



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

*Analisi delle condizioni termo-igrometriche interne in edifici
riqualificati durante periodi di riscaldamento e
raffrescamento*

Relatore: Prof. Michele De Carli

Correlatori: Ing. Laura Carnieletto

Ing. Jacopo Vivian

Matteo Cover
2022550

Anno Accademico 2022/2023

Indice

Abstract.....	1
1 Capitolo. Introduzione.....	3
2 Capitolo. Caso studio.....	11
2.1 Descrizione dei condomini analizzati.....	11
2.2 Programma di monitoraggio degli appartamenti	12
2.3 Caratteristiche degli appartamenti simulati	14
2.3.1 Caratteristiche dell'involucro edilizio	16
3 Capitolo. Metodologia.....	23
3.1 Analisi dei dati monitorati	23
3.1.1 Scelta dei periodi analizzati per la stagione invernale	23
3.1.2 Scelta dei periodi analizzati per la stagione estiva.....	26
3.1.3 Stima dei ricambi di aria per ventilazione naturale	29
3.1.4 Stima delle ore di utilizzo del sistema di climatizzazione.....	32
3.1.5 Medie giornaliere e medie del periodo	34
3.2 Simulazione energetica degli appartamenti	35
3.2.1 Scenari di simulazione per l'analisi invernale	39
3.2.2 Scenari di simulazione per l'analisi estiva	45
4 Capitolo. Risultati	53
4.1 Analisi dei dati monitorati	53
4.1.1 Stagione invernale	54
4.1.2 Stagione estiva.....	63
4.2 Simulazione energetica degli appartamenti	74

4.2.1	Stagione invernale	75
4.2.2	Stagione estiva.....	87
5	Capitolo. Conclusioni.....	95
	Bibliografia.....	101
	Appendice – A.....	105
	Appendice – B.....	109
	Appendice – C.....	111
	Appendice – D.....	115

Abstract

Al giorno d'oggi gli interventi di riqualificazione energetica in ambito edilizio volti a migliorare l'efficienza degli edifici, risultano essere una strategia fondamentale per cercare di raggiungere gli obiettivi prefissati dall'Unione Europea e proseguire il processo di decarbonizzazione avviato. Se da un lato i vantaggi che un nuovo involucro maggiormente isolato può portare in termini di risparmio dei consumi sono ben noti, dall'altro il ruolo dell'utente viene spesso trascurato e con esso anche il verificarsi del fenomeno di *rebound effect*, ovvero quell'effetto di riduzione dei risparmi attesi dovuta al cambiamento del comportamento degli utenti stessi in seguito a un intervento di efficientamento energetico. Il lavoro svolto in questa tesi analizza il comportamento di venti appartamenti situati nella città di Milano prima e dopo gli interventi di riqualificazione energetica, durante le stagioni invernale ed estiva. Nel farlo sono stati analizzati i dati rilevati da sensori di temperatura e umidità interne di ciascun appartamento e sono state eseguite poi alcune simulazioni energetiche per stimare l'impatto dell'eventuale variazione delle condizioni termigrometriche sul fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento. I risultati ottenuti a partire da esse hanno permesso di accertare il verificarsi del *rebound effect* in quattordici dei ventidue appartamenti simulati. Inoltre, l'analisi dei livelli di comfort durante la stagione invernale prima e dopo il retrofit ha evidenziato la variabilità dei comportamenti da parte degli utenti, che non porta necessariamente a maggiori indici di comfort. Infine, lo studio condotto sulla temperatura dell'aria interna dei diversi appartamenti durante la stagione estiva ha evidenziato una discrepanza tra i dati reali ottenuti dai sensori e i risultati delle simulazioni.

1 Capitolo. Introduzione

La vita umana è strettamente legata al mondo dell'edilizia, ciò perché giornalmente trascorriamo gran parte del tempo all'interno di edifici, siano essi adibiti ad uso residenziale, ad uso lavorativo o ad attività legate al nostro tempo libero. Il grande livello di urbanizzazione ha reso gli edifici, il 70% dei quali è di tipo residenziale [1], i più grandi consumatori di energia dell'Unione Europea, essendo responsabili del 40% del consumo energetico complessivo.

L'energia impiegata deriva principalmente dalle fonti fossili e ciò rende gli edifici responsabili del 36% dell'emissione di gas serra dovute principalmente alla costruzione, all'utilizzo, alla ristrutturazione e alla demolizione degli edifici stessi.

In particolare la quota di energia consumata durante l'utilizzo è definita fabbisogno energetico dell'edificio ed è destinata al riscaldamento, alla ventilazione e alla climatizzazione degli edifici ma anche per la parte di illuminazione e per l'alimentazione dei diversi carichi termici.

Il fabbisogno energetico viene soddisfatto dall'energia utile ottenuta a valle della catena energetica (Figura 1.1) a partire dalle sorgenti di energia primaria a seguito di processi di esplorazione, conversione, immagazzinamento e distribuzione.

Per poter ridurre l'impiego di energia primaria proveniente da fonte fossile e destinato a soddisfare il fabbisogno energetico degli edifici, è possibile individuare due principali soluzioni:

- La prima soluzione prevede una maggiore penetrazione delle fonti rinnovabili che può avvenire sia a monte della catena energetica in termini di energia primaria, sia a valle in termini di energia utile; tale incremento infatti porterebbe, a parità di fabbisogno

energetico, ad una conseguente riduzione del consumo di energia proveniente da fonte fossile.

- La seconda soluzione è invece mirata al ridurre il fabbisogno energetico attraverso opere finalizzate al miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici in modo tale da ridurre i consumi con un conseguente calo del consumo di energia proveniente anche da fonte fossile.

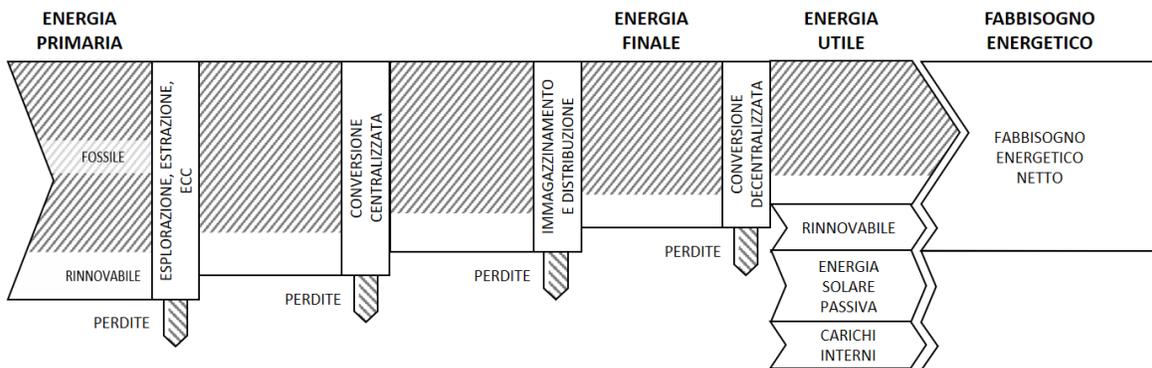


Figura 1.1 – Catena energetica dell'energia richiesta negli edifici per soddisfare il fabbisogno energetico

Tra le due, la seconda soluzione è più semplice da realizzare e risulta essere particolarmente valida se si pensa al fatto che ad oggi circa il 35% degli edifici dell'Unione Europea e il 57% del building stock nazionale sono stati costruiti prima degli anni Settanta, e che il 75% di essi risulti essere inefficiente sotto il profilo energetico con conseguente spreco di gran parte dell'energia utilizzata [1].

Incrementare l'efficienza energetica di un edificio attraverso una migioria del suo involucro edilizio permette di ottenere oltre ad una riduzione del fabbisogno e quindi del corrispondente consumo di energia fossile precedentemente citato, anche una riduzione dei costi in bolletta e un possibile incremento del livello di comfort all'interno degli edifici.

Sulla base di queste motivazioni si è mossa l'Unione Europea attraverso una revisione della direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica avvenute entrambe nel 2018 [1]. All'interno di tali direttive si è individuato nella riqualificazione energetica degli edifici uno strumento valido per

conseguire l'obiettivo di neutralità in termini di emissioni di carbonio entro il 2050, secondo quanto definito nel Green Deal europeo.

Nell'analizzare i benefici derivanti dal retrofit di edifici residenziali, va tuttavia considerato il fatto che si tratta di sistemi dinamici il cui fabbisogno energetico è fortemente influenzato dalle abitudini degli utenti. Infatti, le condizioni termo-igrometriche dell'aria interna possono essere controllate dall'utente stesso ai fini di garantire il comfort termico attraverso regolazioni degli impianti di riscaldamento e raffrescamento oltre che agendo sull'apertura delle finestre per favorire la ventilazione naturale.

Nel momento in cui si realizza un intervento di riqualificazione energetica di un edificio è possibile stimare il risparmio che ne potrebbe derivare in termini di riduzione del fabbisogno energetico. Quello che però può accadere in questi casi è che l'utente si comporti diversamente a valle dell'intervento, aumentando la propria richiesta di comfort o diminuendo la propria attenzione ai consumi, portando così al verificarsi del cosiddetto *rebound effect*.

Il termine *rebound effect*, conosciuto anche in letteratura come *Jevons Paradox* è stato coniato da William Stanley Jevons a metà del Novecento per motivare il fatto che un incremento dell'efficienza nell'impiego del carbone non portasse ad un suo utilizzo ridotto, bensì ad un maggiore consumo [2]. A partire dagli anni 2000, questo termine è stato utilizzato per descrivere riduzioni più o meno considerevoli di risparmi energetici stimati inizialmente in linea teorica, introducendo d'altra parte il termine *backfire* per indicare gli incrementi dei consumi a cui Jevons faceva riferimento [3].

Nel caso specifico di edifici residenziali, con il termine *rebound effect* vengono descritte quelle situazioni in cui i risparmi energetici ottenuti in seguito a migliorie dell'efficienza dell'edificio sono parzialmente compensati da una maggiore domanda nascente da incrementi della temperatura dell'aria interna e da un comportamento non ottimale sulla gestione della ventilazione naturale [4].

Tale fenomeno è stato studiato in letteratura sulla base di diversi indici, tra i quali:

- *l'Energy Performance Gap (EPG)*: compara il fabbisogno energetico simulato con i consumi reali misurati ed è pertanto un indice del potenziale non sfruttato da parte dell'edificio rispetto al suo livello di efficienza energetica;
- *l'Energy Savings Deficit (ESD)*: rappresenta la quota di risparmio energetico stimato inizialmente che non è stato possibile raggiungere;
- *l'Energy Savings Achievement (ESA)*: è complementare al precedente e pertanto rappresentativo della quota di risparmio energetico stimato inizialmente che si è riuscita a raggiungere.

In particolare nello studio condotto da Cali et al. [2] sono stati monitorati tre condomini in Germania riqualificati nel periodo 2008-2010 per i quali si avevano a disposizione i consumi reali misurati prima e dopo il retrofit. A partire da alcune ipotesi fatte sulle condizioni interne si è calcolato il fabbisogno energetico simulato *POST* retrofit con il quale si sono analizzati i diversi indici a livello di intero condominio. Ne sono derivati un *EPG* compreso tra -12% e 287% , un *ESD* compreso tra 5% e 28% e un rispettivo *ESA* compreso tra 72% e 95% .

Anche nello studio condotto da Galvin [3] sono stati monitorati tre condomini in Germania per i quali erano disponibili i consumi reali misurati prima e dopo il retrofit. In questo caso sono stati simulati entrambi i fabbisogni energetici *ANTE* e *POST* retrofit ipotizzando le stesse condizioni interne. Da ciò si sono potuti analizzare gli indici a livello di intero condominio che hanno riportato un *EPG* compreso tra 2% e 273% e un *ESD* compreso tra 1% e 44% .

D'altra parte lo studio condotto da Moeller et al. [4] considera quaranta appartamenti nella città di Monaco che sono già stati riqualificati al momento dell'analisi. In questo caso il confronto è avvenuto tra il fabbisogno energetico simulato a partire da condizioni interne ipotizzate e il fabbisogno energetico sempre simulato, ma a partire dalle condizioni interne reali monitorate da sensori installati all'interno degli appartamenti. L'unico indice analizzato

in questo caso è stato l'*EPG* che ha riportato valori compresi tra -59% e 318% per i singoli appartamenti.

Infine, lo studio condotto da Vivian, Carnieletto e De Carli [5] ha considerato venti appartamenti della città di Milano, otto dei quali sono stati riqualificati nel 2019. Per questi appartamenti è stato simulato il fabbisogno energetico *ANTE* e *POST* retrofit a partire dalle condizioni interne reali monitorate da sensori installati nei diversi appartamenti. Da ciò si è ottenuto un valore di *EPG* compreso tra 42% e 47% . I rimanenti dodici appartamenti sono stati considerati come benchmark in quanto nell' stesso periodo di analisi non era ancora stata fatta la riqualificazione.

Il lavoro svolto in questa tesi nasce proprio come proseguimento di quanto ottenuto nello studio condotto da Vivian, Carnieletto e De Carli [5] ed è costituito da due diverse analisi condotte rispettivamente per il periodo invernale e per quello estivo.

Relativamente all'analisi invernale si è cercato di estendere il campionamento disponibile nello studio precedente, includendo altri appartamenti riqualificati nel corso del 2021. Ciò ha permesso di avere un quadro più preciso circa le condizioni termo-igrometriche *ANTE* e *POST* retrofit sulla base delle quali simulare i rispettivi fabbisogni energetici attraverso il software *EnergyPlus* e confermare o meno il verificarsi del fenomeno di *rebound effect*. In aggiunta a ciò si è cercato di valutare il livello di comfort *ANTE* e *POST* retrofit per testare l'efficacia della riqualificazione energetica anche da quel punto di vista.

Considerando ora il periodo estivo ci si aspetta che il nuovo involucro edilizio, presente nella condizione di *POST* retrofit e caratterizzato da una maggiore resistenza termica causata dall'aggiunta di uno strato di isolante, possa costituire un ostacolo alla dissipazione del calore. Ciò si tramuterebbe in un incremento della temperatura dell'aria interna, piuttosto che in un maggiore utilizzo di eventuali impianti di climatizzazione. Nell'analisi estiva condotta si confronteranno le condizioni termo-igrometriche *ANTE* e *POST* retrofit sulla base delle quali verranno poi eseguite simulazioni attraverso il software *EnergyPlus* al fine di verificare la validità dell'ipotesi fatta.

Il proseguo dell'elaborato risulta essere così strutturato: nel Capitolo 2 verrà presentato il caso studio, nel Capitolo 3 verrà presentato il metodo sulla base del quale si sono ottenuti i risultati esposti nel Capitolo 4; nel Capitolo 5 infine ci sarà spazio per le conclusioni e considerazioni finali.

2 Capitolo. Caso studio

In questo capitolo verrà presentato il caso studio, descrivendo inizialmente i condomini analizzati; successivamente verrà spiegato il programma di monitoraggio delle variabili ambientali e verranno descritte le caratteristiche degli appartamenti simulati.

2.1 Descrizione dei condomini analizzati

Il lavoro svolto è focalizzato sull'analisi di tre condomini situati nella città di Milano, i quali sono stati sottoposti a lavori di riqualificazione durante gli anni 2019-2021. Come riportato in Figura 2.1 i tre condomini si trovano nella prima periferia e per semplicità verranno denominati rispettivamente *condominio B*, *condominio F* e *condominio M*.

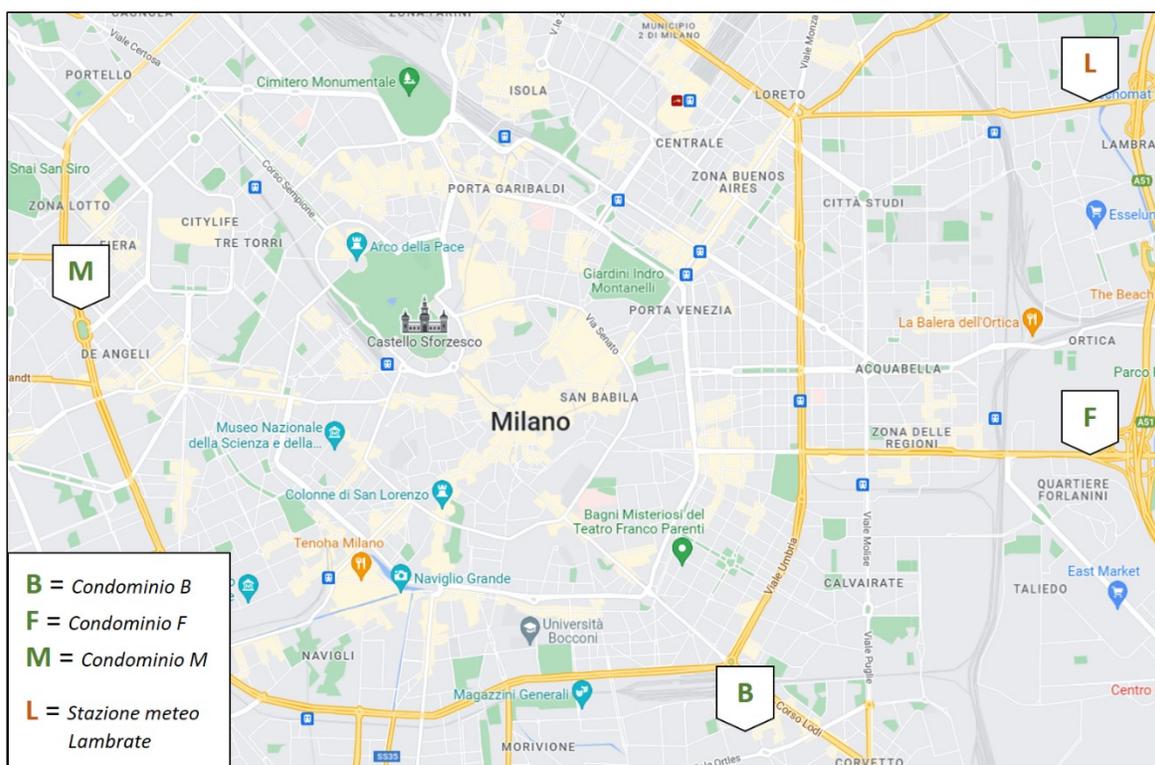


Figura 2.1 - Posizione dei condomini analizzati e della stazione meteo di riferimento

Il *condominio B* è costituito da quattro edifici per un totale di 142 appartamenti ed è stato riqualificato tra febbraio e agosto 2019; per questo condominio sono disponibili i dati di monitoraggio di due appartamenti rinominati *B1* e *B2*.

Il *condominio M* è costituito da soli dieci appartamenti e i lavori per la riqualificazione energetica si sono tenuti tra febbraio e giugno 2019; per questo condominio sono disponibili i dati di monitoraggio di sei appartamenti: *M1, M2, M3, M4, M5* e *M6*.

Infine, il *condominio F* è costituito da 47 appartamenti, riqualificato tra novembre 2020 e febbraio 2021; di esso sono disponibili i dati di dodici appartamenti: *F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11* e *F12*.

Secondo il D.P.R. n°412/1993 [6], essendo situati tutti nella città di Milano, i tre condomini sono caratterizzati da un valore di gradi giorno di 2404 ed appartengono alla zona climatica di tipo E.

2.2 Programma di monitoraggio degli appartamenti

Il programma di monitoraggio degli appartamenti, attualmente ancora operativo, è iniziato prima dei lavori di riqualificazione energetica per determinare il comportamento degli utenti *ANTE* e *POST* intervento.

In particolare per il *condominio B* la raccolta dati si sta tenendo a partire dal 13 novembre 2018, per il *condominio F* dal 13 o 14 novembre 2018, a seconda dell'appartamento, e per il *condominio M* dal 9 novembre 2018.

Ognuno degli appartamenti installati è stato provvisto di uno o due sensori, generalmente posizionati all'ingresso, in soggiorno o in camera da letto come riportato nell'esempio di Figura 2.2.

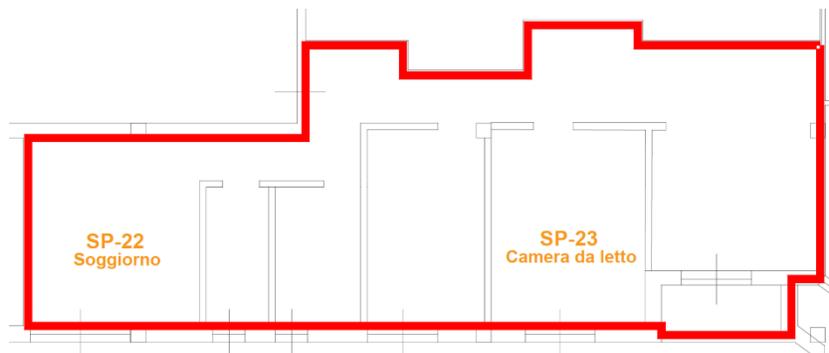


Figura 2.2 - Posizione dei due sensori all'interno dell'appartamento F8

L'elenco completo dei 20 appartamenti monitorati con la rispettiva volumetria e i sensori installati sono stati riportati in Tabella 2.1, Tabella 2.2 e Tabella 2.3, rispettivamente per il condominio B, condominio M e condominio F.

Tabella 2.1 - Elenco dei sensori installati negli appartamenti del condominio B e rispettiva volumetria

Condominio B	B1	B2
VOLUME [m ³]	360	328
SENSORI	SP-1	SP-2

Tabella 2.2 - Elenco dei sensori installati negli appartamenti del condominio M e rispettiva volumetria

Condominio M	M1	M2	M3	M4	M5	M6
VOLUME [m ³]	271	425	660	402	315	402
SENSORI	SP-9	SP-3	SP-5	SP-7	SP-1	SP-11
	SP-10	SP-4	SP-6	SP-8	SP-2	SP-12

Tabella 2.3 - Elenco dei sensori installati negli appartamenti del condominio F e rispettiva volumetria

Condominio F	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
VOLUME [m ³]	256	225	182	313	270	224	285	230	245	256	326	247
SENSORI	SP-9	SP-5	SP-12	SP-16	SP-18	SP-3	SP-7	SP-22	SP-1	SP-14	SP-20	SP-24
	SP-11	SP-6	SP-13	SP-17	SP-19	SP-4	SP-8	SP-23	SP-2	SP-15	SP-21	SP-25

Ciascun sensore opera con un timestep di 15 minuti e fornisce i dati della temperatura dell'aria interna (T_i [$^{\circ}C$]), dell'umidità relativa dell'aria interna (RH_i [%]), della pressione interna (p_i [hPa]), dei composti organici volatili presenti nell'aria (VOC [ppm]) e dell'illuminazione interna (Ill_i [lux]).

Talvolta i sensori non sono riusciti a rilevare correttamente le condizioni termigrometriche, registrando così alcuni dati non validi che sono stati esclusi dall'analisi; i periodi in cui ciò si è verificato hanno avuto una durata variabile dal singolo timestep ad interi mesi e diversa per ciascun sensore. Ipotizzando che ognuno di essi sia rimasto nella posizione in cui è stato installato inizialmente per tutto il periodo di monitoraggio, si è tenuto conto unicamente di quei sensori la cui raccolta dati fosse significativa nei periodi di interesse per le analisi estive e invernali (§3.1.1)(§3.1.2).

I dati relativi alle condizioni climatiche esterne sono stati forniti dall'agenzia regionale per la protezione dell'ambiente (ARPA) della regione Lombardia [7], da cui sono stati elaborati i profili orari della temperatura (T_e [$^{\circ}C$]) e dell'umidità relativa dell'aria esterna (RH_e [%]) e della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI [W/m^2]).

La stazione meteorologica scelta si trova in zona Lambrate a Milano che, come mostrato in Figura 2.1, si tratta di una posizione periferica, al pari dei condomini analizzati; ciò ha permesso di evitare che i dati relativi alle condizioni meteorologiche potessero venire influenzati dall'effetto "isola di calore", in particolare che i valori della temperatura dell'aria esterna venissero alterati a causa di una zona densamente abitata come il centro di Milano.

2.3 Caratteristiche degli appartamenti simulati

Alcuni dati sui tre condomini sono emersi dai rispettivi documenti *Legge 10*, stilati secondo il Decreto 26/06/2015 [8] [9] e forniti dall'azienda; le informazioni principali raccolte sono state sintetizzate nei prossimi paragrafi.

Nel *condominio B* è presente un impianto di riscaldamento centralizzato provvisto di un sistema di generazione a pompa di calore e di un sistema di emissione mediante radiatori incassati sottofinestra; per l'acqua calda sanitaria sono previsti impianti autonomi per ciascun appartamento.

Gli interventi di riqualificazione energetica realizzati per questo edificio sono stati l'isolamento tramite capotto e l'insufflaggio.

Nel *condominio F* è presente un impianto di riscaldamento centralizzato alimentato da tre caldaie a condensazione e un sistema di emissione con termosifoni in alluminio regolati tramite valvole termostatiche.

In questo caso gli interventi realizzati non sono stati specificati.

Nel *condominio M* è presente un impianto di riscaldamento centralizzato alimentato da pompa di calore e un sistema di emissione mediante radiatori tradizionali; anche in questo caso, per l'acqua calda sanitaria sono previsti impianti autonomi per ciascun appartamento.

Le pareti esterne sono state isolate con sistema a cappotto, così come l'isolamento all'intradosso del piano delle cantine, e all'estradosso dei solai verso il sottotetto, mentre la copertura è stata sostituita.

Inoltre il *condominio B* è provvisto di un impianto di generazione fotovoltaica composto da 62 moduli disposti in tre stringhe da 16 moduli e una stringa da 14 moduli, per una superficie complessiva di 101 m^2 e una potenza complessiva di $17,36 \text{ kW}_p$.

Dalla *Legge 10* di ciascun condominio è stato possibile inoltre risalire alle volumetrie dei diversi appartamenti e precedentemente riportate in §2.2.

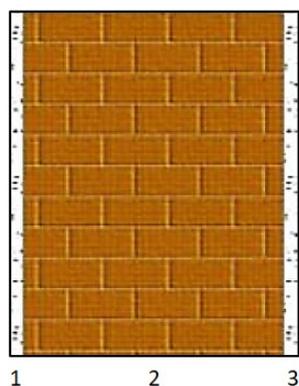
Le simulazioni energetiche fanno riferimento al *condominio M* in quanto erano disponibili maggiori dettagli riguardanti la planimetria e la stratigrafia dell'involucro edilizio, prima e dopo gli interventi di riqualificazione energetica.

Il *condominio M* comprende cinque piani, l'ultimo dei quali è il sottotetto, più un piano interrato adibito a scantinato; è costituito da tre diverse tipologie di muri che per comodità sono stati definiti *muro esterno – CV1*, *muro appartamento – CV2* e *muro interno – PV1* e da due diverse tipologie di solai che per comodità sono stati definiti *soffitto su cantina* e *soffitto ordinario*.

La stratigrafia di ciascuna tipologia di muro e solaio verrà di seguito analizzata nelle condizioni di *ANTE* e *POST* lavori di riqualificazione energetica.

2.3.1 Caratteristiche dell'involucro edilizio

Il *muro esterno* rappresenta i muri perimetrali del condominio che dividono l'ambiente interno di ciascun appartamento da quello esterno. Questa struttura nella situazione *ANTE* retrofit è caratterizzata da una trasmittanza termica pari a $U = 1.40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e la relativa stratigrafia è riportata in Figura 2.3.



MURO ESTERNO - CV1	
N°	STRATO
1	intonaco di calce e sabbia
2	mattone pieno
3	intonaco di calce e sabbia

Figura 2.3 – Stratigrafia del muro esterno – CV1 nella situazione ANTE retrofit

Il *muro appartamento* rappresenta i muri interni al condominio che dividono gli ambienti interni di due diversi appartamenti. Nella situazione *ANTE* retrofit la struttura è caratterizzata da una trasmittanza termica pari a $U = 1.59 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e la relativa stratigrafia è riportata in Figura 2.4.

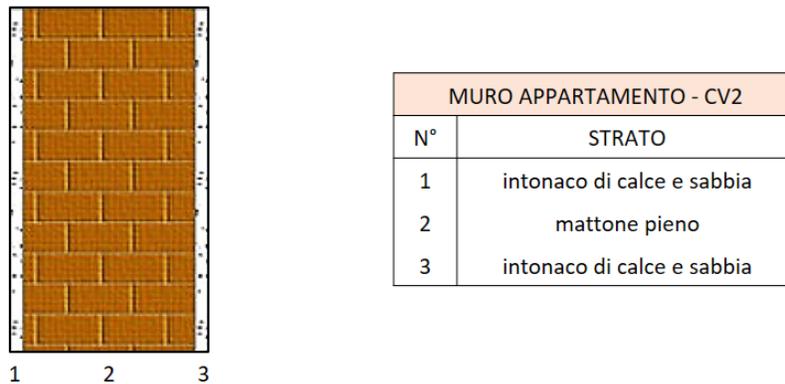


Figura 2.4 – Stratigrafia del muro appartamento – CV2 nella situazione ANTE retrofit

Infine il *muro interno – PV1* rappresenta i muri interni all'appartamento che dividono gli ambienti di due diverse stanze dell'appartamento stesso. Questa struttura in condizioni ANTE retrofit è caratterizzata da una trasmittanza termica pari a $U = 1.43 W/(m^2K)$ e la relativa stratigrafia è riportata in Figura 2.5.

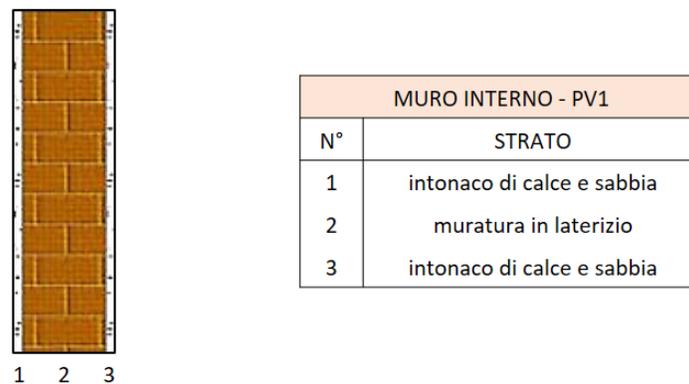
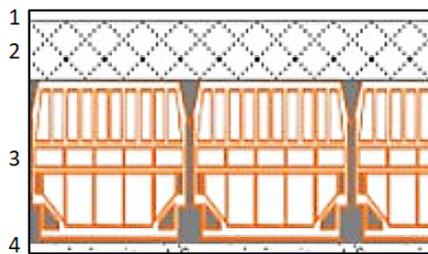


Figura 2.5 – Stratigrafia del muro interno – PV1 nella situazione ANTE retrofit

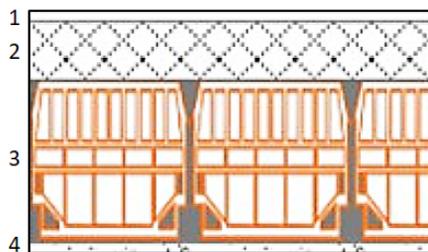
Relativamente alle strutture dei solai, il *solaio su cantina* rappresenta il solaio posto tra il piano interrato e il piano rialzato. Questa struttura nella situazione ANTE retrofit è caratterizzata da una trasmittanza termica pari a $U = 1.40 W/(m^2K)$ e la relativa stratigrafia è riportata in Figura 2.6.



SOLAIO SU CANTINA	
N°	STRATO
1	piastrelle in ceramica
2	massetto in calcestruzzo con rete
3	soletta in laterizio
4	intonaco di calce e sabbia

Figura 2.6 - Stratigrafia del solaio su cantina nella situazione ANTE retrofit

L'ultima struttura analizzata è il solaio ordinario, il quale rappresenta tutti i vari solai interpiano. Nella situazione ANTE retrofit la struttura è caratterizzata da una trasmittanza termica pari a $U = 1.40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e la relativa stratigrafia è riportata in Figura 2.7.

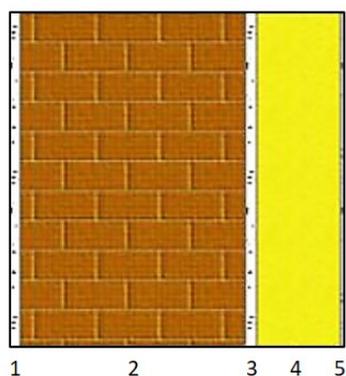


SOLAIO SU CANTINA	
N°	STRATO
1	piastrelle in ceramica
2	massetto in calcestruzzo con rete
3	soletta in laterizio
4	intonaco di calce e sabbia

Figura 2.7 - Stratigrafia del solaio ordinario nella situazione ANTE retrofit

A seguito dell'intervento di riqualificazione energetica sono state solo due le strutture che hanno subito una modifica della rispettiva stratigrafia; esse sono il *muro esterno – CV1* e il *solaio su cantina*.

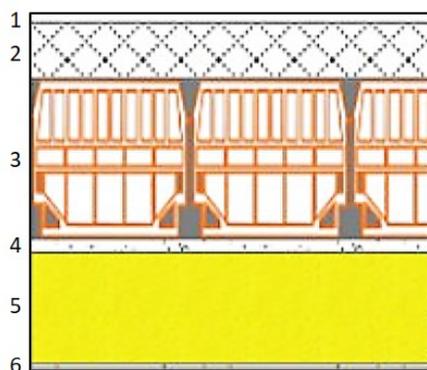
Per il *muro esterno – CV1* nella condizione POST retrofit la trasmittanza termica è scesa a $U = 0.21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e la nuova stratigrafia è riportata in Figura 2.8.



MURO ESTERNO - CV1 (isolato)	
N°	STRATO
1	intonaco di calce e sabbia
2	mattone pieno
3	intonaco di calce e sabbia
4	pannello in lana di roccia
5	intonaco plastico per cappotto

Figura 2.8 – Stratigrafia del muro esterno – CV1 nella situazione POST retrofit

Relativamente al *solaio su cantina*, nella condizione *POST retrofit* la trasmittanza termica è scesa a $U = 0.21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e la nuova stratigrafia è riportata in Figura 2.9.



SOLAIO SU CANTINA (isolato)	
N°	STRATO
1	piastrelle in ceramica
2	massetto in calcestruzzo con rete
3	soletta in laterizio
4	intonaco di calce e sabbia
5	pannello in lana di roccia
6	intonaco plastico per cappotto

Figura 2.9 – Stratigrafia del solaio su cantina nella situazione POST retrofit

La descrizione dettagliata delle proprietà dei vari materiali costituenti le diverse stratigrafie appena illustrate e sulla base delle quali si sono svolte le simulazioni, è riportata in Appendice – A.

Passando ora ai componenti vetrati costituenti il *condominio M*, vale a dire finestre e portefinestre, dalla Legge 10 si potuto risalire alla relativa trasmittanza termica, che risulta rispettivamente pari a $U = 2.71 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $U = 2.74 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Nonostante non sia stato esplicitamente riportato di che tipologia di vetro si tratti, dalle trasmittanze tipiche dei componenti vetrati riportate anch'esse in Appendice – A, si è potuto dedurre che si tratti di doppi vetri aventi dimensioni di $4 - 12 - 4 \text{ mm}$ e valori di emissività pari a $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$.

3 Capitolo. Metodologia

Lo studio in oggetto è stato diviso in due fasi. Inizialmente sono stati analizzati i dati di monitoraggio delle condizioni termo-igrometriche degli appartamenti utilizzando *Python* ed *Excel*. In seguito alcuni appartamenti sono stati analizzati con *EnergyPlus*, un software di simulazione dinamica che consente di valutare il comportamento energetico degli edifici al variare dell'involucro edilizio e del comportamento degli utenti.

3.1 Analisi dei dati monitorati

Come precedentemente introdotto, l'analisi delle misurazioni rilevate dai sensori è stata condotta mediante l'utilizzo di due software, *Python* ed *Excel*.

Considerando che il campionamento fatto da ciascun sensore avviene con un timestep di 15 minuti (§2.2), sono stati costruiti profili orari delle grandezze di interesse: la temperatura (T_i [°C]), l'umidità relativa (RH_i [%]) e la pressione (p_i [hPa]) degli ambienti interni, in quanto sufficienti per determinare le condizioni termo-igrometriche.

A partire dai profili orari delle grandezze considerate registrati da ciascun sensore, si è costruito un profilo orario medio per l'intero appartamento; per gli appartamenti con due sensori che hanno rilevato dati validi, il profilo considerato è stato ottenuto dalla media dei due sensori.

3.1.1 Scelta dei periodi analizzati per la stagione invernale

Durante la stagione invernale è stato individuato un periodo comune per gli anni 2018, 2019 e 2021 compreso tra i mesi di novembre e dicembre; in particolare, il periodo tra il 14 novembre e il 21 dicembre, per escludere gli ultimi 10 giorni del mese che coincidono con

l'inizio del periodo delle vacanze natalizie, nel quale la presenza degli utenti nei diversi appartamenti diventa troppo variabile.

Nell'analisi della stagione invernale si è scelto di non includere il periodo novembre-dicembre 2020, in quanto mesi fortemente influenzati dall'epidemia di Covid-19. Il D.P.C.M. del 3/11/2020 [10] e l'Ordinanza del Ministero della Salute del 4/11/2020 [11] hanno modificato le abitudini degli utenti, influenzando i dati raccolti in quei mesi.

Scelto il periodo di analisi, sono stati individuati tutti quei sensori che hanno fornito dati utili nei mesi di novembre e dicembre in ciascuno dei tre anni considerati (Tabella 3.1, Tabella 3.2 e Tabella 3.3)

Tabella 3.1 - Elenco dei sensori presenti nel Condominio B considerati nell'analisi invernale

Condominio B	B1	B2
SENSORI	SP-1	SP-2

Tabella 3.2 - Elenco dei sensori presenti nel Condominio M considerati nell'analisi invernale

Condominio M	M1	M2	M3	M4	M5	M6
SENSORI	SP-9	SP-3	SP-5	SP-7	SP-1	SP-11
	SP-10	SP-4	SP-6	SP-8	SP-2	SP-12

Tabella 3.3 - Elenco dei sensori presenti nel Condominio F considerati nell'analisi invernale

Condominio F	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
SENSORI	SP-9	SP-5	SP-12	SP-16	SP-18	SP-3	SP-7	SP-22	SP-1	SP-14	SP-20	SP-24
	SP-11	SP-6	SP-13	SP-17	SP-19	SP-4	SP-8	SP-23	SP-2	SP-15	SP-21	SP-25

Sempre in Tabella 3.1, Tabella 3.2 e Tabella 3.3, sono stati evidenziati gli appartamenti nei quali almeno un sensore soddisfa la condizione precedente e quindi quelli effettivi sui quali si è potuta condurre l'analisi invernale.

Considerando il periodo dal 14 novembre al 21 dicembre, il numero totale di ore monitorate in ciascun anno è stato di 912 *h* e ha portato a una percentuale media di dati non validi del 5.3%, dello 0.3%, e dell'1.1% rispettivamente negli anni 2018, 2019 e 2021.

Facendo riferimento al periodo in cui si sono svolti i lavori di riqualificazione energetica in ciascun appartamento (§2.2), è stato possibile associare ad ognuno degli 11 appartamenti analizzati una situazione di *ANTE* o di *POST* retrofit per i tre anni considerati.

Come si può notare dalla Tabella 3.4, gli 11 appartamenti erano in una situazione di *ANTE* retrofit nel 2018, mentre nel 2019 4 di essi sono stati riqualificati e quindi in una situazione di *POST* retrofit (*B2*, *M2*, *M3*, *M5*). I rimanenti 7 (*F2*, *F4*, *F5*, *F8*, *F9*, *F11*, *F12*) sono stati riqualificati in seguito, ottenendo nel 2021 tutti gli 11 appartamenti in una situazione di *POST* retrofit.

Tabella 3.4 – Situazione degli 11 appartamenti nei diversi anni considerati (A - ANTE, P - POST)

ANNO	B2	M2	M3	M5	F2	F4	F5	F8	F9	F11	F12
2018	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
2019	P	P	P	P	A	A	A	A	A	A	A
2021	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Seppur il 2019 sia stato comunque compreso in questo studio, l'analisi invernale è stata principalmente incentrata nel confronto tra le condizioni termo-igrometriche rilevate nel 2018 e quelle rilevate nel 2021. Questa scelta considera che in questi due anni tutti e 11 gli appartamenti analizzati si trovavano nelle stesse situazioni, rispettivamente *ANTE* retrofit nel 2018 e *POST* retrofit nel 2021, permettendo di valutare gli effetti legati alla riqualificazione energetica.

I valori medi della temperatura dell'aria esterna (T_e [°C]), dell'umidità relativa dell'aria esterna (RH_e [%]) e della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI [W/m^2]) ottenuti

dai dati ARPA del periodo che va dal 14 novembre al 21 dicembre per i tre anni presi in considerazione sono riportati in Tabella 3.5.

Tabella 3.5 – Valori medi delle condizioni climatiche dal 14/11 al 21/12 (Lambrate)

YEAR	2018	2019	2021	2018 -> 2019	2018 -> 2021
T _e [°C]	5.9 ± 3.5	7.6 ± 2.6	5.4 ± 3.2	1.7	-0.5
RH _e [%]	80.7 ± 14.4	90.1 ± 10.8	85.9 ± 12.4	9.5	5.2
GHI [W/m ²]	54.6 ± 23.9	34.4 ± 26.8	52.8 ± 27.6	-20.2	-1.7

Si nota che il 2019 è stato un anno più caldo in termini di temperatura dell'aria esterna rispetto al 2018 e, nonostante la ridotta radiazione solare, ciò potrebbe aver influenzato il comportamento dei utenti per quanto riguarda la ventilazione naturale (§4.1.1.4). Il 2018 e il 2021 sono stati anni climatici molto più simili, soprattutto in termini di temperatura dell'aria esterna e questo ha permesso di eseguire un confronto molto più accurato tra i relativi periodi.

3.1.2 Scelta dei periodi analizzati per la stagione estiva

Il periodo comune a tutti gli appartamenti per poter analizzare la stagione estiva comprende tutto il mese di luglio per gli anni 2019, 2020 e 2021 in quanto mese più caldo dell'anno.

Come nel caso invernale, anche per l'analisi estiva sono stati individuati gli appartamenti e i sensori con dati utili per ciascuno dei tre anni considerati (Tabella 3.6, Tabella 3.7 e Tabella 3.8).

Tabella 3.6 – Elenco dei sensori presenti nel condominio B considerati nell'analisi estiva

<i>Condominio B</i>	B1	B2
SENSORI	SP-1	SP-2

Tabella 3.7 – Elenco dei sensori presenti nel condominio M considerati nell'analisi estiva

Condominio M	M1	M2	M3	M4	M5	M6
SENSORI	SP-9	SP-3	SP-5	SP-7	SP-1	SP-11
	SP-10	SP-4	SP-6	SP-8	SP-2	SP-12

Tabella 3.8 – Elenco dei sensori presenti nel condominio F considerati nell'analisi estiva

Condominio F	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
SENSORI	SP-9	SP-5	SP-12	SP-16	SP-18	SP-3	SP-7	SP-22	SP-1	SP-14	SP-20	SP-24
	SP-11	SP-6	SP-13	SP-17	SP-19	SP-4	SP-8	SP-23	SP-2	SP-15	SP-21	SP-25

Sempre in Tabella 3.6, Tabella 3.7 e Tabella 3.8, sono stati evidenziati gli appartamenti nei quali almeno un sensore soddisfa la condizione precedente e quindi quelli effettivi sui quali si è potuta condurre l'analisi estiva.

Considerando il periodo dal 1 al 31 luglio, il numero totale di ore monitorate in ciascun anno è stato di 744 h e ha portato a una percentuale media di dati non validi del 0.0%, del 0.0%, e del 5.7% rispettivamente negli anni 2018, 2019 e 2021.

Analogamente a quanto fatto per l'analisi invernale, sulla base del periodo in cui si sono svolti i lavori di riqualificazione energetica in ciascun appartamento (§2.2), è stato possibile associare ad ognuno degli 11 appartamenti analizzati una situazione di ANTE o di POST retrofit per i tre anni considerati.

Come si può notare dalla Tabella 3.9, nel 2019 e nel 2020 erano 3 gli appartamenti già riqualificati e quindi in una situazione di POST retrofit (M2, M3, M5), mentre i rimanenti 8 erano ancora in una situazione di ANTE retrofit (F2, F3, F4, F5, F8, F9, F11, F12); nell'anno 2021 invece, tutti gli 11 appartamenti erano stati riqualificati ed erano quindi in una situazione di POST retrofit.

Tabella 3.9 – Situazione degli 11 appartamenti nei diversi anni considerati (A - ANTE, P - POST)

ANNO	M2	M3	M5	F2	F3	F4	F5	F8	F9	F11	F12
2019	P	P	P	A	A	A	A	A	A	A	A
2020	P	P	P	A	A	A	A	A	A	A	A
2021	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Nel condurre l'analisi estiva si è inoltre tenuto conto degli appartamenti provvisti di un impianto di climatizzazione (M2, M3, M5, F3, F4, F5, F11 e F12).

Anche in questo caso si hanno a disposizione tre anni, nonostante ciò, lo studio estivo si concentrerà principalmente sul confronto tra il 2019 e il 2021; questo perché, sebbene l'estate del 2020 non sia stata soggetta a restrizioni dal punto di vista normativo, si trattava pur sempre di un periodo temporale in cui il comportamento degli utenti era in parte influenzato dalla pandemia di Covid-19.

Considerando questi due anni si è potuta quindi svolgere un confronto tra ANTE e POST retrofit per 8 appartamenti (F2, F3, F4, F5, F8, F9, F11 e F12) mentre per gli appartamenti M2, M3 e M5 l'analisi condotta ha confrontato la situazione di POST retrofit di due anni differenti. Ciò è servito da benchmark in quanto rilevare la variazione delle condizioni termo-igrometriche in questi appartamenti ha permesso di risalire ad eventuali cambiamenti nel comportamento degli utenti che risultassero però indipendenti dagli interventi di riqualificazione energetica.

Analogamente a quanto fatto nel caso invernale, sono stati considerati i valori ottenuti dall'ARPA della regione Lombardia [7] riportati in Tabella 3.10.

Tabella 3.10 – Valori medi delle condizioni climatiche dal 1 al 31 luglio (Lambrate)

YEAR	2019	2020	2021	2019 -> 2020	2019 -> 2021
Te [°C]	26.8 ± 2.4	25.5 ± 2.3	25.2 ± 2.2	-1.3	-1.6
RHe [%]	55.8 ± 6.1	60.8 ± 8.3	60.5 ± 10.0	5.1	4.8
GHI [W/m ²]	283.0 ± 47.6	296.7 ± 45.6	252.1 ± 70.8	13.6	-30.9

Dal punto di vista delle caratteristiche climatiche analizzate, sono tre anni abbastanza simili; il 2019 è stato leggermente più caldo se si considera la temperatura esterna, nonostante ciò, l'umidità relativa nel 2020 e nel 2021 è stata mediamente più alta rispetto al 2019 e questo ha parzialmente compensato la percezione di caldo da parte degli utenti in quegli anni. Infine, la radiazione solare ha avuto un incremento minimo nel 2020, per poi calare leggermente nel 2021.

3.1.3 Stima dei ricambi di aria per ventilazione naturale

Per quanto riguarda la stima della ventilazione naturale nei diversi appartamenti nelle analisi invernale ed estiva, è stato stimato il valore di ricambi di aria orari ($ACR [h^{-1}]$) mediante un modello impostato sul bilancio igrometrico di un edificio, a partire dal calcolo delle umidità specifiche dell'aria interna ed esterna.

Noti i dati di temperatura e umidità relativa dell'aria interna, è stato infatti possibile calcolare l'umidità specifica dell'aria interna ($x_i [kg_v/kg_{as}]$) secondo la Norma EN ISO 13788 [12]. Inizialmente si è calcolata la pressione di saturazione dell'aria interna ($p_{sat,i} [Pa]$) a partire dalla temperatura ($T_i [°C]$) secondo le formule (Eq 3.1, Eq 3.2):

$$p_{sat,i} = 610.5 \cdot e^{\frac{17.269 \cdot T_i}{237.3 + T_i}} \quad \text{per } T_i \geq 0^\circ C \quad (3.1)$$

$$p_{sat,i} = 610.5 \cdot e^{\frac{21.975 \cdot T_i}{265.5 + T_i}} \quad \text{per } T_i < 0^\circ C \quad (3.2)$$

A questo punto si è potuta calcolare la pressione parziale del vapore ($p_{v,i}$ [Pa]) a partire dall'umidità relativa (RH_i [%]) e dalla pressione di saturazione appena calcolata ($p_{sat,i}$ [Pa]) (Eq 3.3):

$$p_{v,i} = \left(\frac{RH_i}{100} \right) \cdot p_{sat,i} \quad (3.3)$$

Infine, nota la pressione parziale del vapore ($p_{v,i}$ [Pa]) e la pressione interna (p_i [Pa]), si è potuta calcolare l'umidità specifica interna (x_i [kg_v/kg_{as}]) (Eq 3.4)

$$x_i = 0.622 \cdot \left(\frac{p_{v,i}}{p_i - p_{v,i}} \right) \quad (3.4)$$

Analogamente, note la temperatura e l'umidità relativa dell'aria esterna si è potuto calcolare l'umidità specifica dell'aria esterna (x_e [kg_v/kg_{as}]), sempre secondo la Norma EN ISO 13788 [12].

A questo punto è stato possibile definire il bilancio igrometrico di un edificio, come nell'esempio di Figura 3.1, secondo il quale si ha (Eq 3.5):

$$G_a \cdot x_e + G_v = G_a \cdot x_i \quad (3.5)$$

dove x_i [kg_v/kg_{as}] e x_e [kg_v/kg_{as}] sono l'umidità specifica dell'aria esterna precedentemente calcolate, G_a [kg/h] esprime la portata di ricambio d'aria e G_v [kg/h] esprime la generazione interna di vapore.

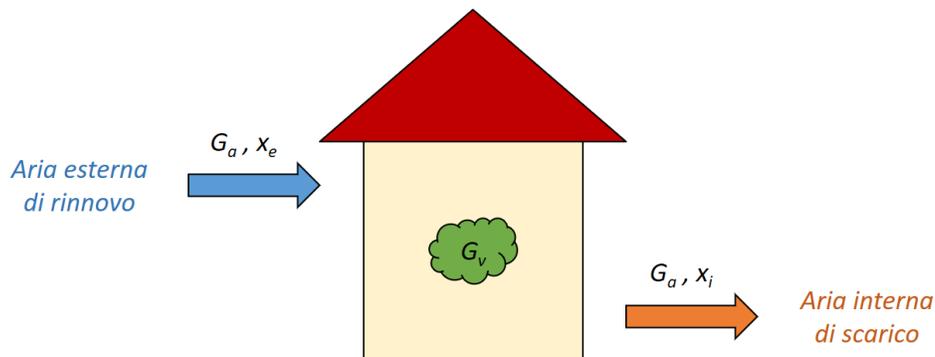


Figura 3.1 – Bilancio igrometrico di un edificio

Per ipotesi viene fissata una generazione interna di vapore pari a $G_v = 0.375 \text{ kg/h}$, considerato come valore medio per un appartamento abitato da tre persone, e tale valore viene assunto costante nell'analisi di ANTE e POST retrofit.

Conoscendo quindi la generazione interna di vapore ($G_v \text{ [kg/h]}$) e le umidità specifiche interna ($x_i \text{ [kg}_v\text{/kg}_{as}]$) ed esterna ($x_e \text{ [kg}_v\text{/kg}_{as}]$), si è potuto calcolare la portata di ricambio d'aria ($G_a \text{ [kg/h]}$) a partire dalla Eq 3.5 (Eq 3.6).

$$G_a = \frac{G_v}{x_i - x_e} \quad (3.6)$$

Quest'ultima può essere espressa anche in funzione della densità dell'aria, assunta costante e pari a $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$, del volume dell'appartamento ($V \text{ [m}^3\text{]}$), riportato in §2.2, e dei ricambi di aria orari ($ACR \text{ [h}^{-1}\text{]}$) (Eq 3.7).

$$G_a = \rho_a \cdot ACR \cdot V \quad (3.7)$$

Dall'Eq (3.7) è quindi possibile risalire al valore di ricambi d'aria orari che risulta pari a (Eq 3.8):

$$ACR = \frac{G_a}{\rho_a \cdot V} \quad (3.8)$$

Il modello così definito consente di ottenere valori rappresentativi di una tipica utenza domestica, tuttavia in alcuni casi ha riportato valori di ricambi d'aria orari negativi o troppo elevati; i risultati ottenuti sono stati quindi filtrati definendo un limite inferiore e un limite superiore che dipendono dalla stagione considerata.

Per l'analisi invernale si è considerato un valore massimo di 2 h^{-1} calcolato considerando un incremento di 5σ rispetto alla media ottenuta per tutti gli 11 appartamenti considerati nello studio invernale, dove σ rappresenta la deviazione standard complessiva. Da ciò risulta (Eq 3.9):

$$\begin{cases} ACR = 0 \text{ h}^{-1} & \text{se } ACR < 0 \\ ACR = 2 \text{ h}^{-1} & \text{se } ACR > 2 \end{cases} \quad (3.9)$$

Per l'analisi della stagione estiva il valore massimo considerato è stato di $9 h^{-1}$, calcolato anch'esso considerando un incremento di 5σ rispetto alla media ottenuta per tutti gli 11 appartamenti considerati nello studio estivo, dove σ rappresenta la deviazione standard complessiva. Da ciò risulta (Eq 3.10):

$$\begin{cases} ACR = 0 h^{-1} & se ACR < 0 \\ ACR = 9 h^{-1} & se ACR > 9 \end{cases} \quad (3.10)$$

3.1.4 Stima delle ore di utilizzo del sistema di climatizzazione

Cercando di determinare l'utilizzo del sistema di climatizzazione da parte degli utenti negli appartamenti che ne sono provvisti, è stato implementato un modello che stimasse le ore di accensione del clima sulla base della temperatura sole-aria ($T_{sol-air}$ [$^{\circ}C$]).

Il valore è stato calcolato a partire dalla temperatura dell'aria esterna (T_e [$^{\circ}C$]) e dalla radiazione globale sul piano orizzontale (GHI [W/m^2]), secondo la formula (Eq 3.11):

$$T_{sol-air} = T_e + \frac{\alpha \cdot GHI \cdot f_{sh}}{h_{c,e}} \quad (3.11)$$

dove:

- $\alpha = 0.25$ indica il coefficiente di assorbimento dell'involucro edilizio;
- $f_{sh} = 0.8$ indica il fattore di vista tra il sole e l'edificio;
- $h_{c,e} = 20 W/(m^2K)$ indica il coefficiente di scambio termico per convezione della superficie esterna.

Per semplicità essi sono stati assunti costanti.

A questo punto per ogni timestep orario, è stata calcolata la differenza tra la temperatura sole-aria ($T_{sol-air}$ [$^{\circ}C$]) e la temperatura dell'aria interna (T_i [$^{\circ}C$]) (Eq 3.12)

$$\Delta T_{e,i} = T_{sol-air} - T_i \quad (3.12)$$

e la derivata della temperatura dell'aria interna ($dT_i[^\circ C]$) valutata come variazione della temperatura stessa tra uno step e quello successivo (Eq 3.13):

$$dT_i = T_i(k + 1) - T_i(k) \quad (3.13)$$

Si ipotizza, infatti, che in assenza di climatizzazione estiva, nei momenti in cui la temperatura sole-aria è maggiore della temperatura dell'aria interna ($\Delta T_{e,i} > 0$), quest'ultima abbia un andamento crescente, e che quindi la sua derivata sia positiva ($dT_i > 0$).

Il modello creato monitora quindi la relazione tra questi due parametri, e consente di definire i periodi in cui l'utente accende il sistema di climatizzazione verificando che, quando la temperatura sole-aria è maggiore della temperatura dell'aria interna ($\Delta T_{e,i} > 0$), la derivata di quest'ultima risulti essere negativa ($dT_i < 0$).

Dopo alcuni tentativi per testare l'efficacia del modello in questione, si è scelto di introdurre due valori di soglia nel controllo di $\Delta T_{e,i}$ e di dT_i , così da renderlo più accurato (Eq 3.14):

$$\begin{cases} \text{clima} = 0 & \text{se } \Delta T_{e,i} \leq 0.1 \\ \text{clima} = 0 & \text{se } \Delta T_{e,i} > 0.1 \text{ e } dT_i \geq -0.05 \\ \text{clima} = 1 & \text{se } \Delta T_{e,i} > 0.1 \text{ e } dT_i < -0.05 \end{cases} \quad (3.14)$$

Un esempio dei risultati ottenuti con il modello precedentemente descritto viene mostrato in Figura 3.2 dove sono stati riportati i profili della temperatura sole-aria (T_{sa}) e della temperatura dell'aria interna (T_i) nel corso di tre giorni del mese di luglio 2019 per l'appartamento F12, sulla base dei quali è stato stimato l'utilizzo del clima (*clima*).

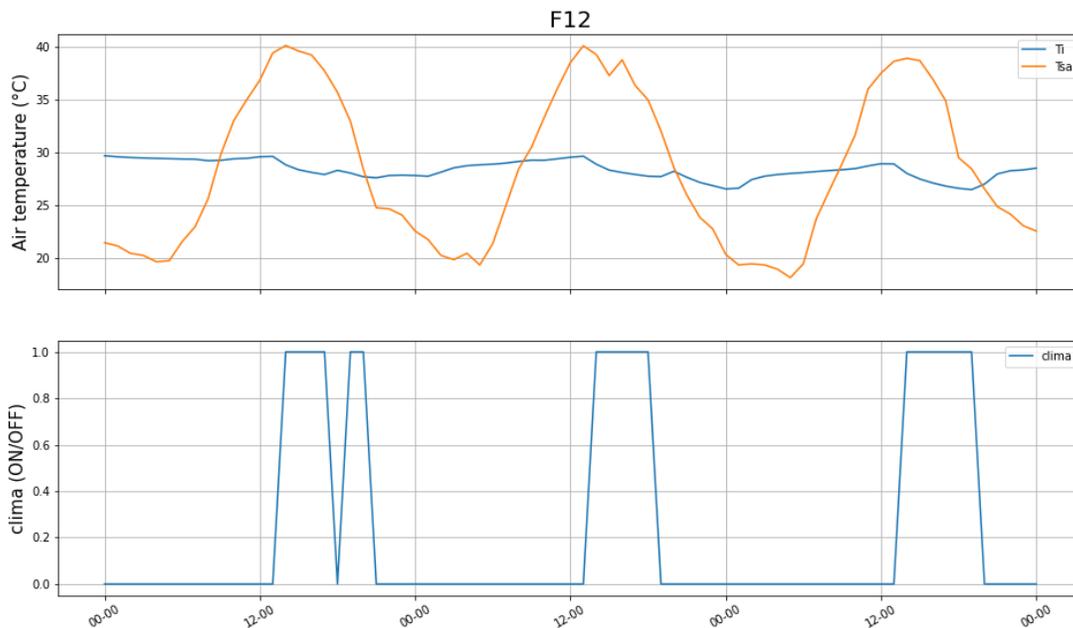


Figura 3.2 – Stima dell'utilizzo del clima in F12 secondo il modello creato

3.1.5 Medie giornaliere e medie del periodo

Dopo aver definito i profili orari per ciascuna grandezza si è potuto calcolare per ognuna di esse la media giornaliera (24 h) del periodo, sia nel caso dell'analisi invernale, sia in quello dell'analisi estiva, ai fini di effettuare un confronto ANTE e POST retrofit.

Per quanto riguarda la temperatura monitorata dell'aria interna durante il periodo invernale considerato, stata calcolata come valore medio giornaliero basato unicamente sulle ore diurne (07:00 – 22:00), escludendo quindi il periodo notturno. I tre condomini sono dotati di un sistema di riscaldamento di tipo centralizzato (§2.3) che viene spento nella fascia oraria dalle 22:00 alle 07:00; pertanto, poiché gli utenti non hanno la possibilità di controllare la temperatura del proprio appartamento attraverso le valvole termostatiche, questa fascia oraria è stata esclusa in quanto esente dal comportamento degli utenti.

Al contrario, durante la stagione estiva si è scelto di determinare giorno per giorno l'utilizzo complessivo del clima in termini di ore giornaliere di accensione.

Non sono stati inclusi nello studio i giorni con un numero complessivo di dati orari disponibili inferiore ad un certo valore definito come soglia di accettabilità. Tale valore è stato fissato pari a 12 nel caso di medie giornaliere, e pari a 7 nel caso di medie diurne.

3.2 Simulazione energetica degli appartamenti

Dopo aver completato l'analisi dei dati monitorati, lo sviluppo di simulazioni energetiche è stato utile per determinare il comportamento termico degli edifici considerando i valori medi dei parametri ambientali calcolati a partire dal monitoraggio dei dati reali prima e dopo gli interventi di riqualificazione.

Sono stati scelti due appartamenti rappresentativi del *condominio M*; in particolare uno medio-piccolo abitato da tre persone e uno medio-grande abitato da quattro persone, per implementare le simulazioni energetiche rappresentative di tutti gli appartamenti analizzati.

Il primo considerato è stato l'appartamento *M2*, collocato al piano secondo e caratterizzato da una superficie utile di 98.88 m^2 e da un volume lordo di 425.16 m^3 ; la Figura 3.3 riporta la planimetria e il modello 3D creato con il software *SketchUp*.

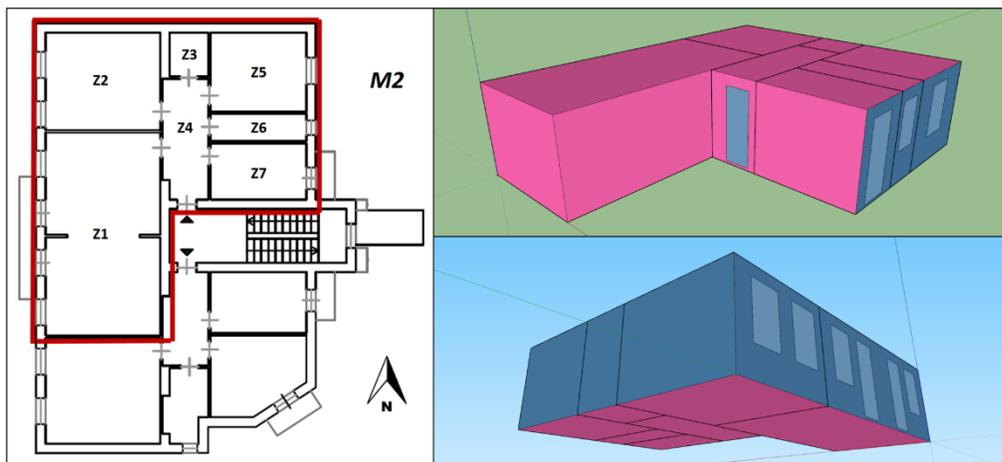


Figura 3.3 – Planimetria dell'appartamento M2 e relativo modello SketchUp

Sono state definite sette zone termiche che corrispondono alle stanze reali che costituiscono l'appartamento stesso, in ordine: *soggiorno*, *camera da letto 1*, *ripostiglio*, *corridoio*, *camera da letto 2*, *bagno*, *cucina*.

L'appartamento *M5*, collocato al piano rialzato, quindi sopra lo scantinato, è caratterizzato da una superficie utile di 66.74 m^2 e da un volume lordo di 315.33 m^3 (Figura 3.4) Figura 3.3.

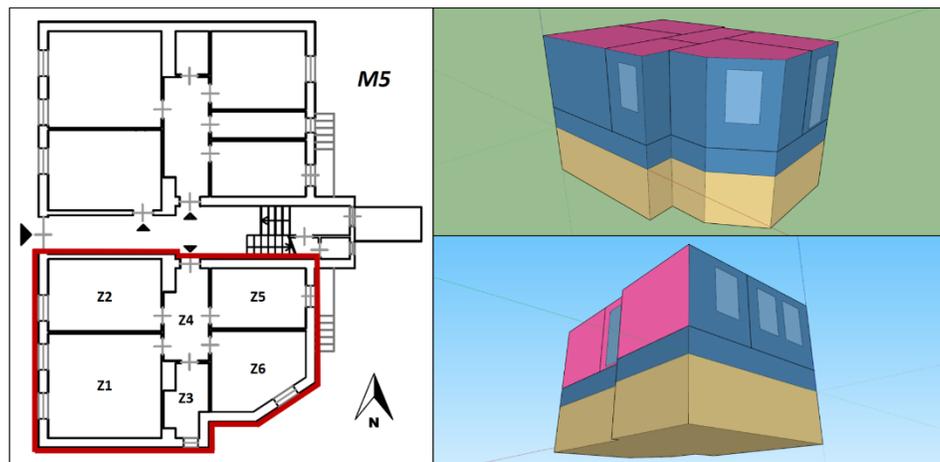


Figura 3.4 – Planimetria dell'appartamento *M5* e relativo modello SketchUp

In questo caso l'appartamento è stato diviso in sei zone termiche, rispettivamente: *camera da letto 1*, *camera da letto 2*, *bagno*, *corridoio*, *cucina*, *soggiorno*. Per ricreare la presenza di un locale sottostante non riscaldato è stata inserita una settima zona sottostante l'appartamento; in essa la temperatura dell'aria interna sarà sempre calcolata attraverso un bilancio termico, nel quale però non sarà incluso alcun carico termico legato a sistemi di riscaldamento.

Una volta creati i modelli dei due appartamenti è stato necessario definire le condizioni al contorno delle diverse superfici; in particolare i colori delle superfici in Figura 3.3 e Figura 3.4 rappresentano:

- Blu – *outdoor*: condizione associata alle superfici rappresentanti le pareti esterne dell'appartamento, ovvero quelle in contatto con le condizioni climatiche esterne;

- Magenta – *adiabatic*: condizione associata alle superfici rappresentanti muri o solai che dividono l'appartamento da altri appartamenti riscaldati;
- Ocra – *ground*: condizione associata alle superfici rappresentanti muri o solai in contatto con il terreno.

Solitamente nelle simulazioni con *EnergyPlus* si considerano le aree lorde delle superfici, in modo tale da tener conto dell'effetto legato ai ponti termici che, soprattutto negli edifici più vecchi, possono influenzare considerevolmente i consumi. Tuttavia, in questo caso, sono state considerate le aree nette, questo perché il nostro obiettivo è quello di analizzare il comportamento dinamico degli appartamenti e non il calcolo effettivo del fabbisogno energetico.

I dati climatici sono stati inseriti considerando un file meteo disponibile dal sito di *EnergyPlus* [13] e relativo alla zona di Milano-Linate; i dati in esso riportati si riferiscono alle condizioni meteo del 2005, anno preso come riferimento (*Test Reference Year - TRY*) e non rappresentano quindi le condizioni meteo effettive degli anni considerati nelle due analisi condotte.

Non conoscendo le abitudini delle persone che abitano i diversi appartamenti e i carichi termici in essi presenti, sono stati ipotizzati considerando le abitudini tipiche di una famiglia, seguendo la Norma BS ISO 18523 – Parte 2 [14].

Per ogni persona (per un totale di 4 in *M2* e 3 in *M5*) si è considerato un carico termico di 65 W/px con una frazione radiante del 0.3 e una frazione sensibile del 0.7.

Per quanto riguarda l'illuminazione si è considerato un valore medio di 1.0 W/m^2 per il bagno e le zone giorno (*soggiorno, cucina*) e di 0.6 W/m^2 per le zone notte (*camera da letto 1, camera da letto 2*).

È stato inoltre considerato il contributo di una TV da 110 W in *soggiorno*, una TV da 110 W in *camera da letto 1*, di un PC da 100 W in *camera da letto 2* e di diversi elettrodomestici per un totale di 150 W in *cucina*.

La regolazione dell'uso dei diversi carichi nel corso del tempo è definita dall'introduzione di diverse *schedule* di funzionamento qui di seguito riassunte:

- **OCCUPANCY**: presenza delle persone in bagno, nelle zone giorno e nelle zone notte (Figura 3.5);
- **LIGHTS**: accensione delle luci in bagno, nelle zone giorno e nelle zone notte (Figura 3.6);
- **EQUIPEMENT**: l'uso di TV/PC e degli elettrodomestici della cucina (Figura 3.7).

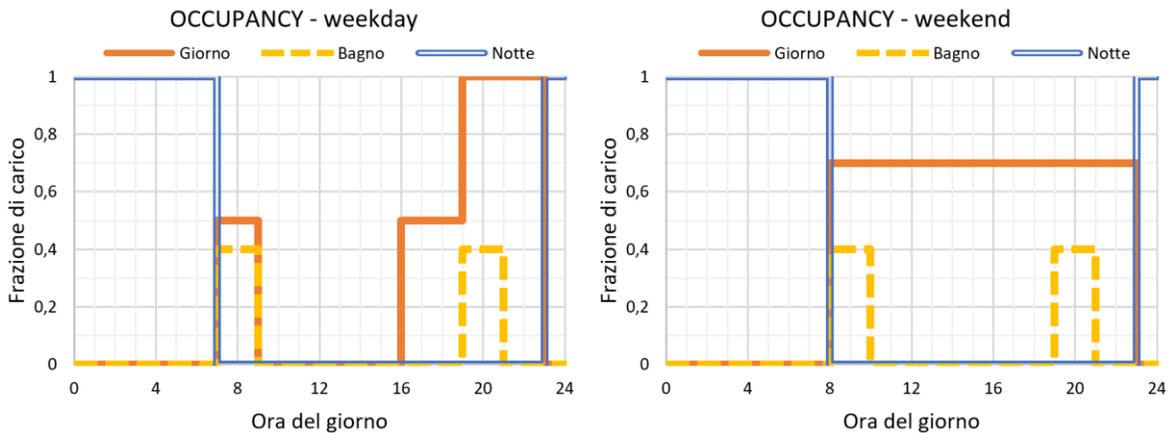


Figura 3.5 – Presenza delle persone nelle diverse zone dell'appartamento durante il giorno

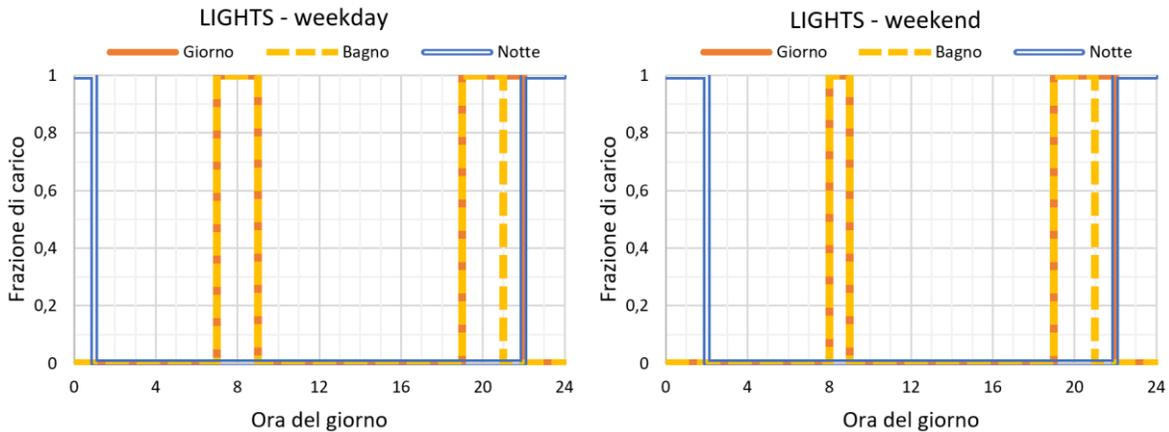


Figura 3.6 – Accensione delle luci nelle diverse zone dell'appartamento durante il giorno

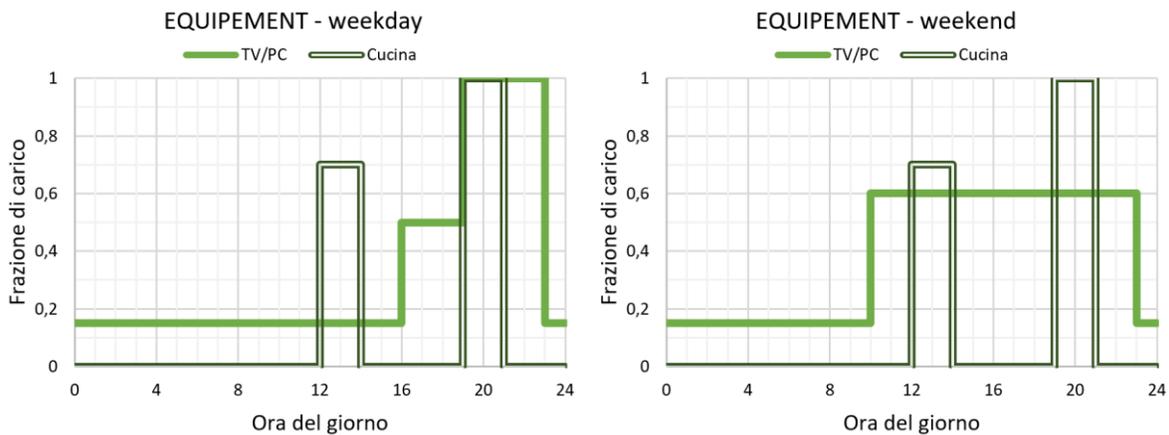


Figura 3.7 – Utilizzo dei carichi termici durante il giorno

Gli input descritti fino ad ora sono comuni a tutte le simulazioni, sia per quelle relative all’analisi invernale, sia per quelle relative a quella estiva; specifiche condizioni di input sono state inserite per ciascuna delle due analisi in funzione dei diversi scenari di simulazione.

3.2.1 Scenari di simulazione per l’analisi invernale

Nel caso dell’analisi invernale, i due modelli precedentemente descritti sono stati utilizzati per simulare al loro interno il comportamento degli utenti che abitano ciascuno degli 11 appartamenti considerati nello studio invernale.

Sono stati ipotizzati 3 diversi scenari di simulazione con i quali si è analizzata la dinamica dell’edificio:

- *ANTE-ANTE*: in questo scenario sono state considerate le caratteristiche dell’involucro e le condizioni interne che si avevano prima del retrofit;
- *POST-ANTE*: in questo scenario sono state considerate le nuove caratteristiche dell’involucro a seguito del retrofit, mantenendo però le condizioni interne che si avevano prima del retrofit;
- *POST-POST*: in questo scenario sono state considerate le nuove caratteristiche dell’involucro e le nuove condizioni interne registrate a seguito del retrofit.

L'obiettivo è quello di analizzare il comportamento energetico dell'edificio prima dell'intervento di riqualificazione (*ANTE-ANTE*) e le variazioni che esso ha avuto, legate al nuovo involucro edilizio (*POST-ANTE*) e legate al nuovo comportamento degli utenti (*POST-POST*).

Per simulare le diverse condizioni interne registrate all'interno di ciascuno degli 11 appartamenti considerati nelle situazioni di *ANTE* e *POST* retrofit si è fatto riferimento ai rispettivi valori medi diurni (07:00 – 22:00) di temperatura dell'aria interna (T_i [$^{\circ}C$]) e ai valori medi giornalieri di portata di ricambio d'aria (ACR [h^{-1}]), ottenuti a partire dal metodo descritto in §3.1.3 e riportati rispettivamente in §4.1.1.1 e §4.1.1.3.

Sulla base della temperatura è stato possibile ricreare per ciascuna situazione simulata una *schedule* relativa al riscaldamento, per il quale è stato impostato un valore di setpoint esattamente pari alla media diurna della temperatura dell'aria interna. Questa *schedule* è attiva per tutta la stagione invernale, quindi per il periodo dal 15 ottobre al 15 aprile in orario diurno (07:00 – 22:00); le ore notturne sono state escluse perchè il riscaldamento centralizzato non è in funzione e gli utenti non possono variare la temperatura del loro appartamento, che seguirà quindi la naturale attenuazione notturna (Figura 3.8).

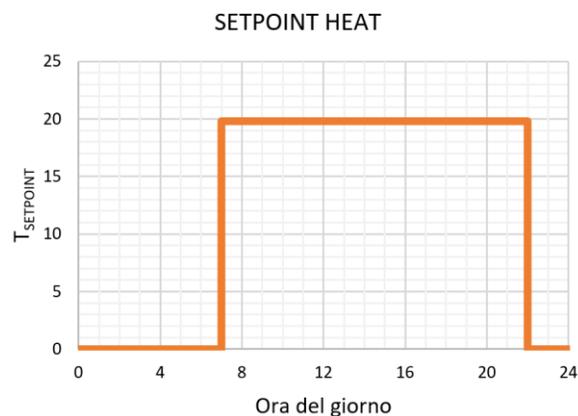


Figura 3.8 – Esempio della *schedule* relativa al riscaldamento per l'appartamento B2 - ANTE

Viceversa, sulla base della ventilazione naturale è stato possibile determinare le infiltrazioni delle diverse zone, il cui valore è stato assunto costante ed esattamente pari alla media

giornaliera della portata di ricambio d'aria. Questa assunzione è stata fatta per ciascuna zona, ad eccezione della cucina per considerare la preparazione dei pasti a pranzo (12:00 – 14:00) e a cena (19:00 – 21:00), in cui l'utente tende a ventilare maggiormente. Per questo motivo si è preferito alzare il valore delle infiltrazioni in queste ore ad $ACR_{max} = 0.7 h^{-1}$, mantenendo tuttavia il valore medio giornaliero della cucina pari a quello delle altre zone (ACR_{avg}) attraverso un semplice bilancio che ha permesso di trovare il valore delle infiltrazioni nelle ore in cui non si cucina (ACR_{min}) (Eq 3.15).

$$ACR_{avg} = \frac{4 \cdot ACR_{max} + 20 \cdot ACR_{min}}{24} \quad (3.15)$$

Ciò ha tuttavia portato al verificarsi di due situazioni limite. La prima si verifica quando il valore medio giornaliero della portata di ricambio d'aria è troppo basso ($ACR_{avg} < 0.12 h^{-1}$) e in questo caso si è assunto un valore di infiltrazioni nelle ore in cui si cucina pari a $ACR_{max} = 6 \cdot ACR_{avg}$ e nelle restanti ore le infiltrazioni saranno nulle. La seconda si verifica quando il valore medio giornaliero della portata di ricambio d'aria è troppo alto ($ACR_{avg} > 0.7 h^{-1}$) e in questo caso si è assunto un valore di infiltrazioni nelle ore in cui si cucina pari a $ACR_{max} = ACR_{avg}$ che sarà poi costante nelle restanti ore (Figura 3.9).

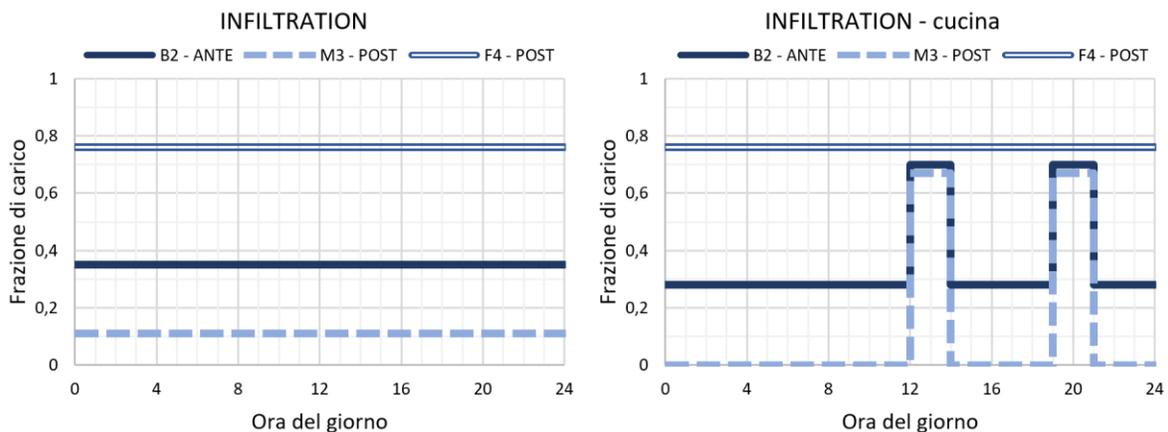


Figura 3.9 – Esempio delle schedule per le infiltrazioni per gli appartamenti B2-ANTE, M3-POST e F4-POST

I risultati così ottenuti dalle simulazioni hanno permesso di stimare il fabbisogno energetico degli appartamenti nelle diverse condizioni di analisi, nonché i profili orari di temperatura dell'aria interna (T_i [$^{\circ}C$]), di temperatura operativa (T_o [$^{\circ}C$]), di temperatura media radiante (T_{mr} [$^{\circ}C$]) e di umidità relativa dell'aria interna (RH_i [%]) di ciascuna zona, per valutare il livello di comfort all'interno di ciascun appartamento.

3.2.1.1 Fabbisogno energetico

Il primo dato utile ottenuto dalle simulazioni condotte in relazione allo studio invernale, è quello relativo al fabbisogno energetico, il quale ha permesso di valutare gli effetti legati sia al nuovo involucro edilizio, sia al cambiamento di abitudini degli utenti. Esso è stato valutato per tutta la durata del periodo invernale, considerando i mesi in cui è acceso il riscaldamento, ovvero dal 15 ottobre al 15 aprile.

In aggiunta a ciò, partendo dal fabbisogno energetico ottenuto a partire dalle simulazioni condotte negli scenari ANTE-ANTE ($Q_{H,AA}$), POST-ANTE ($Q_{H,PA}$) e POST-POST ($Q_{H,PP}$), è stato possibile calcolare tre diversi indici: l'*Energy Performance Gap* (EPG), l'*Energy Saving Deficit* (ESD) e l'*Energy Saving Achievement* (ESA).

L'*Energy Performance Gap* è un indice che mette a confronto il fabbisogno energetico ottenuto dalle condizioni teoriche POST retrofit, in cui il comportamento dell'utente viene assunto costante e pari a quello ANTE retrofit, al fabbisogno energetico ottenuto dalle condizioni reali POST retrofit, in cui si considera anche il nuovo comportamento dell'utente POST retrofit (Eq 3.16).

$$EPG = \frac{Q_{H,PP} - Q_{H,PA}}{Q_{H,PA}} \quad (3.16)$$

D'altra parte, l'*Energy Saving Deficit* è un indice che permette di valutare lo scarto tra il risparmio energetico teorico che si otterrebbe considerando il solo effetto legato

all'involucro, e il risparmio energetico reale che si riesce ad ottenere considerando anche l'effetto legato al comportamento dell'utente (Eq 3.17).

$$ESD = \frac{(Q_{H,AA} - Q_{H,PA}) - (Q_{H,AA} - Q_{H,PP})}{(Q_{H,AA} - Q_{H,PA})} \quad (3.17)$$

Infine l'*Energy Saving Achievement* rappresenta il complementare dell'*Energy Saving Deficit* e indica la frazione di risparmio energetico teorico che si riesce a raggiungere considerando il risparmio energetico reale, comprendente gli effetti legati all'utente (Eq 3.18).

$$ESA = 1 - ESD \quad (3.18)$$

I risultati ottenuti per quanto riguarda il fabbisogno energetico e gli indici ad esso correlati sono riportati e commentati in §**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

3.2.1.2 Comfort

In aggiunta al valore relativo al fabbisogno energetico, dalle simulazioni condotte per l'analisi invernale è stato possibile ottenere i profili orari delle diverse grandezze termigrometriche di ogni zona per ciascun appartamento sulla base dei diversi scenari simulati.

In particolare, dai profili orari di temperatura dell'aria interna (T_i [°C]), di temperatura operativa (T_o [°C]), di temperatura media radiante (T_{mr} [°C]) e di umidità relativa dell'aria interna (RH_i [%]) di ciascuna zona, si è potuto costruire i profili orari medi dell'intero appartamento, attraverso una semplice media pesata sulla base delle aree delle singole zone. Partendo da questi profili poi, è stato possibile valutare il livello di comfort di ciascun appartamento negli scenari ANTE-ANTE, POST-ANTE e POST-POST.

Per fare ciò si è fatto riferimento alla Norma BS EN 15251 [15], sostituita poi dalla più recente Norma BS EN 16798 – Parte 1 [16], nella quale sono riportati diversi metodi per la valutazione del comfort sulla base delle simulazioni dinamiche condotte. Tra di essi sono stati scelti due metodi per il nostro scopo: *Metodo A* e *Metodo B*.

Il *Metodo A* prevede il calcolo del numero o della percentuale di ore occupate (le ore comprese nella fascia oraria tra le 07:00 e le 22:00) durante le quali il valore del *PMV* è al di fuori di un intervallo specifico.

Per *PMV* si intende il *Predicted Mean Vote*, il quale corrisponde al voto medio previsto che un gruppo di persone possono attribuire al livello di comfort di un determinato ambiente e il cui metodo di calcolo è stato descritto nel dettaglio in Appendice – D. Tale indice rientra in una scala che va da -3 per un ambiente molto freddo, a $+3$ per un ambiente molto caldo, e sulla base di esso è possibile definire quattro diverse categorie, secondo gli intervalli riportati nella Norma BS EN 15251 [15].

Nel caso specifico di questo studio, si è considerata la *Categoria II*, alla quale corrisponde un livello di comfort medio, definito da un intervallo di valori del *PMV* compreso tra (Eq 3.19):

$$-0.5 < PMV < 0.5 \quad (3.19)$$

e sulla base del quale si è potuto applicare il *Metodo A* precedentemente descritto.

Per il calcolo del *PMV* i profili orari di temperatura dell'aria interna (T_i [$^{\circ}C$]), di temperatura media radiante (T_{mr} [$^{\circ}C$]) e di umidità relativa dell'aria interna (RH_i [%]) di ciascun appartamento non sono sufficienti; è stato infatti necessario definire altri parametri qui di seguito riportati:

- Attività metabolica: trattandosi di edifici residenziali, si è considerato un valore tipico per le attività sedentarie di $M = 1.2 \text{ met}$ costante durante la giornata e uguale per ciascun appartamento;
- Isolamento termico del vestiario: si è considerato un valore tipico per un vestiario caratteristico della stagione invernale di $I_{cl} = 1.0 \text{ clo}$ costante durante la giornata e uguale per ciascun appartamento;
- Velocità dell'aria interna: anche in questo caso si è assunto un valore costante durante la giornata e uguale per ciascun appartamento pari a $v_i = 0.1 \text{ m/s}$.

Il *Metodo B* è basato sul criterio dei gradi ora; secondo tale criterio, il tempo durante il quale la temperatura operativa (T_o [$^{\circ}C$]) eccede un limite specifico durante le ore occupate (le ore comprese nella fascia oraria tra le 07:00 e le 22:00), viene pesato attraverso un fattore (wf) che dipende da quanti gradi è stato superato il limite stesso (Eq 3.20).

$$\begin{cases} wf = 0 & \text{se } T_{o,limit,lower} \leq T_o \leq T_{o,limit,upper} \\ wf = |T_o - T_{o,limit}| & \text{se } T_o < T_{o,limit,lower} \text{ or } T_o > T_{o,limit,upper} \end{cases} \quad (3.20)$$

dove $T_{o,limit,lower}$ e $T_{o,limit,upper}$ sono rispettivamente il limite inferiore e superiore della temperatura; tali valori dipendono dalla categoria scelta tra le quattro proposte dalla Norma BS EN 15251 [15]. Nel nostro caso avendo considerato la *Categoria II* e un'attività sedentaria da parte degli utenti, la normativa prevede per il periodo invernale un $T_{o,limit,lower} = 20.0$ $^{\circ}C$ e un $T_{o,limit,upper} = 25.0$ $^{\circ}C$.

Una volta definito il fattore wf per ciascuna ora occupata, è possibile ottenere il livello complessivo di gradi ora inferiori dato da (Eq 3.21):

$$GO_{INF} = \sum wf \cdot time \quad \text{per } T_o < T_{o,limit,lower} \quad (3.21)$$

e il livello complessivo di gradi ora superiori dato da (Eq 3.22):

$$GO_{SUP} = \sum wf \cdot time \quad \text{per } T_o > T_{o,limit,upper} \quad (3.22)$$

I risultati ottenuti per quanto riguarda il comfort secondo i due metodi analizzati sono riportati in **§Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

3.2.2 Scenari di simulazione per l'analisi estiva

Nel caso dell'analisi estiva, i due modelli descritti in precedenza sono stati utilizzati per simulare al loro interno il comportamento medio degli utenti che abitano gli undici appartamenti considerati nello studio estivo al fine di analizzare la temperatura dell'aria interna (T_i [$^{\circ}C$]) e confrontarla con i dati monitorati dai sensori.

Sono stati ricreati quindi quattro diversi scenari di simulazione con i quali si è analizzata la dinamica dell'edificio:

- *NO CLIMA-ANTE*: in questo scenario si sono considerate le caratteristiche dell'involucro e le condizioni interne medie che si avevano prima del retrofit in un appartamento sprovvisto di impianto di climatizzazione;
- *NO CLIMA-POST*: in questo scenario si sono considerate le nuove caratteristiche dell'involucro e le nuove condizioni interne medie registrate a seguito del retrofit in un appartamento sprovvisto di impianto di climatizzazione;
- *CLIMA-ANTE*: in questo scenario si sono considerate le caratteristiche dell'involucro e le condizioni interne medie che si avevano prima del retrofit in un appartamento provvisto di impianto di climatizzazione;
- *CLIMA-POST*: in questo scenario si sono considerate le nuove caratteristiche dell'involucro e le nuove condizioni interne medie registrate a seguito del retrofit in un appartamento provvisto di impianto di climatizzazione.

Ciascun scenario è stato poi simulato considerando quattro diverse orientazioni dell'appartamento, ipotizzandolo prima situato nel lato nord del condominio e poi nell'ordine nel lato est, sud e ovest, al fine di analizzare l'impatto dell'orientazione sul profilo di temperatura dell'aria interna.

Come già visto nel caso delle simulazioni invernali, per simulare le diverse caratteristiche dell'involucro edilizio nelle situazioni di *ANTE* e *POST* retrofit è stato sufficiente ricreare nel modello di *OpenStudio* le diverse stratigrafie ottenute a partire dalla *Legge 10* e riportate in §2.3.1.

Tuttavia, nel caso del periodo estivo la radiazione solare influisce maggiormente rispetto a al caso invernale e, per tale motivo, si è scelto di tener conto dell'incremento di spessore dell'involucro edilizio legato all'aggiunta esterna dell'isolante e di come ciò possa parzialmente schermare la radiazione solare che entra dalle superfici vetrate. Per simulare questo effetto, sono state ricreate delle superfici schermanti lungo il perimetro di finestre

e portefinestre di spessore pari all'aggiunta dello strato di isolante. Tale modifica della geometria è definita *overhanding* e in Figura 3.10 ne viene riportato un esempio.

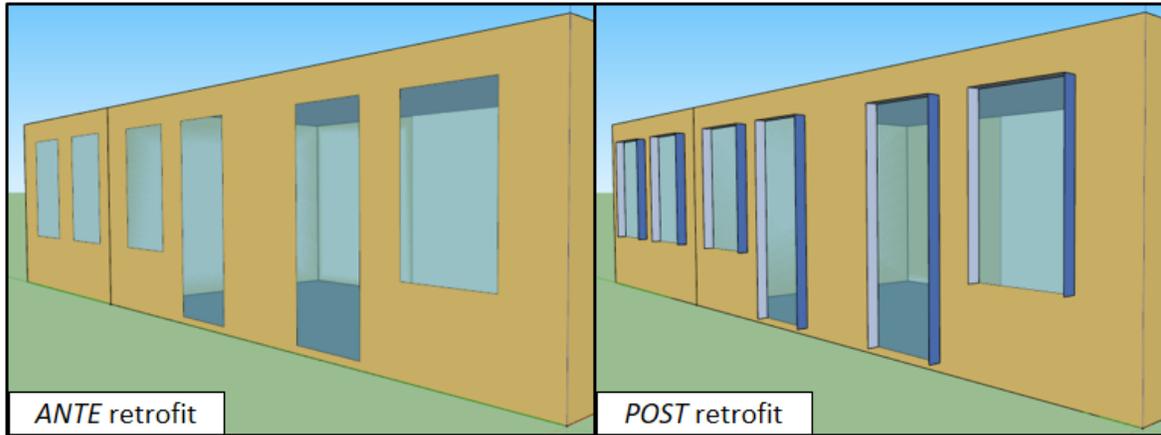


Figura 3.10 – Esempio del modello dell'appartamento nelle condizioni ANTE retrofit e POST retrofit per l'analisi estiva

D'altra parte, per simulare le diverse condizioni interne medie registrate all'interno degli 11 appartamenti considerati nelle situazioni di ANTE e POST retrofit si è fatto riferimento unicamente ai valori medi giornalieri di portata di ricambio d'aria ($ACR [h^{-1}]$) per gli appartamenti sprovvisti di clima e per quelli che invece ne sono provvisti, ottenuti a partire dal metodo descritto in §3.1.3 e riportati §4.1.2.3.

Sulla base di questi valori è stato possibile determinare le infiltrazioni delle diverse zone, il cui valore è stato assunto costante ed esattamente pari alla media giornaliera della portata di ricambio d'aria di tutti gli appartamenti. Anche in questo caso, come in quello invernale, si è fatta questa assunzione per ciascuna zona, ad eccezione della cucina dove si è preferito alzare il valore delle infiltrazioni nelle ore in cui si cucina. A differenza del caso invernale però, per l'analisi estiva si è scelto un $ACR_{max} = 1.5 h^{-1}$ in quanto nel periodo estivo si tende mediamente a ventilare maggiormente; ciò nonostante si è mantenuto comunque il valore medio giornaliero della cucina pari a quello delle altre zone (ACR_{avg}) attraverso un semplice bilancio che ha permesso di trovare il valore delle infiltrazioni nelle ore in cui non si cucina (ACR_{min}) (Eq 3.23):

$$ACR_{avg} = \frac{4 \cdot ACR_{max} + 20 \cdot ACR_{min}}{24} \quad (3.23)$$

Alla *schedule* così definita è stato dato il nome di *INFILTRATION* come nel caso dell'analisi invernale.

Infine per tener conto della differenza tra un appartamento sprovvisto di impianto di climatizzazione e uno che invece ne è provvisto, oltre ai diversi valori di portata di ricambio d'aria, si è introdotta un *schedule* che simulasse l'accensione del clima da parte dell'utente nel modello dell'appartamento che ne è provvisto. Per fare ciò si è ipotizzato un accensione del clima nelle fasce orarie tra le 12:00 – 14:00 e tra le 18:00 – 24:00 con un valore di setpoint pari a 28 °C. Nelle fasce orarie rimanenti, cioè quelle in cui il clima è spento, si è impostato un valore di setpoint pari a 50 °C per evitarne l'accensione da parte del modello. Tale *schedule* è stata impostata unicamente nelle zone del soggiorno e delle due camere, ambienti dove solitamente sono installati i climatizzatori; ad essa è stato assegnato il nome di *SETPOINT COOL* ed è riportata in Figura 3.11.

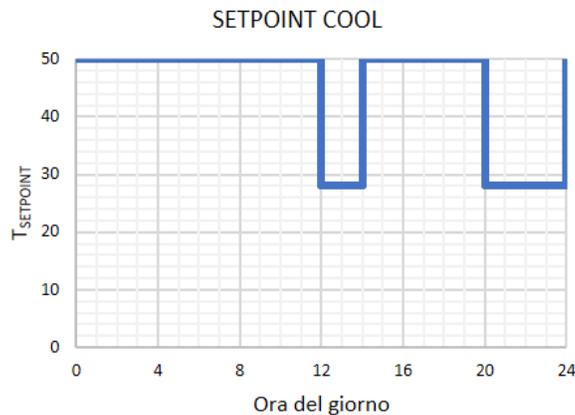


Figura 3.11 – Schedule relative all'utilizzo del clima negli appartamenti che ne sono provvisti

La radiazione solare nel periodo estivo è considerevolmente maggiore rispetto al periodo invernale, infatti facendo riferimento a quanto riportato in §3.1.1 e in §3.1.2, nel caso specifico del 2021, il periodo estivo è stato caratterizzato da una radiazione solare globale di $GHI = 252.1 \text{ W/m}^2$, ben più alta rispetto a quella registrata nel periodo invernale che è

stata di $GHI = 52.8 W/m^2$. Ciò ovviamente influenza le abitudini da parte degli utenti che durante l'estate cercheranno di proteggere la loro abitazione nelle ore più calde dall'elevata radiazione solare regolando l'apertura delle tapparelle. Per tener conto di quanto detto, nel modello è stato simulato tutto ciò considerando la presenza di superfici schermanti poste esternamente ai componenti vetrati e supposto aventi le seguenti proprietà:

- Trasmissione solare: $\tau_{solar} = 0.04$
- Riflessione solare: $\rho_{solar} = 0.31$
- Trasmissione visibile: $\tau_{visible} = 0.06$
- Riflessione visibile: $\rho_{visible} = 0.50$

A queste superfici schermanti è stata infine assegnata una *schedule* che ne simulasse l'apertura e la chiusura durante il giorno; in particolare il periodo di chiusura delle tapparelle è stato ipotizzato nelle fasce orarie tra le 10:00 – 14:00 per le zone orientate ad est, tra le 12:00 – 16:00 per le zone orientate a sud e tra le 14:00 – 18:00 per le zone orientate a ovest. A tale *schedule* è stato assegnato il nome di SHADING ed è riportata in Figura 3.12.

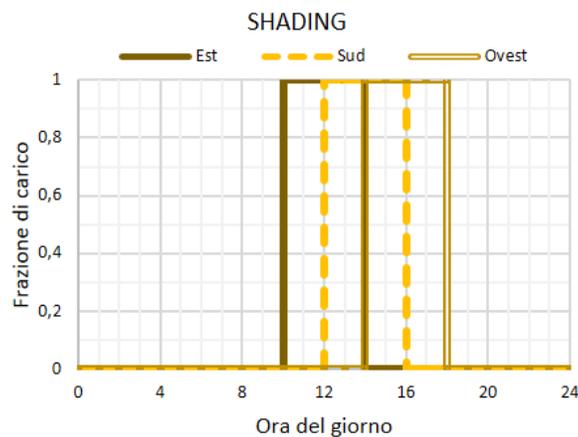


Figura 3.12 – Apertura e chiusura delle tapparelle a seconda dell'orientazione delle diverse zone

Un'ultima modifica che è stata fatta nel caso specifico delle simulazioni per l'analisi estiva è stata la riduzione dei carichi relativi agli elettrodomestici in cucina; questa assunzione è legata al fatto che durante il periodo estivo, vista la temperatura più elevata, l'utente tende a limitare l'uso di apparecchiature che possano scaldare eccessivamente la zona della

cucina, una su tutte il forno. Per tale motivo si è assunto un carico termico legato agli elettrodomestici di $50 W$ per la stagione estiva anziché di $150 W$ come nel caso invernale.

Una volta definite tutte le condizioni di input, è stato possibile passare all'utilizzo del software *EnergyPlus*, con il quale si sono potute eseguire tutte le diverse simulazioni sulla base dei diversi scenari estivi considerati e precedentemente descritti. I risultati così ottenuti hanno permesso di risalire ai profili orari di temperatura dell'aria interna ($T_i [^{\circ}C]$) del periodo compreso tra il 1 e il 31 luglio, per poterli così confrontare con quelli ottenuti dal monitoraggio degli appartamenti attraverso i sensori.

4 Capitolo. Risultati

In questo capitolo verranno analizzati i risultati ottenuti per i due diversi studi, invernale ed estivo; verranno presentati e commentati sia i risultati emersi dall'analisi fatta sui dati monitorati dai sensori, sia quelli emersi dalle simulazioni energetiche.

4.1 Analisi dei dati monitorati

Inizialmente vengono riportati i risultati relativi all'analisi condotta mediante l'utilizzo di software quali *Spyder* ed *Excel* dei dati monitorati dai diversi sensori.

Si partirà col presentare i risultati ottenuti per il periodo invernale, dove l'analisi condotta si è concentrata principalmente sul confronto tra l'anno 2018 e l'anno 2021 e ha così permesso di eseguire un confronto di tipo *ANTE-POST* retrofit negli undici appartamenti considerati in questo caso. I risultati emersi sono stati poi confrontati con quelli ottenuti nello studio condotto in precedenza [5] con due obiettivi:

- capire se, come e quanto le condizioni interne cambiano a seguito della riqualificazione energetica dell'involucro;
- capire quanto questo cambiamento impatta sulla domanda di energia dell'edificio.

Successivamente, verranno presentati i risultati relativi al periodo estivo, dove l'analisi condotta si è concentrata principalmente sul confronto tra l'anno 2019 e l'anno 2021, e ha così permesso di eseguire un confronto di tipo *ANTE-POST* retrofit in otto degli undici appartamenti considerati in questo studio e un confronto di tipo *POST-POST* retrofit nei restanti tre appartamenti. I risultati emersi sono stati quindi analizzati sulla base delle stesse considerazioni fatte per l'analisi invernale.

4.1.1 Stagione invernale

Per lo studio invernale il periodo di analisi va dal 14 novembre al 21 dicembre per gli anni 2018 e 2021. Le grandezze analizzate sono: la temperatura (T_i [$^{\circ}C$]) e l'umidità relativa (RH_i [%]) dell'aria interna, oltre alla portata di ricambio d'aria (ACR [h^{-1}]).

4.1.1.1 Temperatura dell'aria interna

Relativamente alla temperatura dell'aria interna, per l'analisi invernale essa è stata valutata considerando i valori medi diurni (07:00 – 22:00), sulla base delle motivazioni già espresse in precedenza (§3.1.5).

I valori medi per ciascun appartamento nei due diversi anni di analisi sono qui riportati nel grafico di Figura 4.1; esso è diviso in due sezioni: quella di sinistra rappresenta gli appartamenti del *condominio B* e del *condominio M*, ovvero quelli nei quali gli interventi di riqualificazione sono stati effettuati nella primavera-estate del 2019, mentre quella di destra rappresenta gli appartamenti del *condominio F*, ovvero quelli nei quali gli interventi di riqualificazione sono stati effettuati nell'autunno-inverno del 2020.

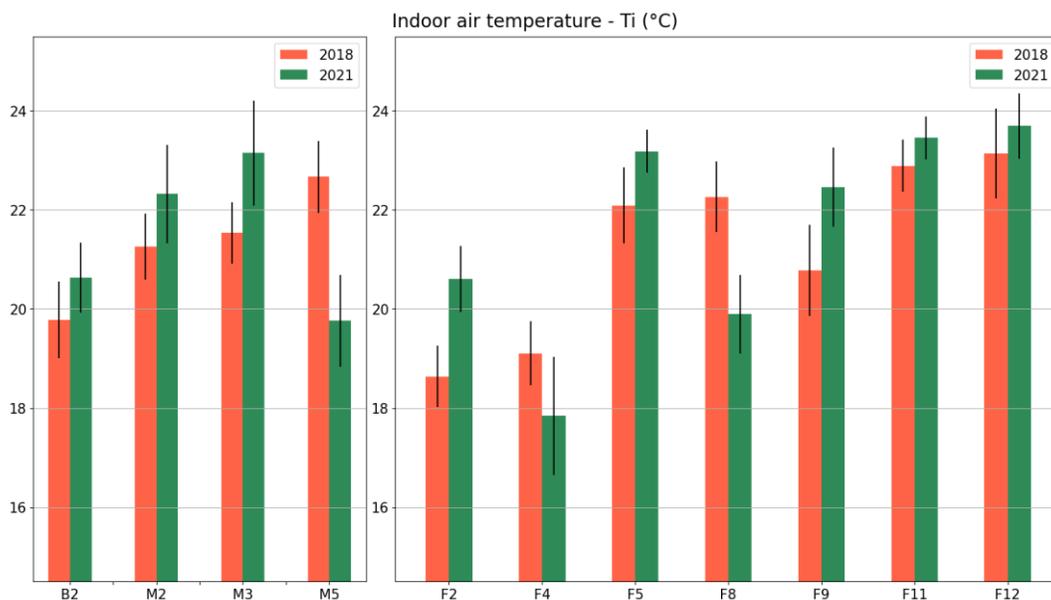


Figura 4.1 – Valori medi diurni della temperatura dell'aria interna per i diversi appartamenti

Per poter eseguire un confronto tra i due periodi, i valori misurati sono stati riassunti in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 - Valori medi diurni della temperatura dell'aria interna per i diversi appartamenti

		T_i		
		2018	2021	2018 -> 2021
Appartamento		[°C]		
4 appartamenti riqualificati nella primavera-estate 2019	B2	19.8 ± 0.8	20.6 ± 0.7	0.8
	M2	21.3 ± 0.7	22.3 ± 1.0	1.0
	M3	21.5 ± 0.6	23.1 ± 1.1	1.6
	M5	22.7 ± 0.7	19.8 ± 0.9	-2.9
	Condomini B - M	Appartamenti con $\Delta T_i > 0$		3
7 appartamenti riqualificati nell'autunno- inverno 2020	F2	18.6 ± 0.6	20.6 ± 0.7	2.0
	F4	19.1 ± 0.7	17.8 ± 1.2	-1.3
	F5	22.1 ± 0.8	23.2 ± 0.4	1.1
	F8	22.3 ± 0.7	19.9 ± 0.8	-2.4
	F9	20.8 ± 0.9	22.5 ± 0.8	1.7
	F11	22.9 ± 0.5	23.5 ± 0.4	0.6
	F12	23.1 ± 0.9	23.7 ± 0.7	0.6
	Condominio F	Appartamenti con $\Delta T_i > 0$		5

Analizzando la variazione dei valori medi diurni delle temperature tra il 2018 e il 2021, è stato rilevato un incremento in tre dei quattro appartamenti riqualificati nella primavera-estate del 2019 e in cinque dei sette riqualificati nell'autunno-inverno del 2020.

Considerando quindi l'analisi ANTE e POST retrofit, su undici casi complessivi sono stati otto gli appartamenti che hanno riportato un incremento della temperatura dell'aria interna a seguito del processo di riqualificazione energetica.

4.1.1.2 Umidità relativa dell'aria interna

La seconda grandezza analizzata è stata l'umidità relativa dell'aria interna, per la quale sono state calcolate le medie giornaliere a partire dai dati registrati dai sensori. Anche in questo caso i valori medi per ciascun appartamento sono qui riportati nel grafico di Figura 4.2, nel quale si è mantenuto lo stesso raggruppamento visto in precedenza.

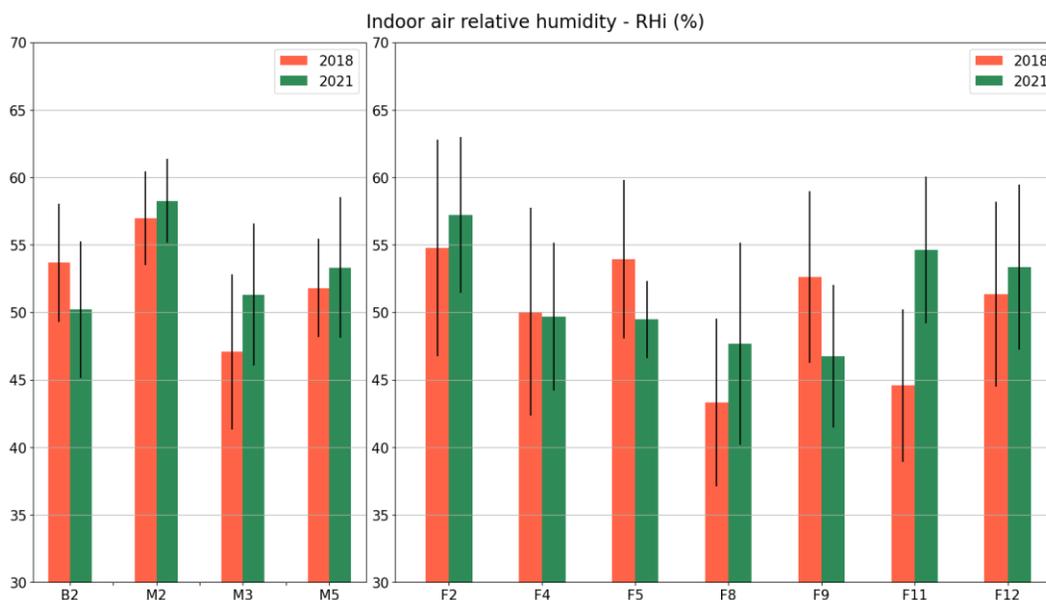


Figura 4.2 - Valori medi giornalieri dell'umidità relativa dell'aria interna per i diversi appartamenti

Anche in questo caso, per poter eseguire un confronto tra i due periodi questi valori sono stati riportati in Tabella 4.2.

Tabella 4.2 - Valori medi giornalieri dell'umidità relativa dell'aria interna per i diversi appartamenti

		RH_i		
		2018	2021	2018 -> 2021
Edificio		[%]		
4 appartamenti riqualificati nella primavera-estate 2019	B2	53.7 ± 4.4	50.2 ± 5.1	-3.5
	M2	57.0 ± 3.5	58.3 ± 3.1	1.3
	M3	47.1 ± 5.7	51.3 ± 5.3	4.2
	M5	51.8 ± 3.6	53.3 ± 5.2	1.5
	Condomini B - M	Appartamenti con $\Delta RH_i > 0$		3
7 appartamenti riqualificati nell'autunno- inverno 2020	F2	54.8 ± 8.0	57.2 ± 5.8	2.4
	F4	50.0 ± 7.7	49.7 ± 5.5	-0.3
	F5	53.9 ± 5.8	49.5 ± 2.9	-4.4
	F8	43.3 ± 6.2	47.7 ± 7.5	4.4
	F9	52.6 ± 6.4	46.7 ± 5.3	-5.9
	F11	44.6 ± 5.6	54.6 ± 5.4	10.0
	F12	51.3 ± 6.9	53.4 ± 6.1	2.1
	Condominio F	Appartamenti con $\Delta RH_i > 0$		4

Analizzando la variazione dei valori medi giornalieri delle umidità relative tra il 2018 e il 2021, è stato rilevato un incremento in tre dei quattro appartamenti riqualificati nella primavera-estate del 2019 e in quattro dei sette riqualificati nell'autunno-inverno del 2020.

Considerando quindi l'analisi ANTE e POST retrofit, su undici casi complessivi sono stati sette gli appartamenti che hanno riportato un incremento dell'umidità relativa dell'aria interna a seguito del processo di riqualificazione energetica.

Un aumento di umidità relativa a fronte di un corrispondente aumento di temperatura significa che o è aumentata la generazione interna di vapore a causa di un differente comportamento degli utenti nei periodi analizzati, oppure è diminuito il numero di ricambi orari. Non avendo dati disponibili relativamente all'attività degli utenti, è stato assunto che

mediamente la generazione di vapore nei due periodi sia stata costante e pertanto tutte le variazioni di umidità sono state attribuite a variazioni della portata di ricambio d'aria e quindi anche alle condizioni climatiche esterne.

4.1.1.3 Portata di ricambio d'aria

Infine si è condotta l'analisi sulla portata di ricambio d'aria, per la quale sono state calcolate le medie giornaliere a partire dal bilancio igrometrico. Anche in questo caso i valori medi per ciascun appartamento sono qui riportati nel grafico di Figura 4.3, nel quale si è mantenuto lo stesso raggruppamento utilizzato nei grafici precedenti.

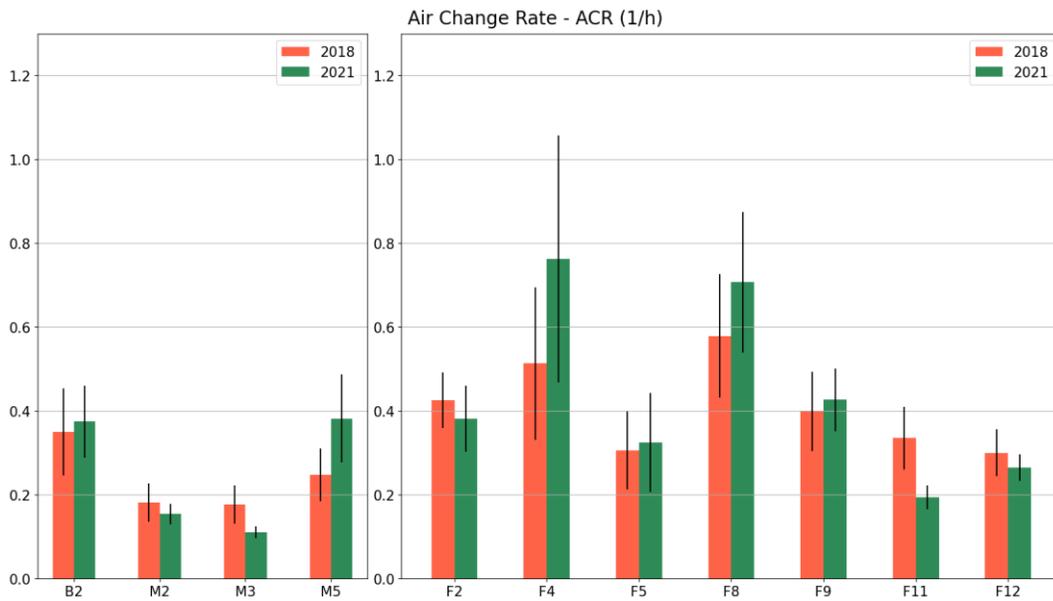


Figura 4.3 - Valori medi giornalieri della portata di ricambio d'aria per i diversi appartamenti

Nuovamente, i valori sono stati riassunti in Tabella 4.3 per confrontare i due periodi.

Tabella 4.3 - Valori medi giornalieri della portata di ricambio d'aria per i diversi appartamenti

ACR				
	Edificio	2018	2021	2018 -> 2021
		[h ⁻¹]		
4 appartamenti riqualificati nella primavera-estate 2019	B2	0.35 ± 0.10	0.37 ± 0.09	0.02
	M2	0.18 ± 0.05	0.15 ± 0.02	-0.03
	M3	0.18 ± 0.05	0.11 ± 0.01	-0.07
	M5	0.25 ± 0.06	0.38 ± 0.11	0.13
	Condomini B - M	Appartamenti con $\Delta ACR > 0$		2
7 appartamenti riqualificati nell'autunno- inverno 2020	F2	0.43 ± 0.07	0.38 ± 0.08	-0.05
	F4	0.51 ± 0.18	0.76 ± 0.29	0.25
	F5	0.31 ± 0.09	0.32 ± 0.12	0.01
	F8	0.58 ± 0.15	0.71 ± 0.17	0.13
	F9	0.40 ± 0.09	0.43 ± 0.08	0.03
	F11	0.34 ± 0.07	0.19 ± 0.03	-0.15
	F12	0.30 ± 0.06	0.26 ± 0.03	-0.04
	Condominio F	Appartamenti con $\Delta ACR > 0$		4

Analizzando la variazione dei valori medi giornalieri delle portate di ricambio d'aria tra il 2018 e il 2021, è stato rilevato un incremento in due dei quattro appartamenti riqualificati nella primavera-estate del 2019 e in quattro dei sette riqualificati nell'autunno-inverno del 2020.

Considerando quindi l'analisi ANTE e POST retrofit, su undici casi complessivi sono stati sei gli appartamenti che hanno riportato un incremento della portata di ricambio d'aria a seguito del processo di riqualificazione energetica.

4.1.1.4 Analisi ANTE-POST retrofit e confronto con lo studio precedente

Al fine di eseguire un confronto complessivo tra la situazione di ANTE e POST retrofit, sono state calcolate per ciascuna grandezza analizzata le medie complessive per l'anno 2018 e per l'anno 2021, a partire dalle medie dei singoli appartamenti.

Ciò che si è ottenuto è stato poi comparato con quanto emerso dall'analisi condotta nello studio precedente, nella quale si erano confrontate la situazione di ANTE e POST retrofit di 8 appartamenti tra gli anni 2018 e 2019 [5].

Analizzando dapprima le medie complessive ottenute dallo studio precedente e riportate in Tabella 4.4, si può notare come temperatura, umidità relativa e portata di ricambio d'aria riportino tutte un incremento a seguito degli interventi di riqualificazione energetica svolti.

Tabella 4.4 – Medie complessive ottenute dal confronto ANTE-POST dello studio precedente [5] con un campione di otto appartamenti riqualificati (periodo 2018-2019)

STUDIO PRECEDENTE				
Anno	2018	2019	DIFFERENZE	APP con INCREMENTO
Situazione	ANTE	POST		
T_i [°C]	21.3 ± 0.8	21.7 ± 0.5	0.4	4 su 8
RH_i [%]	47.9 ± 5.7	53.2 ± 5.0	5.3	8 su 8
ACR [h^{-1}]	0.37 ± 0.12	0.57 ± 0.30	0.20	7 su 8

In particolare, la temperatura dell'aria interna (T_i) aumentava di $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e in quattro appartamenti su otto si verificava un incremento della stessa, l'umidità relativa dell'aria interna (RH_i) aumentava di 5.3% e in tutti gli otto appartamenti si verificava un suo incremento, mentre la portata di ricambio d'aria (ACR) aumentava di $0.20\text{ }h^{-1}$ e in sette degli otto appartamenti incrementava.

D'altra parte, analizzando le medie complessive ottenute dallo studio attuale e riportate in Tabella 4.5, si può notare come nonostante le tre grandezze mantengano un andamento crescente a seguito della riqualificazione, esso sia di diversa entità.

Tabella 4.5 - Medie complessive ottenute dal confronto ANTE-POST dello studio attuale con un campione di undici appartamenti riqualificati (periodo 2018-2021)

STUDIO ATTUALE				
Anno	2018	2021	DIFFERENZE	APP con INCREMENTO
Situazione	ANTE	POST		
T_i [°C]	21.3 ± 0.7	21.5 ± 0.8	0.2	8 su 11
RH_i [%]	50.9 ± 6.0	52.0 ± 5.3	1.1	7 su 11
ACR [h^{-1}]	0.35 ± 0.10	0.37 ± 0.12	0.02	6 su 11

Infatti, la temperatura dell'aria interna (T_i) aumenta di $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e in otto degli undici appartamenti si verifica un incremento della stessa, l'umidità relativa dell'aria interna (RH_i) aumenta di 1.1% e in sette degli undici appartamenti si verifica un suo incremento, mentre la portata di ricambio d'aria (ACR) aumenta di soli $0.02\text{ }h^{-1}$ e in sei degli undici appartamenti incrementa.

Se da un lato gli incrementi di temperatura e umidità dell'aria interna tra i due studi sono comparabili, dall'altro l'incremento della portata di ricambio d'aria emerso dallo studio attuale è di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quello evidenziato nello studio precedente.

La spiegazione di questa differenza può esser individuata nei diversi anni nei quali si è svolto il confronto tra le situazioni di ANTE e POST riqualificazione energetica. Infatti, lo studio precedente ha comparato periodi monitorati rispettivamente negli anni 2018 e 2019, mentre lo studio attuale ha messo a confronto misure effettuate negli anni 2018 e 2021. Se nel secondo caso la differenza delle condizioni climatiche è stata pressoché nulla, nello studio precedente sono stati comparati due anni climaticamente differenti, con il periodo compreso tra il 14 novembre e il 21 dicembre 2019 che è stato di $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ più caldo rispetto all'anno precedente (§3.1.1).

Questo può aver portato gli utenti a ventilare maggiormente nel 2019, grazie ad una temperatura dell'aria esterna più elevata, di conseguenza l'incremento della portata di

rinnovo d'aria di 0.20 h^{-1} emerso dallo studio precedente, potrebbe essere attribuito in parte alle diverse condizioni climatiche e non totalmente all'intervento di riqualificazione energetica.

Il fatto che una temperatura dell'aria esterna più fredda possa in qualche modo indurre l'utente a ventilare di meno si tratta di un'ipotesi, che però trova conferma nel trend che risulta avere la portata di ricambio d'aria (ACR) in funzione della temperatura dell'aria esterna (T_e). Per ciascun appartamento sono state infatti considerate le coppie di valori ($ACR; T_e$) del periodo invernale considerato nei tre anni analizzati (2018, 2019, 2021); su undici appartamenti, in dieci di essi la linea di tendenza della ventilazione in funzione della temperatura ha una pendenza positiva e l'appartamento B2 ne è un esempio, come mostrato in Figura 4.4.

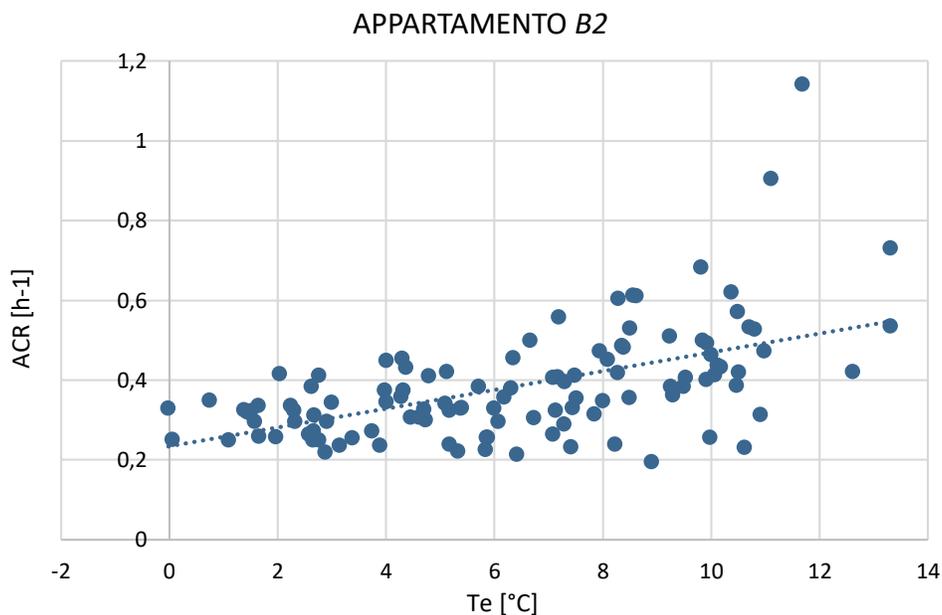


Figura 4.4 – Andamento della portata di ricambio d'aria al variare della temperatura esterna durante il periodo invernale

Tenendo conto di quanto appena detto, è stato esteso il campione dello studio precedente analizzando le variazioni delle grandezze analizzate su entrambi i periodi. Nel complesso si sono quindi potuti confrontare diciannove condizioni di ANTE e POST retrofit (Tabella 4.6).

Tabella 4.6 – Combinazione dei valori medi delle grandezze analizzate emersi dallo studio precedente e della studio attuale

TOTALE				
19 confronti ANTE-POST				
Situazione	ANTE	POST	DIFFERENZE	confronti con INCREMENTO
T_i [°C]	21.3 ± 0.8	21.6 ± 0.7	0.3	12 su 19
RH_i [%]	49.6 ± 5.9	52.5 ± 5.2	2.9	15 su 19
ACR [h^{-1}]	0.36 ± 0.11	0.45 ± 0.21	0.09	13 su 19

Da essa si può notare un incremento medio della temperatura dell'aria interna (T_i) di 0.3 °C che si verifica in dodici dei diciannove confronti ANTE-POST retrofit, un incremento medio dell'umidità relativa dell'aria interna (RH_i) di 2.9 % che si verifica in quindici dei diciannove confronti e un incremento della portata di ricambio d'aria (ACR) di 0.09 h^{-1} che si verifica in tredici confronti su 19.

In Appendice – B sono riportati i valori ottenuti nel corso del 2019 di temperatura (T_i [°C]) e umidità relativa (RH_i [%]) dell'aria interna e di portata di ricambio d'aria (ACR [h^{-1}]) e il relativo confronto con gli anni 2018 e 2021.

4.1.2 Stagione estiva

Relativamente allo studio estivo il periodo preso in considerazione va dal 1 al 31 luglio per gli anni 2019 e 2021. Le grandezze analizzate sono: la temperatura (T_i [°C]) e l'umidità relativa (RH_i [%]) dell'aria interna, oltre alla portata di ricambio d'aria (ACR [h^{-1}]) e alle ore giornaliere di utilizzo del clima (*clima* [h/day]).

4.1.2.1 Temperatura dell'aria interna

La prima grandezza analizzata anche nel caso dell'analisi estiva è stata la temperatura dell'aria interna, per la quale si sono ottenute le medie giornaliere a partire dai dati registrati dai sensori.

I valori medi per gli appartamenti del *condominio F* nei due diversi anni di analisi sono qui riportati nel grafico di Figura 4.5; esso è diviso in due sezioni: quella di sinistra rappresenta gli appartamenti privi di impianto di climatizzazione, mentre quella di destra rappresenta quelli che ne sono provvisti. Nel grafico raffigurante i valori medi, si è scelto di non rappresentare i dati relativi al *condominio M* per chiarezza espositiva, tenendo conto anche del fatto che si tratta di appartamenti analizzati come benchmark, in quanto riquilificati prima degli anni analizzati (§2.1).

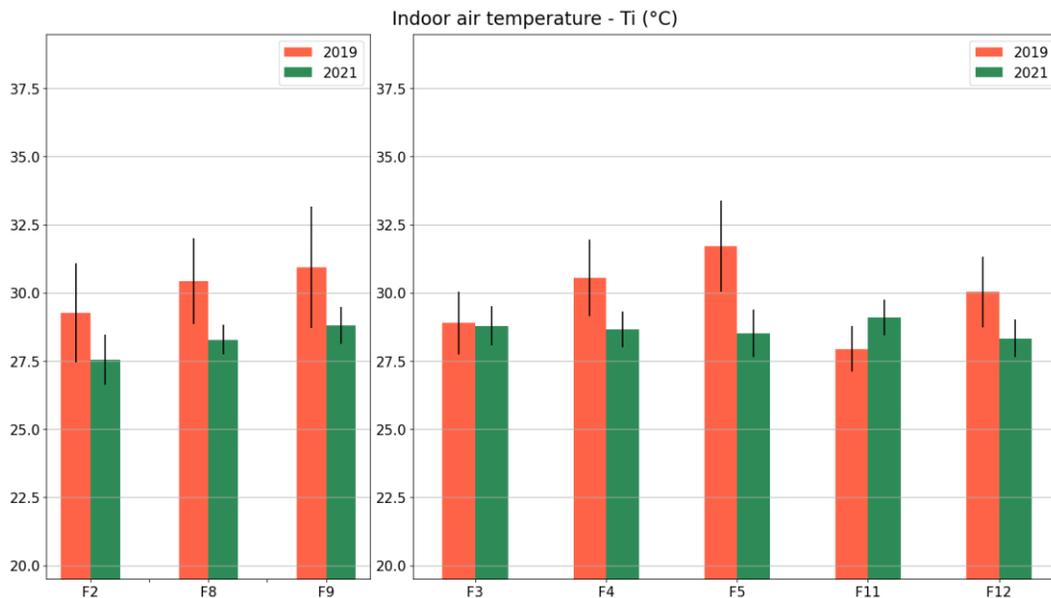


Figura 4.5 – Valori medi diurni della temperatura dell'aria interna per i diversi appartamenti

Come già fatto nel caso dell'analisi invernale, per poter eseguire un confronto più accurato tra i due periodi, i valori medi sono stati riportati in Tabella 4.7, insieme a quelli relativi agli appartamenti del *condominio M*.

Tabella 4.7 - Valori medi giornalieri della temperatura dell'aria interna per i diversi appartamenti

	T_i			
	Appartamento	2019	2021	2019 -> 2021
		[°C]		
3 appartamenti con clima analisi POST-POST	M2	29.2 ± 0.5	29.1 ± 0.6	-0.1
	M3	27.8 ± 0.7	27.9 ± 0.6	0.1
	M5	28.9 ± 1.2	27.7 ± 0.9	-1.2
	POST-POST	Appartamenti con $\Delta T_i > 0$		1
3 appartamenti senza clima analisi ANTE-POST	F2	29.3 ± 1.8	27.6 ± 0.9	-1.7
	F8	30.4 ± 1.6	28.3 ± 0.6	-2.1
	F9	30.9 ± 2.2	28.8 ± 0.7	-2.1
	No clima	Appartamenti con $\Delta T_i > 0$		0
5 appartamenti con clima analisi ANTE-POST	F3	28.9 ± 1.1	28.8 ± 0.7	-0.1
	F4	30.6 ± 1.4	28.7 ± 0.6	-1.9
	F5	31.7 ± 1.7	28.5 ± 0.9	-3.2
	F11	27.9 ± 0.8	29.1 ± 0.7	1.2
	F12	30.0 ± 1.3	28.3 ± 0.7	-1.7
	Con clima	Appartamenti con $\Delta T_i > 0$		1

Analizzando la variazione dei valori medi giornalieri delle temperature tra il 2019 e il 2021, è stato rilevato un incremento in uno dei tre appartamenti che erano già in una situazione di *POST* retrofit al momento dell'analisi; d'altra parte, per quanto riguarda gli appartamenti riqualificati nell'autunno-inverno del 2020, nessuno dei tre appartamenti sprovvisti di clima ha riportato un incremento e solo in uno dei cinque provvisti di clima la temperatura è aumentata.

Considerando quindi l'analisi *ANTE* e *POST* retrofit, su otto casi complessivi solo uno appartamento ha riportato un incremento della temperatura dell'aria interna a seguito del processo di riqualificazione energetica.

4.1.2.2 Umidità relativa dell'aria interna

La seconda grandezza analizzata è stata l'umidità relativa dell'aria interna, per la quale sono state calcolate le medie giornaliere a partire dai dati registrati dai sensori. Anche in questo caso i valori medi per ciascun appartamento sono qui riportati nel grafico di Figura 4.6, nel quale si è mantenuto lo stesso raggruppamento visto in precedenza.

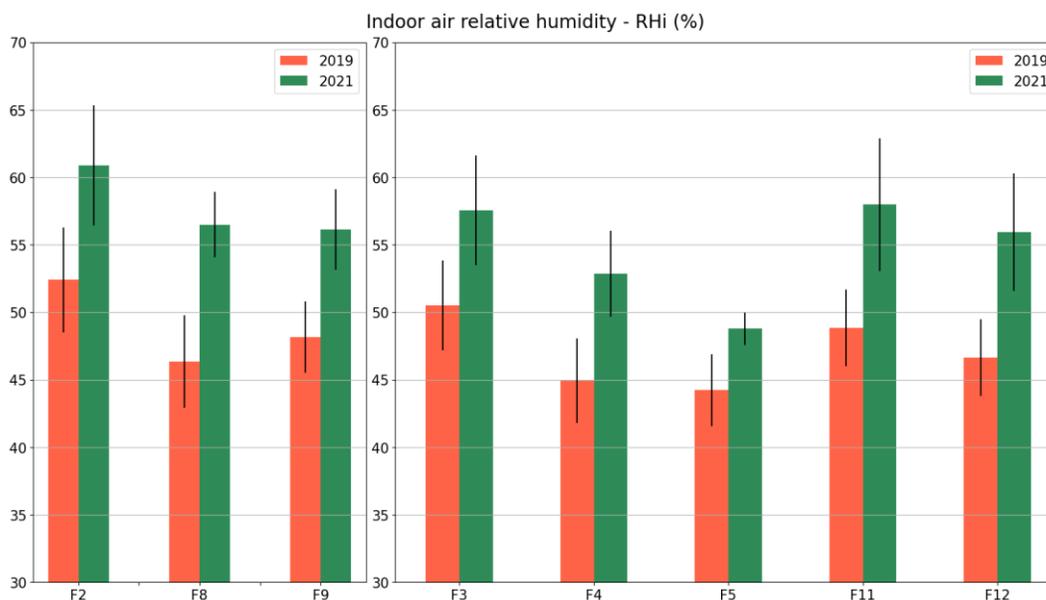


Figura 4.6 - Valori medi giornalieri dell'umidità relativa dell'aria interna per i diversi appartamenti

Anche in questo caso, per poter eseguire un confronto tra i due periodi questi valori sono stati riassunti in Tabella 4.8, insieme a quelli relativi agli appartamenti del *condominio M*.

Tabella 4.8 - Valori medi giornalieri dell'umidità relativa dell'aria interna per i diversi appartamenti

		RH_i		
		2019	2021	2019 -> 2021
Edificio		[%]		
3 appartamenti con clima analisi POST-POST	M2	50.4 ± 2.1	52.8 ± 3.8	2.4
	M3	53.2 ± 2.4	57.1 ± 3.6	3.9
	M5	53.4 ± 3.3	56.3 ± 3.3	2.9
	POST-POST	Appartamenti con $\Delta RH_i > 0$		3
3 appartamenti senza clima analisi ANTE-POST	F2	52.4 ± 3.9	60.9 ± 4.5	8.5
	F8	46.4 ± 3.4	56.5 ± 2.4	10.1
	F9	48.2 ± 2.6	56.1 ± 3.0	7.9
	No clima	Appartamenti con $\Delta RH_i > 0$		3
5 appartamenti con clima analisi ANTE-POST	F3	50.5 ± 3.3	57.6 ± 4.1	7.1
	F4	44.9 ± 3.1	52.8 ± 3.2	7.9
	F5	44.2 ± 2.7	48.8 ± 1.2	4.6
	F11	48.8 ± 2.8	58.0 ± 4.9	9.2
	F12	46.6 ± 2.8	55.9 ± 4.3	9.3
	Con clima	Appartamenti con $\Delta RH_i > 0$		5

Analizzando la variazione dei valori medi giornalieri delle umidità relative tra il 2019 e il 2021, è stato rilevato un incremento in tutti gli appartamenti considerati, sia in quelli che erano già in una situazione di *POST* retrofit al momento dell'analisi, sia in quelli riqualificati nell'inverno-primavera del 2021.

Considerando quindi l'analisi *ANTE* e *POST* retrofit, su otto casi complessivi tutti gli otto appartamenti hanno riportato un incremento dell'umidità relativa dell'aria interna a seguito del processo di riqualificazione energetica.

4.1.2.3 Portata di ricambio d'aria

Similmente a quanto fatto nel caso dell'analisi invernale, anche per quella estiva si è condotto lo studio sulla portata di ricambio d'aria, per la quale sono state calcolate le medie giornaliere a partire nuovamente dal bilancio igrometrico. Anche in questo caso i valori medi per ciascun appartamento sono qui riportati nel grafico di Figura 4.7, nel quale si è mantenuto lo stesso raggruppamento visto nei grafici precedenti.

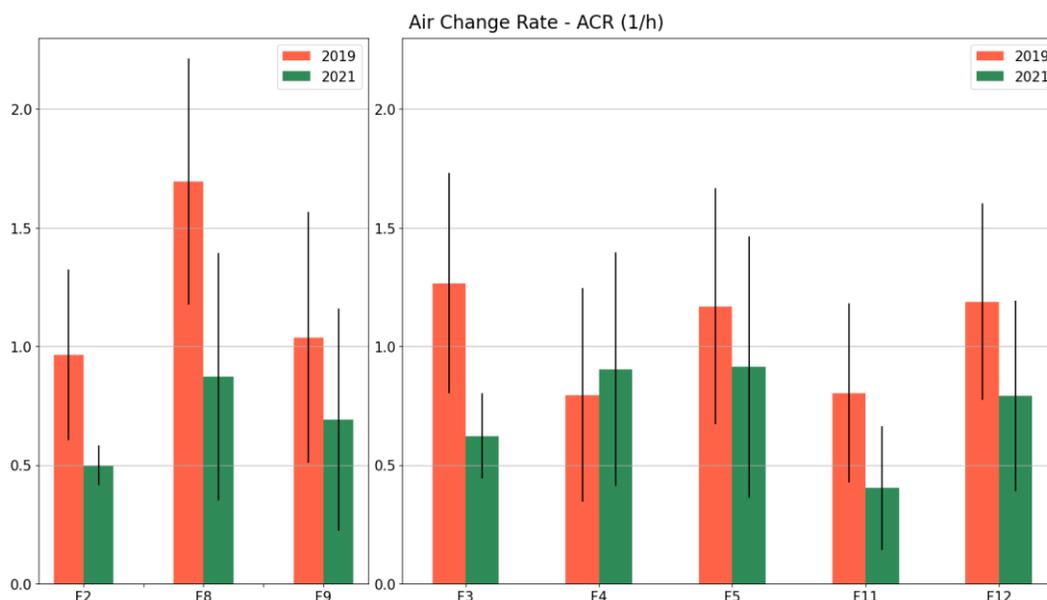


Figura 4.7 - Valori medi giornalieri della portata di ricambio d'aria per i diversi appartamenti

Ancora una volta, questi valori, insieme a quelli relativi agli appartamenti del *condominio M*, sono stati riportati in Tabella 4.9 per poterli confrontare.

Tabella 4.9 - Valori medi giornalieri della portata di ricambio d'aria per i diversi appartamenti

		ACR		
		2019	2021	2019 -> 2021
Edificio		[h ⁻¹]		
3 appartamenti con clima analisi POST-POST	M2	0.70 ± 0.36	0.57 ± 0.27	-0.13
	M3	0.44 ± 0.33	0.38 ± 0.27	-0.06
	M5	0.81 ± 0.42	0.90 ± 0.43	0.09
	POST-POST	Appartamenti con $\Delta ACR > 0$		1
3 appartamenti senza clima analisi ANTE-POST	F2	0.96 ± 0.36	0.50 ± 0.08	-0.46
	F8	1.69 ± 0.52	0.87 ± 0.52	-0.82
	F9	1.04 ± 0.53	0.69 ± 0.47	-0.35
	No clima	Appartamenti con $\Delta ACR > 0$		0
5 appartamenti con clima analisi ANTE-POST	F3	1.27 ± 0.46	0.62 ± 0.18	-0.65
	F4	0.80 ± 0.45	0.90 ± 0.49	0.10
	F5	1.17 ± 0.50	0.91 ± 0.55	-0.26
	F11	0.80 ± 0.38	0.40 ± 0.26	-0.40
	F12	1.19 ± 0.41	0.79 ± 0.40	-0.40
	Con clima	Appartamenti con $\Delta ACR > 0$		1

Analizzando la variazione dei valori medi giornalieri delle portate di ricambio d'aria tra il 2019 e il 2021, è stato rilevato un incremento in uno dei tre appartamenti che erano già in una situazione di *POST* retrofit al momento dell'analisi; d'altra parte, per quanto riguarda gli appartamenti riqualificati nell'inverno-primavera del 2021, nessuno dei tre appartamenti sprovvisti di clima ha riportato un incremento e solo in uno dei cinque provvisti di clima la ventilazione è aumentata.

Considerando quindi l'analisi *ANTE* e *POST* retrofit, su otto casi complessivi solo uno appartamento ha riportato un incremento della portata di ricambio d'aria a seguito del processo di riqualificazione energetica.

4.1.2.4 Utilizzo del clima

Infine, per quanto riguarda l'analisi estiva, è stato stimato l'utilizzo del clima da parte degli utenti, calcolando le ore di accensione giornaliere a partire dal modello descritto in §3.1.4. Anche in questo caso i valori medi per ciascun appartamento sono qui riportati nel grafico di Figura 4.8, nel quale sono stati riportati unicamente gli appartamenti del *condominio F* provvisti di clima.

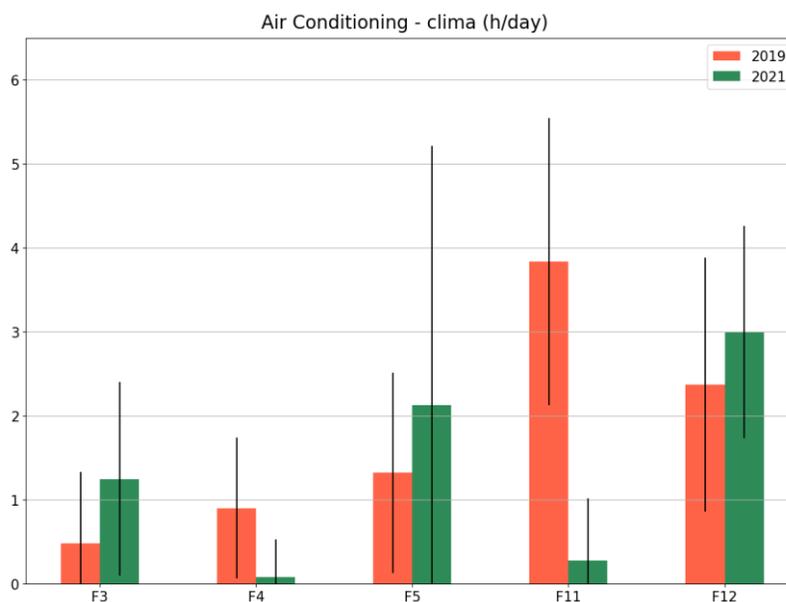


Figura 4.8 - Valori medi giornalieri delle ore di utilizzo del clima per i diversi appartamenti

Ancora una volta, per poter confrontare i due periodi, i valori vengono riportati in Tabella 4.10, insieme a quelli relativi agli appartamenti del *condominio M*.

Tabella 4.10 - Valori medi giornalieri della portata di ricambio d'aria per i diversi appartamenti

		<i>clima</i>				
		2019		2021		2019 -> 2021
Edificio		[h/day]				
3 appartamenti con clima analisi POST-POST	M2	1.94 ± 1.58	2.39 ± 1.22			0.45
	M3	1.94 ± 2.29	1.03 ± 1.17			-0.91
	M5	1.03 ± 1.33	0.32 ± 0.75			-0.71
	POST-POST	Appartamenti con $\Delta clima > 0$			1	
5 appartamenti con clima analisi ANTE-POST	F3	0.48 ± 0.85	1.25 ± 1.15			0.77
	F4	0.90 ± 0.84	0.08 ± 0.45			-0.82
	F5	1.32 ± 1.19	2.13 ± 3.08			0.81
	F11	3.84 ± 1.71	0.27 ± 0.74			-3.57
	F12	2.37 ± 1.51	3.00 ± 1.26			0.63
	Con clima	Appartamenti con $\Delta clima > 0$			3	

Analizzando la variazione dei valori medi giornalieri delle ore di utilizzo del clima tra il 2019 e il 2021, è stato rilevato un incremento in uno dei tre appartamenti che erano già in una situazione di *POST* retrofit al momento dell'analisi; d'altra parte, considerando l'analisi *ANTE* e *POST* retrofit, su cinque casi complessivi sono stati tre gli appartamenti provvisti di clima che hanno riportato un incremento delle ore di utilizzo dello stesso a seguito del processo di riqualificazione energetica.

4.1.2.5 Analisi ANTE-POST retrofit e confronto con il benchmark

Similmente a quanto fatto nel caso dell'analisi invernale, anche per l'analisi estiva si è cercato di eseguire un confronto complessivo tra la situazione di *ANTE* e *POST* retrofit, tenendo tuttavia conto del fatto che il numero di appartamenti monitorati in questo caso era ridotto rispetto allo studio invernale.

Sono stati quindi considerati tre diversi gruppi, uno dei quali comprendente i soli appartamenti del *condominio M*, che nel caso specifico di questa analisi svolgono un ruolo da benchmark, mentre i restanti due comprendono gli appartamenti del *condominio F*, suddivisi a loro volta sulla base della presenza o meno in essi di un impianto di climatizzazione. Per ognuno di questi tre gruppi, si sono calcolate le medie complessive per l'anno 2019 e per l'anno 2021 di ciascuna grandezza analizzata, a partire dalle medie dei singoli appartamenti.

Relativamente al *condominio M*, ciò che si è ottenuto è riassunto in Tabella 4.11. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

Tabella 4.11 – Medie complessive ottenute dal confronto POST-POST nei 3 appartamenti del *condominio M* (riqualificati nel 2019)

CONDOMINIO M					
Anno	2019	2021	DIFFERENZE	APP con INCREMENTO	
Situazione	POST	POST			
T_i [°C]	28.6 ± 0.8	28.2 ± 0.7	-0.4		1 su 3
RH_i [%]	52.3 ± 2.6	55.4 ± 3.6	3.1		3 su 3
ACR [h^{-1}]	0.65 ± 0.37	0.62 ± 0.33	-0.03		1 su 3
$clima$ [h/day]	1.63 ± 1.78	1.25 ± 1.07	-0.38		1 su 3

Dall'analisi *POST-POST* retrofit eseguita in questo caso, ciò che è emerso è che la temperatura dell'aria interna (T_i) cala di 0.4 °C e solo in uno dei tre appartamenti si verifica un incremento della stessa, l'umidità relativa dell'aria interna (RH_i) aumenta di 3.1 % e in tutti e tre gli appartamenti si verifica un suo incremento, la portata di ricambio d'aria (ACR) cala leggermente di 0.03 h^{-1} e in solo uno dei tre appartamenti incrementa, mentre le ore di utilizzo del clima ($clima$) calano di 0.39 h/day e anche in questo caso in solo uno dei tre appartamenti aumentano.

Passando ora al *condominio F*, relativamente agli appartamenti sprovvisti di clima, ciò che si è ottenuto è riassunto in Tabella 4.12.

Tabella 4.12 - Medie complessive ottenute dal confronto ANTE-POST nei 3 appartamenti del condominio F sprovvisti di clima (riqualificati nel 2020)

CONDOMINIO F - NO CLIMA				
Anno	2019	2021	DIFFERENZE	APP con INCREMENTO
Situazione	ANTE	POST		
T_i [°C]	30.2 ± 1.9	28.2 ± 0.7	-2.0	0 su 3
RH_i [%]	49.0 ± 3.4	57.8 ± 3.4	8.8	3 su 3
ACR [h^{-1}]	1.23 ± 0.47	0.69 ± 0.41	-0.54	0 su 3

Dall'analisi ANTE-POST retrofit si è potuto notare che la temperatura dell'aria interna (T_i) cala drasticamente di 2.0 °C e nessuno dei tre appartamenti riporta un incremento della stessa, l'umidità relativa dell'aria interna (RH_i) aumenta di 8.9 % e in tutti e tre gli appartamenti si verifica un suo incremento, mentre la portata di ricambio d'aria (ACR) cala considerevolmente di 0.54 h^{-1} e in nessuno dei tre appartamenti incrementa.

Infine, relativamente agli appartamenti del *condominio F* provvisti di clima, ciò che si è ottenuto è riassunto in Tabella 4.13.

Tabella 4.13 - Medie complessive ottenute dal confronto ANTE-POST negli appartamenti del condominio F provvisti di clima

CONDOMINIO F - CLIMA				
Anno	2019	2021	DIFFERENZE	APP con INCREMENTO
Situazione	ANTE	POST		
T_i [°C]	29.8 ± 1.3	28.7 ± 0.7	-1.1	1 su 5
RH_i [%]	47.0 ± 3.0	54.6 ± 3.8	7.6	5 su 5
ACR [h^{-1}]	1.04 ± 0.44	0.73 ± 0.40	-0.31	1 su 5
<i>clima</i> [h/day]	1.78 ± 1.27	1.35 ± 1.62	-0.43	3 su 5

Dall'analisi ANTE-POST retrofit eseguita in questo caso, i risultati mostrano che la temperatura dell'aria interna (T_i) cala di $1.1\text{ }^\circ\text{C}$ e solo in uno dei cinque appartamenti si rileva un incremento della stessa, l'umidità relativa dell'aria interna (RH_i) aumenta di 7.6% e in tutti e cinque gli appartamenti si verifica un suo incremento, la portata di ricambio d'aria (ACR) cala di 0.31 h^{-1} e solo in uno dei cinque appartamenti incrementa, mentre le ore di utilizzo del clima (*clima*) calano mediamente di 0.44 h/day nonostante in tre dei cinque appartamenti aumentino.

Nel condurre lo studio per il periodo estivo, è stato analizzato anche l'anno 2020, tuttavia trattandosi di un anno parzialmente influenzato dalla pandemia di Covid-19, si è preferito eseguire il confronto tra il 2019 e il 2021; nonostante ciò, i valori ottenuti per quell'anno di temperatura (T_i [$^\circ\text{C}$]) e umidità relativa (RH_i [%]) dell'aria interna, di portata di ricambio d'aria (ACR [h^{-1}]) e di ore di utilizzo del clima (*clima* [h/day]) sono stati riportati in Appendice – C.

4.2 Simulazione energetica degli appartamenti

A seguito dell'analisi dati condotta si è potuto risalire ai valori medi di grandezze quali temperatura dell'aria interna e portata di rinnovo d'aria che hanno permesso di riprodurre le condizioni interne nelle simulazioni energetiche condotte mediante il software *EnergyPlus*.

Di seguito verranno riportati i risultati ottenuti sulla base dei diversi scenari simulati nel caso dell'analisi invernale ed estiva descritti in precedenza rispettivamente nei paragrafi §3.2.1 §3.2.2.

4.2.1 Stagione invernale

Relativamente all'analisi invernale sono stati considerati i valori di temperatura dell'aria interna e di portata di ricambio d'aria di ciascun appartamento nelle situazioni di ANTE e POST retrofit, che hanno permesso di definire le condizioni di input dei diversi scenari simulati.

Considerando le condizioni interne ANTE retrofit riprodotte negli scenari ANTE-ANTE e POST-ANTE di ciascuno degli 11 appartamenti considerati nel caso dell'analisi invernale, si sono potuti definire gli input riportati in Tabella 4.14.

Tabella 4.14 – Condizioni interne riprodotte all'interno delle simulazioni condotte nello scenario ANTE retrofit

APPARTAMENTO		B2	M2	M3	M5	F2	F4	F5	F8	F9	F11	F12
T _{SETPOINT}	[°C]	19.8	21.3	21.5	22.7	18.6	19.1	22.1	22.3	20.8	22.9	23.1
ACR _{AVG}	[h ⁻¹]	0.35	0.18	0.18	0.25	0.43	0.51	0.31	0.58	0.40	0.34	0.30
CUCINA	ACR _{MAX}	[h ⁻¹]	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
	ACR _{MIN}	[h ⁻¹]	0.28	0.08	0.07	0.16	0.37	0.48	0.23	0.55	0.34	0.22

Similmente, considerando le condizioni interne POST retrofit riprodotte nello scenario POST-POST di ciascuno degli 11 appartamenti, si sono potuti definire gli input riportati in Tabella 4.15.

Tabella 4.15 – Condizioni interne riprodotte all'interno delle simulazioni condotte nello scenario POST retrofit

APPARTAMENTO		B2	M2	M3	M5	F2	F4	F5	F8	F9	F11	F12
T _{SETPOINT}	[°C]	20.6	22.3	23.1	19.8	20.6	17.8	23.2	19.9	22.5	23.5	23.7
ACR _{AVG}	[h ⁻¹]	0.37	0.15	0.11	0.38	0.38	0.76	0.32	0.71	0.43	0.19	0.26
CUCINA	ACR _{MAX}	[h ⁻¹]	0.70	0.70	0.67	0.70	0.70	0.76	0.71	0.70	0.70	0.70
	ACR _{MIN}	[h ⁻¹]	0.31	0.04	0.00	0.32	0.32	0.76	0.25	0.71	0.37	0.09

Per ciascuno degli 11 appartamenti sono stati quindi ricreati 3 diversi scenari simulati poi all'interno dei due modelli di appartamento costruiti: quello relativo all'appartamento M2 e quello relativo all'appartamento M5.

I risultati delle 66 simulazioni complessive sono stati qui di seguito riportati ed analizzati.

4.2.1.1 Fabbisogno energetico

Il primo dato utile che emerge dalle simulazioni condotte è sicuramente il fabbisogno energetico, stimato per tutta la stagione invernale, dal 15 ottobre al 15 aprile; con esso si sono potuti analizzare anche diversi indici, quali l'Energy Performance Gap (EPG), l'Energy Saving Deficit (ESD) e l'Energy Saving Achievement (ESA), secondo quanto definito in §3.2.1.1.

Relativamente al modello dell'appartamento M2, si ricorda che si tratta di un appartamento collocato al secondo piano e caratterizzato da un area netta di 98.50 m²; i risultati ottenuti dalle simulazioni condotte al suo interno sono stati qui riportati in Tabella 4.16 e in Figura 4.9.

Tabella 4.16 – Risultati relativi al fabbisogno energetico ottenuti a partire dal modello M2

FABBISOGNO ENERGETICO - modello M2												
APPARTAMENTO		B2	M2	M3	M5	F2	F4	F5	F8	F9	F11	F12
ANTE- ANTE	[kWh/y]	7031	6925	7044	8319	6272	7458	8342	10375	8031	9117	8964
	[kWh/(m ² y)]	71.38	70.30	71.52	84.46	63.68	75.72	84.69	105.33	81.53	92.55	91.00
POST- ANTE	[kWh/y]	3222	2644	2697	3569	3231	3878	3797	5850	3914	4328	4100
	[kWh/(m ² y)]	32.71	26.85	27.38	36.24	32.80	39.37	38.55	59.39	39.73	43.94	41.62
POST- POST	[kWh/y]	3644	2719	2650	3406	3708	4583	4300	5444	4842	3375	4011
	[kWh/(m ² y)]	37.00	27.61	26.90	34.57	37.65	46.53	43.65	55.27	49.15	34.26	40.72
EPG		13%	3%	-2%	-5%	15%	18%	13%	-7%	24%	-22%	-2%
ESD		11%	2%	-1%	-3%	16%	20%	11%	-9%	23%	-20%	-2%
ESA		89%	98%	101%	103%	84%	80%	89%	109%	77%	120%	102%

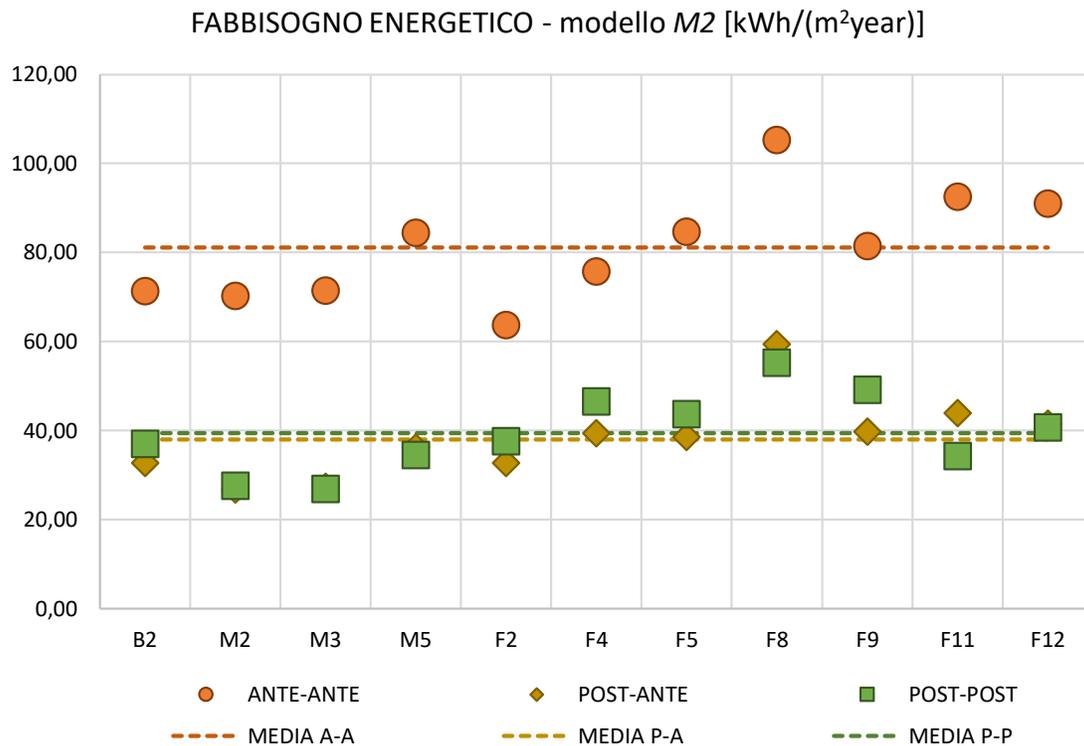


Figura 4.9 – Risultati relativi al fabbisogno energetico ottenuti a partire dal modello M2

Ciò che è emerso nel caso del modello M2 è che, come ci si poteva aspettare, la migliore apportata all’involucro edilizio a seguito degli interventi di riqualificazione energetica ha effettivamente ridotto il fabbisogno energetico relativo alla stagione invernale in tutti gli 11 appartamenti considerati; quanto detto lo si può notare dal confronto tra lo scenario ANTE-ANTE e lo scenario POST-ANTE, nei quali è stato variato l’involucro a parità di condizioni interne.

D’altra parte, il diverso comportamento degli utenti prima e dopo il retrofit ha portato a effetti diversi a seconda dell’appartamento considerato e ciò può essere analizzato dal confronto tra lo scenario POST-ANTE e lo scenario POST-POST. Per gli appartamenti B2, M2, F2, F4, F5 e F9 la variazione delle condizioni interne ha portato ad un incremento del fabbisogno energetico rispetto a quello stimato nello scenario POST-ANTE, viceversa per gli

appartamenti *M3*, *M5*, *F8*, *F11* e *F12* tale variazione ha portato ad un'ulteriore riduzione dei consumi, aumentando di conseguenza il risparmio energetico complessivo.

Procedendo ora con l'analisi degli indici, nel caso del modello *M2* si è ottenuto un valore di *Energy Performance Gap (EPG)* compreso tra -22% e $+24\%$, un valore di *Energy Saving Deficit (ESD)* compreso tra -20% e $+23\%$ e un conseguente valore di *Energy Saving Achievement (ESA)* compreso tra 77% e 120% .

Sulla base degli indici analizzati, si è potuto riscontrare il verificarsi del cosiddetto fenomeno di *Rebound Effect* in 6 degli 11 appartamenti considerati, nei quali si è pertanto ottenuto un risparmio energetico effettivo a seguito della riqualificazione energetica inferiore rispetto a quello stimato considerando le sole modifiche all'involucro e trascurando gli effetti legati al comportamento dell'utente.

Considerando ora il modello dell'appartamento *M5*, si ricorda che si tratta di un appartamento collocato al piano rialzato e caratterizzato da un area netta di $66.84 m^2$; anche in questo caso i risultati ottenuti dalle simulazioni condotte al suo interno sono stati qui riportati in Tabella 4.17 e in Figura 4.10.

Tabella 4.17 – Risultati relativi al fabbisogno energetico ottenuti a partire dal modello *M5*

FABBISOGNO ENERGETICO - modello <i>M5</i>												
APPARTAMENTO		B2	M2	M3	M5	F2	F4	F5	F8	F9	F11	F12
ANTE- ANTE	[kWh/y]	5144	5483	5617	6789	4608	5244	6625	8008	6058	7361	7325
	[kWh/(m ² y)]	76.97	82.04	84.03	101.57	68.95	78.46	99.12	119.81	90.64	110.13	109.59
POST- ANTE	[kWh/y]	1958	1631	1672	2294	1925	2364	2419	3803	2447	2806	2664
	[kWh/(m ² y)]	29.30	24.39	25.02	34.33	28.80	35.37	36.20	56.89	36.61	41.97	39.85
POST- POST	[kWh/y]	2353	1803	1789	2161	2394	2881	2897	3531	3231	2294	2728
	[kWh/(m ² y)]	35.20	26.97	26.76	32.33	35.82	43.10	43.35	52.82	48.33	34.33	40.81
EPG		20%	11%	7%	-6%	24%	22%	20%	-7%	32%	-18%	2%
ESD		12%	4%	3%	-3%	17%	18%	11%	-6%	22%	-11%	1%
ESA		88%	96%	97%	103%	83%	82%	89%	106%	78%	111%	99%

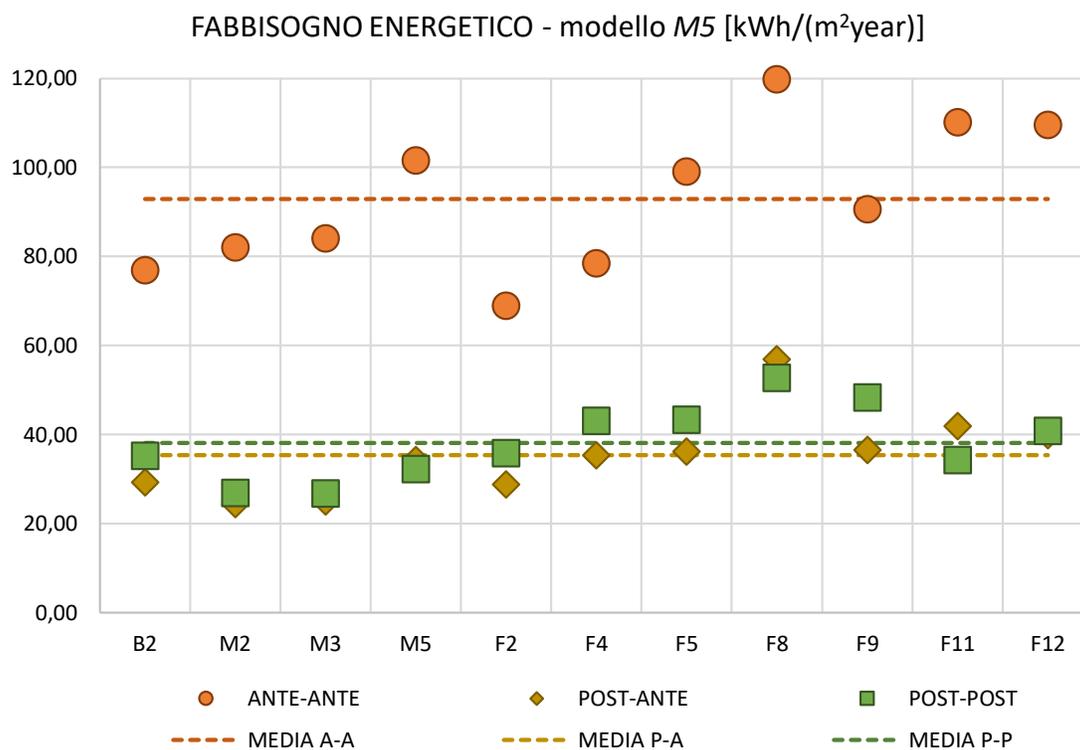


Figura 4.10 – Risultati relativi al fabbisogno energetico ottenuti a partire dal modello M5

Passando ora all'analisi dei risultati relativi al modello M5, anche in questo caso la migliororia apportata all'involucro edilizio a seguito degli interventi di riqualificazione energetica ha ridotto il fabbisogno energetico relativo alla stagione invernale in tutti gli 11 appartamenti considerati; nuovamente, quanto detto lo si può notare dal confronto tra lo scenario ANTE-ANTE e lo scenario POST-ANTE, nei quali è stato variato l'involucro a parità di condizioni interne.

D'altra parte, il diverso comportamento degli utenti prima e dopo il retrofit, analizzato dal confronto tra lo scenario POST-ANTE e lo scenario POST-POST, ha portato in alcuni appartamenti a situazioni diverse rispetto a quelle emerse dall'analisi del modello M2. Gli appartamenti in cui la variazione delle condizioni interne ha portato ad un incremento del fabbisogno energetico rispetto a quello stimato nello scenario POST-ANTE sono stati infatti B2, M2, M3, F2, F4, F5, F9 e F12, viceversa solo negli appartamenti M5, F8 e F11 tale

variazione ha portato ad un'ulteriore riduzione dei consumi, aumentando di conseguenza il risparmio energetico complessivo.

Procedendo ora con l'analisi degli indici, nel caso del modello *M5* si è ottenuto un valore di *Energy Performance Gap (EPG)* compreso tra -18% e $+32\%$, un valore di *Energy Saving Deficit (ESD)* compreso tra -11% e $+22\%$ e un conseguente valore di *Energy Saving Achievement (ESA)* compreso tra 78% e 111% .

Sulla base degli indici analizzati, si è potuto riscontrare il verificarsi del cosiddetto fenomeno di *Rebound Effect* in 8 degli 11 appartamenti considerati, nei quali si è pertanto ottenuto un risparmio energetico effettivo a seguito della riqualificazione energetica inferiore rispetto a quello stimato considerando le sole modifiche all'involucro e trascurando gli effetti legati al comportamento dell'utente.

4.2.1.2 *Comfort*

Relativamente all'analisi invernale si è cercato infine di analizzare il livello di comfort all'interno degli 11 appartamenti considerati nei diversi scenari simulati; per fare ciò si sono seguiti il *Metodo A* e il *Metodo B* definiti dalla Norma BS EN 15251 [15] e spiegati nel dettaglio in §3.2.1.2.

Relativamente al modello *M2* i livelli di comfort ottenuti a partire dal *Metodo A* sono riportati in Tabella 4.18 e in Figura 4.11, mentre quelli ottenuti a partire dal *Metodo B* sono riportati in Tabella 4.19 e in Figura 4.12.

Tabella 4.18 – Livello di comfort valutato secondo il Metodo A a partire dal modello M2

COMFORT - Metodo A - modello M2												
APPARTAMENTO		B2	M2	M3	M5	F2	F4	F5	F8	F9	F11	F12
Ore in cui PMV < -0.5 oppure PMV > 0.5	ANTE - ANTE	74%	12%	7%	0%	90%	89%	1%	1%	48%	0%	0%
	POST - ANTE	60%	12%	12%	9%	79%	76%	5%	1%	13%	6%	7%
	POST - POST	23%	16%	23%	60%	23%	91%	7%	60%	3%	17%	13%

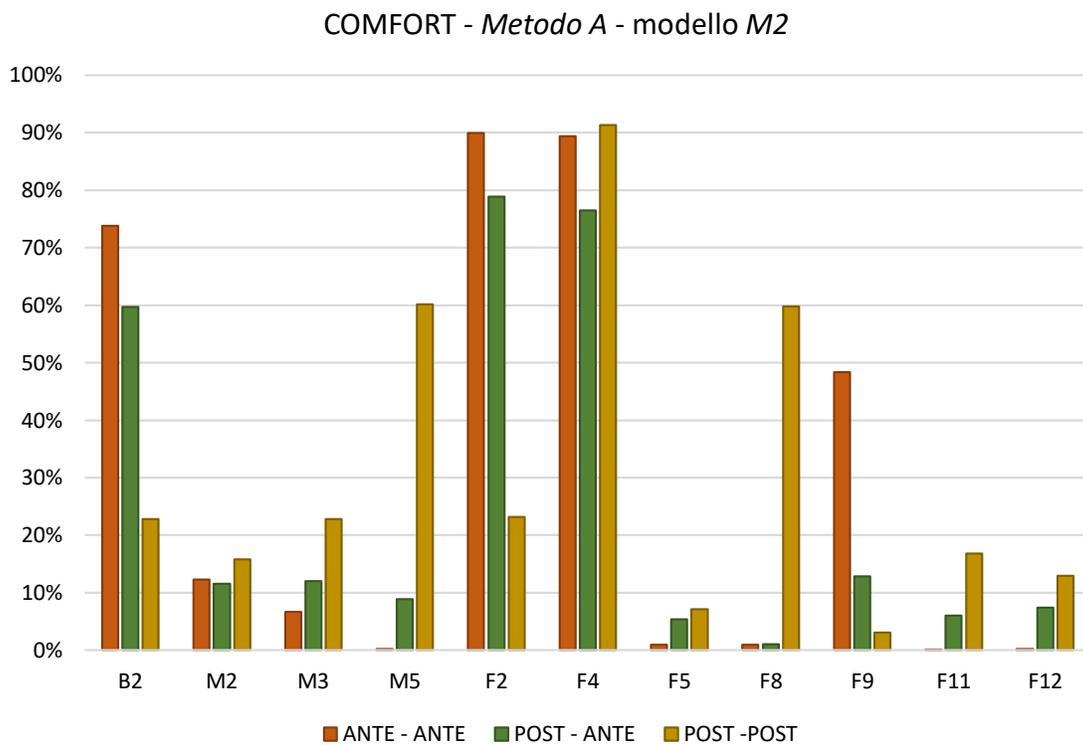


Figura 4.11 – Livello di comfort valutato secondo il Metodo A a partire dal modello M2

Tabella 4.19 – Livello di comfort valutato secondo il Metodo B a partire dal modello M2

COMFORT - Metodo B - modello M2												
APPARTAMENTO		B2	M2	M3	M5	F2	F4	F5	F8	F9	F11	F12
ANTE - ANTE	GO _{INF}	2486	1365	991	0	2611	2630	108	66	2057	0	0
	GO _{SUP}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
POST - ANTE	GO _{INF}	2050	5	0	0	2269	2338	0	0	1021	0	0
	GO _{SUP}	64	181	181	143	28	9	92	0	38	78	121
POST - POST	GO _{INF}	1457	0	0	2078	1464	2580	0	2271	0	0	0
	GO _{SUP}	53	265	377	47	47	0	110	0	28	244	171

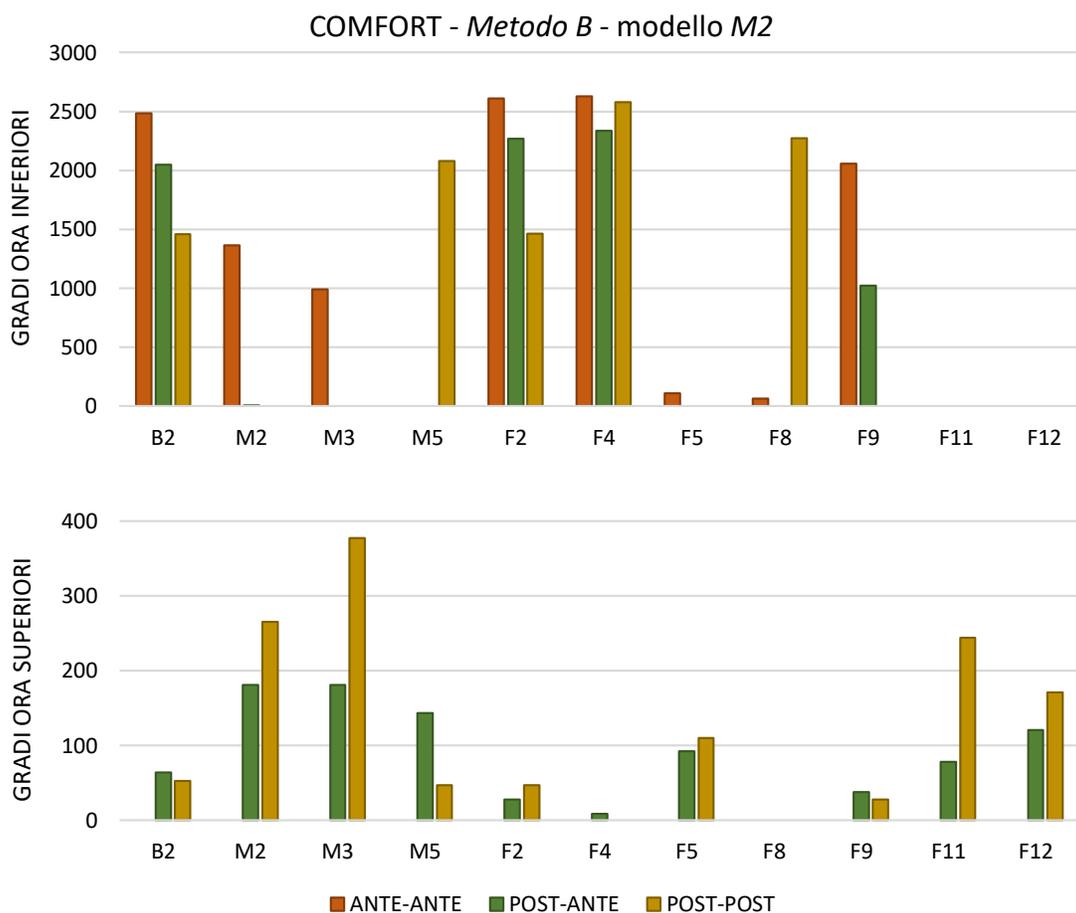


Figura 4.12 – Livello di comfort valutato secondo il Metodo B a partire dal modello M2

Dai risultati ottenuti è difficile individuare un trend comune a tutti gli appartamenti, tuttavia eseguendo un'analisi simultanea di quanto ottenuto dai due metodi considerati, è stato possibile definire cinque diverse situazioni che hanno interessato uno o più appartamenti.

La prima analizzata è la *Situazione I*, relativa agli appartamenti *B2, F2, F9*, i quali erano caratterizzati da una temperatura interna *ANTE* retrofit ridotta (inferiore ai 21.5°C). Questo ha fatto sì che, a parità di condizioni interne, il nuovo cappotto incrementasse il livello di comfort, come si può notare dal confronto tra gli scenari *ANTE-ANTE* e *POST-ANTE*. Gli utenti in questi appartamenti hanno tuttavia alzato la temperatura interna *POST* retrofit e ciò ha permesso di ottenere un ulteriore incremento del livello di comfort finale, come si può notare dal confronto tra gli scenari *POST-ANTE* e *POST-POST*.

La seconda analizzata è la *Situazione II*, relativa al solo appartamento *M2*, il quale era caratterizzato da una temperatura interna *ANTE* retrofit di poco inferiore ai 21.5°C . Questo ha fatto sì che, a parità di condizioni interne, il nuovo cappotto incrementasse il livello di comfort, come si può notare dal confronto tra gli scenari *ANTE-ANTE* e *POST-ANTE*. L'utente in questo appartamento ha tuttavia alzato la temperatura interna *POST* retrofit ma in questo caso ha portato ad una riduzione del livello di comfort finale, come si può notare dal confronto tra gli scenari *POST-ANTE* e *POST-POST*, a causa di un incremento eccessivo di gradi ora superiori.

La terza analizzata è la *Situazione III*, relativa al solo appartamento *F4*, il quale era caratterizzato da una temperatura interna *ANTE* retrofit considerevolmente inferiore ai 21.5°C . Questo ha fatto sì che, a parità di condizioni interne, il nuovo cappotto incrementasse nuovamente il livello di comfort, come si può notare dal confronto tra gli scenari *ANTE-ANTE* e *POST-ANTE*. L'utente in questo appartamento ha però ridotto la temperatura interna *POST* retrofit e così facendo ha portato ad una conseguente riduzione del livello di comfort finale, come si può notare dal confronto tra gli scenari *POST-ANTE* e *POST-POST*.

La quarta analizzata è la *Situazione IV*, relativa agli appartamenti *M5, F8*, i quali erano caratterizzati da una temperatura interna *ANTE* retrofit elevata (superiore ai 21.5°C). Questo ha fatto sì che, a parità di condizioni interne, il nuovo cappotto riducesse il livello di comfort, come si può notare dal confronto tra gli scenari *ANTE-ANTE* e *POST-ANTE*, a causa di un incremento eccessivo dei gradi ora superiori. Gli utenti in questi appartamenti hanno ridotto la temperatura interna *POST* retrofit, in modo però eccessivo e ciò ha portato ad un'ulteriore riduzione del livello di comfort finale, come si può notare dal confronto tra gli scenari *POST-ANTE* e *POST-POST*.

Infine, la quinta analizzata è la *Situazione V*, relativa agli appartamenti *M3, F5, F11, F12*, i quali erano anch'essi caratterizzati da una temperatura interna *ANTE* retrofit elevata (superiore ai 21.5°C). Come nella situazione precedente, a parità di condizioni interne, ciò ha fatto sì che il nuovo cappotto riducesse il livello di comfort, come si può notare dal confronto tra gli scenari *ANTE-ANTE* e *POST-ANTE*, a causa di un incremento eccessivo dei gradi ora superiori. Gli utenti in questi appartamenti hanno però alzato ulteriormente la temperatura interna *POST* retrofit, ottenendo come effetto un'ulteriore riduzione del livello di comfort finale, come si può notare dal confronto tra gli scenari *POST-ANTE* e *POST-POST*.

Considerando ora il modello *M5*, la situazione relativa al comfort è rimasta pressoché invariata rispetto a quanto detto per il modello *M2*. Anche in questo caso infatti è stato possibile definire le cinque situazioni viste in precedenza, alle quali facevano parte gli stessi appartamenti.

L'unica eccezione c'è stata per l'appartamento *F8* che in questo caso è passato da una *Situazione IV* ad una *Situazione III*; questo è accaduto perché la nuova geometria considerata nel modello *M5* è tale per cui l'intervento di riqualificazione energetica condotto abbia portato ad un miglioramento delle condizioni interne ipotizzate nello scenario *POST-ANTE*, con conseguente incremento del livello di comfort.

Anche in questo caso si sono riportati i livelli di comfort ottenuti; per quanto riguarda il *Metodo A* i risultati sono riportati in Tabella 4.20 e in Figura 4.13, mentre per quanto riguarda il *Metodo B* i risultati sono riportati in Tabella 4.21 e in Figura 4.14.

Tabella 4.20 – Livello di comfort valutato secondo il Metodo A a partire dal modello M5

COMFORT - Metodo A - modello M5												
APPARTAMENTO		B2	M2	M3	M5	F2	F4	F5	F8	F9	F11	F12
Ore in cui PMV < -0.5 oppure PMV > 0.5	ANTE - ANTE	77%	18%	11%	0%	92%	90%	4%	4%	51%	0%	0%
	POST - ANTE	57%	13%	14%	10%	76%	73%	6%	2%	12%	7%	9%
	POST - POST	22%	15%	23%	60%	22%	89%	7%	60%	3%	17%	13%

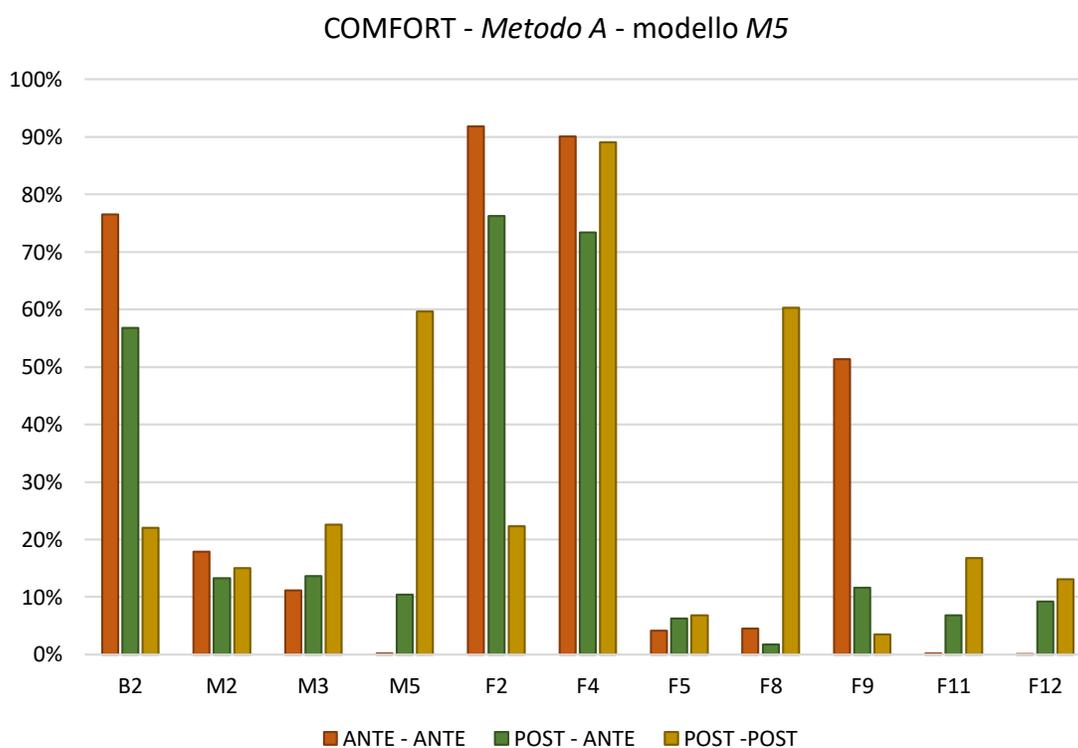


Figura 4.13 – Livello di comfort valutato secondo il Metodo A a partire dal modello M5

Tabella 4.21 – Livello di comfort valutato secondo il Metodo B a partire dal modello M5

COMFORT - Metodo B - modello M5			B2	M2	M3	M5	F2	F4	F5	F8	F9	F11	F12
ANTE-ANTE	GO _{INF}		2571	1690	1354	47	2659	2659	443	309	2227	25	11
	GO _{SUP}		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
POST-ANTE	GO _{INF}		1966	8	0	0	2154	2209	0	0	925	0	0
	GO _{SUP}		91	196	202	157	42	11	111	9	59	107	134
POST-POST	GO _{INF}		1414	0	0	2033	1422	2557	0	2237	0	0	0
	GO _{SUP}		58	234	341	50	50	0	104	0	25	211	161

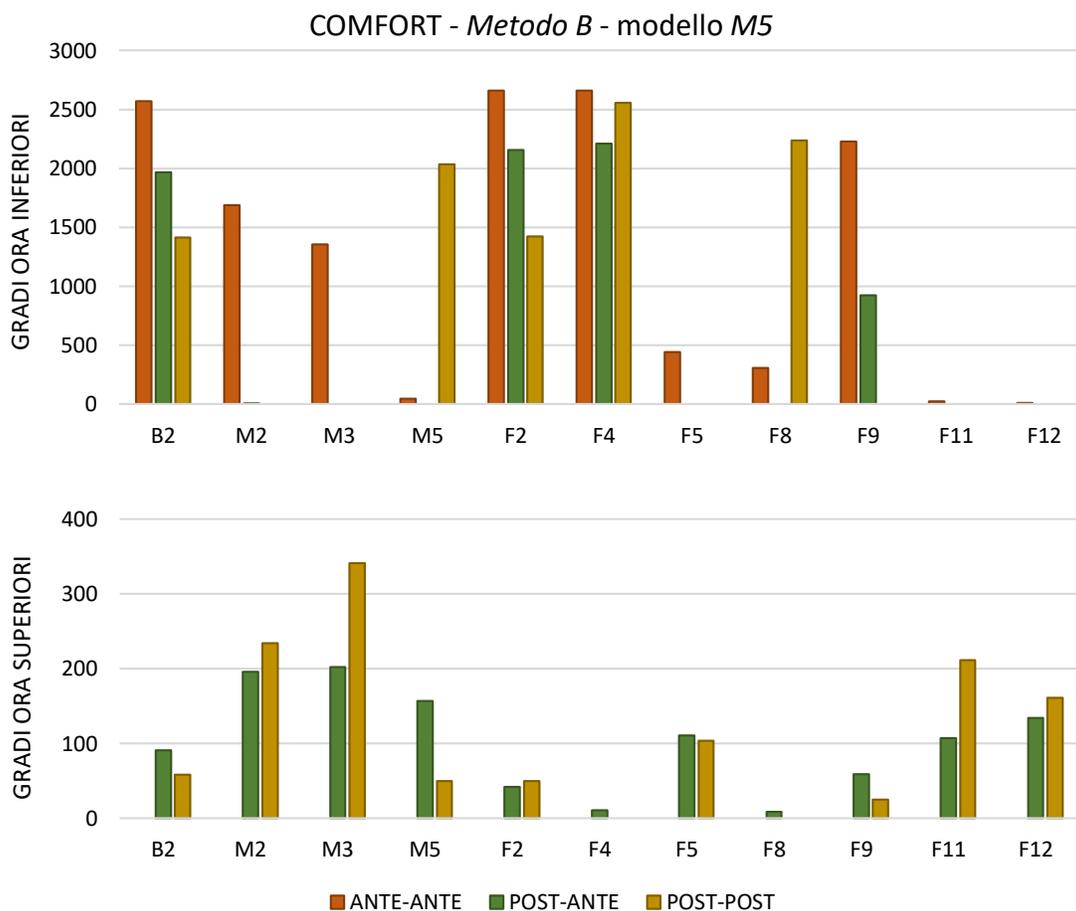


Figura 4.14 – Livello di comfort valutato secondo il Metodo B a partire dal modello M5

4.2.2 Stagione estiva

Passando ora all'analisi estiva si è fatto riferimento unicamente ai valori medi di portata di ricambio d'aria considerando prima i 3 appartamenti sprovvisti di clima e poi i 5 che ne sono provvisti nelle situazioni di ANTE e POST retrofit. Tali valori hanno permesso di definire le condizioni di input dei diversi scenari simulati (§3.2.2), le quali sono state riportate in Tabella 4.22.

Tabella 4.22 – Condizioni interne riprodotte all'interno delle simulazioni condotte per il periodo estivo

SCENARIO		NO CLIMA		CLIMA	
		ANTE	POST	ANTE	POST
ACR _{AVG}	[h ⁻¹]	1.23	0.69	1.04	0.73
CUCINA	ACR _{MAX} [h ⁻¹]	1.50	1.50	1.50	1.50
	ACR _{MIN} [h ⁻¹]	1.18	0.53	0.95	0.58

Le 4 diverse combinazioni sono stati poi replicate considerando le 4 possibili orientazioni dell'appartamento, generando di fatto 16 scenari complessivi. Essi sono stati poi simulati all'interno dei due modelli di appartamento costruiti: quello relativo all'appartamento M2 e quello relativo all'appartamento M5.

I risultati delle 32 simulazioni complessive sono stati qui di seguito riportati ed analizzati.

A differenza di quanto fatto per la stagione invernale, le simulazioni condotte per la stagione estiva hanno avuto come unico fine l'analisi delle medie giornaliere della temperatura dell'aria interna calcolate durante il mese di luglio per i diversi scenari. Ciò è legato al fatto che simulare il comportamento dinamico di un edificio durante il periodo estivo è un processo molto più complicato che richiede informazioni molto più dettagliate riguardanti la geometria del modello, le condizioni al contorno dell'ambiente esterno e il comportamento da parte degli utenti. Pertanto, sulla base dei dati e del tempo che si avevano a disposizione nello svolgere il lavoro di questa tesi, non si è riusciti ad ottenere dei modelli sufficientemente accurati al punto da poter simulare il comportamento dei

singoli appartamenti considerati durante l'analisi estiva; non è stato quindi possibile analizzare nel dettaglio i rispettivi consumi e livelli di comfort secondo quanto fatto durante l'analisi invernale.

Ciò nonostante, l'analisi condotta sulle temperature ha permesso ugualmente di ottenere alcuni risultati significativi dai quali ripartire in successivi studi per poter migliorare i modelli utilizzati durante le diverse simulazioni.

Partendo dal modello *M2*, relativo ad un appartamento medio-grande collocato al secondo piano, sulla base dei diversi scenari simulati si sono ottenuti i risultati riportati in Tabella 4.23 e in Figura 4.15 e Figura 4.16 rispettivamente per gli appartamenti sprovvisti e provvisti di clima.

Tabella 4.23 – Temperatura dell'aria interna media del mese di luglio ottenuta a partire dal modello M2

TEMPERATURA modello M2	MEDIA SIMULAZIONI				MEDIA SENSORI
	NORD	EST	SUD	OVEST	
NO CLIMA-ANTE [°C]	29.3	28.8	30.2	29.1	30.2
NO CLIMA-POST [°C]	31.6	30.4	32.5	30.4	28.2
CLIMA-ANTE [°C]	28.7	28.4	29.0	28.4	29.8
CLIMA-POST [°C]	29.3	28.7	29.4	28.7	28.7

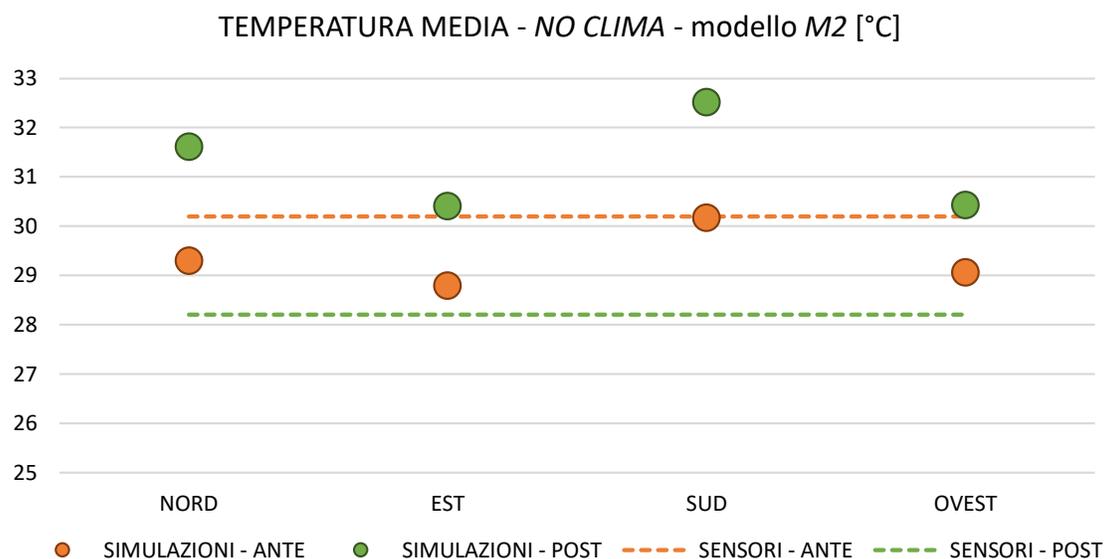


Figura 4.15 – Temperatura dell'aria interna media del mese di luglio ottenuta a partire dal modello M2 per lo scenario NO CLIMA

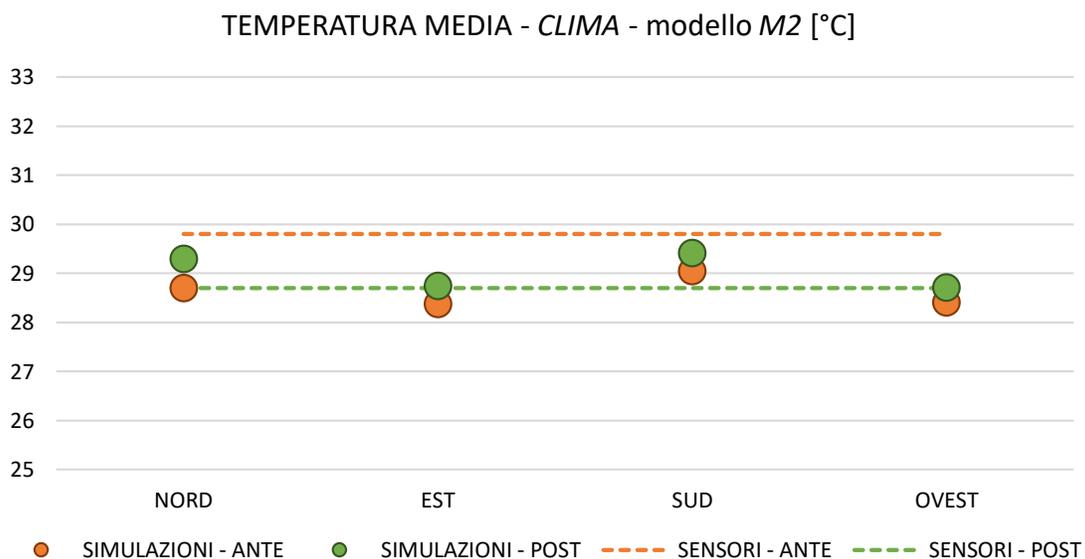


Figura 4.16 – Temperatura dell'aria interna media del mese di luglio ottenuta a partire dal modello M2 per lo scenario CLIMA

La prima considerazione che si può fare sulla base dei risultati ottenuti a partire dal modello M2 è sicuramente legata alla diversa orientazione considerata: notiamo infatti che a seconda di come è orientato il modello dell'appartamento si avrà una temperatura media

più o meno elevata. Tale differenza è massima considerando lo scenario *NO CLIMA-POST* dove orientando il modello a sud si registra una temperatura dell'aria interna mediamente più alta di 2.1 °C rispetto allo stesso modello orientato ad est o ovest.

Considerando ora il confronto tra la situazione di *ANTE* e *POST* retrofit, dalle simulazioni condotte emerge un incremento della temperatura in tutti gli scenari considerati; tale incremento va dagli 1.3 °C ai 2.3 °C per lo scenario *NO CLIMA* e dai 0.3 °C ai 0.6 °C per lo scenario *CLIMA*.

D'altra parte, relativamente al modello M5, relativo ad un appartamento medio-piccolo collocato al piano rialzato, sulla base dei diversi scenari simulati si sono ottenuti i risultati riportati in Tabella 4.24 e in Figura 4.17 e Figura 4.18 rispettivamente per gli appartamenti sprovvisti e provvisti di clima.

Tabella 4.24 – Temperatura dell'aria interna media del mese di luglio ottenuta a partire dal modello M2

TEMPERATURA modello M5	MEDIA SIMULAZIONI				MEDIA SENSORI
	NORD	EST	SUD	OVEST	
NO CLIMA-ANTE [°C]	25.3	25.5	25.5	25.7	30.2
NO CLIMA-POST [°C]	29.6	28.7	29.2	28.5	28.2
CLIMA-ANTE [°C]	25.4	25.6	25.6	25.7	29.8
CLIMA-POST [°C]	28.0	27.6	27.9	27.5	28.7

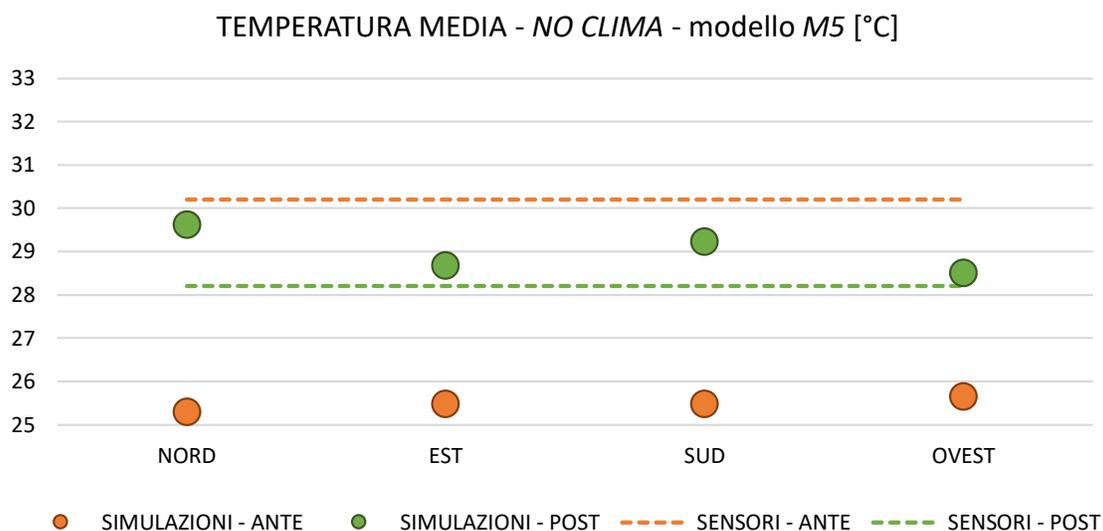


Figura 4.17 – Temperatura dell'aria interna media del mese di luglio ottenuta a partire dal modello M2 per lo scenario NO CLIMA

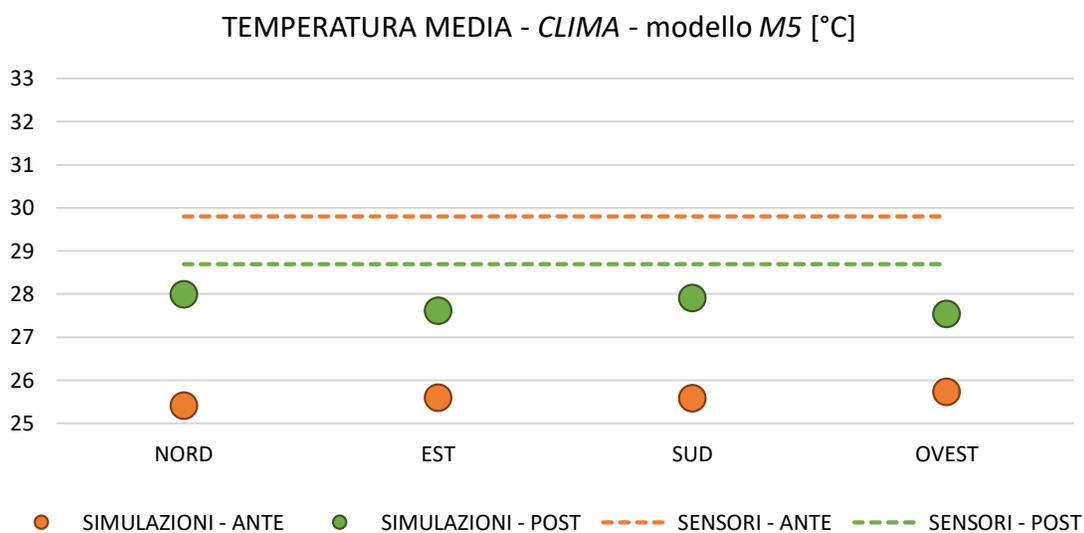


Figura 4.18 – Temperatura dell'aria interna media del mese di luglio ottenuta a partire dal modello M2 per lo scenario CLIMA

Anche in questo caso è possibile notare una diversa temperatura media a seconda dell'orientazione considerata ed anche per il modello M5 la differenza massima la si ha considerando lo scenario *NO CLIMA-POST* dove orientando il modello a nord si registra una temperatura dell'aria interna mediamente più alta di 1.1 °C rispetto allo stesso modello orientato ad ovest.

Passando ora al confronto tra la situazione di *ANTE* e *POST* retrofit, possibile notare nuovamente un incremento della temperatura in tutti gli scenari considerati, incremento che va dai 2.8 °C ai 4.3 °C per lo scenario *NO CLIMA* e dagli 1.8 °C ai 2.6 °C per lo scenario *CLIMA*.

Dal confronto tra i due modelli analizzati emerge un chiaro effetto legato alle diverse orientazioni considerate, tuttavia è impossibile definire un'orientazione più critica rispetto ad un'altra. Il motivo di ciò è che l'orientazione dell'appartamento alla quale corrisponde la temperatura media più elevata dipende da diversi fattori tra i quali la geometria delle diverse zone, la distribuzione dei carichi e l'orientazione delle diverse superfici vetrate.

Analizzando ora il confronto *ANTE* e *POST* retrofit, dalle simulazioni condotte in entrambi i modelli è emerso un incremento della temperatura media a seguito degli interventi di riqualificazione energetica, che si è verificato in ogni scenario considerato. Tale incremento tuttavia non trova corrispondenza da quanto emerso dall'analisi dei dati monitorati dai sensori (**§Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**); in quel caso infatti dal confronto *ANTE* e *POST* retrofit si era registrato un calo di 2.0 °C negli appartamenti sprovvisti di clima e un calo di 1.1 °C in quelli che ne sono provvisti. Una spiegazione di questo diverso trend potrebbe essere legata al fatto che nell'eseguire le simulazioni energetiche attraverso il software *EnergyPlus*, si è fatto affidamento ad un anno di riferimento (*TRY*), pertanto le condizioni climatiche degli scenari di *ANTE* e *POST* retrofit sono rimaste invariate. Ciò non accade nella realtà, in quanto l'anno 2019 (*ANTE* retrofit) è stato più caldo dell'anno 2021 (*POST* retrofit) e ciò potrebbe motivare in parte il calo registrato dai sensori. Chiaramente questa è un'ipotesi, ma che potrebbe trovare conferma

in un eventuale proseguo di questo studio nel quale si considerino le condizioni climatiche reali degli anni considerati nel confronto *ANTE* e *POST* retrofit.

5 Capitolo. Conclusioni

I benefici derivanti da processi di riqualificazione energetica negli edifici in termini di risparmio energetico sono influenzati dal comportamento degli utenti. Infatti, le decisioni e le abitudini in termini di regolazione della temperatura dell'aria interna e di controllo della ventilazione naturale sono determinanti nella valutazione della quota reale di energia risparmiata che in alcuni casi può risultare nettamente diversa da quella stimata nella fase di progettazione dell'intervento.

In questa tesi sono stati analizzati gli effetti derivanti dalla riqualificazione energetica in venti appartamenti di Milano, tenendo conto sia del nuovo involucro edilizio, sia della variazione delle condizioni termo-igrometriche interne rilevata a seguito dell'intervento.

Relativamente all'analisi condotta per il periodo invernale, si è cercato di verificare l'effettiva presenza del fenomeno di *rebound effect* a conferma di quanto già emerso dallo studio condotto in precedenza da Vivian, Carnieletto e De Carli [5]. Per fare ciò si è esteso il campione, aggiungendo agli otto casi di confronto *ANTE* e *POST* retrofit dello studio precedente gli undici nuovi casi dello studio attuale.

Tale verifica ha avuto esito positivo, infatti il monitoraggio delle condizioni termo-igrometriche dell'aria interna ha rilevato dal confronto *ANTE* e *POST* retrofit dei diciannove casi complessivi analizzati un incremento medio della temperatura dell'aria interna di $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, in linea con l'incremento di $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ riscontrato nello studio precedente. Anche relativamente alla portata di ricambio d'aria si è verificato un incremento mediamente di 0.09 h^{-1} ; tuttavia è risultato pari alla metà di quello ottenuto dallo studio precedente, 0.20 h^{-1} . Le motivazioni di tale differenza sono legate con molta probabilità alle diverse condizioni meteorologiche dei due anni considerati nello studio precedente che possono in quel caso aver condotto ad una sovrastima dell'incremento in questione.

Le condizioni degli ambienti interni degli undici appartamenti considerati nell'analisi invernale nelle situazioni di ANTE e POST retrofit sono state poi simulate mediante il software *EnergyPlus*, permettendo così lo studio di alcuni indici rappresentativi del *rebound effect*. Ciò che è emerso è un valore di *Energy Performance Gap (EPG)* compreso tra -22% e $+32\%$, un valore di *Energy Saving Deficit (ESD)* compreso tra -20% e $+23\%$ e un conseguente valore di *Energy Saving Achievement (ESA)* compreso tra 77% e 120% a seconda dell'appartamento e del modello considerati. Questi range evidenziano come la performance dell'edificio a valle della riqualificazione sia molto dipendente dal comportamento degli utenti nei singoli appartamenti. Valori negativi di *ESD* mostrano che in alcuni casi, gli utenti possono ottenere risparmi superiori a quelli attesi. Tuttavia, su ventidue casi complessivi sono stati quattordici quelli caratterizzati da $EPG > 0\%$, $ESD > 0\%$ e conseguente $ESA < 100\%$, a conferma del fatto che esiste una tendenza ad avere rebound effect negli appartamenti riqualificati.

L'analisi ha dimostrato che tale tendenza non è necessariamente legata ad una maggiore richiesta di comfort termico da parte degli utenti. Infatti, un incremento del livello di comfort accade in solo sei dei quattordici casi precedentemente citati. Nei rimanenti otto appartamenti, gli utenti incrementano eccessivamente o la temperatura di setpoint all'interno degli appartamenti, o la portata di ricambio d'aria. Di conseguenza, in questi casi, oltre ad un aumento del fabbisogno energetico, aumentano i periodi di discomfort dell'ambiente interno.

Passando ora all'analisi condotta per il periodo estivo, l'ipotesi iniziale era che l'incremento della resistenza termica apportato all'involucro edilizio a seguito dell'aggiunta dell'isolante potesse costituire un ostacolo alla dissipazione del calore. Se così fosse, si ipotizza di trovare temperature interne agli appartamenti più elevate, piuttosto che aumenti della portata di rinnovo d'aria o delle ore di utilizzo del climatizzatore negli appartamenti che ne sono provvisti.

Dal monitoraggio delle condizioni termo-igrometriche interne tuttavia ciò sembra non accadere, con il confronto *ANTE* e *POST* retrofit condotto in tre appartamenti sprovvisti di clima che ha riportato mediamente un calo netto della temperatura dell'aria interna di $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e un calo della portata di ricambio d'aria di 0.54 h^{-1} . La situazione non cambia se si considerano gli appartamenti provvisti di clima dove, su cinque casi di confronto *ANTE* e *POST* retrofit la temperatura cala in media di $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, la portata di ricambio d'aria cala in media di 0.31 h^{-1} e in aggiunta si registra anche un calo medio delle ore giornaliere di utilizzo del climatizzatore pari a 0.43 h/day .

L'ipotesi iniziale risulta essere pertanto smentita e una possibile motivazione potrebbe essere individuata nelle diverse condizioni climatiche dei due anni analizzati nel confronto *ANTE* e *POST* retrofit. Negli stessi periodi sono stati monitorati anche tre appartamenti già riqualificati, dal cui confronto (*POST-POST*) è emerso un calo della temperatura pari a $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, e quindi non sufficiente a giustificare le riduzioni avvenute a seguito dei lavori di riqualificazione energetica.

Le simulazioni energetiche condotte nel caso estivo si sono pertanto limitate ad analizzare i profili della temperatura nelle condizioni di *ANTE* e *POST* retrofit di diversi scenari per controllare se ci fosse una corrispondenza con quanto emerso dall'analisi dati delle condizioni termo-igrometriche monitorate.

I risultati emersi hanno mostrato un innalzamento della temperatura dell'aria interna dal confronto *ANTE* e *POST* retrofit dai $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ai $4.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a seconda dello scenario considerato. Tale incremento risulta essere coerente con quanto ipotizzato inizialmente, ma come detto non trova un riscontro con le misurazioni reali fatte dai sensori.

Tale discrepanza potrebbe essere legata ad una variazione delle condizioni di utilizzo delle unità residenziali analizzate, a maggior ragione visto il numero ridotto (solo otto) di appartamenti analizzati.

L'effetto legato a una variazione delle condizioni esterne potrebbe aver ulteriormente influenzato quest'analisi, che andrebbe migliorata simulando gli appartamenti considerando le condizioni climatiche reali degli anni presi in esame.

In futuro sarebbe interessante confrontare i risultati emersi dalle simulazioni con i consumi energetici effettivi dei diversi appartamenti, ai quali finora non è stato possibile accedere. Oltre a ciò, sarebbe opportuno estendere ulteriormente il campione (soprattutto per l'analisi estiva), considerando anche edifici locati in altre città o meglio ancora in altre zone climatiche. Questo infatti permetterebbe di analizzare il fenomeno su larga scala, così da poter sensibilizzare gli utenti sul tema in questione.

Bibliografia

- [1] Commissione Europea - Efficienza energetica nell'edilizia, 17 Febbraio 2020. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_it. [Consultato il giorno Dicembre 2022].
- [2] D. Calì, T. Osterhage, R. Streblow e D. Müller, «Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test,» *Energy and Buildings*, n. 127, 2016.
- [3] R. Galvin, «Making the 'rebound effect' more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: Defining the 'energy savings deficit' and the 'energy performance gap',» *Energy and Buildings*, n. 69, 2013.
- [4] S. Moeller, I. Weber, F. Schröder, A. Bauer e H. Harter, «Apartment related energy performance gap –How to address internal heat transfers in multi-apartment buildings,» *Energy and Buildings*, n. 215, 2020.
- [5] J. Vivian, L. Carnieletto e M. De Carli, «Monitoring the change of indoor environmental conditions of refurbished buildings in Milan,» *CLIMA 2022 Conference*, 21 05 2022.
- [6] Presidente della Repubblica Italiana, Decreto, 26 Agosto 1993. [Online]. Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1993/10/14/093G0451/sg>. [Consultato il giorno Dicembre 2022].
- [7] ARPA Lombardia - Meteorologia, [Online]. Available: <https://www.arpalombardia.it/Pages/Meteorologia/Richiesta-dati-misurati.aspx#>. [Consultato il giorno Dicembre 2022].

- [8] Presidente della Repubblica Italiana, Decreto interministeriale - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici, 26 Giugno 2015. [Online]. Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/07/15/15A05198/sg>. [Consultato il giorno Dicembre 2022].
- [9] Presidente della Repubblica Italiana, Decreto interministeriale - Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione degli edifici, 26 Giugno 2015. [Online]. Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/07/15/15A05200/sg>.
- [10] Presidente del Consiglio dei Ministri, Decreto, 3 Novembre 2020. [Online]. Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/11/04/20A06109/sg>. [Consultato il giorno Dicembre 2022].
- [11] Ministero della Salute, Ordinanza, 4 Novembre 2020. [Online]. Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/11/05/20A06144/sg>.
- [12] UNI EN ISO 13788, 2013. [Online]. Available: <https://store.uni.com/uni-en-iso-13788-2013>. [Consultato il giorno Dicembre 2022].
- [13] EnergyPlus - Weather Data, [Online]. Available: <https://energyplus.net/weather>. [Consultato il giorno Dicembre 2022].
- [14] BS ISO 18523 - Parte 2, 2018. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/69633.html>. [Consultato il giorno Dicembre 2022].
- [15] BS EN 15251, 2007. [Online]. Available: <https://store.uni.com/en-15251-2007>. [Consultato il giorno Dicembre 2022].
- [16] BS EN 16798 - Parte 1, 2019. [Online]. Available: <https://store.uni.com/en-16798-1-2019>. [Consultato il giorno Dicembre 2022].

[17] UNI EN ISO 7730, 2006. [Online]. Available: <https://store.uni.com/uni-en-iso-7730-2006>. [Consultato il giorno Dicembre 2022].

Appendice – A

Vengono qui di seguito riportate stratigrafie dei componenti opachi del *condominio M*, modellato mediante il software *Energy Plus* per le simulazioni energetiche, con le relative proprietà dei materiali.

Tab. 1 - Stratigrafia del muro esterno – CV1 nella situazione ANTE retrofit

MURO ESTERNO - CV1				U	[W/(m ² K)]	1.399	
N°	STRATO	s [mm]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kgK)]	μ []
-	superficie interna	-	-	0.130	-	-	-
1	intonaco di calce e sabbia	20	0.8	0.025	1600	1000	10
2	mattono pieno	375	0.798	0.470	1800	840	9
3	intonaco di calce e sabbia	20	0.8	0.025	1600	1000	10
-	superficie esterna	-	-	0.065	-	-	-

Tab. 2 - Stratigrafia del muro appartamento – CV2 nella situazione ANTE retrofit

MURO APPARTAMENTO - CV2				U	[W/(m ² K)]	1.587	
N°	STRATO	s [mm]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kgK)]	μ []
-	superficie interna	-	-	0.130	-	-	-
1	intonaco di calce e sabbia	20	0.8	0.025	1600	1000	10
2	mattono pieno	250	0.781	0.320	1800	840	9
3	intonaco di calce e sabbia	20	0.8	0.025	1600	1000	10
-	superficie esterna	-	-	0.130	-	-	-

Tab. 3 - Stratigrafia del muro interno – PV1 nella situazione ANTE retrofit

MURO INTERNO - PV1				U	[W/(m ² K)]	1.434	
N°	STRATO	s [mm]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kgK)]	μ []
-	superficie interna	-	-	0.130	-	-	-
1	intonaco di calce e sabbia	15	0.8	0.019	1600	1000	10
2	muratura in laterizio	120	0.3	0.400	800	840	7
3	intonaco di calce e sabbia	15	0.8	0.019	1600	1000	10
-	superficie esterna	-	-	0.130	-	-	-

Tab. 4 - Stratigrafia del solaio su cantina nella situazione ANTE retrofit

SOLAIO SU CANTINA				U	[W/(m ² K)]	1.396	
N°	STRATO	s [mm]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kgK)]	μ []
-	superficie interna	-	-	0.170	-	-	-
1	piastrelle in ceramica	15	1.3	0.012	2300	840	999999
2	massetto in calcestruzzo con rete	70	1.49	0.047	2200	880	70
3	soletta in laterizio	200	0.66	0.303	1100	840	7
4	intonaco di calce e sabbia	15	1	0.015	1800	1000	10
-	superficie esterna	-	-	0.170	-	-	-

Tab. 5 - Stratigrafia del solaio ordinario nella situazione ANTE retrofit

SOLAIO ORDINARIO - INTERPIANO				U	[W/(m ² K)]	1.396	
N°	STRATO	s [mm]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kgK)]	μ []
-	superficie interna	-	-	0.170	-	-	-
1	piastrelle in ceramica	15	1.3	0.012	2300	840	999999
2	massetto in calcestruzzo con rete	70	1.49	0.047	2200	880	70
3	soletta in laterizio	200	0.66	0.303	1100	840	7
4	intonaco di calce e sabbia	15	1	0.015	1800	1000	10
-	superficie esterna	-	-	0.170	-	-	-

Tab. 6 - Stratigrafia del muro esterno – CV1 nella situazione POST retrofit

MURO ESTERNO - CV1 (isolato)				U	[W/(m ² K)]	0.211	
N°	STRATO	s [mm]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kgK)]	μ []
-	superficie interna	-	-	0.130	-	-	-
1	intonaco di calce e sabbia	20	0.8	0.025	1600	1000	10
2	mattone pieno	375	0.798	0.470	1800	840	9
3	intonaco di calce e sabbia	20	0.8	0.025	1600	1000	10
4	pannello in lana di roccia	140	0.035	4.000	70	1030	1
5	intonaco plastico per cappotto	5	0.3	0.017	1300	840	30
-	superficie esterna	-	-	0.065	-	-	-

Tab. 7 - Stratigrafia del solaio su cantina nella situazione POST retrofit

SOLAIO SU CANTINA (isolato)				U	[W/(m ² K)]	0.211	
N°	STRATO	s	λ	R	ρ	c	μ
		[mm]	[W/(mK)]	[(m ² K)/W]	[kg/m ³]	[J/(kgK)]	[]
-	superficie interna	-	-	0.170	-	-	-
1	piastrelle in ceramica	15	1.3	0.012	2300	840	999999
2	massetto in calcestruzzo con rete	70	1.49	0.047	2200	880	70
3	soletta in laterizio	200	0.66	0.303	1100	840	7
4	intonaco di calce e sabbia	15	1	0.015	1800	1000	10
5	pannello in lana di roccia	140	0.035	4.000	70	1030	1
6	intonaco plastico per cappotto	5	0.3	0.017	1300	840	30
-	superficie esterna	-	-	0.170	-	-	-

Legenda simboli:

- s : spessore dello strato di materiale
- λ : conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi
- R : resistenza termica
- ρ : massa volumica
- c : capacità termica specifica
- μ : fattore di resistenza alla diffusione del vapore in campo asciutto
- U : trasmittanza termica complessiva

In aggiunta alla descrizione dettagliata delle stratigrafie dei componenti opachi viene riportata anche una tabella contenente i valori tipici della trasmittanza termica per i componenti vetrati (U_g [$W/(m^2K)$]).

Tab. 8 – Trasmittanza termica per i componenti vetrati

Trasmittanza termica per diversi tipi di gas nell'intercapedine				U_g [$W/(m^2K)$]				
Tipo	Vetro	Emissività normale	Dimensioni [mm]	Aria	Argon	Krypton	SF ₆	Xenon
Doppio vetro	Vetro non rivestito (vetro normale)	0.89	4-6-4	3.3	3.0	2.8	3.0	2.6
			4-8-4	3.1	2.9	2.7	3.1	2.6
			4-12-4	2.8	2.7	2.6	3.1	2.6
			4-16-4	2.7	2.6	2.6	3.1	2.6
			4-20-4	2.7	2.6	2.6	3.1	2.6
	Una lastra di vetro rivestita	≤ 0.20	4-6-4	2.7	2.3	1.9	2.3	1.6
			4-8-4	2.4	2.1	1.7	2.4	1.6
			4-12-4	2.0	1.8	1.6	2.4	1.6
			4-16-4	1.8	1.6	1.6	2.5	1.6
			4-20-4	1.8	1.7	1.6	2.5	1.7
	Una lastra di vetro rivestita	≤ 0.15	4-6-4	2.6	2.3	1.8	2.2	1.5
			4-8-4	2.3	2.0	1.6	2.3	1.4
			4-12-4	1.9	1.6	1.5	2.3	1.5
			4-16-4	1.7	1.5	1.5	2.4	1.5
			4-20-4	1.7	1.5	1.5	2.4	1.5
	Una lastra di vetro rivestita	≤ 0.10	4-6-4	2.6	2.2	1.7	2.1	1.4
			4-8-4	2.2	1.9	1.4	2.2	1.3
			4-12-4	1.8	1.5	1.3	2.3	1.3
			4-16-4	1.6	1.4	1.3	2.3	1.4
			4-20-4	1.6	1.4	1.4	2.3	1.4
Una lastra di vetro rivestita	≤ 0.05	4-6-4	2.5	2.1	1.5	2.0	1.2	
		4-8-4	2.1	1.7	1.3	2.1	1.1	
		4-12-4	1.7	1.3	1.1	2.1	1.2	
		4-16-4	1.4	1.2	1.2	2.2	1.2	
		4-20-4	1.5	1.2	1.2	2.2	1.2	

Appendice – B

Vengono qui di seguito presentati i valori delle grandezze monitorate per quanto riguarda l'analisi invernale durante il periodo che va dal 14 novembre al 21 dicembre per gli anni 2018, 2019 e 2021 degli 11 appartamenti considerati.

Tab. 9 - Valori medi diurni della temperatura dell'aria interna per i diversi appartamenti (07:00-22:00)

		T_i				
App		2018	2019	2021	2018 -> 2019	2019 -> 2021
		[°C]				
4 appartamenti riqualificati nella primavera-estate 2019	B2	19.8 ± 0.8	19.6 ± 0.7	20.6 ± 0.7	-0.2	1.0
	M2	21.3 ± 0.7	22.2 ± 0.5	22.3 ± 1.0	0.9	0.1
	M3	21.5 ± 0.6	23.5 ± 0.3	23.1 ± 1.1	2.0	-0.4
	M5	22.7 ± 0.7	20.8 ± 0.6	19.8 ± 0.9	-1.9	-1.0
	B - M	Appartamenti con $\Delta T_i > 0$			2	2
7 appartamenti riqualificati nell'autunno- inverno 2020	F2	18.6 ± 0.6	20.4 ± 0.7	20.6 ± 0.7	1.8	0.2
	F4	19.1 ± 0.7	19.5 ± 0.7	17.8 ± 1.2	0.4	-1.7
	F5	22.1 ± 0.8	19.9 ± 2.2	23.2 ± 0.4	-2.2	3.3
	F8	22.3 ± 0.7	22.0 ± 0.4	19.9 ± 0.8	-0.3	-2.1
	F9	20.8 ± 0.9	20.3 ± 0.7	22.5 ± 0.8	-0.5	2.2
	F11	22.9 ± 0.5	23.0 ± 0.4	23.5 ± 0.4	0.1	0.5
	F12	23.1 ± 0.9	23.2 ± 0.7	23.7 ± 0.7	0.1	0.5
	F	Appartamenti con $\Delta T_i > 0$			4	5

Tab. 10 – Valori medi giornalieri dell'umidità relativa dell'aria interna per i diversi appartamenti

		RH_i				
		2018	2019	2021	2018 -> 2019	2019 -> 2021
App	[%]					
4 appartamenti riqualificati nella primavera-estate 2019	B2	53.7 ± 4.4	59.8 ± 3.4	50.2 ± 5.1	6.1	-9.6
	M2	57.0 ± 3.5	60.5 ± 3.0	58.3 ± 3.1	3.5	-2.2
	M3	47.1 ± 5.7	54.9 ± 4.8	51.3 ± 5.3	7.8	-3.6
	M5	51.8 ± 3.6	52.4 ± 6.1	53.3 ± 5.2	0.6	0.9
	B - M	Appartamenti con $\Delta RH_i > 0$			4	1
7 appartamenti riqualificati nell'autunno- inverno 2020	F2	54.8 ± 8.0	62.2 ± 6.3	57.2 ± 5.8	7.4	-5.0
	F4	50.0 ± 7.7	52.3 ± 5.4	49.7 ± 5.5	2.3	-2.6
	F5	53.9 ± 5.8	59.1 ± 5.4	49.5 ± 2.9	5.2	-9.6
	F8	43.3 ± 6.2	49.4 ± 4.2	47.7 ± 7.5	6.1	-1.7
	F9	52.6 ± 6.4	57.4 ± 3.7	46.7 ± 5.3	4.8	-10.7
	F11	44.6 ± 5.6	50.1 ± 5.5	54.6 ± 5.4	5.5	4.5
	F12	51.3 ± 6.9	58.0 ± 5.4	53.4 ± 6.1	6.7	-4.6
	F	Appartamenti con $\Delta RH_i > 0$			7	1

Tab. 11 - Valori medi giornalieri della portata di ricambio d'aria per i diversi appartamenti

		ACR				
		2018	2019	2021	2018 -> 2019	2019 -> 2021
App	[h ⁻¹]					
4 appartamenti riqualificati nella primavera-estate 2019	B2	0.35 ± 0.10	0.42 ± 0.20	0.37 ± 0.09	0.07	-0.05
	M2	0.18 ± 0.05	0.18 ± 0.05	0.15 ± 0.02	0.00	-0.03
	M3	0.18 ± 0.05	0.12 ± 0.02	0.11 ± 0.01	-0.06	-0.01
	M5	0.25 ± 0.06	0.52 ± 0.24	0.38 ± 0.11	0.27	-0.14
	B - M	Appartamenti con $\Delta ACR > 0$			2	0
7 appartamenti riqualificati nell'autunno- inverno 2020	F2	0.43 ± 0.07	0.42 ± 0.08	0.38 ± 0.08	-0.01	-0.04
	F4	0.51 ± 0.18	0.74 ± 0.35	0.76 ± 0.29	0.23	0.02
	F5	0.31 ± 0.09	0.57 ± 0.36	0.32 ± 0.12	0.26	-0.25
	F8	0.58 ± 0.15	0.67 ± 0.24	0.71 ± 0.17	0.09	0.04
	F9	0.40 ± 0.09	0.55 ± 0.20	0.43 ± 0.08	0.15	-0.12
	F11	0.34 ± 0.07	0.35 ± 0.07	0.19 ± 0.03	0.01	-0.16
	F12	0.30 ± 0.06	0.30 ± 0.06	0.26 ± 0.03	0.00	-0.04
	F	Appartamenti con $\Delta ACR > 0$			5	2

Appendice – C

Vengono qui di seguito presentati i valori delle grandezze monitorate per quanto riguarda l'analisi estiva durante il periodo che va dal 1 al 31 luglio per gli anni 2019, 2020 e 2021 degli 11 appartamenti considerati.

Tab. 12 - Valori medi giornalieri della temperatura dell'aria interna per i diversi appartamenti

		T_i				
App		2019	2020	2021	2019 -> 2020	2020 -> 2021
		[°C]				
3 appartamenti con clima POST-POST	M2	29.2 ± 0.5	29.1 ± 0.5	29.1 ± 0.6	-0.1	0.0
	M3	27.8 ± 0.7	28.2 ± 0.4	27.9 ± 0.6	0.4	-0.3
	M5	28.9 ± 1.2	28.1 ± 0.6	27.7 ± 0.9	-0.8	-0.4
	POST	Appartamenti con $\Delta T_i > 0$			1	0
3 appartamenti senza clima ANTE-POST	F2	29.3 ± 1.8	27.8 ± 1.0	27.6 ± 0.9	-1.5	-0.2
	F8	30.4 ± 1.6	29.6 ± 1.1	28.3 ± 0.6	-0.8	-1.3
	F9	30.9 ± 2.2	29.3 ± 1.2	28.8 ± 0.7	-1.6	-0.5
	No clima	Appartamenti con $\Delta T_i > 0$			0	0
5 appartamenti con clima ANTE-POST	F3	28.9 ± 1.1	28.1 ± 1.3	28.8 ± 0.7	-0.8	0.7
	F4	30.6 ± 1.4	29.9 ± 1.1	28.7 ± 0.6	-0.7	-1.2
	F5	31.7 ± 1.7	30.0 ± 0.9	28.5 ± 0.9	-1.7	-1.5
	F11	27.9 ± 0.8	29.4 ± 1.1	29.1 ± 0.7	1.5	-0.3
	F12	30.0 ± 1.3	29.3 ± 1.1	28.3 ± 0.7	-0.7	-1.0
	Si clima	Appartamenti con $\Delta T_i > 0$			1	1

Tab. 13 - Valori medi giornalieri dell'umidità relativa dell'aria interna per i diversi appartamenti

		RH_i				
		2019	2020	2021	2019 -> 2020	2020 -> 2021
App		[%]				
3 appartamenti con clima POST-POST	M2	50.4 ± 2.1	52.1 ± 2.8	52.8 ± 3.8	1.7	0.7
	M3	53.2 ± 2.4	59.5 ± 2.7	57.1 ± 3.6	6.3	-2.4
	M5	53.4 ± 3.3	56.4 ± 3.4	56.3 ± 3.3	3.0	-0.1
	POST	Appartamenti con $\Delta RH_i > 0$			3	1
3 appartamenti senza clima ANTE-POST	F2	52.4 ± 3.9	59.4 ± 5.8	60.9 ± 4.5	7.0	1.5
	F8	46.4 ± 3.4	49.7 ± 4.9	56.5 ± 2.4	3.3	6.8
	F9	48.2 ± 2.6	53.1 ± 4.7	56.1 ± 3.0	4.9	3.0
	No clima	Appartamenti con $\Delta RH_i > 0$			3	3
5 appartamenti con clima ANTE-POST	F3	50.5 ± 3.3	56.2 ± 5.4	57.6 ± 4.1	5.7	1.4
	F4	44.9 ± 3.1	50.5 ± 3.3	52.8 ± 3.2	5.6	2.3
	F5	44.2 ± 2.7	50.5 ± 0.8	48.8 ± 1.2	6.3	-1.7
	F11	48.8 ± 2.8	56.8 ± 5.2	58.0 ± 4.9	8.0	1.2
	F12	46.6 ± 2.8	51.2 ± 4.0	55.9 ± 4.3	4.6	4.7
	Si clima	Appartamenti con $\Delta RH_i > 0$			5	4

Tab. 14 - Valori medi giornalieri della portata di ricambio d'aria per i diversi appartamenti

		ACR				
		2019	2020	2021	2019 -> 2020	2020 -> 2021
App		[h ⁻¹]				
3 appartamenti con clima POST-POST	M2	0.70 ± 0.36	0.67 ± 0.34	0.57 ± 0.27	-0.03	-0.10
	M3	0.44 ± 0.33	0.30 ± 0.25	0.38 ± 0.27	-0.14	0.08
	M5	0.81 ± 0.42	1.03 ± 0.64	0.90 ± 0.43	0.22	-0.13
	POST	Appartamenti con $\Delta ACR > 0$			1	1
3 appartamenti senza clima ANTE-POST	F2	0.96 ± 0.36	0.71 ± 0.11	0.50 ± 0.08	-0.25	-0.21
	F8	1.69 ± 0.52	1.43 ± 0.32	0.87 ± 0.52	-0.26	-0.56
	F9	1.04 ± 0.53	0.84 ± 0.35	0.69 ± 0.47	-0.20	-0.15
	No clima	Appartamenti con $\Delta ACR > 0$			0	0
5 appartamenti con clima ANTE-POST	F3	1.27 ± 0.46	1.02 ± 0.31	0.62 ± 0.18	-0.25	-0.40
	F4	0.80 ± 0.45	1.03 ± 0.64	0.90 ± 0.49	0.23	-0.13
	F5	1.17 ± 0.50	1.20 ± 0.87	0.91 ± 0.55	0.03	-0.29
	F11	0.80 ± 0.38	0.44 ± 0.21	0.40 ± 0.26	-0.36	-0.04
	F12	1.19 ± 0.41	1.05 ± 0.33	0.79 ± 0.40	-0.14	-0.26
	Si clima	Appartamenti con $\Delta ACR > 0$			2	0

Tab. 15 - Valori medi giornalieri delle ore di utilizzo del clima per i diversi appartamenti

		<i>clima</i>				
		2019	2020	2021	2019 -> 2020	2020 -> 2021
App		[h/day]				
3 appartamenti con clima POST-POST	M2	1.94 ± 1.58	3.76 ± 1.18	2.39 ± 1.22	1.82	-1.37
	M3	1.94 ± 2.29	1.42 ± 1.25	1.03 ± 1.17	-0.52	-0.39
	M5	1.03 ± 1.33	0.16 ± 0.58	0.32 ± 0.75	-0.87	0.16
	POST	Appartamenti con $\Delta clima > 0$			1	1
5 appartamenti con clima ANTE-POST	F3	0.48 ± 0.85	0.71 ± 1.44	1.25 ± 1.15	0.23	0.54
	F4	0.90 ± 0.84	0.05 ± 0.20	0.08 ± 0.45	-0.85	0.03
	F5	1.32 ± 1.19	1.06 ± 1.41	2.13 ± 3.08	-0.26	1.07
	F11	3.84 ± 1.71	0.50 ± 0.65	0.27 ± 0.74	-3.34	-0.23
	F12	2.37 ± 1.51	2.61 ± 1.32	3.00 ± 1.26	0.24	0.39
	Sì clima	Appartamenti con $\Delta clima > 0$			2	4

Appendice – D

Per quanto riguarda il calcolo del *Predicted Mean Vote (PMV)* si è fatto riferimento al modello di Fanger, con il quale si è individuato un indice che permettesse di descrivere in modo oggettivo il livello di comfort di un determinato ambiente.

Il *PMV* è infatti un indice la cui scala va da -3 a $+3$ e i cui valori hanno il significato riportato di seguito:

- $+3$: Molto caldo;
- $+2$: Caldo;
- $+1$: Leggermente caldo;
- 0 : Neutro;
- -1 : Leggermente freddo;
- -2 : Freddo;
- -3 : Molto freddo.

Per il calcolo del *PMV* si fa riferimento alle seguenti equazioni (Eq 1, Eq 2, Eq 3, Eq4):

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \cdot \{(M - W) - 0.00305 [5733 - 6.99(M - W) + -p_a] - 0.42 [(M - W) - 58.15] - 0.000017 M (5867 - p_a) - 0.0014 M (34 + -t_a) - 3.96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} \quad (1)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 (M - W) - I_{cl} \{3.96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} \quad (2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} & \text{per } 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} \leq 12.1 \sqrt{v_a} \\ 12.1 \sqrt{v_a} & \text{per } 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1 \sqrt{v_a} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 1.29 I_{cl} & \text{per } I_{cl} \leq 0.078 \text{ (m}^2\text{K)/W} \\ 1.05 + 0.645 I_{cl} & \text{per } I_{cl} > 0.078 \text{ (m}^2\text{K)/W} \end{cases} \quad (4)$$

dove:

- M è l'attività metabolica [W/m^2];
- W è la potenza meccanica [W/m^2];
- I_{cl} è l'isolamento termico del vestiario [$(m^2K)/W$];
- f_{cl} è il coefficiente di area del vestiario;
- t_a è la temperatura dell'aria [$^{\circ}C$];
- \bar{t}_r è a temperatura media radiante [$^{\circ}C$];
- v_a è la velocità dell'aria [m/s];
- p_a è la pressione parziale del vapor d'acqua [Pa];
- h_c è il coefficiente di scambio termico conduttivo [$W/(m^2K)$];
- t_{cl} è la temperatura superficiale del vestiario [$^{\circ}C$].

Sulla base del PMV è possibile calcolare un secondo indice, ovvero la *Percentage of Person Dissatisfied (PPD)*, ovvero la percentuale di persone insoddisfatte dato un certo valore di PMV (Eq 5).

$$PPD = 100 - 95e^{-0.03353 PMV^4 - 0.2179 PMV^2} \quad (5)$$

In riferimento alla Norma BS EN 15251 [15] è inoltre possibile individuare quattro diverse categorie in funzione del PMV che rappresentano quattro diversi livelli di comfort:

Tab. 16 – Categorie riportate in BS EN 15251 [15]

CATEGORIA	Thermal state of the body as a whole	
	PPD	PMV
I	< 6%	-0.2 < PMV < 0.2
II	< 10%	-0.5 < PMV < 0.5
III	< 15%	-0.7 < PMV < 0.7
IV	> 15%	PMV < -0.7 or PMV > 0.7

Ringraziamenti

Mi è doveroso dedicare questo spazio del mio elaborato alle persone che hanno contribuito, anche solo emotivamente, alla realizzazione dello stesso.

In primis un ringraziamento va al mio relatore, il Prof. Michele De Carli, per l'opportunità che mi ha dato di poter approfondire l'argomento di cui è studio la mia tesi. Un sentito grazie va anche ai correlatori, l'Ing. Laura Carnieletto e l'Ing. Jacopo Vivian, per la loro pazienza e dedizione.

Ringrazio poi i miei genitori, mamma Letizia e papà Bruno, per il costante supporto e appoggio durante l'intero percorso di studi. Un grazie anche ai miei fratelli: Michela, Elena e Pierangelo per essere stati di conforto, sostegno e indispensabili fonti d'aiuto. Inoltre un ringraziamento va ai miei nipoti Marco, Sara, Anna ed Emma per essere stati sempre i miei primi piccoli sostenitori.

Grazie ai miei colleghi di corso e ai miei coinquilini per aver condiviso questi anni universitari tra gioie, pianti e traguardi raggiunti.

A quelle amicizie iniziate in un campo da calcio e cresciute poi al di fuori di esso: grazie anche a voi per avermi insegnato a non arrendermi mai e rialzare sempre la testa dopo una sconfitta.

Ma sopra di tutto un grazie a Giovanna, mia fonte di spensieratezza, per essere entrata nella mia vita con l'amore di chi da sempre ne ha fatto parte.

Infine dedico questa tesi a me stesso, ai miei sacrifici e alla mia tenacia che mi ha permesso di arrivare fino a qui.

