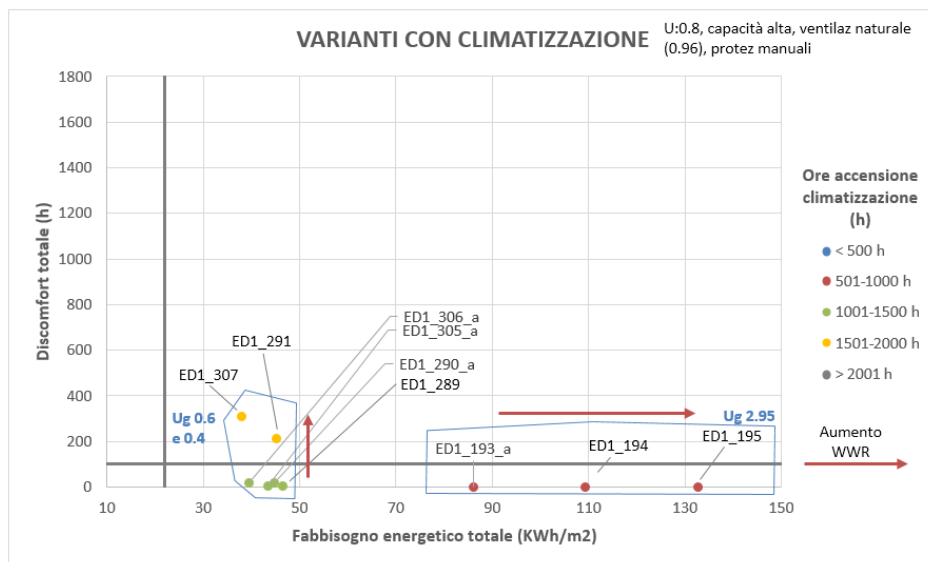


Figura 11: Edifici residenziali con climatizzazione estiva (raffreddamento + deumidificazione) caratterizzati da $U:0.8 W/m^2K$, capacità termica elevata, protezioni solari manuali e ventilazione naturale con portata igienica. Sono rappresentate le varianti con $U_g:2.95...0.4W/m^2K$. La freccia rappresenta l'incremento della percentuale vetrata (WWR) con tre step (30%-50%-70%)

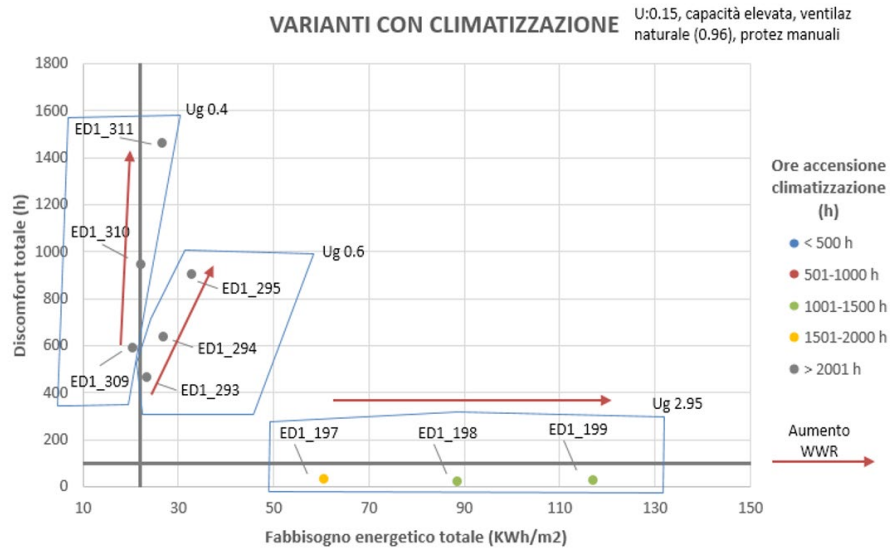


Figura 12: Edifici residenziali con climatizzazione estiva (raffreddamento + deumidificazione) caratterizzati da U:0.15 W/m²K, capacità termica alta, protezioni solari manuali e ventilazione naturale con portata igienica. Sono rappresentate le varianti con Ug:2.95...0.4W/m²K. La freccia rappresenta l'incremento della superficie vetrata (WWR) con tre step (30%-50%-70%)

Osservando le due figure seguenti (Figura 13 e Figura 14), si deduce che **l'aumento della capacità termica comporta un lieve ma non significativo miglioramento del comfort estivo** e nelle mezze stagioni e una riduzione poco significativa del fabbisogno di riscaldamento, di climatizzazione e del fabbisogno energetico totale. La riduzione del fabbisogno energetico è molto più significativa con una percentuale vetrata pari al 50% ma i fabbisogni energetici rimangono comunque superiori alla variante avente una percentuale vetrata pari al 30%.

Si denota inoltre come, quando l'isolamento è performante (U:0.15 W/m²K), l'aumento della capacità termica comporta un aumento del discomfort sebbene la variazione di fabbisogno totale sia minima.

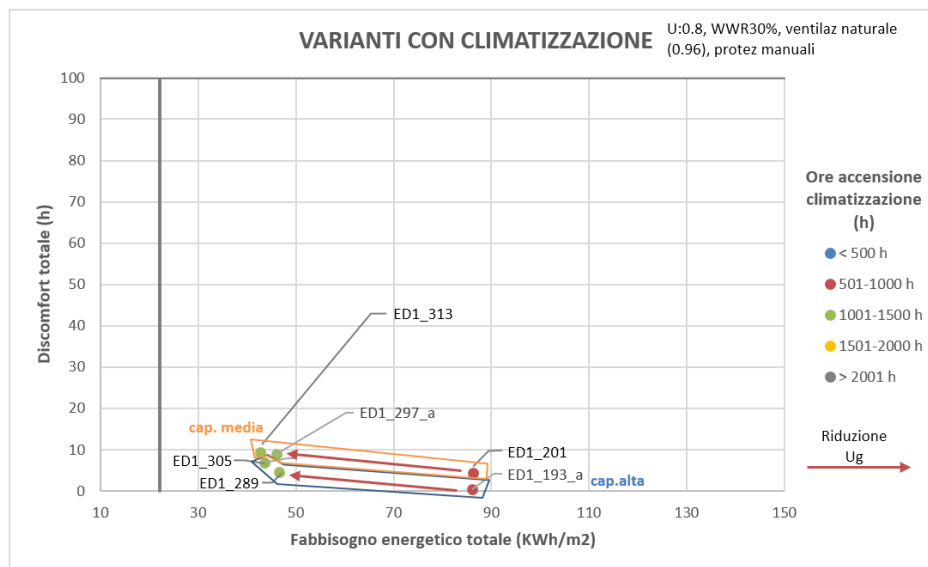


Figura 13: Edifici residenziali con climatizzazione estiva (raffreddamento + deumidificazione) caratterizzati da U:0.8 W/m²K, percentuale vetrata pari al 30%, protezioni solari manuali e ventilazione naturale con portata igienica. Sono rappresentate le varianti con capacità termica media (poligono giallo) e capacità termica elevata (poligono blu). La freccia rappresenta la riduzione della trasmittanza termica delle superfici vetrate da Ug:2.95 W/m²K a Ug:0.6 W/m²K.

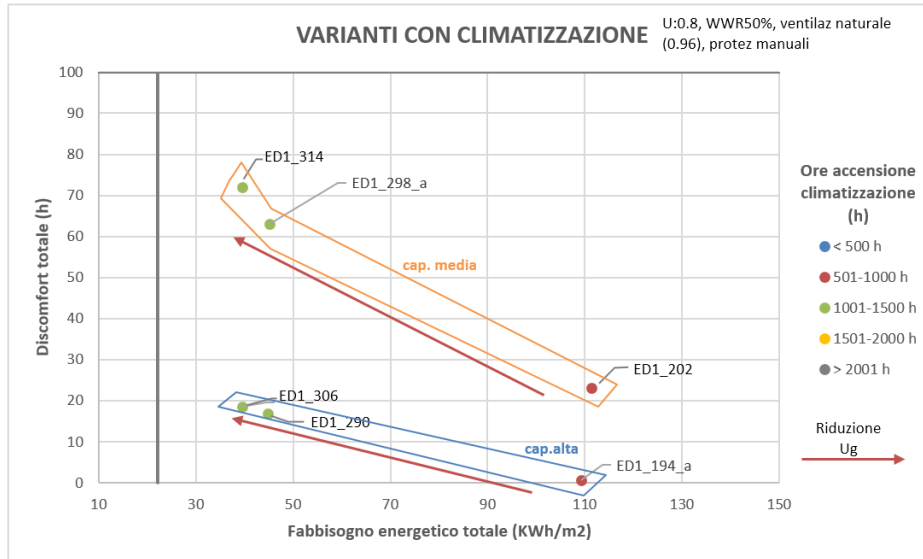


Figura 14: Edifici residenziali con climatizzazione estiva (raffreddamento + deumidificazione) caratterizzati da U:0.8 W/m²K, percentuale vetrata pari a 30%, protezioni solari manuali e ventilazione naturale con portata igienica. Sono rappresentate le varianti con capacità termica media (poligono giallo) e capacità termica elevata (poligono blu). La freccia rappresenta la riduzione della trasmittanza termica delle superfici vetrate da Ug:2.95 W/m²K a Ug:0.6 W/m²K.

Inoltre, dalle figure sottostanti (Figura 15 e Figura 16) si osserva come l'inserimento delle protezioni solari automatizzate comporta un miglioramento del comfort estivo e una notevole riduzione del fabbisogno per la climatizzazione, in modo particolare laddove la trasmittanza termica dell'isolamento opaco risulta essere particolarmente performante.

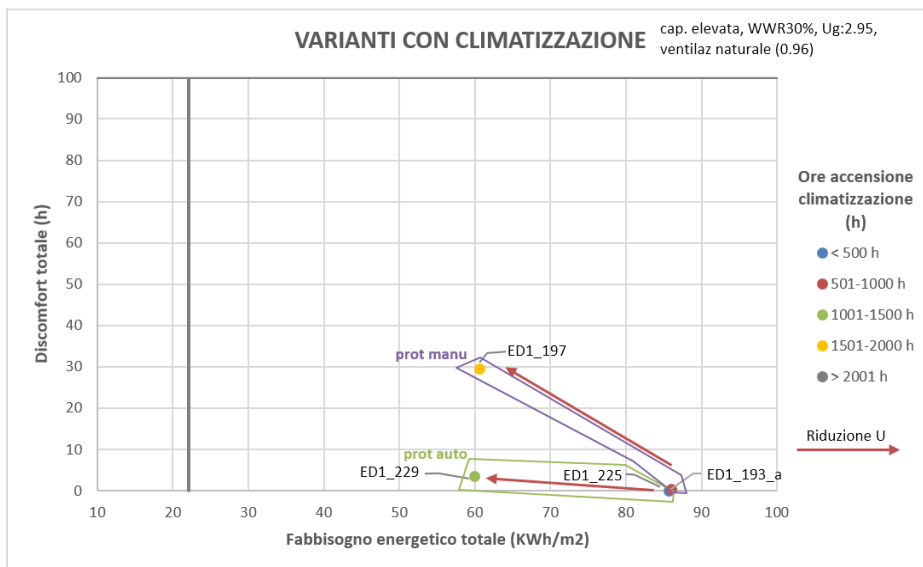


Figura 15: Edifici residenziali con climatizzazione estiva (raffreddamento + deumidificazione) caratterizzati da Ug:2.95 W/m²K, percentuale vetrata pari al 30%, capacità termica elevata e ventilazione naturale con portata igienica. Sono rappresentate le varianti con protezioni solari esterne a movimentazione manuale (poligono viola) e a movimentazione automatizzata (poligono verde). La freccia rappresenta la riduzione della trasmittanza termica dell'isolamento opaco da U: 0.8 W/m²K a U:0.15 W/m²K.

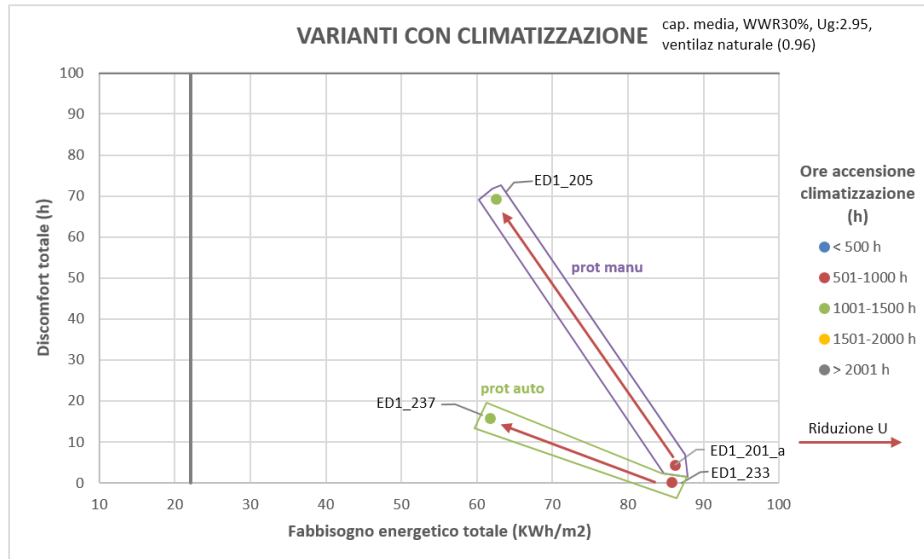


Figura 16: Edifici residenziali con climatizzazione estiva (raffreddamento + deumidificazione) caratterizzati da $U_g:2.95 \text{ W/m}^2\text{K}$, percentuale vetrata (WWR) pari al 30%, capacità termica media e ventilazione naturale con portata igienica. Sono rappresentate le varianti con protezioni solari esterne a movimentazione manuale (poligono viola) e a movimentazione automatizzata (poligono verde). La freccia rappresenta la riduzione della trasmittanza termica dell'isolamento opaco da $U: 0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ a $U:0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$

Infine, dalle simulazioni disponibili per il confronto tra la ventilazione meccanica e la ventilazione naturale, si osserva che l'impiego della ventilazione meccanica al posto della ventilazione naturale comporta un miglioramento del Q_{heat} , grazie al parziale recupero del calore durante il periodo invernale.

D. Analisi dell'influenza delle variabili costruttive e impiantistiche sul clima futuro

Dalle considerazioni emerse nei paragrafi precedenti emerge la necessità di verificare l'effetto di determinate caratteristiche costruttive ed impiantistiche anche nel clima futuro. Per valutare l'influenza della capacità termica e dell'isolamento termico della parte opaca sono quindi state fatte delle simulazioni aggiuntive riportate qui di seguito (Figura 17)

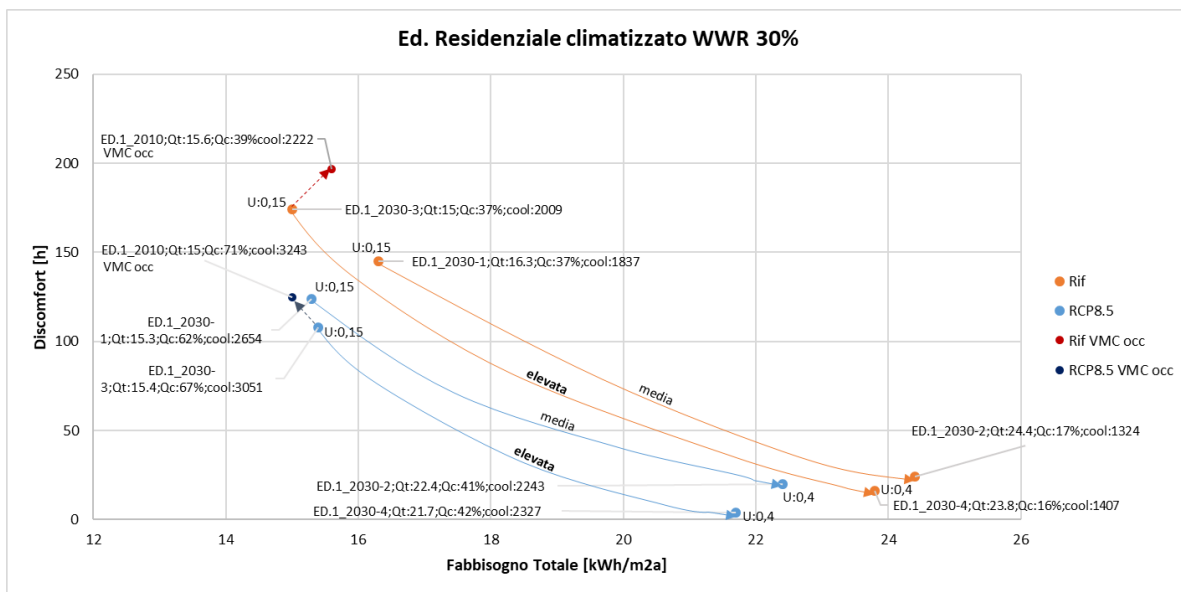


Figura 17: Edificio residenziale con superficie vetrata (WWR) del 30% e $U_g:0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ avente diversi valori di trasmittanza termica dell'isolamento opaco e diversa capacità termica. Tale edificio è caratterizzato da impianti di climatizzazione estiva (raffreddamento+ deumidificazione) e ventilazione meccanica con attivazione sulle 24 ore. Le simulazioni si riferiscono al clima di riferimento (arancione) e al clima futuro (blu). Inoltre, è presente l'edificio ED_2010 caratterizzato da ventilazione meccanica durante l'occupazione.

						RCP 8.5				
Tipologia	WWR	Ug - g	Uopaco	Cap termica	Sigla	Qh [kWh/m2a]	Qc [kWh/m2a]	Fabb. Tot [kWh/m2a]	h_disc mezze stagioni	h_cool_ON
Residenziale	30%	0,6 - 0,5	0.15	media	ED.1_2030-1	5.8	9.5	15.3	124	2654
Residenziale	30%	0,6 - 0,5	0.4	media	ED.1_2030-2	13.2	9.2	22.4	20	2243
Residenziale	30%	0,6 - 0,5	0.15	elevata	ED.1_2030-3	5.1	10.3	15.4	108	3051
Residenziale	30%	0,6 - 0,5	0.4	elevata	ED.1_2030-4	12.6	9.1	21.7	4	2327
Residenziale	30%	0,6 - 0,5	0.15	elevata	ED.1_2010	4.3	10.7	15	125	3243

Tabella 15: Parametri di input e output degli edifici residenziali simulati nel clima futuro

Osservando i risultati di queste simulazioni dalla Figura 17 e dalla Tabella 15 emerge quanto segue.

- Aumentando la capacità termica:
 - o si verifica un moderato miglioramento del comfort nelle mezze stagioni,
 - o se $U:0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, si verificano maggiori ore di accensione dell'impianto di raffreddamento ma con nessuna influenza sul fabbisogno di climatizzazione. Inoltre, si riduce del 4% il fabbisogno totale dovuto principalmente ad una riduzione del fabbisogno di riscaldamento,
 - o se $U:0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, l'aumento della capacità termica comporta un aumento delle ore di accensione dell'impianto e del fabbisogno di climatizzazione (+8%) e una diminuzione del fabbisogno di riscaldamento che "compensa" l'aumento del fabbisogno totale (+1%).
- Diminuendo l'isolamento della parte opaca:
 - o si favorisce la riduzione delle ore di accensione dell'impianto di raffreddamento, riducendo al contempo il fabbisogno per la climatizzazione. Il fabbisogno totale, visto l'aumento del fabbisogno per riscaldamento, aumenta (+ca. 30%),
 - o si diminuiscono significativamente le ore di discomfort nelle mezze stagioni (-83...90%), che risultano essere inferiori all'attuale limite di ore di discomfort (100h) al di sopra del quale si rivela necessaria l'installazione di un impianto di climatizzazione estiva.
- Adottare la ventilazione meccanica con attivazione automatica sulle 24 ore in edifici molto isolati ($U:0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$) permette di ridurre le ore di discomfort nelle mezze stagioni.
- La presenza di un isolamento performante della parte opaca dell'involucro ($U:0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$) comporta, osservando il fabbisogno totale, una preponderanza della quota parte legata al fabbisogno di climatizzazione rispetto al fabbisogno di riscaldamento.

4.2 Edifici scolastici

A. Analisi delle simulazioni sul clima di riferimento

Le principali osservazioni derivanti dalle simulazioni effettuate sul clima di riferimento sono qui di seguito riassunte.

- Il **risanamento globale** di edifici attualmente **non climatizzati** comporta nel clima di riferimento un aumento significativo del surriscaldamento estivo (da 830 a 3'220 ore) e la comparsa di discomfort anche nelle mezze stagioni (da 10 a 840 ore). Risulta quindi necessaria l'implementazione di misure compensatorie e/o un impianto di climatizzazione.
- Il **risanamento globale** di edifici attualmente **climatizzati** comporta, nel clima di riferimento, la comparsa di discomfort anche nelle mezze stagioni (da 10 a 1'040 ore) e l'attivazione dell'impianto di climatizzazione (da 0 a 2'300 ore).
- In edifici isolati non climatizzati, la presenza di una ventilazione meccanica consente di ridurre il fabbisogno di riscaldamento ma non ha un impatto significativo sul discomfort estivo.

B. Identificazione di alcune varianti di edifici da simulare nel clima futuro e analisi dei risultati

Dalle simulazioni condotte sul clima di riferimento, emerge che il risanamento globale degli edifici secondo lo stato della tecnica attuale comporta problemi di surriscaldamento estivo e nelle mezze stagioni tali da rendere necessarie delle misure compensatorie o un'installazione di un impianto di climatizzazione estiva. Quando vi è climatizzazione estiva, tuttavia, i relativi fabbisogni risultano avere un'importanza relativa minore rispetto al fabbisogno di riscaldamento.

Al fine di valutare la risposta degli edifici esistenti nel clima futuro dal punto di vista energetico e di comfort sono state definite tre diverse varianti di edifici tipici di differenti epoche storiche (edificio edificato prima del 1990, edificato tra il 1990 e il 2010 e dopo il 2010).

- L'edificio "caso base" (ED2_000) rappresenta l'edificio di partenza ed è caratterizzato da un rapporto pareti-superfici vetrate intorno al 30%, un isolamento opaco di tipo scarso, finestre con doppio vetro, capacità termica elevata e protezioni solari esterne a movimentazione manuale. Inoltre, l'edificio non ha impianti per la climatizzazione estiva ed è ventilato naturalmente durante il periodo di occupazione dell'edificio.
- L'edificio edificato nel periodo 1990-2010 (ED2_2000) è caratterizzato da una superficie finestrata media del 50%, un isolamento opaco di tipo medio-scarso, finestre con triplo vetro, capacità termica elevata, protezioni solari esterne a movimentazione manuale, assenza di impianti di climatizzazione estiva e ventilazione naturale durante il periodo di occupazione.
- L'edificio edificato successivamente al 2010 (ED2_2010) è infine caratterizzato da una superficie finestrata media del 50%, un isolamento opaco performante, finestre con triplo vetro, capacità termica elevata, protezioni solari esterne a movimentazione automatizzata, assenza di impianti di climatizzazione estiva e una ventilazione meccanica durante il periodo di occupazione.

		ED2_000_a (caso base)	ED2_2000_a	ED2_2010_a
Variabile	Superficie finestrata media	29%	50%	50%
	Isolamento medio opaco [W/m2K]	scarso (U=1.30)	medio-scarso (U=0.78)	performante (U=0.15)
	Capacità termica	elevata	elevata	elevata
	Protezioni solari esterne (controllo)	manuale	manuale	manuale
	Climatizzazione estiva	nessuna	nessuna	nessuna
	Ventilazione naturale	Naturale	Naturale	Assente
	Ventilazione meccanica	Assente	Assente	Meccanica
	Gestione ventilazione	Durante l'occupazione	Durante l'occupazione	Durante l'occupazione
	Finestre	Vetro doppio	Vetro triplo RUG	Vetro triplo RUG

		riferimento		futuro			
Output	Q_H [kWh/m ² a]	75.8	46.3	48	26.2	12.4	6.3
	$Q_C + Q_D$ [kWh/m ² a]	-	-	-	-	-	-
	Q_T [kWh/m ² a]	75.8	46.3	48	26.2	12.4	6.3
	$h_{cool, ON}$	-	-	-	-	-	-
	$h > 26.5$ °C	831	3567	2'407	3'850	3383	5098
	h_{disc}	6	284	81	451	1023	1880

Tabella 16: Dati di input e output relativi alle simulazioni sul clima di riferimento e sul clima futuro per le tre varianti di edifici scolastici tipiche del parco immobiliare esistente

Dai dati di output riportati nella Tabella 16 emerge che le ore di accensione degli impianti di raffreddamento per gli edifici climatizzati nel periodo estivo o, analogamente, le ore in cui si verifica una temperatura superiore a 26.5°C per gli edifici non climatizzati durante il periodo estivo, aumentano fino a quattro volte nel passaggio dal clima attuale al clima futuro. Inoltre, si verifica un significativo aumento anche delle ore di discomfort nel periodo delle mezze stagioni. A livello di fabbisogno di riscaldamento si verifica in tutti i casi una riduzione (-34...49%).

Di conseguenza, si è posta l'attenzione sulla possibilità di ridurre l'isolamento opaco per evitare un eccessivo surriscaldamento sia in estate che nelle mezze stagioni. Sono di conseguenza state identificate due varianti di edifici scolastici che si ipotizza esser risanati nel 2030 (ED2_2030R) o di nuova costruzione sempre nel 2030 (ED2_2030N). Nello specifico, le varianti analizzate hanno le seguenti caratteristiche costruttive ed impiantistiche.

- L'edificio risanato entro il 2030 con criteri attuali (ED2_2030R) presenta una percentuale vetrata pari al 50%, finestre con triplo vetro, capacità termica media, protezioni solari esterne a movimentazione automatizzata. Inoltre, si suppone che la ventilazione sia di tipo meccanico con attivazione automatica sulle 24 ore e portata estiva maggiorata e si ipotizza un isolamento opaco di tipo medio per prevenire il surriscaldamento estivo.
- L'edificio di nuova costruzione realizzato nel 2030 con criteri attuali (ED2_2030N) ha una percentuale vetrata pari al 30%, finestre con triplo vetro, capacità termica media, protezioni solari esterne a movimentazione automatizzata. Inoltre, si suppone che la ventilazione sia di tipo meccanico con attivazione automatica sulle 24 ore e portata estiva maggiorata, e che un isolamento opaco di tipo medio per prevenire il surriscaldamento estivo.

		ED.2_2030R	ED.2_2030N
Variabile	Superficie finestrata media	50%	30%
	Isolamento medio opaco [W/m ² K]	medio (U=0.25)	medio (U=0.25)
	Capacità termica	media	media
	Protezioni solari esterne (controllo)	automatizzata	automatizzata
	Climatizzazione estiva	nessuna	raffredd. (+deumid)
	Ventilazione naturale	Assente	Assente
	Ventilazione meccanica	Igienica + Estiva 1	Igienica + Estiva2
	Gestione ventilazione	H24	H24
	Finestre	Vetro triplo RUGn	Vetro triplo RUGn

		riferimento	futuro	riferimento	futuro
Output	Q _H [kWh/m ² a]	18.2	12	16.8	8.5
	Q _C + Q _D [kWh/m ² a]	-	-	6	16.8
	Q _T [kWh/m ² a]	18.2	12	22.8	25.3
	h _{cool_ON}	-	-	869	1820
	h >26.5 °C	1497	2767	0	0
	h _{disc}	98	201	145	238

Tabella 17: Dati di input e output relativi alle simulazioni sul clima di riferimento e sul clima futuro per le due varianti di edifici scolastici che si ipotizza esser risanati o costruiti da nuovo nel 2030

Dalle simulazioni condotte su tali varianti (Tabella 17) rispetto al caso base (ED2_000) emerge che, nonostante l'isolamento opaco non sia performante (U:0.25 W/m²K), si verifica una riduzione del fabbisogno di riscaldamento rispetto al caso base (legata al miglioramento della trasmittanza delle parti opache, alla minore trasmittanza delle superfici vetrate e alla ventilazione meccanica con recupero di calore). Inoltre, è da notare come l'aumento della superficie vetrata (da 30% a 50%) comporti un aumento del fabbisogno per riscaldamento nel clima futuro e un aumento delle ore di surriscaldamento estivo (confronto di h_{cool_ON} con h>26.5°C). Si sottolinea inoltre che una parte della riduzione del surriscaldamento nell'edificio con una percentuale vetrata del 30% è dovuta alla portata di ventilazione estiva maggiorata. Infine, per quanto riguarda il livello di discomfort nelle mezze stagioni non vi sono significative differenze nel clima futuro.

C. Analisi dell'influenza delle variabili costruttive e impiantistiche sul clima di riferimento

Attraverso un'analisi approfondita delle simulazioni effettuate sul clima di riferimento per valutare l'influenza di specifiche caratteristiche sul fabbisogno energetico e sul comfort, emergono le seguenti considerazioni aggiuntive.

Osservando le simulazioni di Figura 18, emerge che la diminuzione dell'isolamento termico delle superfici opache (da U:0.15 W/m²K a U:1.3 W/m²K) con vetri doppi (U_g: 1.4 W/m²K) comporta un significativo miglioramento del comfort estivo e nelle mezze stagioni, ma aumento del fabbisogno di riscaldamento, più marcato quando la superficie finestrata è bassa.

Gli edifici oggetto di questa analisi sono edifici scolastici senza impianti di climatizzazione estiva (Figura 18), aventi di conseguenza un consumo per raffrescamento nullo. In presenza di un impianto di climatizzazione è verosimile attendersi, come per gli edifici residenziali, una riduzione del fabbisogno in caso di presenza di un isolamento termico delle superfici opache più scarso.

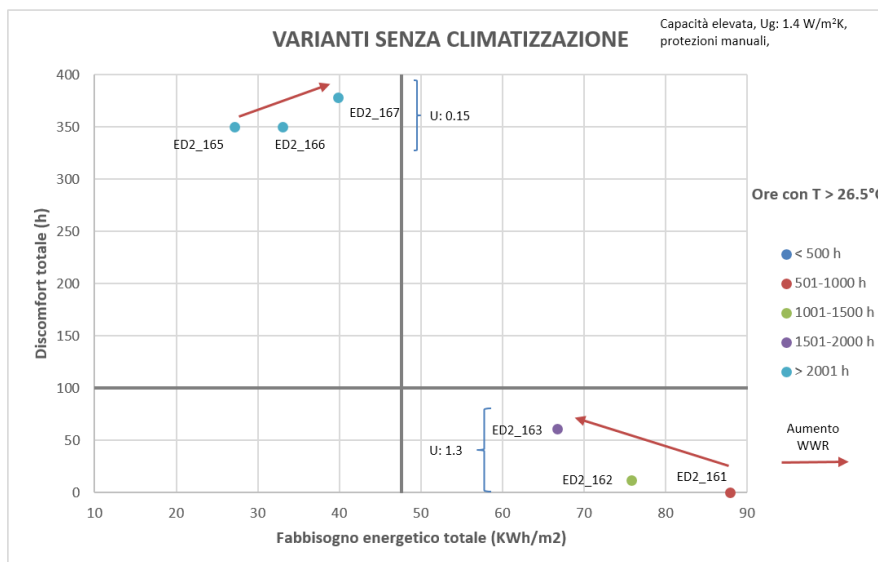


Figura 18: Edifici scolastici senza climatizzazione estiva caratterizzati da Ug: 1.4 W/m²K, capacità termica elevata, protezioni solari esterne manuali e ventilazione naturale con portata igienica. Sono rappresentate le varianti con U:0.15W/m²K e con U:1.3 W/m²K. La freccia rappresenta l'aumento della superficie finestrata (WWR) da 30% a 50%

Inoltre, dalle simulazioni sugli edifici scolastici privi di climatizzazione estiva rappresentate in Figura 19 e in Figura 20 emergono i seguenti aspetti.

- Aumentare la percentuale vetrata da 30% a 50% comporta un peggioramento del comfort in estate e nelle mezze stagioni. In presenza di una capacità termica elevata, è previsto un aumento del fabbisogno per riscaldamento in caso di un isolamento scarso così come una sua riduzione in presenza di un isolamento performante.
- Aumentare la percentuale vetrata da 50% a 70% comporta un peggioramento del comfort estivo e nelle mezze stagioni e una riduzione del fabbisogno per riscaldamento se l'isolamento risulta essere scarso mentre un aumento del fabbisogno in caso di isolamento performante.
- Aumentare la **capacità termica** (pavimento, soffitto, pareti estere/interne, vedi Tabella 6) con una percentuale vetrata del 30% comporta un miglioramento del comfort estivo, se l'edificio risulta essere poco isolato, altrimenti un lieve peggioramento, un miglioramento del comfort mezze stagioni e una diminuzione del fabbisogno per riscaldamento se l'edificio è molto isolato.
- Aumentare la **capacità termica** con una percentuale vetrata del 50% comporta invece un miglioramento del comfort estivo se l'edificio è molto isolato altrimenti nessuna significativa variazione, un miglioramento del comfort nelle mezze stagioni e una riduzione del fabbisogno per riscaldamento.
- Aumentare la **capacità termica** con una percentuale vetrata del 70% comporta infine un miglioramento del comfort estivo e del comfort nelle mezze stagioni e una riduzione del fabbisogno per riscaldamento.

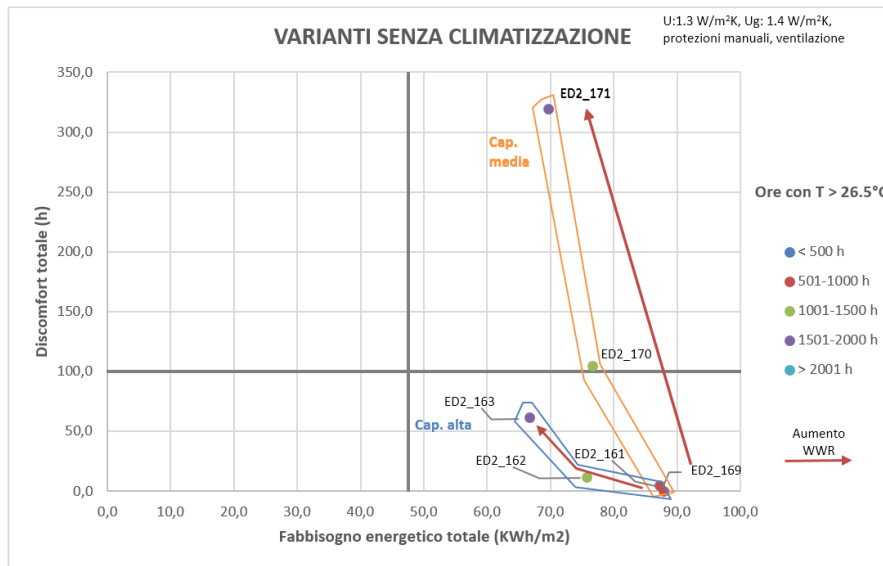


Figura 19: Edifici scolastici senza climatizzazione estiva caratterizzati da U: 1.3 W/m²K, Ug: 1.4 W/m²K, protezioni solari esterne manuali e ventilazione naturale con portata igienica. Sono rappresentate le varianti con capacità termica elevata (poligono blu) e capacità termica media (poligono giallo). La freccia rappresenta l'aumento della superficie finestrata (WWR: 30%...50%...70%)

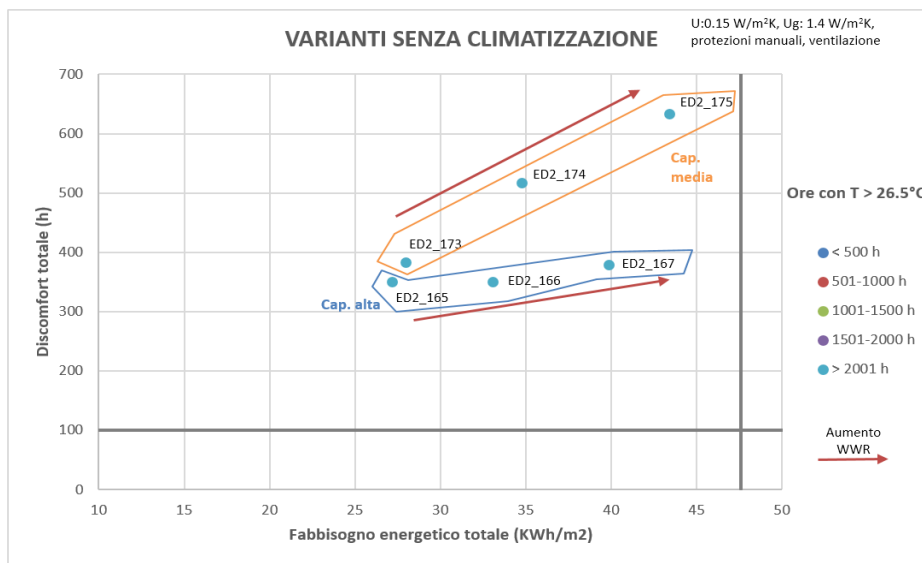


Figura 20: Edifici scolastici senza climatizzazione estiva caratterizzati da U: 0.15 W/m²K, Ug: 1.4 W/m²K, protezioni solari esterne manuali e ventilazione naturale con portata igienica. Sono rappresentate le varianti con capacità termica elevata (poligono blu) e capacità termica media (poligono giallo). La freccia rappresenta l'aumento della superficie finestrata (WWR: 30%...50%...70%)

D. Analisi dell'influenza delle variabili costruttive e impiantistiche sul clima futuro

Considerando quanto descritto nei paragrafi precedenti emerge la necessità di verificare l'effetto di determinate caratteristiche costruttive ed impiantistiche. Per valutare l'influenza della capacità termica e dell'isolamento termico della parte opaca sono quindi state fatte delle simulazioni aggiuntive nel clima futuro.

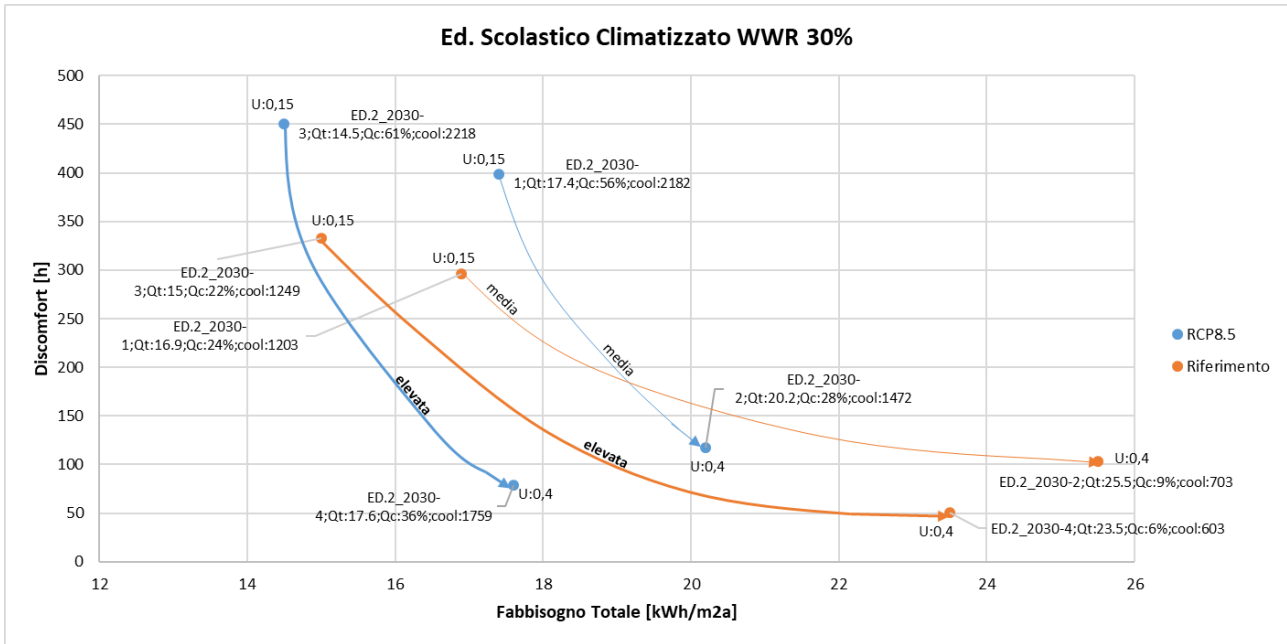


Figura 21: Edificio scolastico con superficie finestrata (WWR) del 30% e Ug:0.6 W/m²K avente diversi valori di trasmittanza termica dell'isolamento opaco e diversa capacità termica. Tale edificio è caratterizzato da impianti di climatizzazione estiva (raffreddamento + deumidificazione) e ventilazione meccanica con attivazione sulle 24 ore. Le simulazioni si riferiscono al clima di riferimento (arancione) e al clima futuro (blu).

Tipologia	WWR	Ug - g	Uopaco	Cap termica	Sigla	RCP 8.5				
						Qh [kWh/m2a]	Qc [kWh/m2a]	Fabb. Tot [kWh/m2a]	h_disc stagioni	h_cool_ON
Scolastico	30%	0,6 - 0,5	0.15	media	ED.2_2030-1	7.7	9.7	17.4	399	2182
Scolastico	30%	0,6 - 0,5	0.4	media	ED.2_2030-2	14.5	5.7	20.2	117	1472
Scolastico	30%	0,6 - 0,5	0.15	elevata	ED.2_2030-3	5.7	8.8	14.5	450	2218
Scolastico	30%	0,6 - 0,5	0.4	elevata	ED.2_2030-4	11.2	6.4	17.6	79	1759

Tabella 18: Parametri di input e output degli edifici scolastici simulati nel clima futuro

Osservando i risultati di queste simulazioni dalla Figura 21 e dalla Tabella 18, emerge quanti segue.

- Aumentando la capacità termica:
 - o di edifici molto isolati (U:0.15 W/m²K) si riduce il fabbisogno energetico totale (-17%) rispetto alla capacità media ma si ha un aumento del discomfort nelle mezze stagioni (da 400 a 450 ore)
 - o di edifici con isolamento discreto (U:0,4 W/m²K) si riduce il fabbisogno totale (-13%) rispetto alla capacità media con una riduzione del discomfort nelle mezze stagioni (da 117 a 79 ore).
- Diminuendo l'isolamento della parte opaca:
 - o si migliora significativamente il comfort nelle mezze stagioni (-70-80%, inferiori alle 100h nel caso di capacità termica elevata) e si verifica una diminuzione delle ore di accensione dell'impianto di raffreddamento/climatizzazione,
 - o ma si verifica un aumento del fabbisogno (+14-18% dovuto all'aumento del fabbisogno per il riscaldamento).
- Con un isolamento performante (U:0.15 W/m²K) della parte opaca si ha una preponderanza del fabbisogno per climatizzazione rispetto a quello per il riscaldamento.

4.3 Edifici Amministrativi

A. Analisi delle simulazioni sul clima di riferimento

Le principali osservazioni che emergono dalle simulazioni effettuate sul clima di riferimento sono qui di seguito riassunte.

- Un risanamento globale (involucro opaco e involucro trasparente) comporta una riduzione del fabbisogno energetico principalmente dovuto alla diminuzione del fabbisogno di riscaldamento (mentre quello per la climatizzazione aumenta) con un aumento delle ore di accensione dell'impianto di raffreddamento e un aumento delle ore di discomfort nelle mezze stagioni.
- Edifici con bassa superficie finestrata hanno un minor fabbisogno energetico (ma un discomfort maggiore se hanno capacità termica elevata e sono molto isolati).
- Edifici con capacità termica elevata sono preferibili agli edifici leggeri in termini energetici ma aumentano il discomfort in estate e nelle mezze stagioni (in misura maggiore dove si hanno una superficie vetrata contenuta e un isolamento performante). Con una superficie vetrata elevata (WWR>50%) l'importanza della massa aumenta in modo preponderante rispetto all'isolamento termico.
- L'automazione dei sistemi di protezione solare porta a una riduzione potenziale del fabbisogno termico di raffreddamento pari a circa 30...50% (maggiore in edifici molto isolati) che corrisponde a circa 20...25% dei consumi energetici totali.
- Una strategia di ventilazione naturale addizionale (free-cooling) permetterebbe di ridurre di circa 10...20% il consumo per la climatizzazione e migliorare anche il comfort (analogo comportamento si ottiene estendendo la ventilazione con portata igienica anche nelle ore notturne, soprattutto in edifici non molto isolati).

B. Identificazioni di alcune varianti di edifici da simulare nel clima futuro e analisi dei risultati

Dalle simulazioni condotte sul clima di riferimento, emerge che il risanamento globale degli edifici secondo lo stato della tecnica attuale comporta una riduzione del fabbisogno energetico totale (con un fabbisogno per climatizzazione preponderante rispetto a quello per il riscaldamento) ma con significativi problemi di surriscaldamento estivo e nelle mezze stagioni tali da rendere necessarie delle misure compensatorie o un aumento delle ore di accensione dell'impianto di climatizzazione.

Al fine di valutare come gli edifici esistenti rispondano al clima futuro dal punto di vista energetico e di comfort sono state definite tre diverse varianti di edifici tipici di differenti epoche storiche.

- L'edificio "base" (ED3_000) utilizzato quale punto di partenza è caratterizzato da una superficie finestrata media intorno al 45%, un isolamento opaco performante, finestre con triplo vetro, capacità termica media, protezioni solari esterne a movimentazione automatizzata, impianto di raffreddamento e deumidificazione e un sistema di ventilazione meccanica con attivazione durante il periodo di occupazione dell'edificio.
- L'edificio edificato nel periodo 1990-2010 (ED3_2000) è caratterizzato da una superficie finestrata media del 50%, un isolamento opaco medio, finestre con doppio vetro, capacità termica elevata, protezioni solari esterne a movimentazione manuale, impianti di climatizzazione estiva (raffreddamento e deumidificazione) e una ventilazione naturale con attivazione durante il periodo di occupazione dell'edificio.
- L'edificio edificato successivamente al 2010 (ED3_2010) è caratterizzato da una superficie finestrata media del 50%, un isolamento opaco performante, finestre con triplo vetro, capacità termica media, protezioni solari esterne a movimentazione automatizzata, impianti di climatizzazione estiva (raffreddamento e deumidificazione) e un sistema di ventilazione meccanica con attivazione durante il periodo di occupazione dell'edificio.

		ED3_000_a	ED3_2000_a	ED3_2010_a
Variabile	Superficie finestrata media	45%	50%	50%
	Isolamento medio opaco [W/m2K]	performante (U=0.15)	medio (U = 0.34)	performante (U=0.15)
	Capacità termica	media	elevata	media
	Protezioni solari esterne (controllo)	automatizzata	manuale	automatizzata
	Climatizzazione estiva	raffredd. (+deumid)	raffredd. (+deumid)	raffredd. (+deumid)
	Ventilazione naturale	Assente	Naturale	Assente
	Ventilazione meccanica	Meccanica	Assente	Meccanica
	Gestione ventilazione	Durante l'occupazione	Durante l'occupazione	Durante l'occupazione
Finestre	Vetro triplo RUEn ⁽⁺⁾	Vetro doppio	Vetro triplo RUEn	

		riferimento		futuro		riferimento		futuro		riferimento		futuro	
Output	Q _H [kWh/m ² a]	3.4	1.8	23.2	10.5	6.8	3.5						
	Q _C + Q _D [kWh/m ² a]	18.3	27.4	16	32.5	18	26.7						
	Q _T [kWh/m ² a]	21.7	29.2	39.2	43	24.8	30.2						
	h _{cool ON}	2'775	3'607	2'224	3'340	2'293	2'950						
	h >26.5 °C	0	0	0	0	0	0						
	h _{disc}	2'358	1'628	1'222	1'162	1'567	1'116						

Tabella 19: Dati di input e output relativi alle simulazioni sul clima di riferimento e sul clima futuro per le tre varianti di edifici amministrativi tipiche del parco immobiliare esistente

Dai dati di output riportati nella Tabella 19, emerge che le ore di funzionamento del sistema di climatizzazione aumentano nel passaggio dal clima di riferimento al clima futuro (+33...51%). Il fabbisogno di riscaldamento invece si riduce (-47...55%) anche se vi è un aumento del fabbisogno totale utile (+9...26%) e una riduzione delle ore di discomfort nelle mezze stagioni.

Di conseguenza, si è posta l'attenzione sulla possibilità di ridurre l'isolamento opaco per evitare un eccessivo surriscaldamento nel periodo estivo. Sono quindi state identificate due varianti di edifici amministrativi che si ipotizza esser risanati nel 2030 (ED2_2030R) o di nuova costruzione nel 2030 (ED2_2030N). Nello specifico, le varianti analizzate hanno le seguenti caratteristiche costruttive ed impiantistiche.

- L'edificio tipico del parco immobiliare degli edifici amministrativi risanato entro il 2030 con criteri attuali (ED3_2030R) presenta una percentuale vetrata pari al 50%, finestre con triplo vetro, capacità termica elevata, protezioni solari esterne a movimentazione automatizzata. Inoltre, si suppone che la ventilazione sia di tipo meccanico con attivazione automatizzata nelle 24 ore e portata estiva maggiorata, che l'edificio sia dotato di impianto di raffreddamento e deumidificazione e si ipotizza un isolamento opaco di tipo medio per prevenire il surriscaldamento estivo.
- L'edificio di nuova costruzione realizzato nel 2030 con criteri attuali (ED3_2030N) ha una percentuale vetrata pari al 30% (al fine di ridurre l'eccessivo surriscaldamento già presente nel clima presente), finestre con triplo vetro, capacità termica media, protezioni solari esterne a movimentazione automatizzata. Inoltre, si suppone che la ventilazione sia di tipo meccanico con attivazione nelle 24 ore e portata estiva maggiorata, che l'edificio sia dotato di impianto di climatizzazione e deumidificazione e si ipotizza un isolamento opaco di tipo medio per prevenire il surriscaldamento estivo.

		ED.3_2030R	ED.3_2030N
Variabile	Superficie finestrata media	50%	30%
	Isolamento medio opaco [W/m2K]	medio (U=0.25)	medio (U=0.25)
	Capacità termica	elevata	media
	Protezioni solari esterne (controllo)	automatizzata	automatizzata
	Climatizzazione estiva	raffredd. (+deumid)	raffredd. (+deumid)
	Ventilazione naturale	Assente	Assente
	Ventilazione meccanica	Igienica + estiva 2	Igienica + Estiva2
	Gestione ventilazione	H24	H24
Finestre	Vetro triplo RUEn	Vetro triplo RUEn	

		riferimento		futuro	
Output	Q _H [kWh/m ² a]	6.5	2.6	8.2	5.1
	Q _C + Q _D [kWh/m ² a]	12.7	24.9	12.1	19
	Q _T [kWh/m ² a]	19.2	27.5	20.3	24.1
	h _{cool ON}	1866	2574	1589	2275
	h >26.5 °C	0	0	0	0
	h _{disc}	1414	925	959	714

Tabella 20: Dati di input e output relativi alle simulazioni sul clima di riferimento e sul clima futuro per le due varianti di edifici amministrativi che si ipotizza esser risanati o costruiti da nuovo nel 2030

Dalle simulazioni riportate nella Tabella 20e dal loro confronto con il caso base (ED3_000) emerge che, nonostante l'isolamento opaco non sia performante, il fabbisogno di riscaldamento per tutte le varianti analizzate rimane contenuto. Inoltre, è da notare che la presenza di percentuali vetrate maggiori combinate ad una capacità termica elevata comporta un aumento dei fabbisogni energetici (con netta prevalenza del fabbisogno per climatizzazione rispetto a quello per riscaldamento).

C. Analisi dell'influenza delle variabili costruttive e impiantistiche sul clima di riferimento

Le principali considerazioni che emergono dall'analisi approfondita delle simulazioni eseguite sul clima di riferimento, in aggiunta a quanto descritto nel paragrafo A, sono riportate di seguito.

Dalle simulazioni di Figura 22, emerge che aumentare l'**isolamento termico** delle superfici opache (da U:0.34 W/m²K a U:0.15 W/m²K) comporta un peggioramento del comfort estivo e nelle mezze stagioni, un aumento del fabbisogno di climatizzazione ma diminuzione del fabbisogno di riscaldamento e del fabbisogno totale.

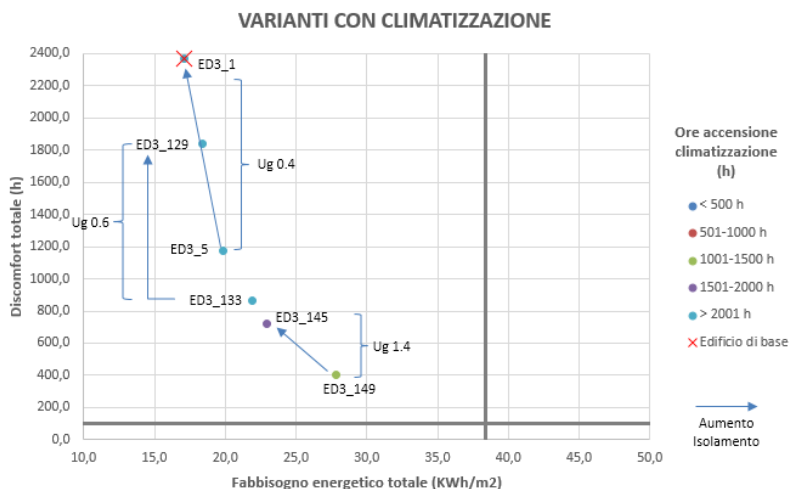


Figura 22: Edifici amministrativi con climatizzazione estiva (raffreddamento e deumidificazione) caratterizzati da una percentuale vetrata pari al 30%, capacità termica media, protezioni solari esterne automatizzate e ventilazione meccanica con portata igienica durante l'occupazione. Sono rappresentate le varianti con diversi valori di trasmittanza termica delle superfici vetrate (Ug:1.4...0.4 W/m²K). La freccia rappresenta l'aumento dell'isolamento termico opaco e la riduzione della trasmittanza (U:0.34...0.15 W/m²K).

Dalla Figura 23, si deduce che diminuire la trasmittanza (da $U_g:1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ a $U_g:0.6...0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$) delle superfici vetrate comporta una diminuzione del fabbisogno di riscaldamento e del fabbisogno totale, un aumento del fabbisogno di climatizzazione ma anche un significativo peggioramento del comfort estivo e nelle mezze stagioni.

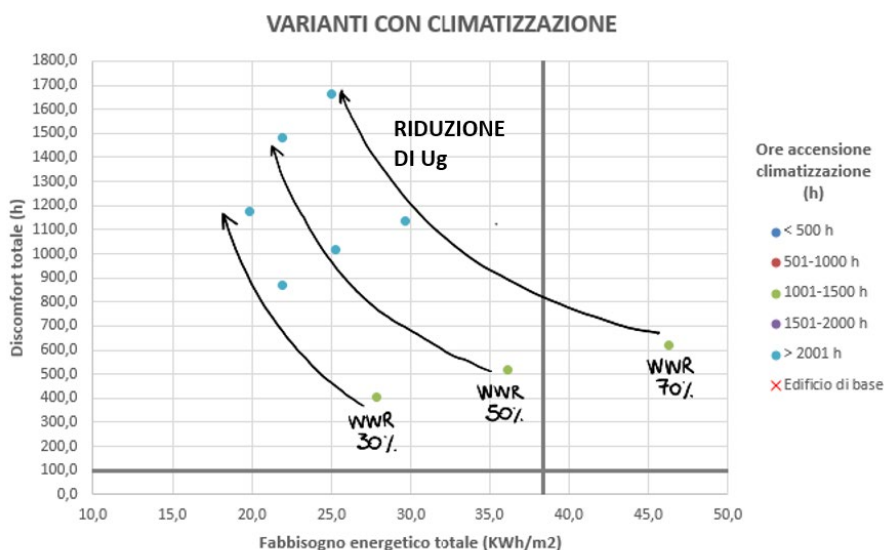


Figura 23: Edifici amministrativi con climatizzazione estiva (raffreddamento e deumidificazione) caratterizzati da $U:0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$, capacità termica media, protezioni solari esterne automatizzate e ventilazione meccanica con portata igienica durante l'occupazione. Sono rappresentate le varianti con diversi valori di superficie vetrata (WWR: 30%...50%...70%). La freccia rappresenta la riduzione della trasmittanza termica delle superfici vetrate ($U_g:1.4...0.6...0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Inoltre, dalle simulazioni emerge che aumentare la percentuale vetrata, nonostante la presenza di protezioni solari automatizzate, comporta un aumento del fabbisogno totale ed un aumento del discomfort nelle mezze stagioni, eccetto quando:

- la trasmittanza dei vetri è scarsa ($U_g:1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$), in quanto si viene a creare maggiore superficie disperdente per dissipare gli alti carichi interni;
- l'edificio è molto isolato (sia parte opaca che trasparente), la maggiore superficie vetrata comporta una maggiore superficie disperdente. In questo caso, però, l'edificio presenta valori di discomfort nelle mezze stagioni molto elevati (da 1'400 ore a 2'660 ore).

Un aumento della capacità termica con $U_g = 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ comporta una riduzione del discomfort nelle mezze stagioni e una riduzione del fabbisogno per riscaldamento, climatizzazione e totale.

Un aumento della capacità termica con $U_g = 0.6...0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ comporta un aumento del discomfort mezze stagioni ed estivo e una riduzione del fabbisogno energetico totale.

D. Analisi dell'influenza delle variabili costruttive e impiantistiche sul clima futuro

Considerando quanto emerso nei paragrafi precedenti, diventa palese la necessità di verificare l'effetto di determinate caratteristiche costruttive e impiantistiche. Per tale motivo, sono state fatte delle simulazioni aggiuntive sul clima futuro per valutare l'influenza della capacità termica e dell'isolamento termico della parte opaca.

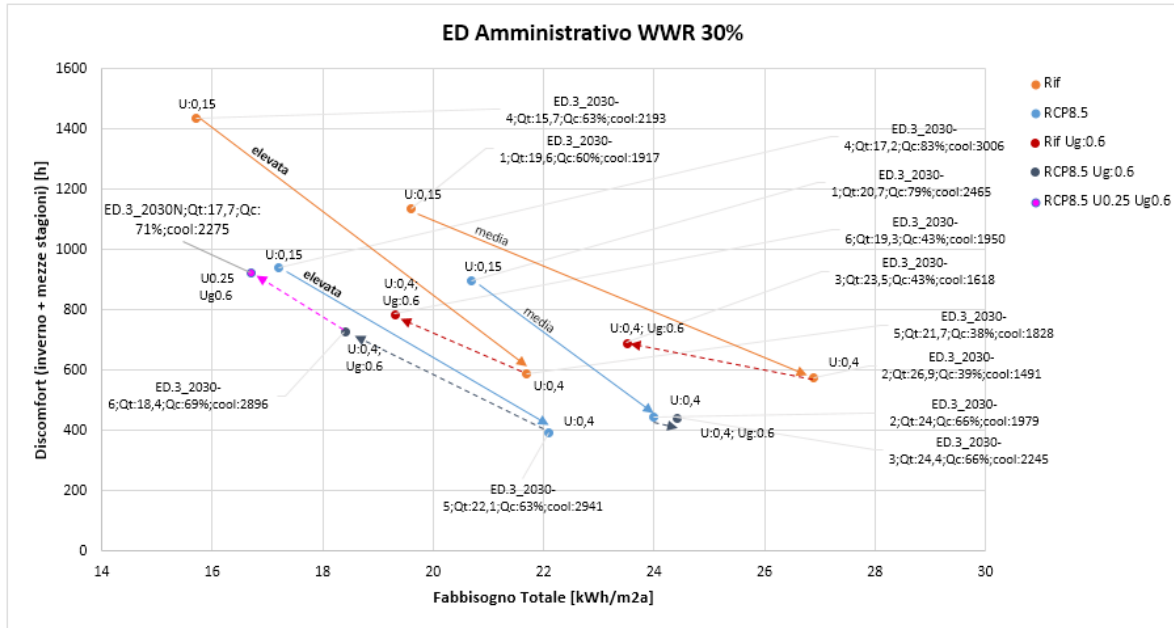


Figura 24: Edificio amministrativo con superficie finestrata (WWR) del 30%, avente diversi valori di trasmittanza termica dell'isolamento opaco e delle superfici vetrate, e diversa capacità termica. Tale edificio è caratterizzato da impianti di climatizzazione estiva (raffreddamento + deumidificazione) e ventilazione meccanica con attivazione sulle 24 ore. Le simulazioni si riferiscono al clima di riferimento (arancione) e al clima futuro (blu).

						RCP 8.5				
Tipo edificio	WW	Ug - g	Uopaco	Cap termica		Qh [kWh/m2a]	Qc [kWh/m2a]	Fabb. Tot [kWh/m2a]	h_disc mezze stagioni	h_cool_ON
Uffici	30%	1,4 - 0,6	0,15	media	ED.3_2030-1	4.3	16.4	20.7	897	2465
Uffici	30%	1,4 - 0,6	0,4	media	ED.3_2030-2	8.1	15.9	24	447	1979
Uffici	30%	0,6 - 0,5	0,4	media	ED.3_2030-3	8.2	16.2	24.4	445	2245
Uffici	30%	1,4 - 0,6	0,15	elevata	ED.3_2030-4	2.9	14.3	17.2	940	3006
Uffici	30%	1,4 - 0,6	0,4	elevata	ED.3_2030-5	8.1	14	22.1	392	2941
Uffici	30%	0,6 - 0,5	0,4	elevata	ED.3_2030-6	5.7	12.7	18.4	729	2896
Uffici	30%	0,6 - 0,5	0,25	media	ED.3_2030N	5.1	12.6	17.7	25	2275

Tabella 21: Parametri di input e output degli edifici amministrativi simulati nel clima futuro

Osservando i risultati delle simulazioni nel clima futuro eseguite con Ug pari a 1.4 W/m²K riportate in Figura 24 e nella Tabella 21 emerge quanto segue.

- Aumentando la capacità termica di edifici molto isolati, il fabbisogno energetico diminuisce ma aumenta il discomfort nelle mezze stagioni. Negli edifici mediamente isolati (U:0.4 W/m²K), l'aumento della capacità termica comporta una lieve riduzione del fabbisogno energetico. In particolare, cala il fabbisogno energetico di climatizzazione e una lieve riduzione del discomfort nelle mezze stagioni,
- Diminuendo l'isolamento della parte opaca si favorisce una lieve diminuzione del fabbisogno di climatizzazione a fronte di un aumento del fabbisogno di riscaldamento e, quindi, di un aumento del fabbisogno totale. Tuttavia, si nota che un minore isolamento termico opaco favorisce la riduzione delle ore di discomfort nelle mezze stagioni (anche > 50%),
- Vi è sempre una significativa preponderanza del fabbisogno per climatizzazione rispetto al fabbisogno di riscaldamento.

Inoltre, la diminuzione della trasmittanza termica delle finestre comporta una diminuzione del fabbisogno totale (dovuto alla riduzione del fabbisogno di climatizzazione) ma un aumento delle ore di discomfort nelle mezze stagioni.

5 Innovazioni tecnologiche

I trend climatici attuali imporranno ai progettisti di orientare le proprie strategie costruttive alla ricerca di una maggiore efficienza nei sistemi di raffreddamento degli edifici in modo da migliorarne l'efficacia riducendo al contempo i consumi e i costi di utilizzo. Per raggiungere tale obiettivo sarà necessario indirizzare la progettazione verso la ricerca di un efficace raffreddamento passivo; per perseguire tale obiettivo e garantire inoltre una buona efficienza energetica media annuale diventa indispensabile orientare le proprie tecniche costruttive alla formulazione di soluzioni che permettano di variare l'inerzia termica dell'edificio.

5.1 Rendere più efficiente il raffreddamento di un edificio

Di seguito sono elencate le aree di intervento su cui agire per migliorare il raffreddamento passivo all'interno di un edificio. In generale bisogna limitare l'impatto che la radiazione solare ha sulla temperatura interna dell'edificio e limitare i carichi termici entranti durante le giornate calde.

La ventilazione naturale dovrà essere sfruttata come utile strumento per smaltire i carichi termici generati dalle funzioni domestiche e dai suoi occupanti.

L'approccio dovrà inoltre essere orientato all'efficienza annuale delle prestazioni dell'edificio. In una soluzione statica, i parametri energetici dovranno essere ottimizzati su base annuale. Una soluzione che permetta di gestire i parametri in maniera dinamica invece, permetterebbe di adattare la struttura alle necessità stagionali, ottenendo così un'efficienza annuale di molto maggiore a qualsiasi soluzione statica.

Area di intervento	Obiettivo
Superfici dell'edificio	Ridurre la quantità di radiazione solare assorbita dalle superfici esterne dell'edificio ed i carichi termici entranti da queste ultime durante la stagione calda
Superfici finestrate	Ridurre la quantità di radiazione solare entrante nell'edificio attraverso le superfici finestrate ed i carichi termici entranti da queste ultime durante la stagione calda
Ventilazione	Aumentare la ventilazione passiva (naturale) dell'edificio in modo da smaltire i carichi termici generati dalle attività domestiche (cucina, attività degli elettrodomestici...) e da apporti solari indesiderati, anche soluzioni di ventilazione meccanica sono contemplate, è però necessario valutare il trade-off energetico tra ventilazione meccanica e raffreddamento
Rendere dinamici i parametri energetici dell'edificio	Tutti gli interventi indicati precedentemente modificano dei parametri energetici dell'edificio (carichi termici entranti ed uscenti, dovuti a radiazione solare e smaltimento del calore interno). Una gestione dinamica di come i vettori energetici consentano lo scambio di calore con l'ambiente circostante permetterebbe di trarre vantaggio delle condizioni ambientali (assorbimento di calore durante il giorno e limitarne l'emissione durante la notte nella stagione invernale, e permettere lo smaltimento del calore durante la notte e limitandone l'assorbimento durante il giorno nella stagione estiva). Questa gestione dinamica dei parametri energetici degli elementi costruttivi permetterebbe di ottimizzare lo scambio energetico a seconda della stagione e a seconda delle condizioni giornaliere rendendo più efficiente il processo rispetto a qualsiasi soluzione statica

Tabella 22: aree di intervento per migliorare il raffreddamento passivo all'interno di un edificio

5.2 Superfici opache dell'involucro edilizio

Le superfici dell'edificio, in particolar modo quelle maggiormente esposte alla radiazione solare, dovranno essere progettate in modo da minimizzare l'assorbimento di calore durante il periodo estivo. Particolare

attenzione dovrà essere prestata ai materiali componenti il tetto, i quali, in contesti con presenza di edifici medio-bassi, sono i principali fattori di conduzione del calore all'interno dell'edificio. Inoltre, il calore assorbito dal tetto viene anche rilasciato nello spazio circostante per convezione e irraggiamento; questo, negli agglomerati urbani a densità medio/alta contribuisce alla formazione di isole di calore che riducono drasticamente il comfort dei cittadini dentro e fuori dagli edifici.

5.2.1 Tetti freddi

Diversi studi⁸ hanno dimostrato che l'adozione di tecniche costruttive volte al raffreddamento dei tetti permette di ridurre la temperatura interna del tetto fino a 5°C⁹; inoltre, questa soluzione consente, nelle zone urbane, di ridurre l'effetto "isole di calore" (in queste aree a causa dell'assorbimento di calore da parte degli edifici si possono registrare temperature fino a 4°C maggiori che nelle zone rurali durante il giorno e fino a 12°C durante la notte), i benefici dell'adozione di questa tecnica sono molteplici e sono evidenziati nella Figura 25.

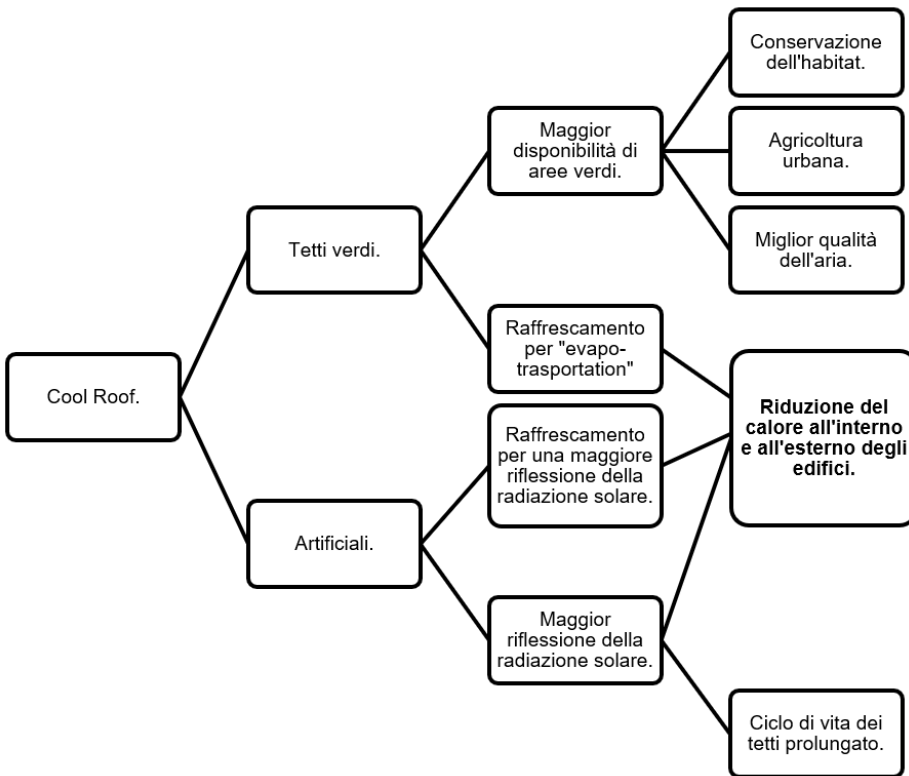


Figura 25: Analisi dell'impatto derivato dall'adozione di "cool roof" nei centri urbani

Esistono varie soluzioni per l'implementazione di tetti freddi, ciò che è comune a tutte le soluzioni è un elevato SRI (indice di riflessione solare) dello strato più esterno in modo da ridurre la radiazione solare assorbita dal tetto. Di seguito alcuni esempi di tetti freddi artificiali di un produttore Svizzero¹⁰.

⁸ Mohan Rawat, R, N. Singh, A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions, Energy and Build Environment, 2022

⁹https://www.academia.edu/33566487/A_CFD_STUDY_ON_THE_APPLICATION_OF_COOL_ROOF_TECHNOLOGY_IN_AN_AIR_CONDITIONED_ROOM

¹⁰ <https://www.sika.com/en/construction/roof-systems/cool-roofs.html>

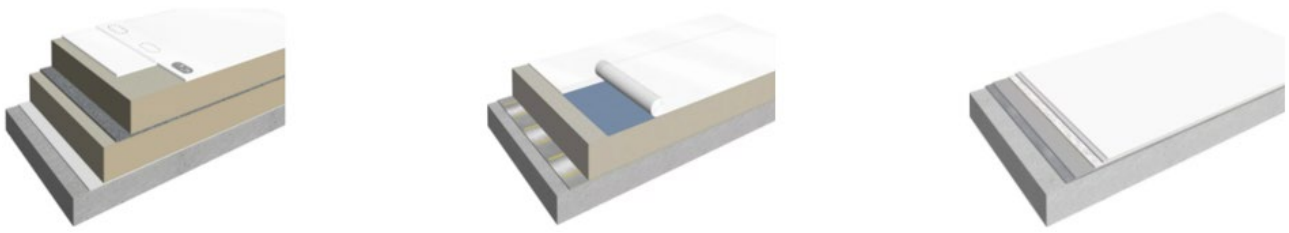


Figura 26: Sistemi per implementazione di tetti freddi (Da sinistra verso destra: sistema a membrane fissate meccanicamente, sistema a membrane incollate, sistema a membrane liquide)

Le soluzioni presentate nella Figura 26 risultano essere particolarmente indicate per rivestire i tetti orizzontali ad alta incidenza della radiazione solare. Ognuna di esse ha però lo svantaggio di essere una soluzione permanente, che quindi non permette di trarre beneficio dal calore derivato dalla radiazione solare durante la stagione fredda.

5.2.2 Vernici riflettenti

Sono presenti sul mercato da diversi anni ma sono recentemente tornate oggetto di studio di molta letteratura scientifica; l'obiettivo è lo stesso dei rivestimenti esterni impiegati nei tetti freddi, ottenere un elevato SRI. Questo permette una buona gestione del bilancio termico dell'edificio, con lo svantaggio come per i tetti freddi di non adattarsi alle diverse esigenze della stagione fredda.

Tra i vari studi che si occupano di questo argomento, si citano quelli che hanno quale obiettivo quello di rendere la vernice stessa un elemento di isolamento dell'edificio; ad esempio, le vernici con nanoporosità di silica aerogel¹¹ permettono una conduttività termica di 0.029 W/mK, una riflessione del 90% ed un'alta resistenza all'abrasione. Occorre in ogni caso considerare con attenzione quelli che possono essere gli spessori isolanti considerati che hanno evidentemente un impatto considerevole sull'effettiva efficacia di questo intervento.

Tali soluzioni permetterebbero di schermare le facciate dell'edificio più esposte alla radiazione solare. Si segnala come il tema può essere generalizzato considerando come soluzione low tech alternativa, l'applicazione di superfici chiare.

5.3 Superfici finestrate

L'utilizzo di superfici dell'involucro edilizio ad elevato indice di trasparenza solare, che consentono l'ingresso della radiazione diretta all'interno degli spazi, andrebbe adeguatamente concepita in fase di concetto architettonico e nelle seguenti fasi progettuali, attraverso un accurato approccio bioclimatico attento alla gestione della radiazione solare nelle varie stagioni, al fine di evitare soprattutto problematiche di surriscaldamento e cercando al contempo di massimizzare l'illuminazione naturale degli spazi. Normalmente la previsione di sistemi di schermatura diviene utile in tal senso nel caso soprattutto di grandi superfici vetrate di alcune tipologie edilizie. In alcuni casi anche la riduzione delle superfici trasparenti in favore di quelle opache si dimostra un possibile approccio.

L'area delle facciate dell'edificio ricoperta da finestre costituisce un elemento di grande impatto sull'apprezzamento dell'edificio stesso; questo principio nuoce però inevitabilmente alle performance energetiche della struttura, per questo motivo si suggerisce di contenere il quanto più possibile le superfici finestrate, in particolar modo è fondamentale ridurre la percentuale di vetrate distribuita sulle facciate più

¹¹ <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsanm.1c01280>

esposte alla radiazione solare, laddove non fosse possibile dovendo mantenere determinati livelli di comfort visivo esistono delle soluzioni che permettono un'elevata schermatura della radiazione solare.

Le soluzioni più diffuse attualmente disponibili sul mercato che permettono di schermare i vetri dalla radiazione solare sono i "sun protective film", applicabili sopra i tradizionali vetri. L'applicazione di un "sun protective film" ad alte prestazioni può consentire la riflessione del 79% dell'energia solare che colpisce una vetrata, riducendo notevolmente il carico termico entrante negli edifici a causa della radiazione solare. Questa soluzione ha però lo svantaggio di schermare la radiazione solare anche nella stagione fredda.

Particolarmente apprezzabile di tale tecnologia è la sua facile implementazione e i suoi costi contenuti, può essere adottata sia in fase di produzione delle finestre che su elementi già posati nell'edificio. Soluzioni più avanzate, che permettono di adattare la schermatura solare dei vetri in base all'occorrenza, vengono trattate nei capitoli successivi.

5.4 Ventilazione interna

La ventilazione svolge un ruolo fondamentale di controllo termico all'interno di un edificio, l'aria funge da termovettore, trasportando così il calore interno dell'edificio nell'ambiente circostante. La ricerca di un'efficiente ventilazione passiva all'interno dell'edificio deve essere considerata in fase progettuale, in modo da smaltire il calore interno all'edificio.

5.5 Isolamento termico

L'isolamento termico dell'edificio dev'essere correttamente ponderato in modo da ottenere un'inerzia termica dell'edificio ottimizzata in base alla posizione della costruzione. Paradossalmente sovradimensionare l'isolamento termico dell'edificio potrebbe non essere la via giusta, questo approccio infatti è potenzialmente sconveniente durante i periodi estivi, in quanto impedisce lo smaltimento degli apporti energetici interni all'edificio; il trend crescente delle temperature estive potrà eventualmente portare il settore delle costruzioni a rivedere i propri paradigmi di isolamento termico degli edifici, alla ricerca di una soluzione che consideri il fabbisogno energetico su tutto l'arco dell'anno.

5.6 Gestione dinamica dello scambio termico negli edifici

Ciascuna delle soluzioni precedentemente proposte, se concepita staticamente e senza un'adeguata contestualizzazione progettuale, rischia di essere accompagnata dallo svantaggio di provocare un effetto negativo durante la stagione fredda, introducendo soluzioni (schermare gli edifici dalla radiazione solare ad es.) che non contribuiscono ad un utile riscaldamento passivo dell'edificio. La scelta implementativa di soluzioni che dunque non presentino una buona efficienza durante tutto l'anno non è adatta. Una gestione dinamica di come i vettori energetici consentano lo scambio di calore con l'ambiente circostante permetterebbe di trarre vantaggio delle condizioni ambientali (permettere l'assorbimento di calore durante il giorno e limitarne l'emissione durante la notte nella stagione invernale, e permettere lo smaltimento del calore durante la notte e limitandone l'assorbimento durante il giorno nella stagione estiva). Questa gestione dinamica permetterebbe di ottimizzare lo scambio energetico a seconda della stagione e a seconda delle condizioni giornaliere rendendo più efficiente il processo rispetto a qualsiasi soluzione statica.

5.6.1 Vetri a prestazioni dinamiche

Una soluzione relativa a vetri con prestazioni dinamiche viene dagli "Electrochromic glass"; alcuni produttori di vetri sono in grado di offrire vetri capaci di adattare la propria tinta (manualmente o automaticamente) alle condizioni della luce esterna secondo 4 diversi stati.

Tinta	Valore SHGC	Coefficiente U W/m ² K
Stato chiaro	0.41	0.28
Stato intermedio 1	0.15	0.28
Stato intermedio 2	0.1	0.28
Tinto	0.09	0.28

Tabella 23: In tabella i valori SHGC (quantità di radiazione solare che la finestra lascia entrare nell'edificio, chiamato fattore solare g nel presente studio) e Coefficiente U (trasmissione termica della finestra) relativi ai diversi stati del vetro elettrocromico, si noti che la finestra elettrocromica offre un SHGC variabile, ma non un Coefficiente U variabile

Questa soluzione offre un'ottima adattabilità alle condizioni luminose, garantendo un buon comfort degli occupanti dell'edificio per quanto riguarda tale aspetto. Le tinte più scure che caratterizzano gli ultimi stati riportati nella Tabella 23 provvedono anche a riflettere maggiormente la radiazione solare, disponendo di un valore g che varia tra 0.09 e 0.41.



Figura 27: Tutti e quattro gli stati degli smart glass di SageGlass

I sistemi offerti da questi produttori sono però controllati elettricamente e i consumi legati al loro funzionamento sono piuttosto elevati, altri produttori offrono invece soluzioni di "Passive Dynamic Glass", i cui prodotti si regolano automaticamente in base alle condizioni di luce esterna, come ad esempio Suntuitive Glass¹². Un problema legato a questi elementi passivi è che la schermatura della radiazione solare avverrà anche in inverno (mentre l'altra soluzione, essendo gestita elettronicamente, può by-passare questa problematica).

Un'altra ingegnosa soluzione è quella proposta da GLASSX@crystal¹³, questo produttore ha sviluppato un sistema di oscuramento variabile (Figura 28), un prisma trasparente in grado di schermare la radiazione solare con un'incidenza superiore a 40°. La schermatura viene drasticamente ridotta quando l'incidenza risulta essere inferiore a 35°, permettendo un basso SHGC in estate (riflessione quasi totale) e alto in inverno (radiazione solare libera di penetrare nell'edificio).

¹² <https://suntuitiveglass.com/why-suntuitive-dynamic-glass/>

¹³ <https://www.glassx.ch/en/products/glassx-crystal/>

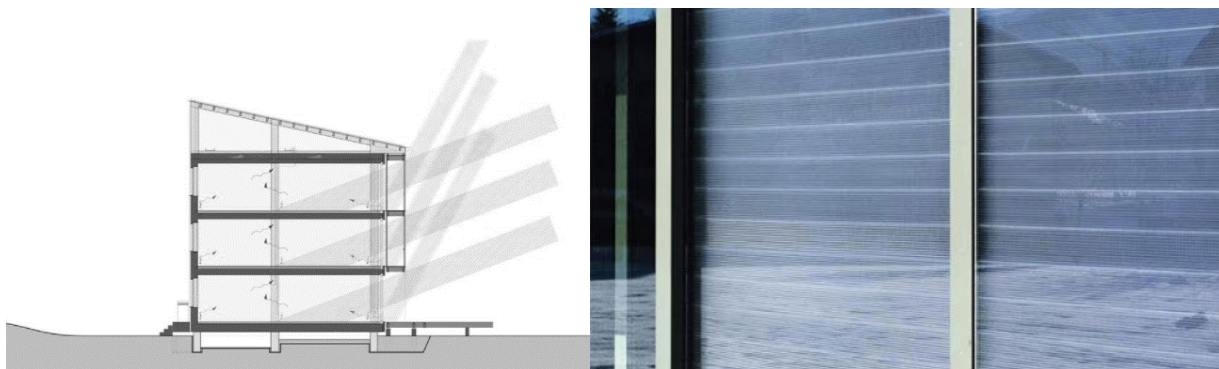


Figura 28: Sistema di oscuramento prismatico variabile, i raggi solari ad incidenza maggiore vengono filtrati, mentre quelli ad incidenza minore (dunque quelli invernali) sono liberi di filtrare attraverso la finestra. A sinistra un esempio (fonte: GlassX Crystal)

Sia gli “Electrochromic glass” che questi ultimi, offrono una buona flessibilità della facciata dell'edificio alla schermatura della radiazione solare ma non offrono un'inerzia termica dinamica del vetro. La ricerca potrebbe dunque muoversi in questa direzione, con l'obiettivo di rendere gli elementi vetrati più performanti in ottica di dinamicità delle proprie prestazioni.

5.6.2 Isolamento a prestazioni variabili

I PCMs¹⁴ “Phase Change Materials”, sono materiali le cui temperature di solidificazione e fusione si trovano rispettivamente sotto e sopra alla temperatura ideale di comfort nell'edificio (vedere immagine seguente), in questo modo quando il materiale fonde, il calore viene assorbito dal PCM (il cambio di fase avviene a temperatura costante), quando invece solidifica, cede il calore assorbito all'ambiente. I PCMs, rispetto ad altri materiali da costruzione presentano una maggiore capacità calorica volumetrica ed un'elevata inerzia termica.

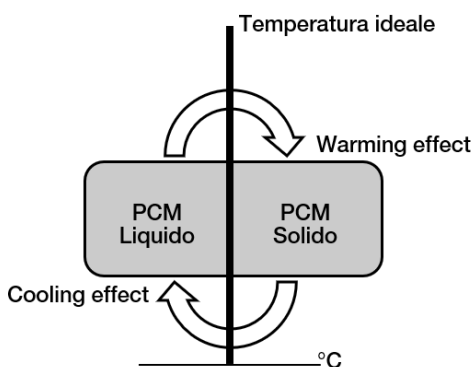


Figura 29: Principio di funzionamento dei PCMs, al centro la temperatura di solidificazione del materiale. Il PCM svolge il suo ciclo oscillando attorno a tale temperatura

Ma per perseguire l'obiettivo di migliorare il raffreddamento e il riscaldamento passivo dell'edificio questa funzione non è sufficiente. Al contrario, un'inerzia termica elevata è ciò che impedisce di trarre beneficio delle notti più fresche durante l'estate e dei giorni più caldi durante l'inverno; prendiamo quest'ultima situazione come esempio, durante la stagione fredda si verificano condizioni per cui la temperatura delle facciate esterne dell'edificio è maggiore rispetto a quella interna, come un pannello solare che permette di riscaldare l'acqua anche in inverno. In questi casi, che possono verificarsi più o meno frequentemente durante la stagione,

¹⁴ Posatore Svizzero di PCMs come isolanti edili: <https://www.glassx.ch/en/products/pcm-heat-storage/>

l'elevata inerzia dell'edificio impedisce di giovare di questo effetto. Questo sistema dovrebbe dunque essere integrato con sistemi di Dynamic Breathing Building.

02:
L'aria fluisce attraverso il PCM permettendogli di assorbire o cedere calore dall'/all' ambiente esterno.

01:
Presa d'aria esterna ad apertura controllata.

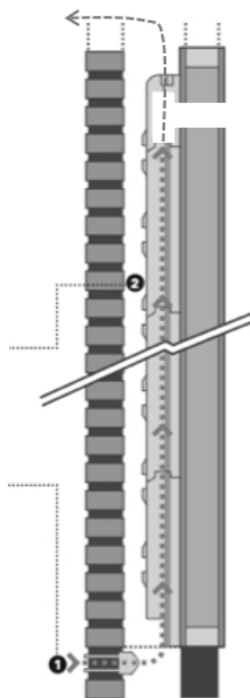


Figura 30: Dynamic Breathing Building e PCM; delle prese d'aria ad apertura controllata permettono al PCM, usato come isolante dell'edificio, di scambiare calore con l'ambiente circostante

Ad ogni modo l'utilizzo di questa tecnica può essere vincolato dalla reperibilità di PCM che presentino temperature di fusione e solidificazione posizionate in maniera da soddisfare un'ottimizzazione sia estiva che invernale.

Una soluzione particolarmente interessante è quella di disporre di un materiale isolante con una conduttività termica variabile. Al momento non vi è purtroppo letteratura scientifica che tratta questo tema così come non vi sono materiali sul mercato che hanno queste capacità. Si può però dire che ogni materiale ha una conduttività termica che varia in base a molti parametri, tra cui la temperatura a cui il materiale si trova. Questi cambi di conduttività termica derivati dalle variazioni di temperatura e degli altri parametri sono però troppo contenuti per poterne trarre un sensibile beneficio.

Queste variazioni si notano invece maggiormente durante i cambi di fase: ad esempio l'acqua ha una conduttività termica di $\lambda=0.6 \text{ W/mK}$, mentre il ghiaccio di $\lambda=1,8 \text{ W/mK}$ (λ = conduttività termica).

Per cui il modo migliore, attualmente disponibile, per avvalersi di conduttività termiche variabili sarebbe l'adozione dei PCM. Per ottenere la conduttività termica desiderata la temperatura del PCM dovrebbe però essere controllata da un sistema di ventilazione meccanica ed al momento non c'è alcuna pubblicazione scientifica su questo tema.

5.6.3 Conclusione

All'interno della seguente tabella sono state riassunte le varie tecnologie esposte dove si è cercato di indicarne il grado di sviluppo nell'ottica di una loro applicazione su larga scala. Si ritiene in ogni caso sempre importante valutare ogni singola applicazione secondo il caso specifico.

Area di intervento	Tecnologia	Descrizione	Stato della tecnologia
Superfici dell'edificio	Tetti freddi	I tetti freddi permettono di diminuire la temperatura interna del tetto fino a 5 gradi rispetto a quella esterna	Tecnologia matura
Superfici dell'edificio	Vernici riflettenti	Le vernici riflettenti permettono di ridurre il carico termico, dovuto alla radiazione solare, entrante dalle superfici dell'edificio	In via di sviluppo, in particolare per quanto riguarda la gamma di colori disponibili
Superfici finestrate	Film schermanti per finestre	Permettono di schermare la radiazione solare entrante dalle finestre	Tecnologia matura
Ventilazione	Gestione della ventilazione	Studiare la ventilazione territoriale per migliorare lo smaltimento del calore interno agli edifici	Gli studi riguardanti la ventilazione degli edifici sono maturi, ma poco adattati alla pratica. Considerazioni di gestione della ventilazione di interi quartieri sono invece in via di sviluppo
Parametri energetici dinamici	Vetri elettrocromici	Vetri, ad attivazione elettronica che possono regolare la loro tinta	Tecnologia giovane, inefficiente in particolare per quanto riguarda i consumi energetici
	Passive dynamic glass	Vetri che variano la loro tinta in base all'esposizione solare	Tecnologia matura, ancora inefficiente per il settore edile dato il ciclo di vita troppo breve del prodotto
	Vetri prismatici	Vetri con schermatura variabile a seconda dell'incidenza solare	Tecnologia giovane
	PCM	Materiali isolanti che attraverso i cambi di stato aumentano l'inerzia termica dell'edificio	Tecnologia giovane, i cicli di cambio di fase perdono di efficienza con il passare degli anni, bisogna ancora superare questa barriera
	PCM + DBB	PCM abbinati a sistemi di areazione del materiale isolante	Tecnologia giovane

Tabella 24: Riassunto delle tecnologie esposte nel report con indicato il grado di sviluppo di tali tecnologie: con tecnologia giovane si intende dire che la ricerca sta ancora lavorando per rendere tali principi applicabili su larga scala

6 Lessons learned

Affinché gli edifici possano essere in grado di garantire adeguati livelli di comfort nello scenario climatico futuro per il Sud delle Alpi, risulta essere necessaria l'installazione di impianti di raffreddamento e deumidificazione - o quantomeno devono essere previsti opportuni spazi per il loro inserimento. Infatti, nello scenario climatico futuro per il Sud delle Alpi si prevede una tendenza all'aumento delle temperature durante tutto l'arco dell'anno che comporterà inverni con temperature più miti e periodi estivi più caldi ed estesi, tali per cui la climatizzazione estiva degli edifici sarà essenziale.

Rimane in ogni caso importante progettare impianti di climatizzazione estiva (raffreddamento e deumidificazione) che, sfruttando fonti ambientali quali l'acqua e il sottosuolo, non emettano aria calda nell'ambiente esterno (specialmente nelle aree urbane, per evitare di amplificare l'effetto delle isole di calore) e che siano alimentati da energie rinnovabili (per ridurre le emissioni di gas ad effetto serra, considerati quali i principali responsabili del riscaldamento globale e dei conseguenti cambiamenti climatici). Sebbene in questo progetto non sia stato approfondito né il tema degli impianti di climatizzazione invernale ed estiva e i relativi carichi, né il potenziale di produzione energetica da impianti a fonti rinnovabili, il contesto suggerisce di far soddisfare la domanda energetica dovuta alla maggior necessità di climatizzazione estiva attraverso l'uso di impianti a fonti rinnovabili che presentano un buon potenziale in questo periodo. Tra le varie possibili opzioni, **l'abbinamento di impianti di climatizzazione estiva alimentati da sistemi fotovoltaici potrebbe rappresentare un'adeguata soluzione che consentirebbe di far coincidere la maggiore domanda di energia estiva per climatizzazione e/o ventilazione con la maggior produzione da fotovoltaico nel periodo estivo. Tuttavia, la tematica degli impianti, gestione dei carichi e della produzione di energia da fonti rinnovabili dovrà essere approfondita in successivi studi.**

Sebbene la presenza degli impianti di climatizzazione estiva sia fondamentale per garantire un adeguato comfort interno nel clima futuro, **un'adeguata progettazione passiva dell'involucro edilizio è in ogni caso un aspetto cruciale per far fronte ai periodi di surriscaldamento estivo e soprattutto nelle mezze stagioni.** Questo consentirebbe di controllare l'interazione edificio-clima ed evitare l'insorgere di condizioni di discomfort eccessive che potrebbero richiedere delle potenze maggiori, un'estensione del periodo di attivazione (con conseguente possibile aumento dei costi di manutenzione e riduzione della vita utile di servizio degli impianti di climatizzazione estiva) e permetterebbe di impedire che, in caso di malfunzionamento degli impianti, si vengano a creare situazioni di discomfort interno tali da rendere non vivibile lo spazio indoor.

In termini generali, dalle analisi condotte, risulta fondamentale dotare l'edificio di protezioni solari esterne automatizzate secondo i criteri indicati nelle norme attuali (sia nel clima di riferimento che in futuro) al fine di garantire un efficace controllo solare stagionale e ridurre il rischio di surriscaldamento estivo e nelle mezze stagioni. Inoltre, emerge anche l'importanza di verificare, nel clima futuro, quale sia l'incidenza in termini di fabbisogno elettrico della ventilazione meccanica con potenziale attivazione automatica nelle 24 ore, visto che dalle simulazioni effettuate si è dimostrata una soluzione utile per ridurre il discomfort e diminuire sia il fabbisogno di climatizzazione nonché per ridurre il fabbisogno di riscaldamento grazie al recupero di calore.

Edifici residenziali

Dalle simulazioni sul clima di riferimento emerge che gli edifici con una percentuale vetrata limitata (30% rispetto a 50%, valori adottati arbitrariamente nelle simulazioni) favoriscono un migliore comfort nelle mezze stagioni (soprattutto se gli edifici non sono opportunamente provvisti di movimentazione automatizzata delle schermature solari esterne). È fondamentale considerare che l'edificio di base utilizzato per queste simulazioni è caratterizzato da una struttura articolata, con svariati oggetti che quindi hanno un elevato auto-ombreggiamento delle superfici vetrate. In caso di edifici aventi facciate lineari i risultati potrebbero quindi variare leggermente.

Dalle simulazioni nel clima futuro emerge che, grazie ad una minor sollecitazione dovuta agli apporti solari, la capacità termica negli edifici residenziali con una percentuale vetrata pari al 30% non ha una significativa incidenza sul fabbisogno energetico né sul discomfort nelle mezze stagioni,

Rispetto alla scelta della performance energetica dell'isolamento opaco da adottare nel clima futuro, è fondamentale valutare l'impatto dello stesso sul discomfort e sul fabbisogno energetico, sia totale che stagionale. Infatti, **se da un lato isolamenti opachi performanti ($U:0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$) comportano la riduzione del fabbisogno energetico totale (con una evidente prevalenza del fabbisogno per climatizzazione rispetto a quello per il riscaldamento), dall'altro si verifica un aumento delle ore di discomfort nelle mezze stagioni.** Tale aumento potrebbe richiedere l'attivazione della climatizzazione anche in questo periodo e quindi comportare un ulteriore aumento del fabbisogno per climatizzazione (che però non è stato quantificato). Se l'obiettivo è quello di evitare l'attivazione dell'impianto di raffreddamento nelle mezze stagioni, allora è opportuno valutare se la scelta di un isolamento termico "discreto" rispetto ad un involucro più isolato possa essere vantaggioso in termini di riduzione del discomfort, ricordando che tale scelta va ad aumentare il fabbisogno di riscaldamento. Il fabbisogno utile annuale si riduce comunque ma il fabbisogno per la climatizzazione diventa, rispetto a quello per il riscaldamento, significativo. In aggiunta a quanto detto, **la scelta dell'isolamento opaco dovrebbe tenere in considerazione anche la combinazione impianti di riscaldamento/raffreddamento e ventilazione e la disponibilità di fonti energetiche rinnovabili locali per soddisfare il fabbisogno energetico dovuto al riscaldamento, alla climatizzazione e alla ventilazione.**

Edifici scolastici

Dalle simulazioni sul clima di riferimento emerge che per gli edifici scolastici con un buon isolamento opaco e con superfici trasparenti a doppi vetri orientate a sud dotate di schermature solari esterne non automatizzate, una percentuale vetrata limitata favorisce un minor fabbisogno energetico e un migliore comfort estivo e nelle mezze stagioni.

Nelle simulazioni nel clima futuro è invece stato dimostrato che edifici con una percentuale vetrata pari al 30%, vetri tripli (con $U_g:0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$) dotati di movimentazione automatizzata delle schermature solari esterne e caratterizzati da capacità termica elevata hanno un minor fabbisogno totale rispetto agli stessi edifici "leggeri".

Tuttavia, per questo tipo di edifici è fondamentale valutare anche l'impatto dell'isolamento termico opaco in quanto se l'edificio è caratterizzato da un isolamento opaco performante si ha una riduzione del fabbisogno totale (Q_t -13...17%) ma si verifica una significativa crescita delle ore di discomfort nelle mezze stagioni (+270...380 ore). Di conseguenza, **la scelta relativa all'isolamento opaco dovrebbe considerare non solo il fabbisogno energetico totale e stagionale (Q_h e Q_c , di cui deve essere valutata anche la quota aggiuntiva dovuta all'aumentato discomfort nelle mezze stagioni) ma anche la concomitanza fra gli impianti di riscaldamento/raffreddamento e ventilazione con la disponibilità di fonti energetiche rinnovabili locali per soddisfare la domanda energetica dovuta al fabbisogno di riscaldamento (Q_h), di raffreddamento (Q_c) e ventilazione (Q_v).**

Edifici amministrativi

L'edificio di tipo amministrativo è caratterizzato da elevati carichi interni che rendono questa tipologia di edificio particolarmente soggetta al rischio di surriscaldamento, non solo nel periodo estivo e nelle mezze stagioni ma anche nel periodo invernale. In questo caso, gli impianti di climatizzazione e ventilazione sono essenziali per garantire adeguati livelli di comfort su tutto il periodo dell'anno. Inoltre, risulta fondamentale un'adeguata progettazione passiva dell'involucro affinché i carichi legati alla climatizzazione e ventilazione siano limitati su tutto l'arco dell'anno.

Dalle simulazioni sul clima di riferimento emerge che **l'aumento della percentuale vetrata dal 30% al 50%** negli edifici amministrativi con superfici trasparenti performanti ($U_g:0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$) dotate di schermature solari esterne a movimentazione automatizzata **comporta un aumento del fabbisogno energetico totale**, dovuto sia all'aumento del fabbisogno di riscaldamento sia all'aumento del fabbisogno di raffreddamento, **con una riduzione delle ore di discomfort nelle mezze stagioni solo quando l'isolamento opaco è molto performante ($U:0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$).**

Dalle simulazioni eseguite nel clima futuro, si osserva inoltre che gli edifici amministrativi caratterizzati da una percentuale vetrata con vetri doppi limitata (30% e $U_g: 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$) hanno minori fabbisogni energetici totali se presentano una capacità termica elevata, anche se questa caratteristica non ha un significativo impatto a

livello di discomfort nelle mezze stagioni. Per questi edifici con capacità termica elevata, si osserva che l'isolamento opaco "discreto" ($U: 0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$) rispetto all'isolamento performante (e.g. $U: 0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$) permette di ottenere una riduzione del discomfort nelle mezze stagioni e una lieve riduzione del fabbisogno di climatizzazione, a fronte però di un aumento del fabbisogno totale. In aggiunta a questo è importante sottolineare che la diminuzione della trasmittanza termica delle superfici vetrate negli edifici con capacità elevata comporta da un lato la riduzione del fabbisogno energetico totale ma dall'altro un significativo aumento del discomfort.

Di conseguenza, negli edifici amministrativi è di fondamentale importanza valutare opportunamente qual è l'impatto della riduzione della trasmittanza termica dell'involucro (sia trasparente che opaco) sia sul fabbisogno energetico totale e stagionale, sia sul discomfort durante tutto l'arco dell'anno. In aggiunta a questo, **deve essere considerata anche la combinazione impianti di riscaldamento, climatizzazione e ventilazione (in particolare durante le ore notturne) con la disponibilità di fonti energetiche rinnovabili locali per soddisfare la domanda energetica dovuta al fabbisogno di riscaldamento, climatizzazione e ventilazione.**

7 Suggerimenti per adeguamenti normativi

Le norme e gli approcci attualmente utilizzati per il calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio e la garanzia del comfort potrebbero, in futuro, non essere più adeguati. Attualmente, infatti le stesse puntano maggiormente sul risparmio energetico in termini di riscaldamento dell'edificio, dedicando meno attenzione al fabbisogno necessario per la climatizzazione (raffreddamento e deumidificazione). A seguito dei cambiamenti climatici attualmente in corso questo approccio dovrà verosimilmente cambiare.

L'attuale norma SIA 380/1 considera, ad esempio, unicamente il fabbisogno di riscaldamento dell'edificio senza verificare se e come una maggiore coibentazione o una progettazione indirizzata unicamente alla stagione invernale possano compromettere il benessere o aumentare i fabbisogni di climatizzazione nelle mezze stagioni e durante il periodo estivo. Il discorso risulta essere analogo per la verifica estiva basata sulle norme SIA 180, 382/1 e 382/2 le quali considerano unicamente il periodo che va dal 15 aprile al 15 ottobre.

Dai risultati di questo studio si evince come una valutazione sull'intero anno possa favorire un'ottimizzazione dei fabbisogni energetici considerando al contempo in maniera più ampia e completa i parametri di comfort.

Già oggi il MoPEC 2014 prevede il calcolo di un indice globale dell'edificio per riscaldamento, acqua calda sanitaria, ventilazione e climatizzazione. Questi valori derivano tuttavia ancora da metodi di calcolo separati e non vengono considerati nel loro insieme. Un approccio globale dovrebbe quindi permettere un'ottimizzazione di questo aspetto.

A seguito dell'aumento delle temperature, cresce anche la probabilità di dover prevedere una climatizzazione nelle mezze stagioni in particolare in edifici con elevati carichi interni. Risulta di conseguenza essenziale poter calcolare il fabbisogno di climatizzazione sull'intero anno e non limitarsi alla sola stagione estiva, come attualmente prassi.

Si rende infine necessario un continuo aggiornamento dei dati climatici da utilizzare nel campo della fisica della costruzione, energia e impiantistica, che tenga in conto anche delle previsioni di evoluzione climatica nel futuro: è in fase di emanazione l'aggiornamento della norma climatica SIA 2028 (la versione attualmente in vigore, del 2010, si basa difatti su misure risalenti al periodo 1984-2003).

8 Conclusioni

Il progetto di ricerca "Clima di domani: linee guida per l'edilizia, Sud delle Alpi Precursore" ha permesso di valutare l'incidenza di alcuni provvedimenti architettonici e gestionali, così come la loro eventuale combinazione, sul comfort e sul fabbisogno energetico, sia nel clima presente che nel clima futuro. Ciò con l'obiettivo di definire possibili accorgimenti e strategie da adottare al fine di mitigare gli effetti del cambiamento climatico attualmente in atto, identificando al contempo le eventuali opportunità che tale evoluzione porterà.

I risultati del progetto potranno servire quale riferimento per la strategia di risposta e di adattamento al cambiamento climatico, soprattutto a fronte di un parco immobiliare che ben presto sarà oggetto di importanti interventi di risanamento. Inoltre, grazie a quanto emerso nel corso del progetto, si potranno fornire delle linee guida congruenti per la progettazione di nuovi edifici, così da affrontare in modo proattivo i cambiamenti climatici sfruttandoli al meglio per aumentare il comfort all'interno degli edifici e diminuire il fabbisogno energetico anche nella prospettiva futura di utilizzare in maniera ottimizzata e consistente fonti di energia rinnovabili (non oggetto del presente studio).

Sulla base delle simulazioni effettuate, si è giunti a considerazioni tangibili soprattutto su parametri come la superficie vetrata, l'isolamento termico e il raffreddamento. In particolare, è stato evidenziato come, alle nostre latitudini, nel clima futuro, dato l'innalzamento generale delle temperature, ci sarà la necessità di installare impianti di climatizzazione (raffreddamento e deumidificazione) in praticamente tutti gli edifici, indipendentemente dalla loro tipologia e dalla loro parametrizzazione. Ciò risulta in particolar modo imprescindibile laddove i carichi interni e i guadagni solari siano importanti. Per limitare le emissioni di gas serra, che sono la causa maggiore dei cambiamenti climatici, questi impianti dovranno essere alimentati attraverso fonti di energie rinnovabili. Ad esempio, tra le varie soluzioni possibili, l'abbinamento di impianti di climatizzazione estiva con sistemi fotovoltaici potrebbe rappresentare un'adeguata soluzione per rendere multifunzionali le superfici dell'involucro (es. coperture, facciate, schermature) e che consentirebbe anche di far coincidere la maggiore domanda di energia estiva per climatizzazione e/o ventilazione con la maggior produzione da fotovoltaico nel periodo estivo. Tuttavia, anche a fronte dei risultati emersi dal presente studio relativamente ai possibili futuri approfondimenti, emerge la necessità di fornire maggiore attenzione all'opportunità di produrre energia da fonti rinnovabili, ad esempio attraverso la produzione decentralizzata e l'integrazione del solare fotovoltaico in materiali multifunzionali attivi per l'involucro edilizio, valutandone i relativi potenziali e impatti sugli effetti dei cambiamenti climatici.

I risultati progettuali hanno altresì evidenziato l'importanza di un'adeguata progettazione dell'involucro edilizio per far fronte al surriscaldamento estivo e delle mezze stagioni limitando quindi l'utilizzo degli impianti di climatizzazione. Ciò consiste fondamentalmente nella presenza di protezioni solari automatizzate che permettono, quando necessario, di ridurre i guadagni solari. Indirettamente questo risultato permette di riflettere sull'orientamento dell'edificio, parametro non variato nell'ambito del presente studio.

I benefici di un ricambio d'aria, reso possibile attraverso impianti meccanici o aperture nell'involucro durante tutto l'arco del giorno e soprattutto durante le ore notturne, quando le condizioni termiche interne ed esterne lo rendono vantaggioso per smaltire i carichi termici accumulati negli edifici, risultano rilevanti soprattutto in termini di comfort e di possibile riduzione del funzionamento degli impianti di climatizzazione, così come la presenza di un'elevata capacità termica.

Leggere differenze possono essere constatate in funzione della destinazione d'uso dell'edificio considerato. In particolare, la presenza o meno di importanti carichi interni può influenzare in maniera consistente l'impatto che la presenza di un pacchetto isolante performante può avere sui parametri di comfort e fabbisogno energetico dell'edificio. Laddove i carichi risultano essere importanti, la presenza di un isolamento termico molto performante non sembra infatti portare sempre a benefici in termini energetici, in quanto il fabbisogno termico estivo risulta essere preponderante a causa della necessità di una maggiore climatizzazione. È importante valutare tale aspetto caso per caso, in quanto il bilanciamento tra riduzione del fabbisogno invernale per riscaldamento e aumento del fabbisogno estivo per raffrescamento dipende molto dall'insieme

dei parametri fisici di ogni edificio e il cambiamento climatico atteso, esaspera tale bilanciamento, dando un peso relativo maggiore al fabbisogno estivo.

Le considerazioni qui espresse sono fatte sia basandosi sui risultati delle simulazioni eseguite per il clima di riferimento che per quelle basate sugli scenari climatici futuri. Siccome il numero contenuto di simulazioni eseguite nel clima futuro ne limita la rappresentatività, si suggerisce di considerare un ulteriore ampliamento del campione analizzato, grazie anche alle più recenti elaborazioni di dati climatici orari basati sugli scenari CH-2018, che non è stato possibile utilizzare nel presente studio.

Gli approcci normativi attualmente utilizzati, anche se in misura diversa in funzione del Cantone di riferimento (riferimenti alle norme SIA aggiornate o meno), separano in maniera chiara la verifica invernale da quella estiva, concentrandosi sul fabbisogno legato al riscaldamento dell'edificio durante il periodo invernale e dedicando meno attenzione al fabbisogno necessario per la climatizzazione. Lo studio suggerisce una modifica di questo approccio, identificando un approccio globale, che considera un'ottimizzazione dei fabbisogni energetici globali annuali così come dei parametri di comfort, più indicato.

Parallelamente si segnala come le attuali normative, nonché le analisi eseguite all'interno del presente studio, sono state eseguite considerando unicamente il comfort termico adattivo e non quello termo-igrometrico. Si suggerisce a questo proposito di valutare la sua eventuale integrazione. Ciò potrebbe cambiare l'entità delle considerazioni qui riportate.

Una soluzione ai vari problemi precedentemente citati potrebbe arrivare dagli sviluppi tecnologici attualmente in corso. Di particolare interesse risulta essere la formulazione di soluzioni che permettano di variare l'inerzia termica dell'edificio e forse, in futuro, il suo isolamento termico. Questa tecnologia non sembra tuttavia al momento sufficientemente matura. Un suo utilizzo su larga scala necessita infatti importanti sviluppi con orizzonti temporali medio-lunghi.

9 Possibili sviluppi futuri dello studio

Il presente progetto di ricerca ha infine evidenziato la necessità di svolgere ulteriori approfondimenti nei seguenti ambiti:

- estensione delle varianti simulate nel clima futuro grazie alla recente disponibilità di dati climatici orari per gli scenari climatici futuri;
- valutare l'influsso dell'umidità nel clima futuro sia in termini energetici che in termini di benessere e comfort adattivo al fine di verificare la necessità o meno di un'integrazione di questo parametro all'interno dell'attuale definizione di comfort (norma SIA 180);
- approfondire l'influsso dei vari sistemi impiantistici che garantiscono il comfort e la loro regolazione. Compresa la possibilità di avere una produzione contemporanea di caldo e freddo;
- estensione dell'analisi dal fabbisogno termico utile al fabbisogno energetico finale, in funzione dei vettori energetici/impianti, nell'ottica di una massimizzazione dello sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili;
- approfondire il concetto di spostamento dei carichi al fine di favorire l'autoconsumo;
- valutare l'impatto di rendere attive le superfici dell'involucro edilizio attraverso ad es. sistemi solari integrati nelle superfici opache e/o trasparenti che al contempo producano effetti sia sul comfort dell'edificio (passivo, attraverso le proprie caratteristiche come materiali da costruzione) che sulla produzione di energia rinnovabile (attivamente, come generatori di elettricità).