



Ricerca di Sistema elettrico

Validazione sperimentale dei risultati delle simulazioni dinamiche di edifici con PdC e accumuli non convenzionali

G. Salvadori, M. Rocca

Report RdS/PTR(2021)/343

VALIDAZIONE SPERIMENTALE DEI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DINAMICHE DI EDIFICI CON PdC E ACCUMULI NON CONVENZIONALI

G. Salvadori, M. Rocca

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – III annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Pompe di Calore

Linea di attività: PdC con accumuli strutturali: Validazione sperimentale dei risultati delle simulazioni dinamiche di edifici con PdC e accumuli non convenzionali

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Raniero Trinchieri, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi dell'interazione tra edificio e sistema di climatizzazione a PdC, in sistemi residenziali di piccola taglia con accumulo idronico trascurabile o assente"

Responsabile scientifico ENEA: Maurizio Pieve

Responsabile scientifico Università di Pisa: Giacomo Salvadori

| | |
|---|-----------|
| SOMMARIO..... | 4 |
| 1. INTRODUZIONE | 5 |
| 2. DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO | 6 |
| 2.1 LOCALITÀ E DATI CLIMATICI | 6 |
| 2.2 TIPOLOGIA EDILIZIA E NUMERO DI OCCUPANTI | 7 |
| 2.3 TIPOLOGIA COSTRUTTIVA..... | 10 |
| 2.4 CARATTERISTICHE E PRESTAZIONI DEL SISTEMA A POMPA DI CALORE | 11 |
| 3. INTRODUZIONE ALLA CAMPAGNA DI SIMULAZIONI..... | 13 |
| 3.1 VALIDAZIONE DEL MODELLO PER CONFRONTO CON DATI MONITORATI | 13 |
| 3.1.1 Dati monitorati | 13 |
| 3.1.2 Dati simulati..... | 16 |
| 3.2 ANALISI DELL'IMPATTO DI VARIAZIONI DI PARAMETRI OPERATIVI SIGNIFICATIVI SUI CONSUMI ENERGETICI DEL MODELLO VALIDATO DEL CASO DI STUDIO | 18 |
| 3.2.1 Variazioni di parametri climatici | 19 |
| 3.2.2 Variazioni di parametri di funzionamento della pompa di calore | 20 |
| 3.2.3 Variazioni di capacità termica delle strutture edili..... | 21 |
| 4. RISULTATI DELLA CAMPAGNA DI SIMULAZIONI | 23 |
| 4.1 VALIDAZIONE DEL MODELLO PER CONFRONTO CON DATI MONITORATI | 23 |
| 4.2 ANALISI DELL'IMPATTO DI VARIAZIONI DI PARAMETRI OPERATIVI SIGNIFICATIVI SUI CONSUMI ENERGETICI DEL MODELLO VALIDATO DEL CASO DI STUDIO | 28 |
| 4.2.1 Variazioni di parametri climatici | 28 |
| 4.2.2 Variazioni di parametri di funzionamento della pompa di calore | 29 |
| 4.2.3 Variazioni di capacità termica delle strutture edili..... | 30 |
| 5. CONCLUSIONI..... | 32 |
| BIBLIOGRAFIA | 33 |

Sommario

Il presente rapporto si inserisce nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni dell'Università di Pisa, per una attività di ricerca dal titolo: "Analisi dell'interazione tra edificio e sistema di climatizzazione a pompa di calore, in sistemi residenziali di piccola taglia con accumulo idronico trascurabile o assente".

Il rapporto si riferisce alle attività svolte nella Linea di Attività 20 (LA 3.20), che prevede la validazione della capacità previsionale, rispetto al comportamento energetico, della modellazione semplificata (di tipo grey-box, realizzata su piattaforma Matlab/Simulink in precedenti linee di attività) di edifici che utilizzano pompe di calore con accumuli idronici assenti o trascurabili per il servizio di climatizzazione invernale.

La validazione della modellazione semplificata è stata condotta per confronto tra i dati dei consumi energetici (mensili e stagionale) ottenuti dalle simulazioni e quelli monitorati per un edificio caso di studio.

In accordo agli obiettivi generali del progetto di ricerca, la campagna di simulazioni è stata condotta considerando un edificio caso di studio con destinazione d'uso residenziale e riscaldato con sistema a pompa di calore aria-aria. Tale sistema costituisce un esempio significativo dei generatori termici a pompa di calore che sfruttano l'aria esterna come sorgente termica e caratterizzati dal possedere accumulo idronico trascurabile o assente. Le simulazioni sono state condotte su base oraria considerando l'intera stagione di riscaldamento.

I risultati ottenuti dalle simulazioni del caso di studio sono presentati, discussi e confrontati con i dati monitorati, con particolare riferimento al comportamento energetico dinamico del sistema edificio-impianto a pompa di calore.

Per completezza di indagine, una volta compiuta la validazione, la campagna di simulazione è proseguita investigando numericamente i consumi energetici del caso di studio in un anno meteorologico tipico (diverso da quello specifico utilizzato per la validazione) e valutando i risparmi energetici ottenibili sul caso di studio con l'introduzione di alcune delle tecniche giudicate come potenzialmente utili al miglioramento delle performance stagionali in precedenti linee di attività; tra queste lo sfruttamento della capacità termica delle strutture edili come accumulo di tipo non idronico.

1. Introduzione

Il tema affrontato dalla LA 3.20 *“PdC con accumuli strutturali: Validazione sperimentale dei risultati delle simulazioni dinamiche di edifici con PdC e accumuli non convenzionali”* si inserisce nell’ambito del progetto *“Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali”*, work package *“pompe di calore”*. Esso segue e completa ulteriori linee di attività: LA 3.16, LA 3.17, LA 3.18 e LA 3.19. In particolare le LA 3.16 e LA 3.18 [1,2] avevano portato alla definizione di una modellazione semplificata, realizzata su piattaforma Matlab/Simulink, per la valutazione delle prestazioni energetiche dinamiche di edifici riscaldati con sistemi a pompa di calore aria-aria. Attraverso una ampia campagna di simulazioni, condotta sfruttando la modellazione semplificata precedentemente definita, era stato possibile analizzare gli effetti di zona climatica, tipologia abitativa, tipologia costruttiva, profilo di occupazione, caratteristiche operative del sistema a pompa di calore, sui consumi energetici dovuti al riscaldamento invernale di un campione rappresentativo di edifici. Inoltre era stata investigata la possibilità di utilizzare la capacità termica delle strutture edili come sistema di accumulo termico non convenzionale da abbinare all’uso di pompe di calore prive di accumulo idronico.

Per completare lo studio svolto nelle precedenti linee di attività, la modellazione semplificata utilizzata per le analisi effettuate necessitava di una validazione per confronto con dati sperimentali, monitorati su un caso di studio. Il presente report si occupa prevalentemente di riportare quanto compiuto nella LA 3.20 in merito all’attività di validazione. Per completezza una parte del report è dedicata allo sviluppo di specifiche simulazioni post-validazione, effettuate per investigare numericamente i consumi energetici del caso di studio in un anno meteorologico tipico (diverso da quello utilizzato per la validazione) e per valutare i risparmi energetici ottenibili con l’introduzione di specifiche soluzioni tecniche finalizzate al miglioramento energetico del sistema edificio-impianto, suggerite in precedenti linee di attività.

Il report è strutturato in 3 capitoli principali, preceduti da un capitolo introduttivo (Capitolo 1) e seguiti dalle conclusioni (Capitolo 5). Nel Capitolo 2 è riportata una descrizione dettagliata delle caratteristiche rilevanti del caso di studio, i cui consumi energetici monitorati sono stati utilizzati nel processo di validazione, per confrontarli con quelli ottenuti dalle simulazioni. Nel Capitolo 3 sono riportate tutte le informazioni necessarie alla comprensione delle simulazioni condotte, sia in riferimento al loro sfruttamento per l’attività di validazione, sia in riferimento al loro sfruttamento per l’analisi dell’impatto di variazioni di parametri operativi significativi sui consumi energetici del modello validato (analisi post-valutazione). Nel Capitolo 4 sono riportati e discussi dettagliatamente i risultati ottenuti dalle simulazioni condotte per il caso di studio. I risultati sono discussi sono suddivisi per risultati dell’attività di validazione (§ 4.1) e risultati delle analisi post-validazione (§ 4.2). In particolare, i risultati dell’analisi post-validazione sono presentati separatamente per impatto delle variazioni di: parametri climatici (§ 4.2.1), parametri di funzionamento della pompa di calore (§ 4.2.2), capacità termica delle strutture edili (§ 4.2.3).

2. Descrizione del caso di studio

Nel presente capitolo si descrivono le caratteristiche rilevanti del caso di studio selezionato per essere utilizzato nell'attività di validazione della tecnica di modellazione semplificata, per la previsione del comportamento energetico di edifici riscaldati con pompe di calore aria-aria, realizzata in precedenti linee di attività. In particolare i consumi energetici monitorati per il caso di studio, in una stagione invernale completa, vengono confrontati con quelli ottenuti dalle simulazioni impieganti la modellazione semplificata. Per consentire la validazione tramite confronto è stato rintracciato nella letteratura scientifica un caso di studio che combinasse le seguenti caratteristiche salienti: avere destinazione d'uso residenziale, utilizzare esclusivamente un sistema a pompa di calore aria-aria per il riscaldamento invernale, avere un monitoraggio regolare e continuo dei consumi energetici del solo sistema a pompa di calore per almeno una stagione di riscaldamento completa, essere ubicato in una zona climatica dove la stagione di riscaldamento è sufficientemente lunga (novembre-aprile), rendere disponibili sufficienti dati in merito a geometria, esposizione e caratteristiche costruttive dell'edificio, fornire informazioni sulle caratteristiche di occupazione dell'edificio (almeno numero di occupanti e rispettivi periodi di occupazione). In base a quanto sopra indicato, è stato individuato nella letteratura scientifica, e selezionato come caso di studio, quello di una unità abitativa monofamiliare, le cui caratteristiche sono dettagliatamente descritte nei paragrafi successivi.

2.1 Località e dati climatici

L'attività di monitoraggio dei consumi energetici (in edifici sfruttanti di pompe di calore aria-aria per il riscaldamento invernale) da cui sono stati estrapolati i dati utilizzati nel processo di validazione descritto nel presente report, ha coinvolto due lotti di terreno situati in due località dello stato del Massachusetts (USA). Sui lotti sono presenti edifici residenziali monofamiliari caratterizzati da tecniche costruttive simili, stesse dotazioni impiantistiche, ma differenti dimensioni e disposizioni degli ambienti. In particolare, l'edificio utilizzato come caso di studio si trova a Devens (latitudine 42°32'14" Nord, longitudine 71°36'56" Ovest), località posta nelle vicinanze di Worcester cittadina capoluogo dell'omonima contea. Devens appartiene alla zona climatica statunitense 6a (si veda Figura 1).

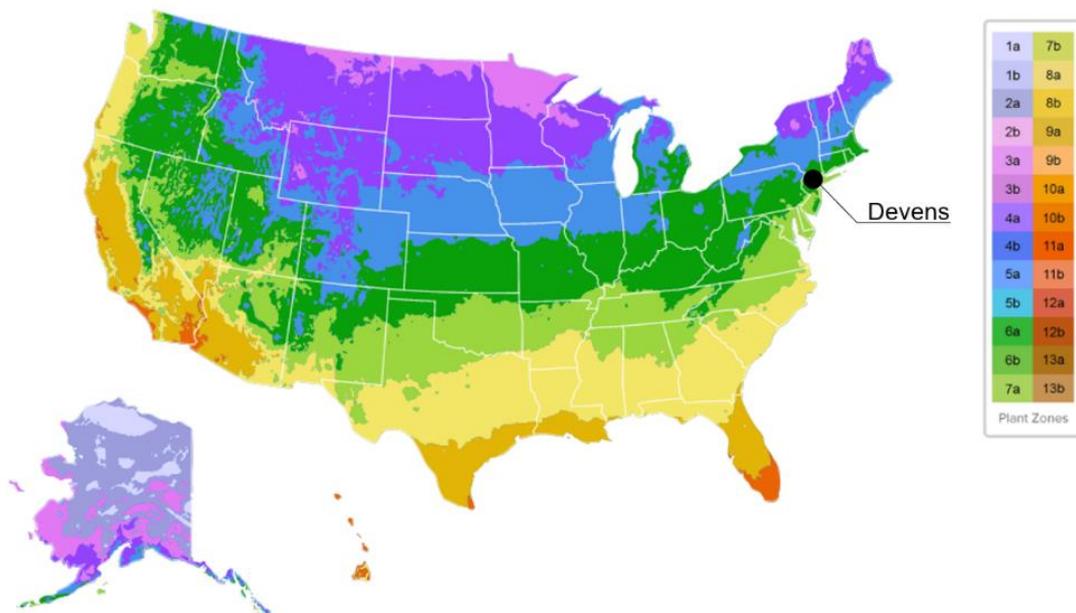


Figura 1. Mappa degli USA, con territorio suddiviso in Zone Climatiche ed indicazione dell'ubicazione di Devens.

La Zona climatica 6a è definita come Freddo-Umida con gradi giorno di riscaldamento, espressi nel sistema anglosassone e riferiti a 65°F, compresi nell'intervallo 7200-9000 °F. Tale intervallo di gradi giorno corrisponde nel Sistema Internazionale, dopo opportuna conversione in Celsius, a circa 4000-5000 °C (calcolati utilizzando la stessa temperatura di riferimento di 18.3°C, cioè 65 °F).

L'attività di monitoraggio dei consumi energetici, per il caso di studio, si è protratta dal dicembre 2011 al febbraio 2014. In questo arco temporale è stato possibile individuare una stagione completa di riscaldamento, con dati dei parametri esterni (in particolare temperatura dell'aria esterna) e consumi energetici monitorati in maniera regolare e continua, cioè la stagione di riscaldamento che va dal 1 novembre 2012 al 30 aprile 2013. Tale stagione è stata considerata come riferimento, ed utilizzata per la validazione sperimentale dei modelli sviluppati nelle precedenti linee di attività. Per questa stagione, in Figura 2 sono mostrati i Gradi Giorno calcolati (su base mensile utilizzando la temperatura di riferimento di 18.3 °C) a partire dai valori misurati per le temperature dell'aria esterna.

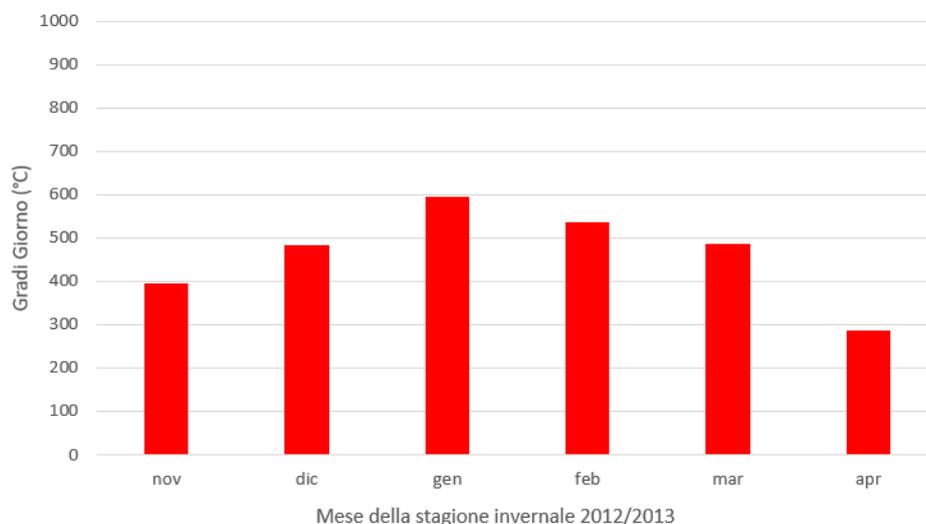


Figura 2. Gradi Giorno mensili della località di ubicazione del caso di studio (Devens, MA, USA) registrati nella stagione di riscaldamento 2012-2013.

I valori dei parametri climatici utilizzati nelle simulazioni finalizzate alla validazione con dati sperimentali dei modelli realizzati, in particolare i valori orari della temperatura dell'aria esterna, sono stati ottenuti da [4] per la cittadina di Worcester, che dista meno di 30 km dall'ubicazione del caso di studio.

2.2 Tipologia edilizia e numero di occupanti

L'edificio utilizzato nella presente attività come caso di studio è inserito in una zona residenziale composta da abitazioni monofamiliari di diverse dimensioni. Nelle Figure 3 e 4 sono riportate rispettivamente la planimetria del lotto in cui è situato l'edificio (l'edificio è identificato con la denominazione "Victorian (Lot3)") ed una immagine fotografica del complesso di edifici.

L'edificio selezionato come caso di studio è di tipo monofamiliare residenziale e si sviluppa su due piani fuori terra (piano terra, piano primo) più un sottotetto ed è caratterizzato da una architettura di tipo "Vittoriana". Solamente i primi due piani sono climatizzati mentre il sottotetto è un vano non riscaldato, utilizzato come ripostiglio. L'edificio presenta un altro locale non riscaldato, attiguo al piano primo, con funzione di garage. In particolare al piano terra sono presenti una cucina, una sala da pranzo

ed un bagno, mentre al piano primo sono presenti un bagno, due camere singole, ciascuna dotata di cabina armadio, ed una camera matrimoniale anch'essa dotata di cabina armadio e bagno ad uso esclusivo.

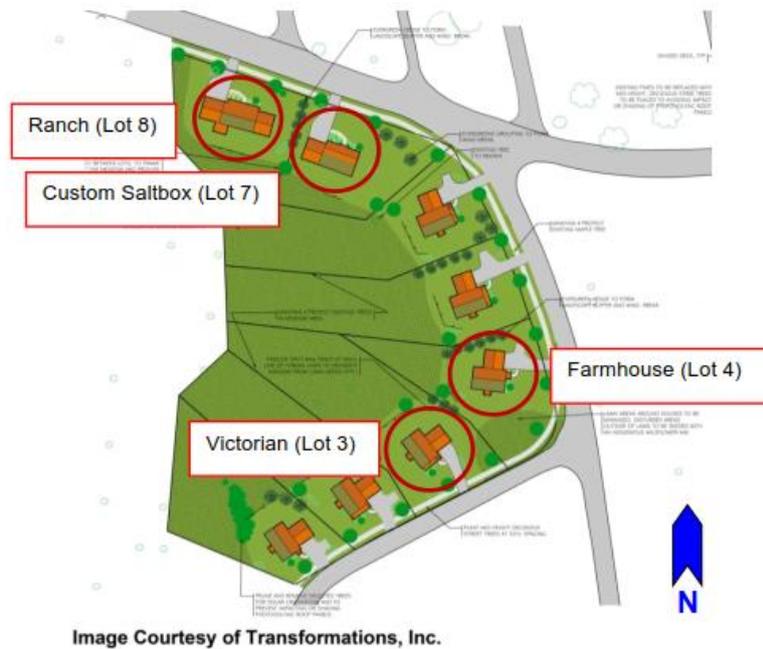


Figura 3. Pianta del lotto di terreno in cui è situato l'edificio oggetto di studio (denominato Victoria Lot 3) [3].



Figura 4. Immagine fotografica prospettica degli edifici appartenenti al lotto di terreno di Devens [3].

In Figura 5 sono mostrate due immagini fotografiche dell'edificio (una frontale ed una posteriore). Le planimetrie dei due piani abitabili sono riportate per completezza nelle Figure 6 e 7. Ogni piano ha una estensione di circa 80 m², per un totale di circa 160 m² di superficie netta. Dalle planimetrie e dalle immagini è possibile anche osservare la disposizione e la consistenza delle superfici finestrate. La superficie disperdente complessiva è di circa 380 m², di cui circa 80 m² di superficie disperdente verso il terreno (solaio contro terra), circa 185 m² verso l'esterno ed i rimanenti verso ambienti non riscaldati. Nel dettaglio, le superfici disperdenti verso l'esterno sono costituite da circa 235 m² di superficie opaca verticale e da circa 25 m² di superficie trasparente verticale (infissi).

Per tutto il periodo di monitoraggio, l'edificio è stato occupato da un nucleo familiare composto da quattro persone (due adulti e due bambini).



Figura 5. Immagini fotografiche dell'edificio utilizzato come caso di studio [3] (sinistra: vista da Sud, destra: vista da Est).

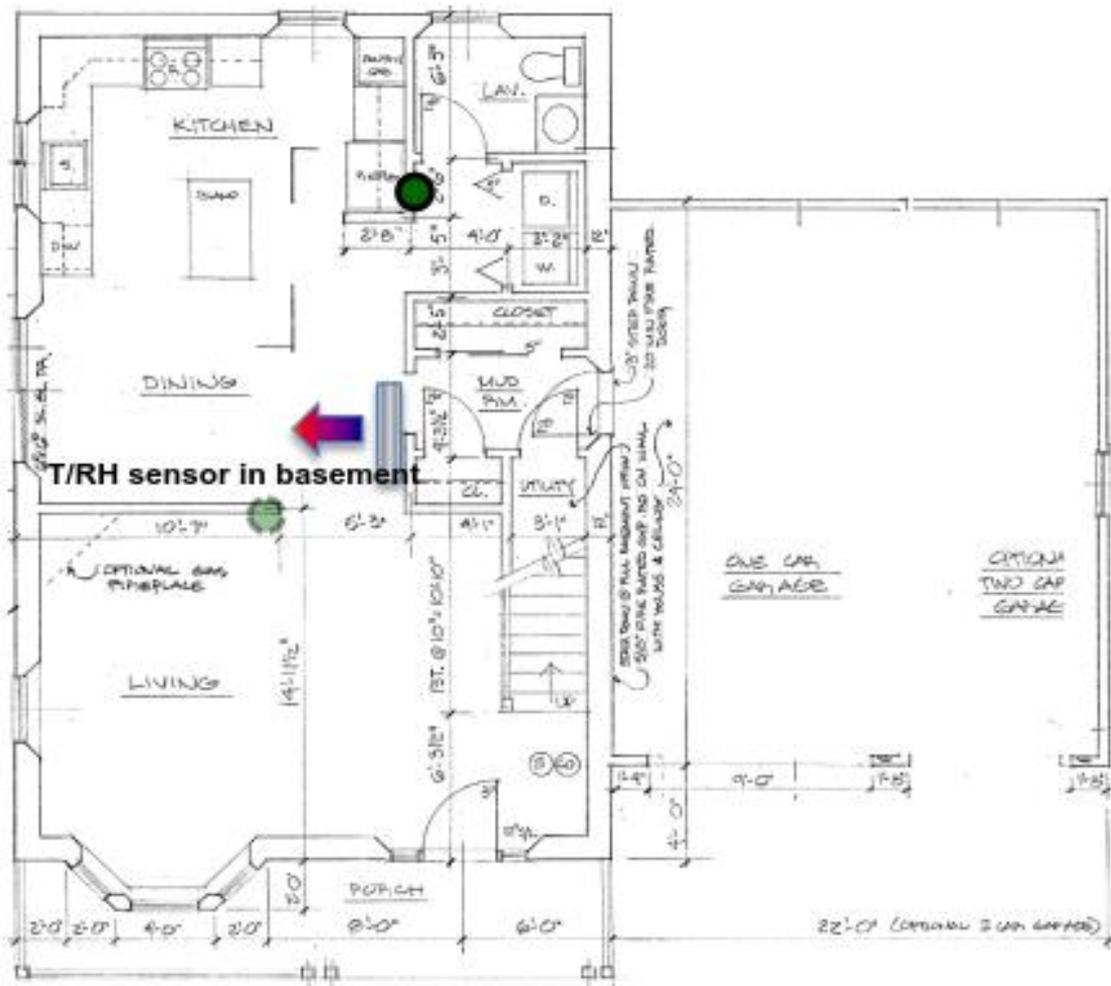


Figura 6. Pianta del piano terra dell'edificio utilizzato come caso di studio [3] (disegno non in scala).

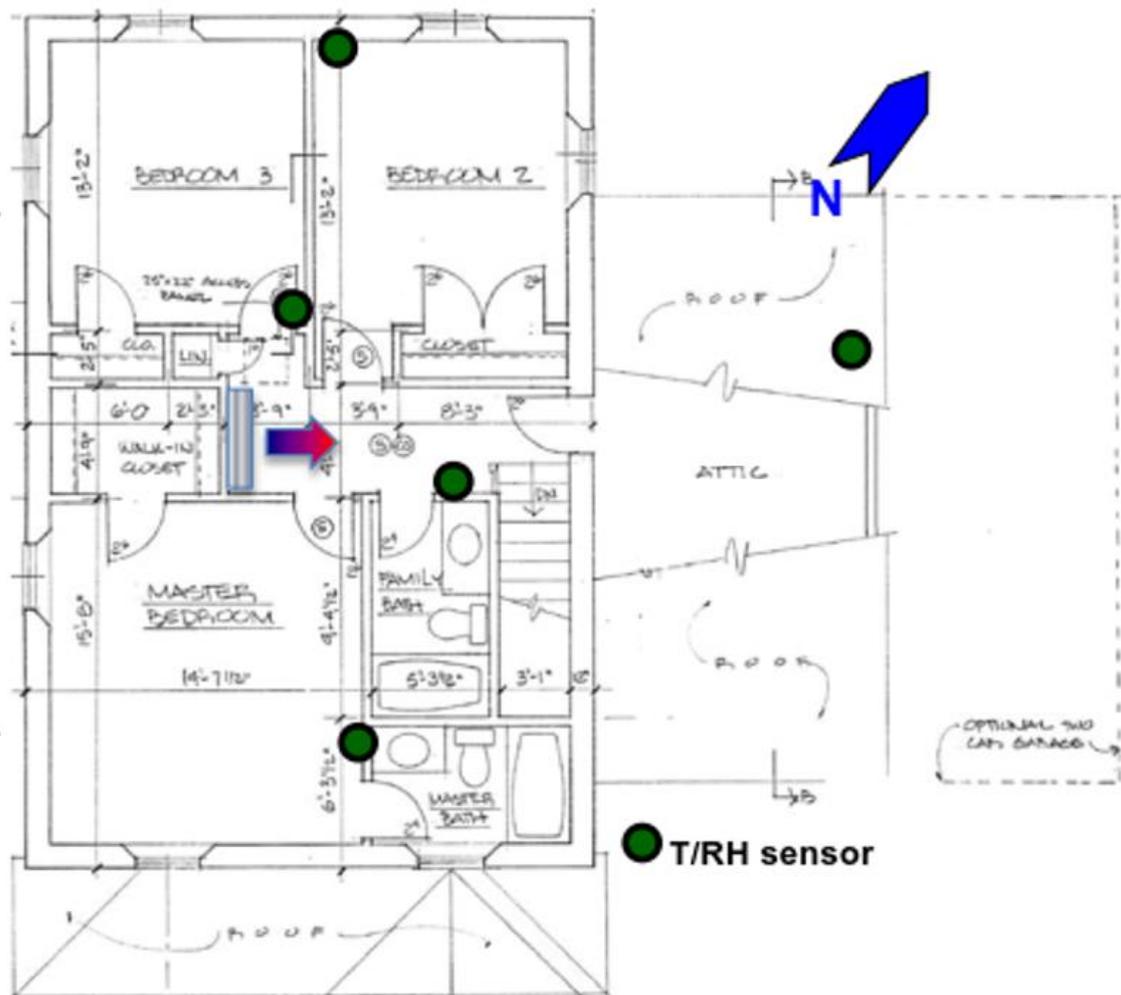


Figura 7. Pianta del piano primo dell'edificio utilizzato come caso di studio (disegno non in scala).

2.3 Tipologia costruttiva

La tipologia costruttiva dell'edificio caso di studio è una tipologia tipica dell'edilizia statunitense, meno diffusa sul territorio nazionale italiano. L'edificio è realizzato con struttura portante in legno e tamponamenti realizzati con tecnica "a secco", cioè pareti leggere costituite da un abbondante strato di materiale isolante e rivestite in pannelli di legno o di cartongesso. In particolare, le pareti perimetrali fuori terra hanno uno spessore di circa 30 cm e sono composte da doppio montante riempite con isolante in schiuma poliuretana a celle aperte. Il paramento interno di tali strutture perimetrali è composto da lastre di gesso, mentre il paramento esterno è realizzato con rivestimento in legno. La trasmittanza termica di tali parti risulta pari a circa $0.12 \text{ W/m}^2\text{K}$, valore sufficientemente contenuto ed adeguato ai climi rigidi come quello della località di ubicazione del caso di studio. Le superfici disperdenti trasparenti sono invece composte da infissi con telaio in PVC e triplo vetro con una trasmittanza termica media di circa $1.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ e fattore di trasmissione solare pari a 0.17. Per quanto riguarda le strutture orizzontali, il solaio contro terra è composto da un basamento in calcestruzzo dello spessore di 10 cm, termicamente isolato con uno spessore di 15 cm di XPS; la trasmittanza termica di tale solaio risulta pari a circa $0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Il solaio verso il sottotetto non riscaldato ha struttura portante in legno ed è tamponato con pannelli in gesso rivestito e isolante termico in fibra di cellulosa di spessore 40 cm, esso presenta una trasmittanza termica di circa $0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$.

2.4 Caratteristiche e prestazioni del sistema a pompa di calore

Al fine di soddisfare il servizio energetico di climatizzazione invernale, l'edificio caso di studio è dotato di un sistema a pompa di calore aria-aria, privo di accumulo termico idronico, di conseguenza adeguato per gli scopi della presente attività di ricerca.

Per provvedere alla climatizzazione dell'intero edificio monofamiliare, il sistema a pompa di calore è composto da due pompe di calore identiche, ognuna a servizio di uno dei piani climatizzati dell'edificio. Le unità esterne delle pompe di calore sono montate a livello del terreno, tuttavia, per evitare il contatto con il terreno (e garantire la protezione da acqua o eventuale neve depositate sullo stesso), le unità sono state collocate su opportuni basamenti provvisti di distanziali in legno (si veda la Figura 8). Ognuna delle 2 pompe di calore aria-aria installata ed utilizzata per la climatizzazione invernale dell'edificio caso di studio è del tipo Mitsubishi FE12NA con potenza elettrica nominale assorbita di 950 W e potenza termica nominale erogata di 4 kW. I dati tecnici essenziali della singola pompa di calore sono riportati in Tabella 1, con particolare riferimento a quelli di interesse per la climatizzazione invernale.



Figura 8. Dettaglio dell'installazione delle unità esterne delle pompe di calore, utilizzate per la climatizzazione invernale del caso di studio [3].

Tabella 1. Caratteristiche tecniche essenziali dalla singola pompa di calore impiegata nel caso di studio (in accordo a dati dichiarati dal produttore) [5].

| | Unità di misura | |
|--|-----------------|-----------------------|
| Denominazione completa | - | Mitsubishi MUZ-FE12NA |
| Fluido refrigerante | - | R410A |
| Potenza termica nominale erogata | kW | 4 |
| Potenza elettrica nominale assorbita | W | 950 |
| Condizioni nominali sorgente interna B.A. (B.U.) | °C | 21 (15.6) |
| Condizioni nominali sorgente esterna B.A. (B.U.) | °C | 8 (6) |
| COP @ Tint=21°C, Text=8 °C | - | 4.2 |
| COP @ Tint=21 °C, Text=-8°C | - | 3.1 |

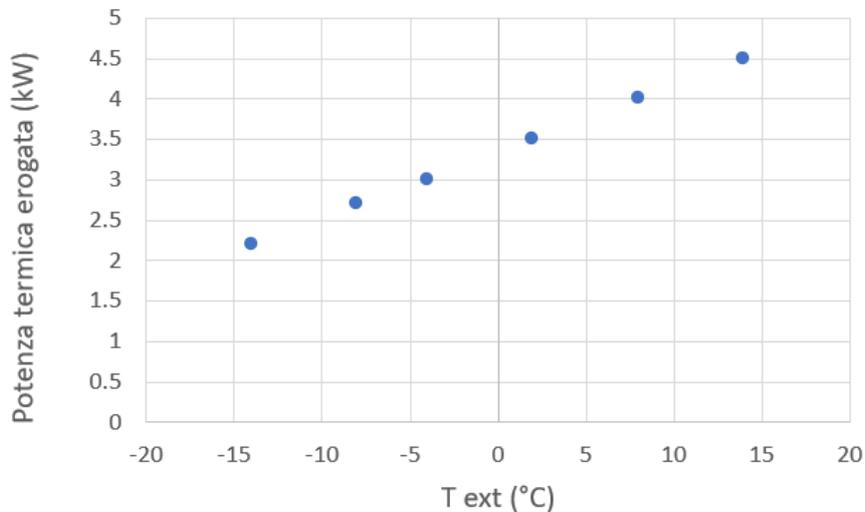


Figura 9. Potenza termica erogata dalla pompa di calore Mitsubishi FE12NA, in funzione della temperatura dell'aria esterna (dati dichiarati dal produttore con temperatura dell'aria interna pari a 21 °C).

Per completezza in Figura 9 è riportato l'andamento della potenza termica erogata dalla singola pompa di calore Mitsubishi FE12NA in funzione della temperatura dell'aria esterna. Si noti che alle condizioni $T_{ext}=-8$ °C e $T_{ext}=8$ °C sono noti anche il valore del COP al 100% del carico, valori indicati nella precedente Tabella 1. L'andamento di Figura 9 mostra che la macchina è in grado di erogare una soddisfacente energia termica anche a temperature dell'aria esterna molto basse, come possono verificarsi nella località di ubicazione del caso di studio. Dai dati indicati dal costruttore, è possibile rilevare che la singola pompa di calore è in grado di modulare fino a circa il 20% della potenza termica nominale (potenza termica nominale a $T_{int}=21$ °C e $T_{out}=8$ °C di 4000 W, potenza termica minima erogabile alle stesse condizioni di 880 W). In mancanza di ulteriori specifiche indicazioni sul funzionamento della pompa di calore ed in particolare sulla modalità di regolazione della stessa, per quest'ultima è stata utilizzata una regolazione con modulazione proporzionale fino al 20% della potenza nominale già proposta ed utilizzata in precedenti linee di attività [2]. Tale modalità di modulazione è descritta con dettaglio, mediante l'uso di una tabella, nel successivo paragrafo 3.2.2

Infine è opportuno osservare che alle due unità esterne delle pompe di calore mostrate nell'immagine di Figura 8 sono collegate due unità interne (una per ciascuna unità esterna). Le unità interne sono collocate rispettivamente al piano terra ed al piano primo e dunque a loro è affidata la climatizzazione di un intero piano cadauna. Siccome l'obiettivo del presente studio è una validazione su base sperimentale della capacità di previsione dei consumi energetici di un modello realizzato in precedenti linee di attività, non saranno fatte considerazioni sulla disomogeneità di temperatura eventualmente presente nei vari locali del caso di studio (per effetto della disposizione delle unità interne), ma sarà considerata esclusivamente la temperatura media presente nell'unità abitativa.

3. Introduzione alla campagna di simulazioni

Al fine di ottenere una validazione su base sperimentale dei modelli di calcolo semplificati sviluppati nelle precedenti linee di attività è stata condotta una campagna di simulazioni, le cui caratteristiche essenziali sono descritte nel presente capitolo. La validazione effettuata riguarda la capacità dei modelli semplificati di prevedere i consumi energetici di edifici con sistema di climatizzazione invernale a pompa di calore, del tipo aria-aria priva di accumulo idronico. La validazione è stata effettuata attraverso un confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni con quelli monitorati su un edificio scelto come caso di studio e descritto nel capitolo precedente. E' opportuno precisare che per consumi energetici in questo documento si intendono i consumi di energia elettrica necessari al funzionamento del sistema a pompa di calore utilizzato per il soddisfacimento del servizio di climatizzazione invernale.

3.1 Validazione del modello per confronto con dati monitorati

3.1.1 Dati monitorati

Al fine di confrontare i risultati delle simulazioni con dati sperimentali riguardanti consumi energetici (monitorati), dalla letteratura scientifica, è stato selezionato un caso di studio che avesse caratteristiche, tipologia e numerosità dei dati monitorati adeguati all'attività. L'edificio selezionato come caso di studio è stato sottoposto ad un monitoraggio nel periodo dicembre 2011 - febbraio 2014. In particolare sono stati monitorati: il consumo elettrico delle pompe di calore, la temperatura e l'umidità relativa all'interno e all'esterno dell'edificio. In questo arco temporale è stata individuata una stagione completa di riscaldamento, con dati monitorati in maniera regolare e continua, cioè la stagione di riscaldamento che va dal 1 novembre 2012 al 30 aprile 2013. Tale stagione è stata considerata come riferimento, ed utilizzata per il confronto tra dati monitorati e dati simulati attraverso i modelli semplificati sviluppati nelle precedenti linee di attività.

Nel caso di studio considerato, le misure di temperatura e umidità relativa interne sono state effettuate con datalogger a batteria, installati a parete ad una altezza di circa 1,10 m dal pavimento e settati con un passo di campionamento di 5 minuti. Il consumo di elettricità delle pompe di calore è stato misurato con specifici "energy meters" autoalimentati, montati nei quadri di alimentazione delle pompe di calore, in grado di acquisire e restituire il consumo di energia elettrica su base oraria. Una immagine fotografica dell'installazione degli energy meters è mostrata in Figura 10.



Figura 10. Dettaglio dell'installazione del sistema di monitoraggio dei consumi elettrici delle pompe di calore del caso di studio [3].

Dai dati monitorati per il caso di studio e messi a disposizione in [3] è possibile ottenere una serie di informazioni utili all'attività di validazione. A titolo di esempio, per il periodo di riferimento considerato (1 novembre 2012 – 30 aprile 2013), in Figura 11 sono riportati gli andamenti monitorati per le temperature interne, per la temperatura esterna ed i consumi elettrici su base oraria delle due pompe di calore aria-aria utilizzate per la climatizzazione invernale. Dagli andamenti riportati, in particolare quello delle temperature interne, è possibile osservare come gli utenti abbiano mantenuto la temperatura di set-point relativamente stabile durante la stagione di riscaldamento, con la maggior parte delle temperature nell'intervallo 65°-72°F (18°C-22°C), questo è un aspetto utile per il processo di validazione.

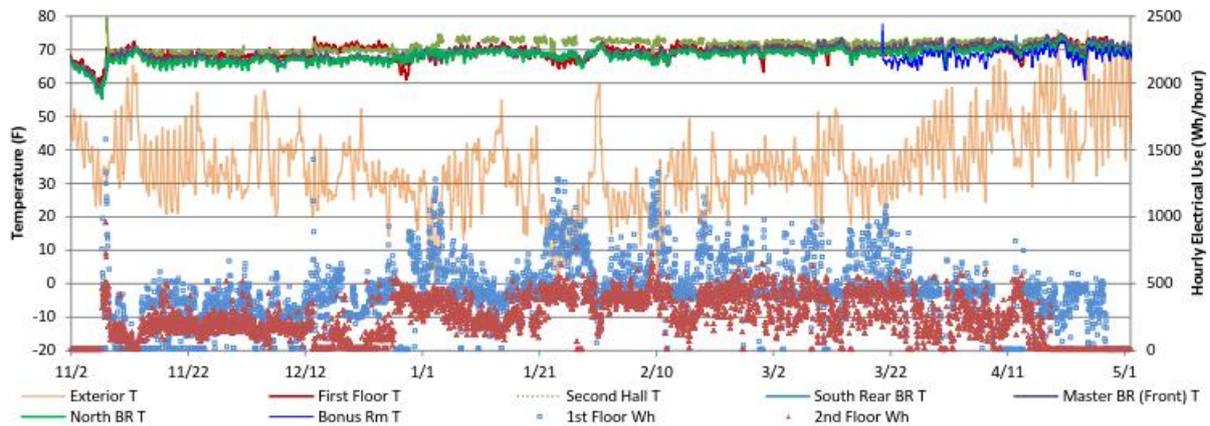


Figura 11. Esempio di dati monitorati nell'inverno 2012-2013 per il caso di studio [3].

Ulteriori informazioni possono essere ottenute ponendo in relazione il consumo energetico delle pompe di calore con il valore medio giornaliero della temperatura esterna dell'aria, come fatto in Figura 12. Come ci si aspetterebbe, il consumo energetico giornaliero aumenta con le temperature più fredde. Tuttavia, i dati mostrano una dispersione sostanziale, oltre che molti giorni a basso carico di potenza a basse temperature. Questo tipo di grafico a dispersione viene spesso creato anche utilizzando la differenza di temperatura interna-esterna (ΔT) come asse orizzontale, ma con un set-point interno fisso, il grafico è essenzialmente lo stesso del grafico della temperatura esterna (supponendo che le pompe di calore siano in grado di garantire il soddisfacimento del valore di set-point).

Di particolare interesse per l'attività di validazione sono i grafici riportati nelle Figure 13 e 14. Nel primo (Figura 13) è tracciato il legame tra la temperatura dell'aria esterna (asse ascisse) ed il consumo energetico orario complessivo delle pompe di calore (asse ordinate). Nell'ipotesi che il consumo energetico orario sia ottenuto attraverso l'erogazione di una potenza elettrica (e termica) costante nell'ora considerata, la regressione ottenuta in Figura 13 (linea rossa tratteggiata) può essere considerata una sorta di firma energetica dell'edificio, in quanto rappresenta la dipendenza tra la temperatura dell'aria esterna e la potenza elettrica utilizzata per il soddisfacimento del servizio di climatizzazione invernale. E' chiaro che tale firma energetica è specifica dell'edificio analizzato sia in termini di caratteristiche del sistema edificio-impianto (in particolare per caratteristiche dell'involucro edilizio e prestazioni delle pompe di calore) sia in termini di comportamento dell'utenza (in particolare per profili di occupazione e settaggio delle temperature di set-point dell'aria interna). L'ipotesi di erogazione di potenza elettrica/termica costante per ogni ora è coerente con il passo (orario) con cui sono stati monitorati i consumi energetici e con cui si dispongono i dati in ingresso e uscita dalle simulazioni. Il punto nel quale la linea di regressione intercetta l'orizzontale a consumo energetico nullo può essere interpretato come temperatura esterna alla quale l'utente non richiede l'attivazione della climatizzazione invernale, evidentemente i carichi termici gratuiti (interni e solari) possono essere

considerati sufficienti per compensare le dispersioni per trasmissione e ventilazione. Tale valore è circa 57 °F (14 °C), valore piuttosto basso ma ancora in linea con quelli tipici di edifici con involucri ad elevate prestazioni di isolamento termico e carichi interni tipici di edifici a destinazione residenziale.

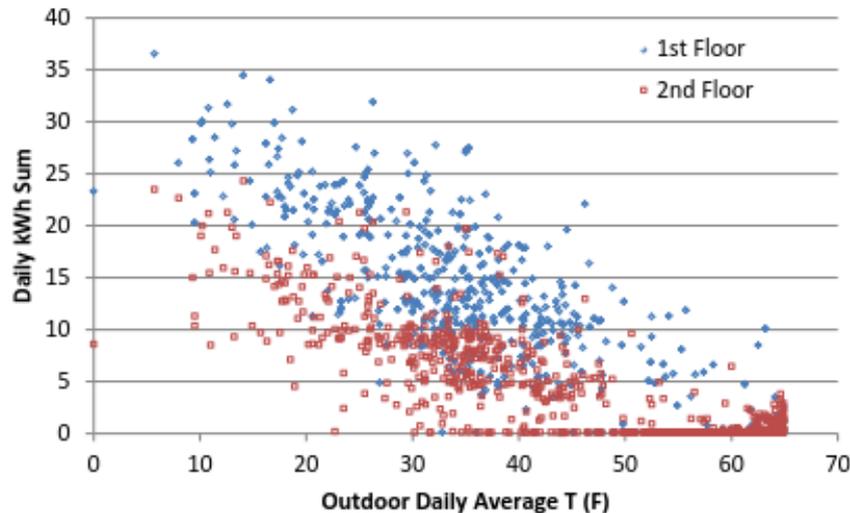


Figura 12. Relazione tra la temperatura media giornaliera dell'aria esterna (°F) e consumo energetico giornaliero delle pompe di calore rilevato nel periodo di riferimento considerato per il caso di studio [3].

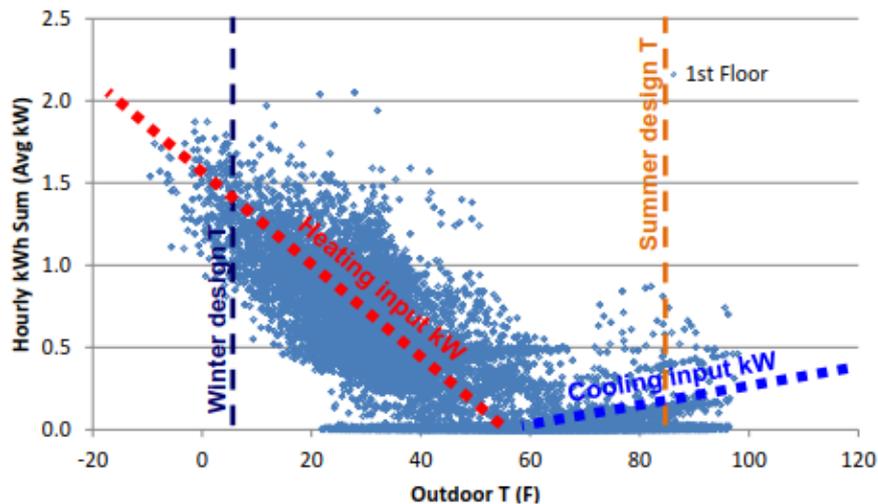


Figura 13. Relazione tra il valore della temperatura dell'aria esterna e quello del consumo energetico per riscaldamento, valutata su base oraria nel periodo di riferimento considerato per il caso di studio [3].

Nel secondo (Figura 14) è riportato l'andamento dei consumi energetici complessivi, ottenuti dal monitoraggio del caso di studio, sui vari mesi del periodo di riscaldamento preso a riferimento. Dalla figura si nota come i mesi di gennaio, febbraio e marzo siano stati i mesi più dispendiosi dal punto di vista energetico per la climatizzazione invernale.

I grafici riportati nelle Figure 13 e 14, riferiti ai consumi energetici complessivi delle due pompe di calore, saranno oggetto di specifici confronti con i dati simulati, nel capitolo successivo, e saranno utilizzati per considerazioni utili all'attività di validazione.

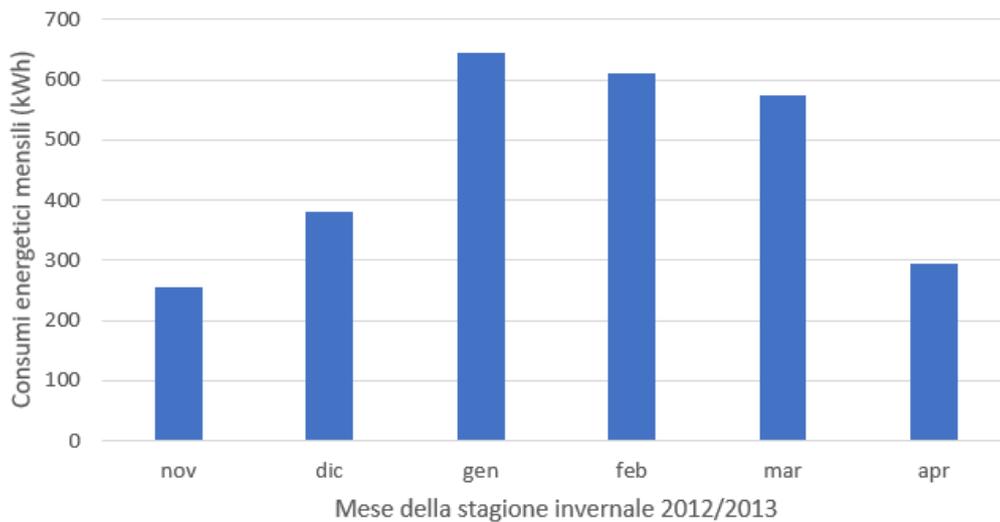


Figura 14. Consumi energetici mensili monitorati nel periodo di riferimento considerato per il caso di studio.

3.1.2 Dati simulati

I dati simulati sono stati ottenuti come risultati di una campagna di simulazioni effettuata sfruttando modelli semplificati, implementati su piattaforma Matlab/Simulink in precedenti linee di attività e dettagliatamente descritti nei documenti [1,2].

I dati in ingresso ai modelli di simulazione, al fine di poter confrontare i risultati dei consumi energetici ottenuti dalle simulazioni con quelli monitorati, sono stati introdotti in maniera coerente ai dati disponibili per il caso di studio. In particolare, in accordo alle caratteristiche dei modelli sviluppati in [1,2], i dati in ingresso possono essere raggruppati in 4 macro categorie: dati meteorologici riguardanti la località di ubicazione del caso di studio (in particolare temperature dell'aria estera e radiazione solare), dati riguardanti l'involucro edilizio (in particolare superfici e caratteristiche termiche delle pareti orizzontali e verticali, opache e trasparenti), dati riguardanti la gestione dell'edificio (in particolare profilo di occupazione), dati riguardanti le prestazioni del sistema impiantistico utilizzato per il riscaldamento (in particolare dati prestazionali delle pompe di calore aria-aria). In riferimento ai dati meteorologici, dovendo effettuare una validazione sulla stagione invernale 2012-2013, sono stati introdotti i dati relativi a quel periodo. A titolo di esempio in Figura 15 è riportato l'andamento della temperatura dell'aria esterna della località di ubicazione del caso di studio nel periodo di riferimento (1 novembre 2012 – 30 aprile 2013). Per esigenze computazionali, nel modello vengono introdotti i dati meteorologici relativi ad un ciclo biennale completo (da 1 gennaio a 31 dicembre dell'anno successivo) estrapolando dai dati in uscita solo quelli relativi al periodo invernale analizzato. In riferimento ai dati sull'involucro edilizio, sono state sfruttate le informazioni disponibili in [3], in particolare rispettando caratteristiche, superfici e coefficienti di trasmissione globale di scambio termico descritti nel precedente capitolo. In riferimento ai dati prestazionali delle pompe di calore aria-aria sono state utilizzate le informazioni tecniche messe a disposizione dal costruttore delle macchine e riepilogate nel capitolo precedente. In particolare la procedura di calcolo utilizzata per la determinazione degli indicatori prestazionali delle pompe di calore aria-aria al variare delle temperature delle sorgenti termiche (interna ed esterna) è effettuata in accordo a [6,7] e dettagliatamente descritta in [2]. Per le pompe di calore è stato considerato un profilo di modulazione della potenza elettrica del compressore di tipo proporzionale, basato sulla differenza di temperatura ΔT fra la temperatura di set-point e la temperatura dell'aria interna, secondo lo schema indicato in

Tabella 2. In riferimento ai profili di occupazione, non si avevano informazioni significative per il caso di studio, eccetto che l'edificio è stato occupato (per tutto il periodo analizzato) da un nucleo familiare composto da 4 persone. In assenza di informazioni più precise, per il profilo di occupazione è stato utilizzato quello risultato maggiormente frequente per famiglie da 4 persone, in accordo ai risultati delle precedenti linee di attività [1]. Allo specifico profilo di occupazione sono associati apporti termici interni, calcolati in accordo alla normativa tecnica secondo la procedura descritta in [2]. In Figura 16 è riportato l'andamento giornaliero su base oraria degli apporti termici interni per il giorno tipo feriale utilizzato nelle simulazioni.

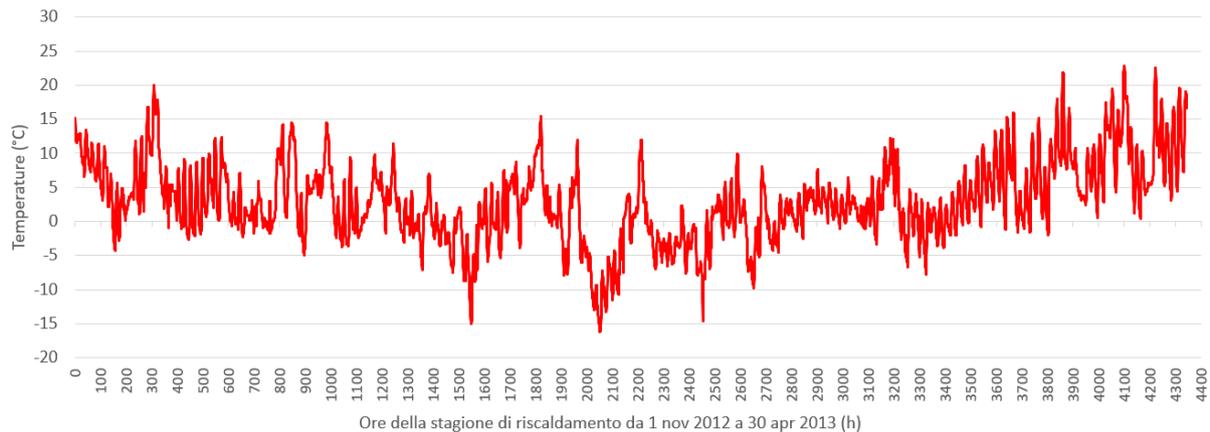


Figura 15. Andamento della temperatura dell'aria esterna nel periodo di riferimento analizzato per la località di ubicazione del caso di studio.

Tabella 2 – Intervalli di modulazione della potenza della pompa di calore.

| ΔT °C | Modulazione |
|---|-------------|
| $\Delta T > 3^{\circ}\text{C}$ | 100% |
| $2.5^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 3^{\circ}\text{C}$ | 80% |
| $2.0^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 2.5^{\circ}\text{C}$ | 60% |
| $1.0^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 2^{\circ}\text{C}$ | 40% |
| $0^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 1.0^{\circ}\text{C}$ | 20% |
| $\Delta T \leq 0^{\circ}\text{C}$ | 0% |



Figura 16 – Andamento degli apporti termici dovuti alla presenza di persone per il giorno tipo (orario in ascisse, apporto in W in ordinate).

3.2 Analisi dell'impatto di variazioni di parametri operativi significativi sui consumi energetici del modello validato del caso di studio

Una volta effettuata la validazione del modello per il caso di studio, paragonandone i consumi energetici ottenuti con quelli monitorati ed ottenendo risultati soddisfacenti, si è proceduto applicando al sistema edificio-impianto del caso di studio alcune variazioni di parametri operativi significativi. Tali variazioni sono state applicate con l'obiettivo di analizzare l'impatto da loro prodotto sui consumi energetici del sistema a pompa di calore aria-aria. Le variazioni hanno riguardato i seguenti parametri:

- parametri climatici;
- parametri di funzionamento della pompa di calore;
- capacità termica delle strutture edili.

I parametri climatici sono stati fatti variare per svincolare i risultati ottenuti dalla specifica stagione di riscaldamento considerata ai fini della validazione (stagione invernale 2012-2013). Per questo motivo sono stati utilizzati anche dati meteorologici di un anno tipo. I parametri di funzionamento e la capacità termica delle strutture edili sono stati fatti variare, a partire dal modello ottenuto con l'anno meteorologico tipo, per verificare il risparmio energetico conseguibile sul riscaldamento invernale, con l'utilizzo di soluzioni che, nelle precedenti linee di attività [2], erano state individuate come utili per il miglioramento della performance energetica stagionale. Le variazioni introdotte ed analizzate sono descritte dettagliatamente nei sotto-paragrafi successivi.

I confronti dei consumi energetici sostenuti su base mensile e stagionale per il riscaldamento invernale, non possono prescindere da alcune considerazioni in merito al mantenimento, nel volume riscaldato, di intervalli di temperatura dell'aria interna considerati di comfort, per questo motivo i seguenti indicatori vengono introdotti e successivamente utilizzati per il commento di alcuni dei risultati ottenuti.

- N – numero di ore in cui la temperatura dell'aria interna rimane nell'intervallo contenuto tra 19 °C e 22 °C, tipico intervallo di riferimento per il soddisfacimento del comfort termico in destinazioni d'uso residenziali [9,10].
- ME – Scostamento medio tra i valori della temperatura dell'aria interna ottenuti dalle simulazioni con passo orario ed il valore di riferimento, calcolato come:

$$ME = \sum_{t=1}^n \frac{R_{v,t} - F_{v,t}}{n}$$

- MAD - Scostamento medio, in valore assoluto, tra i valori della temperatura dell'aria interna ottenuti dalle simulazioni con passo orario ed il valore di riferimento, calcolato come:

$$MAD = \sum_{t=1}^n \frac{|R_{v,t} - F_{v,t}|}{n}$$

Nelle definizioni sopra riportate, i simboli hanno i seguenti significati: $R_{v,t}$ = valore di riferimento per la temperatura dell'aria interna (in questo studio assunto pari a 20 °C), $F_{v,t}$ = valore della temperatura dell'aria interna ottenuto dalle simulazioni alla generica ora t , n = numero totale delle ore considerate.

I valori dei parametri sopra definiti sono stati calcolati per una settimana di riferimento della stagione di riscaldamento (prima settimana di gennaio, mese più freddo dell'anno per la località di ubicazione del caso di studio), in modo da considerare lo scostamento delle temperature interne dalle condizioni

di comfort su un periodo di lunghezza significativa e nelle condizioni maggiormente critiche, dove il sistema edificio-impianto deve comunque essere in grado di garantire il benessere termico degli utenti.

3.2.1 Variazioni di parametri climatici

Al fine di svincolare i risultati ottenuti dalle simulazioni del caso di studio dalla specifica stagione di riscaldamento considerata per la validazione (stagione invernale 2012-2013), l'analisi dei consumi energetici per la climatizzazione invernale del caso di studio è stata ripetuta anche per un anno meteorologico tipo. Per questo motivo sono stati utilizzati specifici dati meteorologici relativi ad un anno tipico per la località di Devens. Per ricavare i dati dell'anno meteorologico tipico è stato utilizzato il database fornito dal Joint Research Center (JRC) [8]: il database risulta essere completo, funzionale ed adatto al tipo di simulazioni in oggetto [2]. La struttura dei dati meteorologici ottenuti da [8] per Devens si compone di 12 "mesi-tipo", l'intervallo temporale sui cui essi sono stati identificati è compreso tra l'anno 2005 e l'anno 2015. I parametri ambientali che verranno utilizzati nelle successive campagne di simulazione relativamente ai mesi tipo sono in particolare: temperatura dell'aria esterna (°C), radiazione solare incidente su superficie orizzontale (W/m^2) e radiazione solare incidente su superficie verticale (W/m^2) con differenti esposizioni. I valori di tali parametri sono stati tutti ricavati con passo orario.

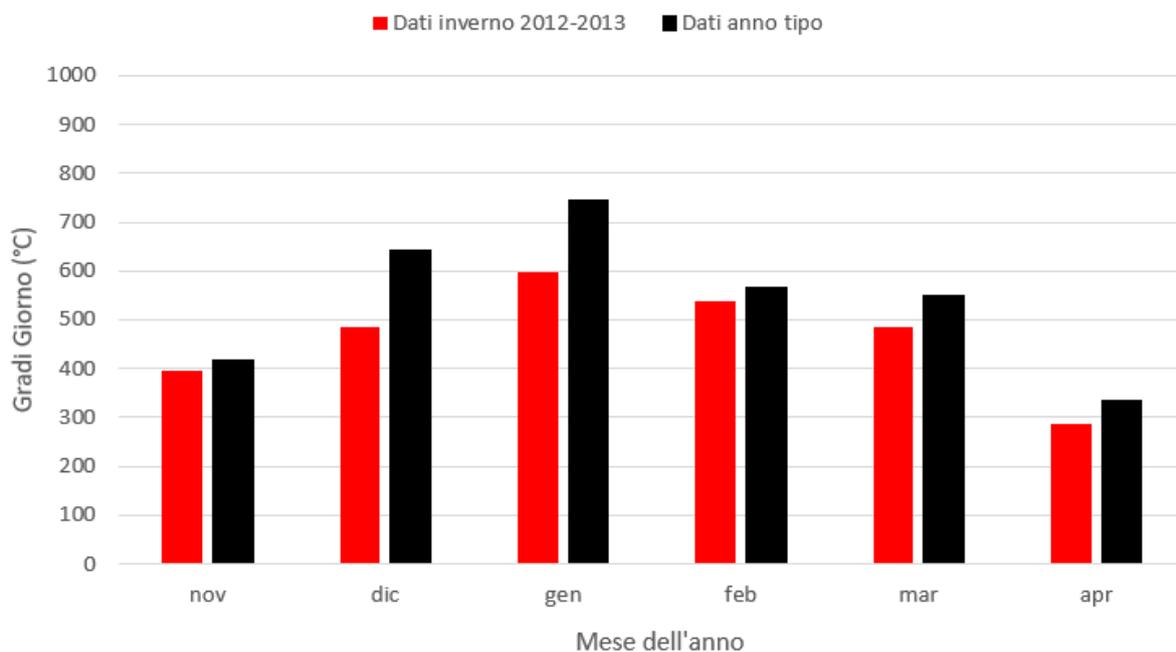


Figura 17 – Gradi giorno mensili per la località di ubicazione del caso di studio nella stagione utilizzata per la validazione e nell'anno meteorologico tipo.

In Figura 17 è riportato un confronto tra i gradi giorno, calcolati su base mensile, tra la stagione di cui si disponevano dati monitorati, e dunque utilizzata per la validazione, e quella dell'anno meteorologico tipo. Dalla Figura 17 si osserva come la stagione invernale utilizzata per la validazione sia stata relativamente "calda" rispetto alla stagione invernale tipo. I gradi giorno totali, calcolati sul periodo 1 novembre – 30 aprile, risultano 2785 °C per la stagione 2012-2013 e 3253 °C per l'anno tipo. Con differenze marcate soprattutto nei mesi di dicembre, gennaio e marzo. Le differenze sulla temperatura dell'aria fra stagione 2012-2013 e anno tipo sono evidenti anche dall'analisi della Figura 18, dove sono

riportate (sempre sul periodo 1 novembre – 30 aprile) le ore complessive (ascisse) in cui la temperatura dell'aria esterna rimane nell'intorno di ± 0.5 °C da un valore prefissato (ordinate). Dalla Figura 18 si osserva come la moda della stagione 2012-2013 risulti pari a 3 °C (mentre quella dell'anno tipo risulti pari a 0 °C) con occorrenze più elevate nell'intervallo tra -1 e 8 °C rispetto all'anno tipo che al contrario ha occorrenze più elevate della stagione 2012-2013 nell'intervallo tra -2 e -15 °C.

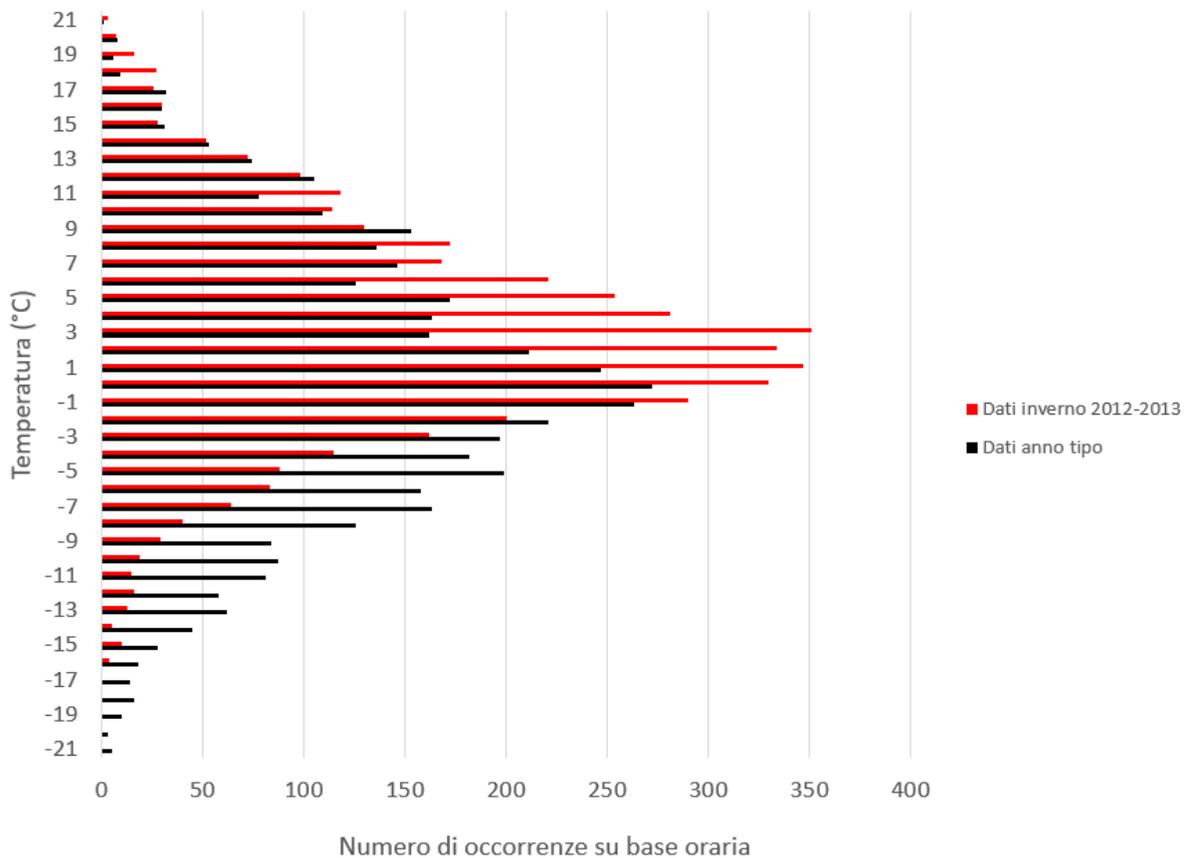


Figura 18 – Numero di occorrenze su base oraria dei valori di temperatura dell'aria esterna per il periodo 1 novembre- 30 aprile nella stagione invernale 2012-2013 ed in quella dell'anno tipo.

3.2.2 Variazioni di parametri di funzionamento della pompa di calore

Al fine di valutare l'impatto di alcuni rilevanti parametri di funzionamento del sistema a pompa di calore aria-aria sui consumi energetici stagionali, sono state ripetute alcune simulazioni del comportamento energetico dinamico del caso di studio. La valutazione ha l'obiettivo di confermare tendenze osservate nelle precedenti linee di attività ed eventualmente confermare, anche per il caso di studio, le indicazioni progettuali precedentemente ottenute [2]. I parametri di funzionamento di cui sono state analizzate le variazioni sono i seguenti:

- taglia della pompa di calore;
- modulazione della pompa di calore.

Tali parametri sono stati scelti tra quelli con maggiori implicazioni progettuali e poiché il loro impatto può risultare significativo, in accordo a quanto indicato in [2].

Per quanto riguarda la taglia della pompa di calore, oltre a quella descritta nel paragrafo 2.4, è stata utilizzata nelle simulazioni anche la taglia inferiore in cui è disponibile il modello di pompa di calore del

caso di studio, cioè quella con potenza elettrica nominale assorbita di 700 W e potenza termica nominale erogata di 3.2 kW. Il COP e la sua variazione con le temperature delle sorgenti di scambio termico sono state lasciate invariate rispetto al caso della pompa di calore realmente usata nel caso di studio.

Per quanto riguarda la modulazione della pompa di calore, oltre ad una logica di regolazione proporzionale fino al 20% della potenza nominale (MOD20), è stata utilizzata nelle simulazioni anche una logica di regolazione proporzionale fino al 10% della potenza nominale (MOD10). Le logiche di regolazione proporzionali, basati sulla differenza fra la temperatura dell'aria interna e la temperatura impostata come set-point, sono descritte dettagliatamente nella Tabella 3. Le logiche descritti nella tabella erano state già utilizzate nelle precedenti linee di attività [2].

Tabella 3 – Descrizione delle differenti logiche di regolazione proporzionali, prese in considerazione per la modulazione della pompa di calore

| ΔT | MOD20 | MOD10 |
|---|-------|-------|
| $\Delta T > 3^{\circ}\text{C}$ | 100% | 100% |
| $2.5^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 3.0^{\circ}\text{C}$ | 80% | 65% |
| $2.0^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 2.5^{\circ}\text{C}$ | 60% | 40% |
| $1.0^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 2.0^{\circ}\text{C}$ | 40% | 25% |
| $0.0^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 1.0^{\circ}\text{C}$ | 20% | 10% |
| $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$ | 0% | 0% |

ΔT rappresenta la differenza di temperatura tra la temperatura di set-point e quella effettiva dell'aria interna

3.2.3 Variazioni di capacità termica delle strutture edili

Uno degli obiettivi delle precedenti linee di attività era quello di analizzare la possibilità di sfruttare la capacità termica delle strutture edili (pareti verticali e orizzontali opache), come sistema di accumulo dell'energia termica per sistemi a pompa di calore sprovvisti di accumulo idronico, come avviene nel caso delle pompe di calore aria-aria. La possibilità di sfruttare la capacità termica delle strutture edili è stata investigata anche per il caso di studio utilizzando due tecniche in combinazione, in accordo ai risultati ottenuti in [2]: la prima tecnica utilizza una modalità di gestione dell'accensione/spegnimento della pompa di calore differente dalla modalità utilizzata per tutte le simulazioni precedenti del caso di studio, la seconda utilizza l'incremento della capacità termica della parete.

Per quanto riguarda la modalità di gestione avanzata della pompa di calore, essa è stata introdotta, descritta e utilizzata in [2], per completezza essa è rappresentata schematicamente nel diagramma di flusso di Figura 19. Tale modalità è stata pensata come una delle più semplici per far funzionare la pompa di calore in condizioni climatiche favorevoli (in questo studio rappresentate da una differenza tra le temperature delle sorgenti termiche interna ed esterna minore o uguale a 5°C) indipendentemente dalla presenza o meno di occupanti nell'unità immobiliare e con un set-point maggiorato (in questo studio impostato a 24°C). La modalità di gestione si differenzia da quella semplice, utilizzata per le altre simulazioni, che è basata esclusivamente sul controllo della presenza di almeno un utente all'interno dell'edificio: se il controllo da esito positivo, la pompa di calore viene mantenuta accesa ed il set-point impostato al valore prestabilito, altrimenti la pompa di calore viene lasciata spenta. Ciò consente di ottenere un caricamento termico delle strutture edili in corrispondenza di condizioni favorevoli per lo scambio termico con le sorgenti interna ed esterna.

Per quanto riguarda l'incremento della capacità termica delle pareti, esso è stato ottenuto aggiungendo uno strato sul lato interno della parete verticale (quindi direttamente a contatto con l'aria interna), caratterizzato nei modelli RC da una resistenza termica trascurabile e da una capacità termica tale da incrementare la capacità termica originaria della parete. Come fattori di incremento della capacità termica originaria è stato utilizzato il valore massimo considerato in [2], cioè 100. Si noti che l'incremento della capacità termica di un fattore cento è molto consistente e potrebbe considerarsi rappresentativo dell'utilizzo di materiali innovativi come quelli che sfruttano il cambiamento di fase delle sostanze in essi contenute [11,12]. Tali materiali sono caratterizzati da capacità termiche tendenti all'infinito, negli intervalli di temperatura per i quali si ha il cambiamento di fase della sostanza in esso contenuta e fino al completo passaggio di stato della stessa.

Riepilogando le configurazioni analizzate in questo studio, oltre alla configurazione utilizzata per la validazione e dunque fedele alle reali condizioni operative, sono:

- Modalità di gestione avanzata della pompa di calore;
- Modalità di gestione avanzata della pompa di calore ed incremento della capacità termica delle pareti.

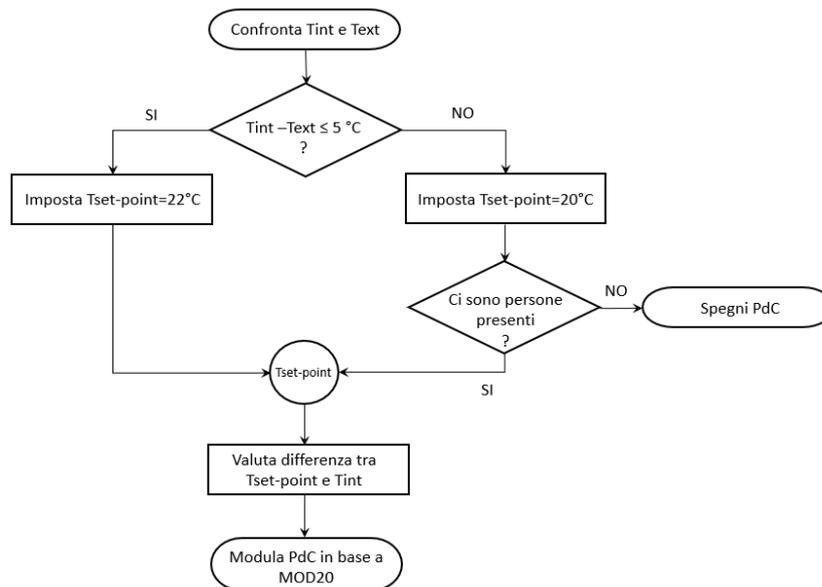


Figura 19 – Diagramma di flusso della gestione avanzata della pompa di calore, utilizzata per analizzare il possibile sfruttamento della capacità di accumulo delle pareti

4. Risultati della campagna di simulazioni

In questo capitolo sono riportati e commentati i risultati ottenuti dalla campagna di simulazioni condotta in questa linea di attività. La prima parte del capitolo è dedicata all'obiettivo principale della presente linea di attività, cioè la validazione, per confronto con dati monitorati sperimentalmente, della capacità predittiva dei consumi energetici manifestata dai modelli semplificati realizzati in precedenti linee di attività. La seconda parte è dedicata all'analisi dell'impatto di variazioni di parametri operativi significativi sul modello validato del caso di studio, in particolare per verificare il risparmio energetico conseguibile sul riscaldamento invernale, con l'utilizzo di soluzioni che, nelle precedenti linee di attività, erano state individuate come utili per il miglioramento della performance energetica stagionale.

In accordo alle caratteristiche dei modelli semplificati realizzati, le simulazioni sono state tutte condotte in regime di scambio termico dinamico valutato con passo orario. Al fine di rendere più agevole la lettura del presente capitolo, sono utili le seguenti specificazioni.

- I dati riportati e commentati nei sottoparagrafi seguenti, in merito ai consumi energetici, si riferiscono al consumo di energia elettrica necessario al funzionamento della pompa di calore aria-aria, nelle configurazioni di volta in volta specificate, su intervalli di tempo mensili e stagionali.
- La pompa di calore, nella sua modalità di gestione semplice, viene considerata in funzione (con temperatura di set-point pari a 22 °C) quando almeno una persona è presente all'interno dell'unità abitativa analizzata (in accordo ai profili di occupazione) e spenta se nessuno è presente all'interno dell'unità abitativa. Nella sua modalità di gestione avanzata, la pompa di calore è in funzione secondo lo schema di Figura 19.
- La logica di regolazione utilizzata per la pompa di calore è quella con modulazione proporzionale identificata con il codice MOD20 in Tabella 3. La regolazione con modulazione proporzionale identificata con il codice MOD10 in Tabella 3 è utilizzata solo in un caso (si veda successivo paragrafo 4.2.2), per verificare l'effetto di una variazione della logica di regolazione.

4.1 Validazione del modello per confronto con dati monitorati

In accordo all'obiettivo principale della linea di attività a cui il presente report si riferisce, in questo paragrafo vengono descritti i risultati ottenuti dalle simulazioni, con particolare riferimento ai consumi energetici per la climatizzazione invernale del caso di studio, che sono confrontati con i rispettivi consumi monitorati al fine di validare i modelli di simulazione.

I consumi energetici ottenuti dalle simulazioni per il caso di studio sono riportati in Tabella 4, insieme a quelli monitorati. Come si vede dalla Tabella 4, i dati simulati sono riportati per 3 differenti configurazioni di simulazione. Le configurazioni si differenziano per temperature di set-point e volume degli ambienti riscaldati, secondo quanto riportato nella Tabella riepilogativa 5. La prima configurazione (Config. A) si riferisce alle condizioni che si sono maggiormente verificate nel periodo invernale analizzato (1 nov 2012 – 30 apr 2013): cioè quelle in cui veniva mantenuta una temperatura media oscillante tra 20 °C e 22 °C nel volume riscaldato (che corrisponde nelle simulazioni ad avere posto una temperatura di set-point pari a 22 °C; si ricordi la regolazione delle pompe di calore impostate nei modelli in accordo alla Tabella 2) ed il volume riscaldato dalle pompe di calore è quello descritto nel paragrafo 2.2 del presente report (si vedano anche Figure 5 e 6).

Dal confronto dei risultati dei consumi energetici simulati per la configurazione A, aggregati per ciascun mese del periodo invernale analizzato, con quelli monitorati è possibile notare un eccellente accordo nei mesi centrali (gennaio e febbraio) della stagione invernale con scostamenti percentuali inferiori al 10%. Tali scostamenti salgono nei mesi finali della stagione di riscaldamento (marzo e aprile),

raggiungendo valori di oltre il 30%, e diventano molto grandi per i primi mesi della stagione invernale (novembre e dicembre).

Gli elevati scostamenti registrati nei mesi iniziali della stagione di riscaldamento sono in gran parte dovuti a differenti modalità di gestione dell'edificio caso di studio proprio in questi mesi. Infatti dalle informazioni riportate in [3], nei primi due mesi della stagione di riscaldamento all'interno del volume riscaldato è stata mantenuta una temperatura media inferiore di circa 2.5-3 °C rispetto al resto della stagione di riscaldamento analizzata. Questo ha comportato la necessità di modificare la configurazione A, introducendo una modifica sul valore di set-point (passando da 22 °C a 19 °C) per il funzionamento delle pompe di calore, da utilizzare esclusivamente per i mesi iniziali di novembre e dicembre. Da questa modifica è stata originata la configurazione di simulazione B, i cui risultati (vedi Tabella 4) mostrano una forte riduzione degli scostamenti ottenuti per i mesi di novembre e dicembre, in particolare per il mese di dicembre si evidenzia un valore dello scostamento assolutamente in linea con quelli dei mesi centrali della stagione di riscaldamento.

Tabella 4 – Confronto dati monitorati (C.M.) e dati simulati (C.S.): valori mensili dei consumi energetici per la climatizzazione invernale in kWh e scostamenti in % tra i dati ottenuti nelle diverse configurazioni e i dati monitorati.

| Mese | C.M. | C.S. | | | | | |
|----------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| | | Config. A | | Config. B | | Config. C | |
| 2012/13 | kWh | kWh | % | kWh | % | kWh | % |
| Novembre | 255 | 436 | 71.1 | 300 | 17.6 | 300 | 17.6 |
| Dicembre | 380 | 564 | 48.4 | 412 | 8.4 | 412 | 8.4 |
| Gennaio | 645 | 696 | 8.0 | 696 | 8.0 | 696 | 8.0 |
| Febbraio | 610 | 602 | -1.3 | 602 | -1.3 | 602 | -1.3 |
| Marzo | 575 | 511 | -11.1 | 511 | -11.1 | 581 | 1.1 |
| Aprile | 295 | 187 | -36.8 | 187 | -36.8 | 219 | -25.6 |
| TOTALE | 2760 | 2996 | 8.6 | 2708 | -1.9 | 2811 | 1.8 |

Tabella 5 – Cati caratterizzanti le differenti configurazioni di simulazione utilizzate per la validazione.

| Mese | C.S. | | | | | |
|----------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|
| | Config. A | | Config. B | | Config. C | |
| 2012/13 | Tset-point | Vol. risc. | Tset-point | Vol. risc. | Tset-point | Vol. risc. |
| Novembre | | | 19 °C | | 19 °C | |
| Dicembre | | | | | | Senza mansarda |
| Gennaio | 22 °C | Senza mansarda | | Senza mansarda | | |
| Febbraio | | | 22 °C | | 22 °C | |
| Marzo | | | | | | Con mansarda |
| Aprile | | | | | | |

Anche gli elevati scostamenti registrati nei mesi finali della stagione di riscaldamento sono in gran parte dovuti a differenti modalità di gestione dell'edificio caso di studio. Infatti dalle informazioni riportate in [3], per gli ultimi due mesi della stagione di riscaldamento vi è stata una variazione del volume riscaldato e della superficie netta abitata. Infatti a partire dal marzo 2013 è stata completata ed occupata regolarmente una stanza aggiuntiva dell'edificio al piano primo (una mansarda, denominata "attic" in Figura 5). Questo ha comportato la necessità di modificare la configurazione B, introducendo una modifica sulla geometria della porzione di edificio riscaldato (con incremento di superficie netta di 160 a 180 m²), da utilizzare esclusivamente per i mesi finali di marzo e aprile. Da questa modifica è stata originata la configurazione di simulazione C, i cui risultati (vedi Tabella 4) mostrano una forte

riduzione degli scostamenti ottenuti per i mesi di marzo e aprile, in particolare per il mese di marzo si evidenzia un valore dello scostamento di entità assolutamente contenuta e molto simile in valore assoluto a quello del precedente mese di marzo.

Nella la configurazione C, il modello semplificato realizzato manifesta una capacità previsionale dei consumi energetici sostenuti per la climatizzazione invernale assolutamente adeguata agli scopi della ricerca effettuata nelle precedenti linee di attività, infatti lo scostamento evidenziato su base stagionale tra consumo monitorato e consumo simulato è inferiore al 2% (si veda Tabella 4). In Figura 20 è riportato il confronto per via grafica dei dati di consumo energetico monitorati e quelli simulati, suddivisi per i differenti mesi del periodo invernale analizzato.

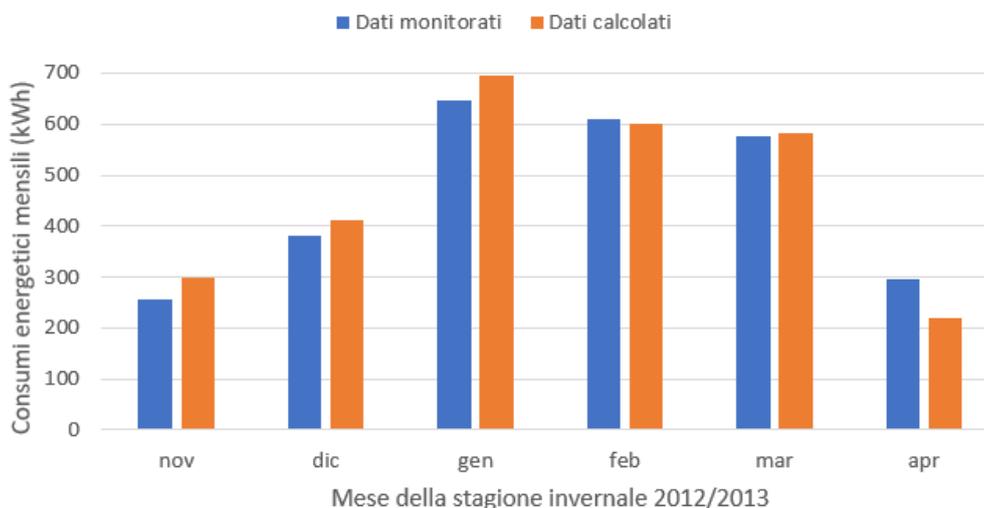


Figura 20 – Confronto tra consumi energetici mensili monitorati e simulati (config. C) per il caso di studio nel periodo invernale analizzato.

Il confronto è relativo alla configurazione finale (Config. C), che meglio risponde a come è stato realmente gestito l'edificio caso di studio. Come si può apprezzare dalla figura l'accordo tra i dati è soddisfacente. In particolare se si escludono la testa (mese di novembre) e la coda (mese di aprile) del periodo invernale, l'accordo tra i dati è eccellente, con scostamento medio (valutato con i valori assoluti degli scostamenti ottenuti su base mensile) inferiore al 5% e scostamento massimo di 8.4%. Gli scostamenti sono significativamente più alti per i mesi di novembre ed aprile, tali scostamenti raggiungono il valore del 25% nel mese di aprile. Per questi mesi, nei quali la necessità di climatizzazione può essere meno sentita da parte dell'utente, le modalità di gestione energetica dell'unità abitativa diventano essenziali nella previsione dei consumi. Al fine di avere un modello più preciso, servirebbero informazioni più dettagliate di quelle a disposizione sui profili effettivi di occupazione e sugli orari di accensione e spegnimento delle pompe di calore decisi dagli utenti. Tuttavia è opportuno osservare che, se l'intera stagione di riscaldamento è considerata, i mesi di novembre ed aprile sono quelli in cui i consumi sono più contenuti: la somma dei consumi monitorati in questi due mesi pesa per meno del 20% sui consumi complessivi.

Per completezza in Figura 21 è riportato l'andamento della temperatura dell'aria interna in funzione del tempo per tutta la stagione di riscaldamento analizzata. Nella stessa figura è riportato anche l'andamento della temperatura dell'aria esterna, utilizzato come dato di ingresso per le simulazioni. Dal confronto dei due andamenti è evidente come il modello risponda agli incrementi di temperatura esterna, si vedano per esempio il picco dopo circa 300 ore e quelli dopo circa 3900 e 4200 ore. Questi

picchi si verificano in giornate dei mesi iniziale e finale della stagione di riscaldamento, ed in tali giornate la temperatura esterna sale (per intervalli di tempo contenuti) al di sopra della temperatura di set-point. In Figura 22 sono riportati i consumi energetici mensili, sia monitorati che calcolati attraverso le simulazioni, in funzione dei gradi giorno dei rispettivi mesi, come rilevati per la stagione invernale di riferimento (si veda anche Figura 2). Gli andamenti dei consumi energetici, sia monitorati che simulati, possono essere descritti con buona approssimazione da curve esponenziali, confermando quanto osservato nelle precedenti linee di attività, in particolare nella linea di attività 3.18 [2].

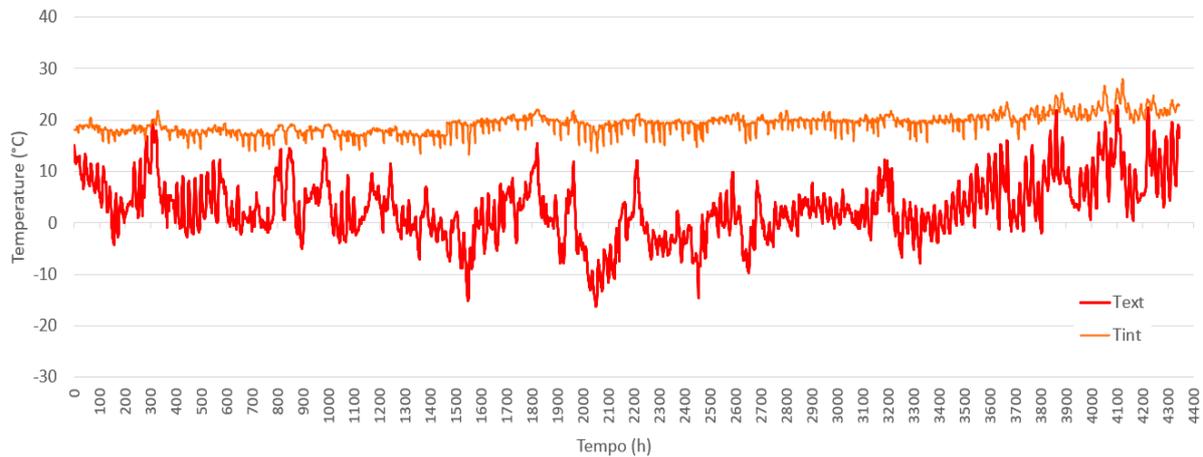


Figura 21 – Andamenti della temperatura dell’aria esterna (dati meteorologici, input delle simulazioni) e della temperatura dell’aria interna (dati calcolati, output delle simulazioni) in funzione del tempo, per la stagione di riscaldamento analizzata.

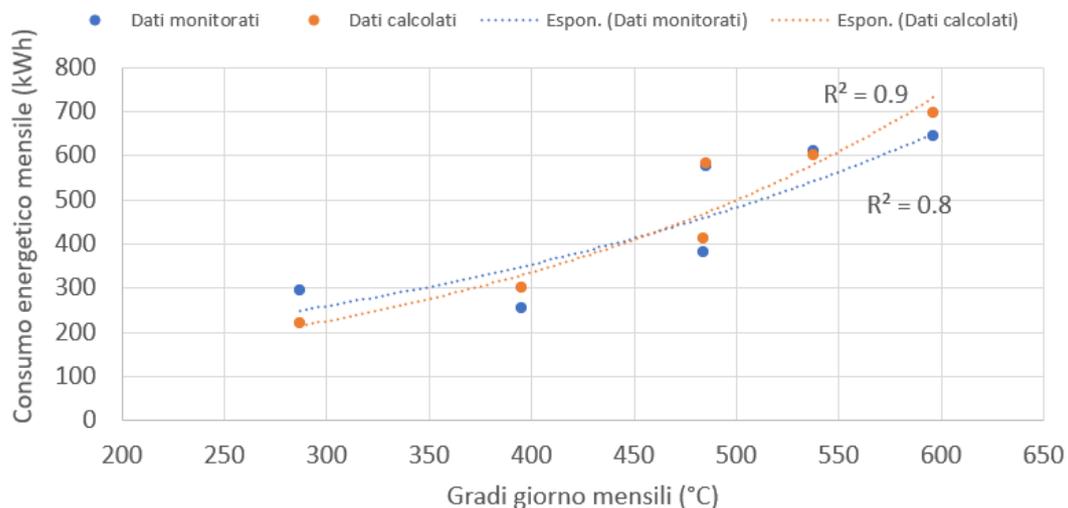


Figura 22 – Consumi energetici mensili in funzione dei gradi giorno dei rispettivi mesi, per i dati monitorati e per quelli ottenuti dalle simulazioni.

Nel grafico di Figura 23 sono riportate, per tutte le ore della stagione di riscaldamento analizzata, le coppie: temperatura dell’aria esterna (ascisse) e consumo energetico orario (ordinate), ottenute dai risultati delle simulazioni. Per facilitare il confronto tra dati monitorati e dati simulati, nel grafico in basso di Figura 24 sono riportati gli stessi dati di Figura 23 ma con temperatura dell’aria esterna espressa in °F, e per confronto, nel grafico in alto di Figura 24 gli analoghi dati monitorati.

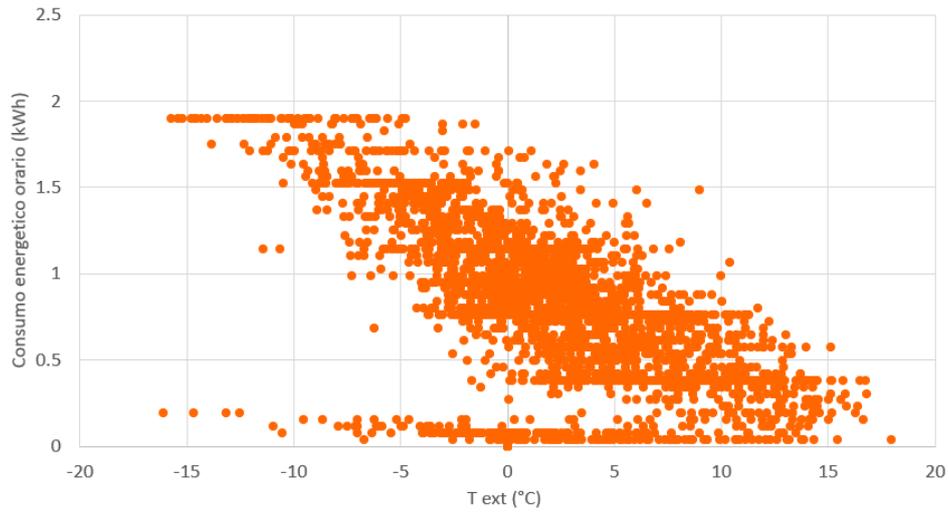


Figura 23 – Andamento della temperatura esterna nella settimana tipo per le quattro località climatiche considerate.

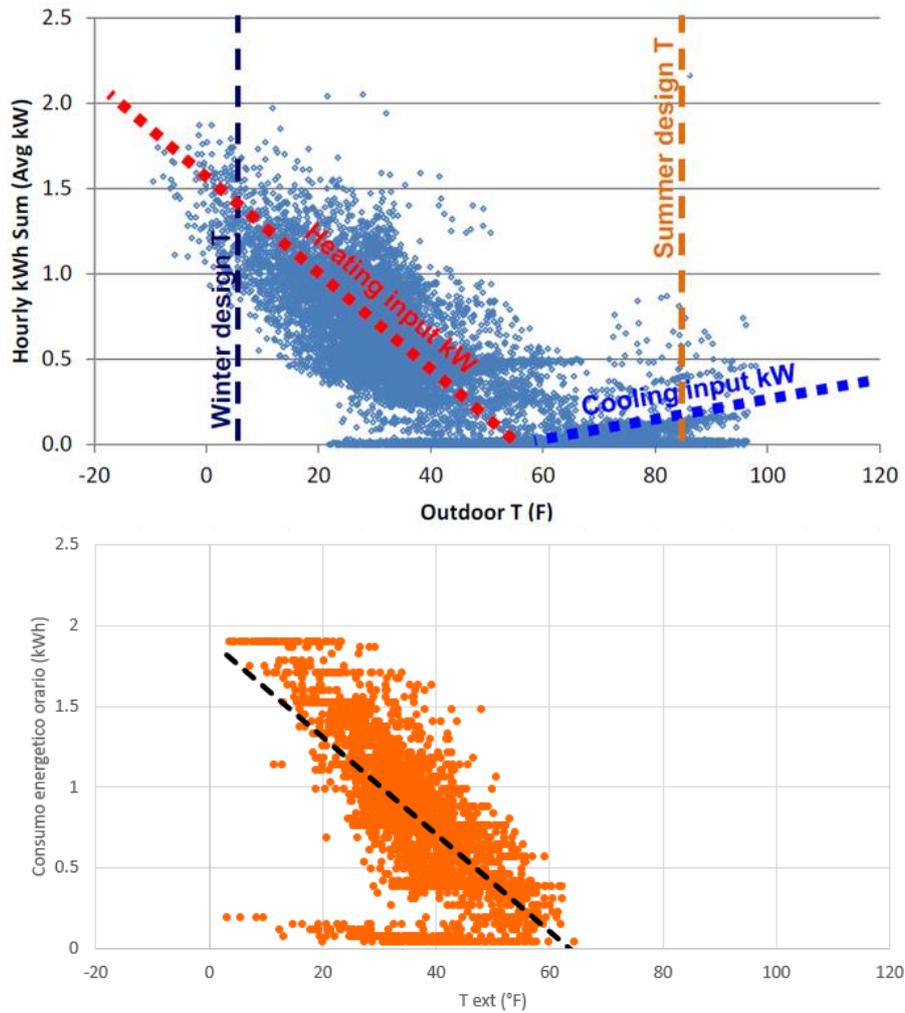


Figura 24 – Andamento della temperatura esterna nella settimana tipo per le quattro località climatiche considerate.

Operando una regressione lineare dei dati ottenuti dalle simulazioni, analogamente a quanto fatto in [3] per i dati monitorati, è possibile osservare come la firma energetica dell'edificio ottenuta dai dati simulati sia sufficientemente accurata rispetto a quella ottenuta dai dati monitorati. L'equazione rappresentativa della firma energetica (ipotizzando il consumo energetico orario come ottenuto da una potenza elettrica costante sulla singola ora) per i dati simulati risulta $Y=-0.03X+1.9$ (con Y potenza elettrica necessaria al funzionamento della pdc e X temperatura dell'aria esterna in °F). L'equazione rappresentativa della firma energetica per i dati monitorati risulta $Y=-0.03X+1.7$ (con Y potenza elettrica necessaria al funzionamento della pdc e X temperatura dell'aria esterna in °F). Dal confronto delle equazioni rappresentative è evidente il sufficiente accordo, le relazioni lineari presentano la stessa pendenza ed uno scostamento di 3 °C (6 °F) sulla temperatura dell'aria esterna alla quale non è richiesta climatizzazione invernale degli ambienti. Essa infatti vale circa 14 °C (57 °F) per la regressione lineare fatta sui dati monitorati, e circa 17 °C (63 °F) per la regressione lineare fatta sui dati simulati.

4.2 Analisi dell'impatto di variazioni di parametri operativi significativi sui consumi energetici del modello validato del caso di studio

Alla luce dei risultati soddisfacenti ottenuti dal processo di validazione, sono state eseguite una serie di ulteriori simulazioni con l'obiettivo di analizzare l'impatto di variazioni di parametri operativi significativi sui consumi energetici del modello validato del caso di studio. I parametri che sono stati fatti variare e le caratteristiche delle variazioni sono stati descritti nel precedente capitolo. Nei sottoparagrafi seguenti sono riportati e discussi i risultati delle simulazioni con particolare riferimento ai consumi energetici ottenuti a seguito di: variazioni di parametri climatici, variazioni di parametri di funzionamento della pompa di calore e variazioni di capacità termica delle strutture edili.

4.2.1 Variazioni di parametri climatici

I risultati ottenuti dalle simulazioni per la stagione invernale utilizzata nella validazione (2012/13) e quelli ottenuti per l'anno meteorologico tipo (TMY) sono riepilogati in Tabella 6. Nella tabella sono riportati i consumi energetici mensili ed il totale dei consumi su tutta la stagione dal 1 novembre al 30 aprile. Come era evidente dai dati meteorologici discussi in precedenza, la stagione 2012/13 era stata meno rigida dell'anno meteo tipo. Ciò si ripercuote sui consumi energetici, infatti raffrontando i consumi su base mensile si vede un deciso incremento dei consumi per tutti i mesi considerati. Se l'intera stagione di riscaldamento è considerata, i consumi energetici incrementano di circa il 20% passando da 2296 kWh per la stagione 2012/13 a 3600 kWh per la stagione TMY.

Tabella 6 – Raffronto dei consumi energetici mensili ottenuti dalle simulazioni nella stagione utilizzata per la validazione (2012/13) e per l'anno meteorologico tipo (TMY).

| Mese | Consumi energetici mensili in kWh | |
|---------------|-----------------------------------|-------------|
| | 2012/13 | TMY |
| Novembre | 436 | 466 |
| Dicembre | 564 | 774 |
| Gennaio | 696 | 882 |
| Febbraio | 602 | 645 |
| Marzo | 511 | 590 |
| Aprile | 187 | 243 |
| Totale | 2996 | 3600 |

E' interessante evidenziare che i risultati ottenuti mostrano una capacità della pompa di calore di garantire le condizioni di comfort che rimane sostanzialmente inalterata passando dalla stagione 2012/13 a quella TMY. Tale aspetto può essere osservato considerando che il valore del parametro N (si veda paragrafo 3.2) non si riduce passando da 2012/13 a TMY, anzi subisce un lieve incremento passando da 96 a 103 h. Anche osservando i valori dei parametri ME e MAD, ottenuti dalle simulazioni per la settimana significativa (prima settimana del mese di gennaio) della stagione 2012/13 e quella della stagione TMY, possono essere confermate le considerazioni appena effettuate per il parametro N. Il parametro ME rimane praticamente costante (ME=1.1 °C) passando dalla stagione 2012/13 a quella TMY, mentre il parametro MAD subisce una modesta riduzione passando da 1.2 a 1.0 °C, testimoniando una lieve riduzione degli scostamenti rispetto al valore di 20 °C.

4.2.2 Variazioni di parametri di funzionamento della pompa di calore

Utilizzando come base di confronto i risultati delle simulazioni per la stagione invernale dell'anno meteorologico tipo, in Tabella 7 è riportato un raffronto dei consumi energetici mensili e totali (dal 1 novembre al 30 aprile) ottenuti utilizzando per il riscaldamento invernale rispettivamente:

- il sistema a pompa di calore realmente impiegato nel caso di studio (TMY),
- un sistema a pompa di calore di taglia inferiore (TMY-P1400), composto da 2 macchine di potenza elettrica nominale assorbita singolarmente paria 700 W invece di 950 W,
- un sistema a pompa di calore della stessa taglia di quello realmente impiegato nel caso di studio, ma con capacità di modulazione fino al 10% della potenza nominale (TMY-MOD10) invece di 20%.

Come è possibile osservare dai dati riportati in Tabella 7, i due sistemi a pompa di calore TMY-P1400 e TMY-MOD10 consentono entrambi risparmi energetici rispetto al sistema TMY. Se l'intera stagione di riscaldamento è considerata, i consumi energetici si riducono di poco oltre il 10% passando da TMY a TMY-P1400 e di circa il 4% passando da TMY a TMY-MOD10. Mentre per il sistema TMY-P1400 le riduzioni sono distribuite piuttosto equamente su tutti i mesi considerati, per il sistema TMY-MOD10 si rilevano risparmi maggiori nei mesi iniziale e finale della stagione di riscaldamento, dove le temperature medie sono più alte e la capacità di modulare fino a bassi carichi diventa importante per i risparmi energetici, in accordo ai principi operativi dalla pompa di calore.

Tabella 7 – Raffronto dei consumi energetici mensili ottenuti dalle simulazioni per l'anno meteorologico tipo (TMY) con la pompa di calore realmente utilizzata nel caso di studio, con la pompa di calore di taglia ridotta (TMY-P1400) e con la pompa di calore in grado di modulare fino al 10% della potenza nominale (MOD10).

| Mese | Consumi energetici mensili in kWh | | |
|---------------|-----------------------------------|-------------|-------------|
| | TMY | TMY-P1400 | TMY-MOD10 |
| Novembre | 466 | 428 | 440 |
| Dicembre | 774 | 678 | 752 |
| Gennaio | 882 | 757 | 866 |
| Febbraio | 645 | 581 | 623 |
| Marzo | 590 | 525 | 565 |
| Aprile | 243 | 224 | 218 |
| Totale | 3600 | 3193 | 3464 |

Tuttavia è utile osservare una sostanziale differenza di comportamento in merito al mantenimento delle condizioni di comfort tra i sistemi TMY-P1400 e TMY-MOD10. Considerando i valori assunti dal parametro N (si veda paragrafo 3.2), è possibile notare che esso scende da 96 a 70 h passando da TMY

a TMY-P1400, di conseguenza il risparmio energetico ottenuto con il sistema TMY-P1400 è ottenuto a spese di una riduzione delle condizioni di comfort per gli occupanti. Da ciò può essere confermata la correttezza della taglia del sistema a pompa di calore, scelta e posata in opera nel caso di studio, che ben si adatta al mantenimento delle condizioni di comfort per la stagione invernale dell'anno meteo tipo. Al contrario il parametro N rimane sostanzialmente inalterato (N=96) passando da TMY a TMY-MOD10, di conseguenza il risparmio energetico ottenuto con il sistema TMY-MOD10, seppur molto contenuto, non impatta sulle mantenimento delle condizioni di comfort. Anche osservando i valori dei parametri ME e MAD, ottenuti dalle simulazioni per la settimana significativa (si veda paragrafo 3.2), possono essere confermate le considerazioni appena effettuate per il parametro N. Il valore del parametro ME sale molto passando da TMY (ME=1.1 °C) a TMY-P1400 (ME=1.7 °C), mentre sale di poco con il sistema TMY-MOD10 (ME=1.3). Una tendenza analoga si osserva per il parametro MAD (MAD=1.0 °C per TMY, MAD=1.4 °C per TMY-P1400, MAD=1.2 °C per TMY-MOD10).

4.2.3 Variazioni di capacità termica delle strutture edili

Utilizzando come base di confronto i risultati delle simulazioni per la stagione invernale dell'anno meteorologico tipo, in Tabella 8 è riportato un raffronto dei consumi energetici mensili e totali (dal 1 novembre al 30 aprile) ottenuti utilizzando strategie per lo sfruttamento delle strutture edili come sistemi di accumulo non convenzionali. Tali strategie sono state messe a punto nelle precedenti linee di attività. In particolare il raffronto è riportato per:

- il sistema a pompa di calore realmente impiegato nel caso di studio (TMY), con gestione di accensione/spegnimento legata esclusivamente all'occupazione (si veda paragrafo 3.2.3),
- un sistema a pompa di calore con gestione avanzata di accensione/spegnimento (TMY-C) per consentire, in condizioni climatiche favorevoli, lo sfruttamento della capacità termica delle strutture edili (si veda paragrafo 3.2.3),
- un sistema a pompa di calore con gestione avanzata di accensione/spegnimento e con capacità termica delle strutture edili fortemente incrementata (TMY-C-PCM) (si veda paragrafo 3.2.3).

Tabella 8 – Raffronto dei consumi energetici mensili ottenuti dalle simulazioni per l'anno meteorologico tipo (TMY) con la logica di gestione accensioni/spegnimenti della pdc ordinaria, con la logica di gestione accensioni/spegnimenti della pdc avanzata (TMY-C) e con l'incremento della capacità termica delle strutture edili (TMY-C-PCM).

| Mese | Consumi energetici mensili in kWh | | |
|---------------|-----------------------------------|-------------|-------------|
| | TMY | TMY-C | TMY-C-PCM |
| Novembre | 466 | 426 | 185 |
| Dicembre | 774 | 761 | 406 |
| Gennaio | 882 | 893 | 566 |
| Febbraio | 645 | 622 | 491 |
| Marzo | 590 | 577 | 550 |
| Aprile | 243 | 185 | 359 |
| Totale | 3600 | 3464 | 2557 |

Come è possibile osservare dai dati riportati in Tabella 8, le strategie di sfruttamento della capacità termica delle strutture edili TMY-C e TMY-C-PCM consentono entrambe risparmi energetici rispetto a quelli rilevati con TMY. Se l'intera stagione di riscaldamento è considerata, i consumi energetici si riducono di circa il 4% passando da TMY a TMY-C (stesso risparmio ottenuto intervenendo sulla capacità di modulazione della pompa di calore) e di poco meno del 30% passando da TMY a TMY-C-PCM. In particolare il valore del risparmio energetico ottenuto con la logica di gestione avanzata della

pompa di calore ed il forte incremento della capacità termica delle strutture edili è del tutto in linea con gli analoghi valori ottenuti in precedenti linee di attività, per tipologie edifici con tipologie costruttive simili a quelle del caso di studio, in località climatiche medio-rigide (si vedano risultati ottenuti in [2], per il cluster costruttivo C08, ubicato a Milano). Tuttavia, come già evidenziato in [2], deve essere osservato che le forti riduzioni notate con TMY-C-PCM sono in parte dovute ad un effetto secondario della elevata capacità termica delle pareti, cioè la più lenta discesa dei valori medi della temperatura dell'aria interna, nella fase iniziale del periodo di riscaldamento. Ciò è particolarmente evidente osservando la Figura 25, nella quale sono riportati gli andamenti della temperatura dell'aria interna in funzione del tempo nella stagione di riscaldamento (1 novembre – 30 aprile), ottenuti per TMY-C e TMY-C-PCM. In particolare osservando gli andamenti, si nota un periodo collocato all'inizio della stagione di riscaldamento, per il quale le temperature dell'aria interna in TMY-C-PCM si mantengono a livelli superiori ai 20 °C, risentendo ancora degli effetti delle giornate precedenti più calde, e dunque la pompa di calore si attiva molto poco, consentendo rilevanti risparmi energetici. Il comportamento descritto conferma quanto era stato ottenuto in [2], per edifici con livelli di isolamento termico elevati. Per quanto riguarda i risparmi ottenuti con TMY-C, seppur contenuti, essi sono concentrati nei mesi iniziale e finale della stagione di riscaldamento, dove, grazie al maggior numero di ore con condizioni climatiche favorevoli, gli effetti della logica di gestione avanzata diventano apprezzabili.

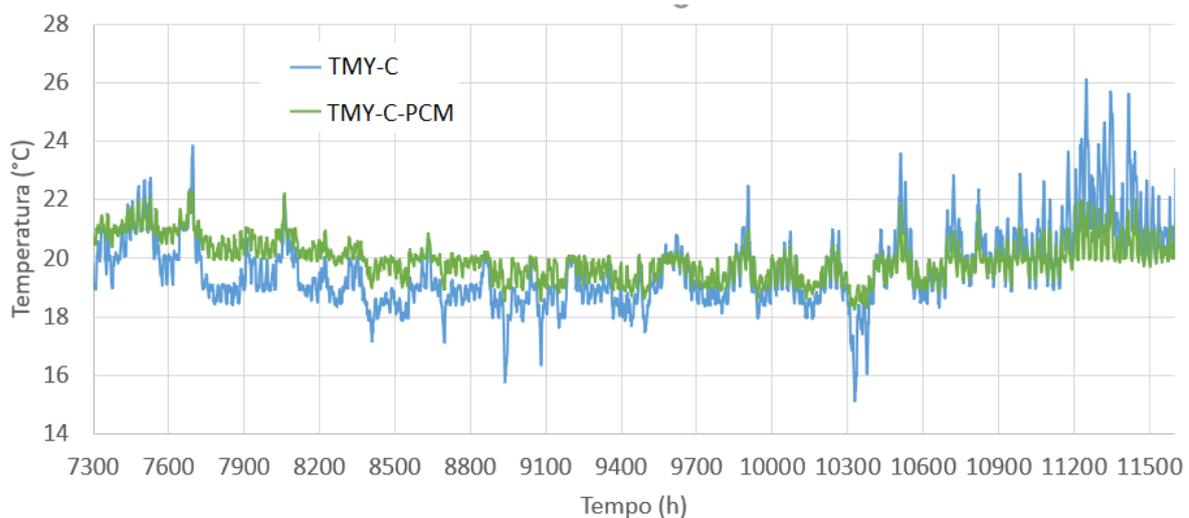


Figura 25 – Andamenti della temperatura dell'aria interna in funzione del tempo nella stagione di riscaldamento (1 novembre – 30 aprile), ottenuti per TMY-C e TMY-C-PCM.

E' interessante evidenziare che i risparmi energetici ottenuti con TMY-C e TMY-C-PCM non comportano alcun peggioramento riguardo il mantenimento delle condizioni di comfort termico. Tale aspetto può essere osservato considerando che il valore del parametro N (si veda paragrafo 3.2) non si riduce per TMY-C e TMY-C-PCM rispetto a TMY, anzi nel passaggio da TMY a TMY-C-PCM subisce un significativo incremento passando da 96 a 140 h, questo per effetto della grande capacità termica che consente di mantenere più contenute le oscillazioni di temperatura. Anche osservando i valori dei parametri ME e MAD, ottenuti dalle simulazioni per la settimana significativa (prima settimana del mese di gennaio, si veda paragrafo 3.2), possono essere confermate le considerazioni appena effettuate per il parametro N. Il valore del parametro ME rimane costante passando da TMY (ME=1.1 °C) a TMY-C (ME=1.1 °C), mentre si riduce significativamente passando a TMY-C-PCM (ME=0.2). Una tendenza analoga si osserva per il parametro MAD (MAD=1.0 °C per TMY, MAD=1.0 °C per TMY-C, MAD=0.2 °C per TMY-C-PCM).

5. Conclusioni

Nel presente report sono descritte le attività svolte nell'ambito della LA 3.20 dell'Accordo di Collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni dell'Università di Pisa, dal titolo: "Analisi dell'interazione tra edificio e sistema di climatizzazione a PdC, in sistemi residenziali di piccola taglia con accumulo idronico trascurabile o assente". La LA 3.20 prevedeva la conduzione di una campagna di simulazioni del comportamento termo-energetico dinamico di edifici, che utilizzano pompe di calore con accumuli idronici assenti o trascurabili per il soddisfacimento del servizio di climatizzazione invernale. La campagna di simulazioni condotta, e descritta nel presente report, ha avuto come obiettivo principale la validazione della capacità previsionale, rispetto al comportamento energetico, della modellazione semplificata (di tipo grey-box) realizzata su piattaforma Matlab/Simulink in precedenti linee di attività. In particolare, in questa linea di attività, la validazione è stata condotta per confronto tra i risultati ottenuti per i consumi energetici mensili e stagionali dalle simulazioni e quelli sperimentalmente misurati su un caso di studio.

Per effettuare tale validazione è stato dunque necessario identificare un caso di studio idoneo, per il quale fossero disponibili un sufficiente numero di informazioni tecniche relative al sistema edificio-impianto e che avesse i consumi energetici monitorati, in maniera regolare e continua, per almeno un'intera stagione di riscaldamento. A questo proposito è stata individuata in letteratura scientifica e selezionata come caso di studio una unità abitativa ubicata a Devens (USA). E' stata dunque effettuata la modellazione semplificata del caso di studio e sono state condotte simulazioni con dati di ingresso congruenti a quelli reali a cui è stato sottoposto il caso di studio nel periodo monitorato (in particolare condizioni climatiche esterne e modalità di occupazione). Inoltre, dopo aver effettuato la validazione, sono state condotte ulteriori simulazioni con le seguenti finalità: valutare i consumi energetici del caso di studio in un anno meteorologico tipico e valutare i risparmi energetici ottenibili sul caso di studio con l'introduzione di alcune delle tecniche giudicate come potenzialmente utili al miglioramento delle performance stagionali in precedenti linee di attività.

Dai risultati ottenuti e discussi, in particolare dal confronto dei consumi energetici simulati con quelli monitorati, è stato possibile apprezzare come la modellazione semplificata adottata manifesti una capacità previsionale adeguata all'attività condotta nel presente programma di ricerca ed in particolare nelle precedenti linee di attività, dove la modellazione semplificata è stata impiegata. I consumi simulati sono stati molto prossimi a quelli monitorati con uno scostamento calcolato su base stagionale inferiore al 2%. Su base mensile, gli scostamenti più elevati, seppure ancora tollerabili, tra consumi simulati e monitorati si sono evidenziati per i mesi con minor richiesta di climatizzazione invernale (mese iniziale e mese finale della stagione di riscaldamento), mesi per i quali il comportamento e le preferenze dell'utenza, non sempre facilmente schematizzabili, hanno un maggiore impatto. Dai risultati delle simulazioni condotte successivamente alla validazione è stato possibile svincolare i consumi energetici evidenziati per il caso di studio dalla specifica stagione invernale di cui si disponevano i dati monitorati ed inoltre confermare alcune interessanti tendenze evidenziate in precedenti linee di attività (in particolare si veda la LA 3.18), riguardo possibili strategie per la riduzione dei consumi energetici con sistemi di riscaldamento a pompa di calore aria-aria; tra queste quella di utilizzare le strutture edili come accumulo termico non convenzionale, in corrispondenza di condizioni climatiche esterne favorevoli.

Alla fine delle attività condotte nella LA 3.20, i modelli numerici di tipo grey-box utilizzati nel presente programma di ricerca, risultano validati sia per confronto con dati numerici (si veda LA 3.17), sia per confronto con dati sperimentali (si veda la presente LA). Come sviluppo futuro è auspicabile una validazione sperimentale dei risultati sui risparmi energetici conseguibili con l'accoppiamento di sistemi a pompa di calore aria-aria con l'utilizzo di soluzioni tecniche per l'incremento della capacità termica delle strutture edili, quali l'impiego di materiali in cambiamento di fase.

Bibliografia

- 1 G. Salvadori, L. Formicola, G. Lamberti. Campione rappresentativo di edifici residenziali presenti sul territorio nazionale e modellazione semplificata per la stima del loro comportamento energetico dinamico. Report di Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021, Progetto 1.7, Work Package 3, Linea di Attività 16 (2021).
- 2 G. Salvadori, F. Fantozzi, F. Leccese, G. Lamberti, L. Formicola. Simulazioni del comportamento energetico dinamico di edifici con pompe di calore e accumuli idronici assenti o trascurabili per la climatizzazione invernale. Report di Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021, Progetto 1.7, Work Package 3, Linea di Attività 18 (2021).
- 3 K. Ueno, H. Loomis. Long-Term Monitoring of Mini-Split Ductless Heat Pumps in the Northeast. Technical report of the research program "Building America", US Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, NREL Contract No. DE-AC36-08GO28308, June 2015. (Available electronically at <http://www.osti.gov/scitech>)
- 4 <https://www.wunderground.com/history/daily/us/ma/worcester>
- 5 https://www.mitsubishitechinfo.ca/sites/default/files/SH_MUZ-FE09_18NA%28H%29%281%29_OBH543G.pdf
- 6 UNI/TS 11300-4 (2016). Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.
- 7 UNI EN 14825 (2019). Condizionatori d'aria, refrigeratori di liquido e pompe di calore, con compressore elettrico, per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti - Metodi di prova e valutazione a carico parziale e calcolo del rendimento stagionale.
- 8 <https://ec.europa.eu/jrc/en>
- 9 https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?id=4387&area=indor&menu=vuoto
- 10 UNI EN 16798-1 (2019). Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6.