



## Ricerca di Sistema elettrico

# Simulazioni del comportamento energetico dinamico di edifici con PdC e accumuli idronici assenti o trascurabili per la climatizzazione invernale

G. Salvadori, F. Fantozzi, F. Leccese, G. Lamberti, L. Formicola

Report RdS/PTR(2021)/341

## SIMULAZIONI DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO DINAMICO DI EDIFICI CON PDC E ACCUMULI IDRONICI ASSENTI O TRASCURABILI PER LA CLIMATIZZAZIONE INVERNALE

G. Salvadori, F. Fantozzi, F. Leccese, G. Lamberti, L. Formicola

Ottobre 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 integrate ad accumuli strutturali: Simulazioni energetico dinamiche di edifici con PdC e accumuli trascurabili per la climatizzazione invernale

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



<b>SOMMARIO</b> .....	<b>4</b>
<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	<b>5</b>
<b>2. RIEPILOGO DELLE CARATTERISTICHE ESSENZIALI DEI MODELLI GREY-BOX UTILIZZATI PER L'ATTIVITÀ DI SIMULAZIONE</b> .....	<b>6</b>
2.1 MODELLAZIONE DELLE UNITÀ ABITATIVE MEDIANTE VOLUMI CONCETTUALI.....	6
2.2 SCHEMATIZZAZIONE DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI DI CONTATTO TRA UNITÀ ABITATIVE ADIACENTI .....	8
2.3 SCHEMA FUNZIONALE DELL'IMPIANTO A POMPA DI CALORE .....	8
2.3.1 <i>Esportazione dei parametri di funzionamento della pompa di calore</i> .....	12
2.4 IMPORTAZIONE DATABASE DATI CLIMATICI ED ESPORTAZIONE RISULTATI DELLE SIMULAZIONI.....	13
<b>3. INTRODUZIONE ALLA CAMPAGNA DI SIMULAZIONI</b> .....	<b>14</b>
3.1 CARATTERISTICHE DEL CAMPIONE OGGETTO DI SIMULAZIONI.....	14
3.1.1 <i>Riepilogo località climatiche di riferimento</i> .....	14
3.1.2 <i>Riepilogo tipologie abitative residenziali di riferimento</i> .....	16
3.1.3 <i>Riepilogo profili di occupazione di riferimento</i> .....	17
3.1.4 <i>Riepilogo delle tipologie costruttive di riferimento</i> .....	18
3.2 CARATTERISTICHE DELLA CAMPAGNA DI SIMULAZIONE .....	20
3.2.1 <i>Parametri esportati da ciascuna simulazione – Dati di output</i> .....	21
3.2.2 <i>Parametri statistici di confronto utilizzati per le valutazioni sul mantenimento delle condizioni di comfort</i> .....	24
3.2.3 <i>Parametri utilizzati per valutazioni inerenti le prestazioni energetiche</i> .....	27
<b>4. CAMPAGNA DI SIMULAZIONI</b> .....	<b>30</b>
4.1 ANALISI PER ZONA CLIMATICA .....	31
4.1.1 <i>Condizioni climatiche esterne</i> .....	31
4.1.2 <i>Analisi dei consumi energetici</i> .....	33
4.1.3 <i>Analisi delle condizioni di comfort</i> .....	38
4.2 ANALISI PER TIPOLOGIA DI EDIFICIO .....	44
4.2.1 <i>Analisi dei consumi energetici</i> .....	44
4.2.2 <i>Analisi del comfort termico</i> .....	48
4.3 ANALISI PER PROFILO DI UTILIZZO .....	52
4.3.1 <i>Analisi dei consumi energetici</i> .....	52
4.3.2 <i>Analisi del comfort termico</i> .....	56
4.4 ANALISI PER CARATTERISTICHE DI IMPIANTO.....	60
4.4.1 <i>Analisi dei consumi energetici</i> .....	61
4.4.2 <i>Analisi del comfort termico</i> .....	64
4.5 ANALISI DELLO SFRUTTAMENTO DELLA CAPACITÀ TERMICA DELLE PARETI COME SISTEMA DI ACCUMULO.....	68
4.5.1 <i>Analisi dei consumi energetici</i> .....	70
4.5.2 <i>Analisi del comfort termico</i> .....	76
<b>5. CONCLUSIONI</b> .....	<b>79</b>
<b>ALLEGATI</b> .....	<b>80</b>
ALLEGATO A – IMPORTAZIONE DATABASE IN AMBIENTE MATLAB/SIMULINK DA EXCEL.....	80
ALLEGATO B - ESPORTAZIONE DATI SIMULAZIONI DA MATLAB/SIMULINK IN EXCEL .....	85
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>87</b>

## 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 18, che prevede la realizzazione di una campagna di simulazioni del comportamento energetico dinamico di edifici che utilizzano pompe di calore con accumuli idronici assenti o trascurabili per il servizio di climatizzazione invernale. L'individuazione degli edifici campione da utilizzare nelle simulazioni ed i modelli numerici da sfruttare per la conduzione delle simulazioni sono stati oggetto di una precedente Linea di Attività, condotta nell'ambito del medesimo progetto di ricerca.

In accordo agli obiettivi generali del progetto di ricerca, la campagna di simulazioni è stata condotta considerando edifici riscaldati con sistemi a pompa di calore aria-aria, come 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 e per giorni tipo.

I risultati ottenuti dalle simulazioni, su un campione molto numeroso di edifici, sono presentati e discussi con particolare riferimento al comportamento termo-energetico dinamico del sistema edificio-impianto a pompa di calore. A questo proposito sono valutati gli effetti di variazioni di condizioni climatiche esterne, di tipologia edilizia, di profilo di utilizzo e di caratteristiche dell'impianto nei confronti dei consumi energetici e del mantenimento delle condizioni di comfort interno, per differenti cluster di tipologie costruttive. Nella campagna di simulazioni condotta, viene investigata la possibilità di utilizzare la capacità termica dell'edificio come sistema di accumulo termico non convenzionale, con l'obiettivo di ridurre il consumo energetico dell'insieme edificio-impianto. Nella descrizione di questa fase di indagine, specifiche considerazioni sono condotte sull'utilizzo di materiali innovativi, in grado di potenziare gli effetti capacitivi delle strutture edili, quali i materiali in cambiamento di fase.

## 1. Introduzione

Il tema affrontato dalla LA18 all'interno del Work Package 3 *“Simulazioni del comportamento energetico dinamico di edifici che utilizzano pompe di calore con accumuli idronici trascurabili per il servizio di climatizzazione invernale”* segue allo sviluppo della LA16 [1]. Lo sviluppo della precedente attività ha portato alla definizione di un database tipologico composto da *“macro-categorie”* riguardanti i principali caratteri che influenzano il comportamento termo-energetico dinamico degli edifici. Tali *macro-categorie* sono le seguenti:

- zona climatica
- tipologia abitativa
- tipologia costruttiva
- profilo di occupazione
- impianto di climatizzazione a pompa di calore definito secondo le prescrizioni dalla Linea di Attività: impianto di climatizzazione invernale a pompa di calore aria-aria, del tipo a compressione di vapore ad azionamento elettrico, con sistema di accumulo idronico trascurabile o assente.

Il presente report, sviluppato seguendo le indicazioni definite nella Linea di Attività 18 del progetto di ricerca, ha come obiettivo l'analisi degli effetti dei parametri appartenenti alle macro-categorie sopra definite sul comportamento termo-energetico dinamico degli edifici, durante il periodo di riscaldamento invernale. L'analisi è condotta sfruttando i risultati di una campagna di simulazioni energetiche dinamiche, effettuate su base oraria.

Il report è strutturato in 3 capitoli principali, preceduti da un capitolo introduttivo (Capitolo 1) e seguiti dalle conclusioni (Capitolo 5). Nel Capitolo 2, al fine di una miglior comprensione dei risultati delle simulazioni, è riportato un riepilogo delle caratteristiche più significative dei modelli numerici realizzati nella precedente Linea di Attività e utilizzati per le simulazioni. Nel Capitolo 3 sono riportate tutte le informazioni necessarie alla comprensione delle simulazioni condotte, precisando i principali dati di ingresso e di uscita delle simulazioni, gli indicatori utilizzati per la discussione dei risultati ottenuti e soprattutto le differenti caratteristiche degli edifici e le loro combinazioni, per le quali sono state effettuate simulazioni del comportamento termo-energetico dinamico. Nel Capitolo 4 sono riportati e discussi i risultati ottenuti dalle simulazioni in edifici caratterizzati da tipologie di involucro (cluster costruttivi) diversi tra loro. I risultati sono discussi con riferimento agli effetti sui consumi energetici e sul mantenimento delle condizioni di comfort di: variazioni di località climatica (§ 4.1), variazioni di tipologia edilizia (§ 4.2), di profilo di utilizzo (§ 4.3), di caratteristiche di impianto (§ 4.4), della possibilità di utilizzo delle strutture edili come sistemi di accumulo termico (§ 4.5).

## 2. Riepilogo delle caratteristiche essenziali dei modelli grey-box utilizzati per l'attività di simulazione

Nella LA16, denominata *"Campione rappresentativo di edifici residenziali presenti sul territorio nazionale e modellazione semplificata per la stima del loro comportamento energetico dinamico"*, sono stati condotti due filoni di ricerca sinergici tra di loro. In accordo alle ricerche condotte, il report finale della LA16 è composto da due sezioni complementari tra loro. All'interno della Sezione A è racchiusa la definizione del database che racchiude i parametri tipologici, ambientali ed energetici mentre nella Sezione B è trattato il tema della modellazione semplificata attraverso il principio dell'analogia elettrica delineandone le peculiarità e le funzionalità essenziali.

In merito a quanto riportato nel report relativo a tale linea di attività è opportuno introdurre alcune considerazioni integrative. Queste ultime fanno riferimento a tre aspetti:

- modellazione delle unità abitative secondo volumi concettuali aventi proiezione in pianta rettangolare e volume parallelepipedo
- schematizzazione e modellazione degli elementi costruttivi verticali e orizzontali che separano due unità abitative adiacenti
- schematizzazione e funzionamento dell'impianto a pompa di calore; miglioramento generale del livello di dettaglio ed integrazione dei parametri esportabili

### 2.1 Modellazione delle unità abitative mediante volumi concettuali

In base a quanto definito con il Paragrafo 2.2.5 della Sezione A e con quanto riportato nell'Allegato B *"Unità abitative considerate: caratteristiche tipologiche e geometriche"* del report relativo alla LA16 sono state definite le tipologie abitative di riferimento con le rispettive caratteristiche geometriche. Tali parametri sono stati ottenuti per estrapolazione dai progetti TABULA ed EPISCOPE i cui risultati relativi alle tipologie abitative individuate sono riportati nell'Allegato E *"Estratti Webtool progetto TABULA/EPISCOPE"*.

Attraverso i dati ricavati dai progetti scientifici di cui sopra, sono state redatte delle schede tipologiche riportanti i parametri di riferimento necessari a condurre simulazioni energetiche dinamiche su base oraria. Inoltre, con l'obiettivo di rispondere alla prescrizione *"modellazione semplificata"*, sempre all'interno del report relativo alla LA16 sono state formulate alcune ipotesi finalizzate alla semplificazione dei reali fenomeni fisici che caratterizzano il comportamento termico-dinamico di un edificio. In aggiunta alle considerazioni espresse nella precedente linea di attività, per svolgere le simulazioni e con l'obiettivo di omogeneizzare la strategia di modellazione dei vari casi studio, si introduce la seguente ipotesi aggiuntiva: ciascuna unità abitativa avrà una proiezione in pianta rettangolare e tridimensionalmente si presenterà come un parallelepipedo regolare. Per ottenere questa schematizzazione si è partiti dai dati geometrici messi a disposizione nei suddetti progetti scientifici e riportati nel report relativo alla LA16, ricercando il volume concettuale corrispondente. I parametri geometrici di partenza sono i seguenti:

- estensione e distribuzione sulle superfici di involucro delle porzioni opache;
- estensione e distribuzione sulle superfici di involucro delle porzioni finestrate e delle porte;
- volume lordo;
- superficie lorda di ciascun piano;
- altezza di interpiano;
- numero di piani.

Nelle figure seguenti si riportano le caratteristiche geometriche essenziali degli edifici utilizzati nelle simulazioni, ottenute a partire dai dati geometrici riportati nei progetti scientifici indicati e in accordo

all'ipotesi di semplificazione geometrica sopra indicata. Al fine di una immediata comprensione delle figure seguenti, si riporta il significato delle sigle con cui sono definite le tipologie edilizie nel presente report ed in accordo con il report relativo alla LA16, a cui si rimanda per tutti i maggiori dettagli: UAM=unità abitativa monofamiliare, UAS1L=unità abitativa a schiera posizionata al limite esterno della schiera; UAS2L= unità abitativa a schiera posizionata al centro della schiera; UAC=unità abitativa inserita in condominio.

Tipologia Abitativa UAM												
Dati di riferimento scheda TABULA												
S_netta	V_netto	V_lordo	S_disp_TOT	S/V	S_solaio_CT	S_fin_N	S_fin_E	S_fin_S	S_fin_O	S_porta	h_interp	n_piani
156,3	468,9	678,8	494,0	0,7	107,8	0,0	5,9	7,8	5,9	2,4	3,0	2,0

PARALLELEPIPEDO IDEALIZZATO - Valori di riferimento per associazione ai cluster costruttivi									
S_netta	h_interp	V_lordo = V_netto	S_Cterra	S_interp	S_cop	S_disp_murature	S_edif_adiacenti	S_solai_edif_adiacenti	
216,0	3,0	648,0	108,0	108,0	108,0	236,1	---	---	

Figura 1 – UAM: parametri dimensionali in accordo all'ipotesi semplificativa sulla geometria dell'edificio

Tipologia Abitativa UAS1L												
Dati di riferimento scheda TABULA												
S_netta	V_netto	V_lordo	S_disp_TOT	S/V	S_solaio_CT	S_fin_N	S_fin_E	S_fin_S	S_fin_O	S_porta	h_interp	n_piani
62,60	375,60	434,00	289,19	0,690	68,89	1,56	4,69	9,39	0,00	2,40	3,0	2,0

PARALLELEPIPEDO IDEALIZZATO - Valori di riferimento per associazione ai cluster costruttivi									
S_netta	h_interp	V_lordo = V_netto	S_Cterra	S_interp	S_cop	S_disp_murature	S_muri_edif_adiacenti	S_solai_edif_adiacenti	
141,1	3,0	423,4	70,6	70,6	70,6	133,2	50,4	---	

Figura 2 – UAS1L: parametri dimensionali in accordo all'ipotesi semplificativa sulla geometria dell'edificio

Tipologia Abitativa UAS2L												
Dati di riferimento scheda TABULA												
S_netta	V_netto	V_lordo	S_disp_TOT	S/V	S_solaio_CT	S_fin_N	S_fin_E	S_fin_S	S_fin_O	S_porta	h_interp	n_piani
44,50	267,00	374,40	193,74	0,520	59,43	4,45	0,00	6,67	0,00	2,40	3,0	2,0

PARALLELEPIPEDO IDEALIZZATO - Valori di riferimento per associazione ai cluster costruttivi									
S_netta	h_interp	V_lordo = V_netto	S_Cterra	S_interp	S_cop	S_disp_murature	S_muri_edif_adiacenti	S_solai_edif_adiacenti	
121,9	3,0	365,6	60,9	60,9	60,9	61,5	117	---	

Figura 3 – UAS2L: parametri dimensionali in accordo all'ipotesi semplificativa sulla geometria dell'edificio

Tipologia Abitativa UAC												
Dati di riferimento scheda TABULA												
S_netta	V_netto	V_lordo	S_disp_TOT	S/V	S_solaio_CT	S_fin_N	S_fin_E	S_fin_S	S_fin_O	S_porta	h_interp	n_piani
73,10	219,30	219,30	---	---	---	0,00	0,00	0,38	7,75	2,40	3,0	1,0

PARALLELEPIPEDO IDEALIZZATO - Valori di riferimento per associazione ai cluster costruttivi									
S_netta	h_interp	V_lordo = V_netto	S_Cterra	S_interp	S_cop	S_disp_murature	S_muri_edif_adiacenti	S_solai_edif_adiacenti	
73,1	3,0	219,4	---	73,1	---	43,3	49,02	146,24	

Figura 4 – UAC: parametri dimensionali in accordo all'ipotesi semplificativa sulla geometria dell'edificio

Le caratteristiche geometriche determinate per ciascuna tipologia abitativa verranno associate ai relativi elementi costruttivi determinando le caratteristiche di resistenza termica e capacità termica di ciascun elemento in accordo con quanto riportato nel Capitolo 5 e nel Capitolo 7 della Sezione B [1] del report redatto al termine della LA 16.



## 2.2 Schematizzazione degli elementi costruttivi di contatto tra unità abitative adiacenti

Definita l'implementazione rispetto alla geometria degli edifici è necessaria una considerazione in merito agli elementi costruttivi che separano due o più unità abitative adiacenti; questa considerazione è necessaria nel caso delle tipologie abitative UAS1L, UAS2L, UAC (non nel caso della UAM che non presenta unità immobiliari confinanti).

Per la determinazione di una strategia operativa relativa alla schematizzazione RC degli elementi citati si fa riferimento al Paragrafo 5.3.3.2 della Sezione B del report relativo alla LA16. In tale paragrafo si descrive la schematizzazione dei divisori interni (solai di interpiano e tramezzature), i quali vengono modellati all'interno dell'ambiente Matlab/Simulink come blocco unico composto da una resistenza termica rappresentativa del flusso liminare posta in serie ad una resistenza ed una capacità termica; i valori di riferimento di questi tre elementi si determinano in funzione delle caratteristiche dimensionali e dei materiali costruttivi.

Al fine di non introdurre ulteriori parametri di variazione nello sviluppo delle simulazioni, le condizioni a contorno, in particolare la temperatura dell'aria delle unità abitative adiacenti viene considerata uguale a quella dell'unità abitativa analizzata.

In Tabella 1 per ciascuna tipologia abitativa sono riportate le distribuzioni superficiali di pareti e solai che separano due unità abitative adiacenti. Tali dimensioni sono utilizzate per determinare le caratteristiche termofisiche dei rispettivi componenti R e C.

**Tabella 1 – Distribuzione delle superfici di contatto tra due o più unità abitative adiacenti**

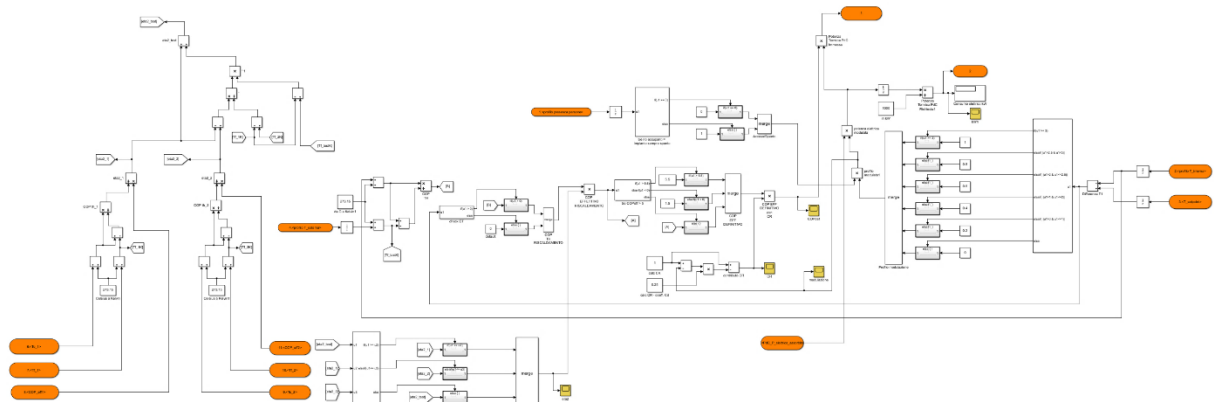
	UAM	UAS1L	UAS2L	UAC
Pareti verticali [m <sup>2</sup> ]	0.00	50.40	117.00	49.20
Solai divisori [m <sup>2</sup> ]	0.00	0.00	0.00	146.24

## 2.3 Schema funzionale dell'impianto a pompa di calore

A complemento della determinazione delle caratteristiche geometriche-costruttive di ciascuna unità abitativa, l'analisi dell'interazione tra edificio ed impianto a pompa di calore rappresenta un elemento di interesse nell'ottica di ottenere logiche di gestione del sistema impiantistico finalizzate alla riduzione dei consumi energetici. Affinché tale interazione possa essere studiata con i modelli semplificati realizzati nel presente studio, è necessario implementare l'impianto di riscaldamento a pompa di calore precisando che in questo studio l'attenzione è rivolta a sistemi di riscaldamento che utilizzino pompe di calore con sistema di accumulo idronico trascurabile o assente.

I parametri che influenzano il comportamento dell'impianto e l'analisi energetica dinamica sono molteplici; la logica di gestione della pompa di calore è guidata dal valore della temperatura interna ed il suo andamento, dal valore della temperatura esterna e dal suo andamento ed infine il profilo di occupazione durante le ventiquattro ore. Inoltre, si specifica che per come sono composte all'interno dell'interfaccia Matlab/Simulink le caratteristiche prestazionali della pompa di calore possono essere customizzate in funzione dei dati a disposizione. La rappresentazione schematica del modello logico completo con cui è stato modellato il funzionamento della pompa di calore è riportata in Figura 5. I dati di input richiesti per il funzionamento del modello sono i seguenti:

- Potenza elettrica assorbita [W]
- $T_{c1}$  - temperatura sorgente calda, condizioni di funzionamento 1 (es. 20°C);
- $T_{f1}$  - temperatura sorgente fredda, condizioni di funzionamento 1 (es. 2°C);
- $COP_1$  - coefficiente di prestazione condizioni di funzionamento 1;
- $T_{c2}$  - temperatura sorgente calda, condizioni di funzionamento 2 (es. 20°C);
- $T_{f2}$  - temperatura sorgente fredda, condizioni di funzionamento 2 (es. 12°C);
- $COP_2$  - coefficiente di prestazione condizioni di funzionamento 2.



- **Figura 5 – Rappresentazione schematica del modello logico completo con cui è stato modellato il funzionamento della pompa di calore su piattaforma Matlab/Simulink**

Tali dati sono generalmente forniti dai produttori delle pompe di calore. Noti i dati di input, in maniera dinamica ed automatica lo schema riportato in Figura 5 determina con passo orario tutti i parametri che caratterizzano l'effettivo comportamento della pompa di calore:

- COP - il coefficiente di prestazione effettivo;
- $\eta_{II}$  - il rendimento di secondo principio[2];
- CR – il fattore di carico.

Per quanto concerne il valore del coefficiente di prestazione (COP) della pompa di calore, il modello semplificato realizzato tiene in considerazione la variabilità della temperatura della sorgente di scambio termico esterna (aria esterna) e della variazione della temperatura interna con cui opera la pompa di calore. Di conseguenza, il valore effettivo del COP della pompa di calore viene aggiornato con passo orario in funzione di questi due termini, del rendimento di secondo principio e del fattore di carico. Per quanto concerne quest'ultimo, nel caso di pompe di calore a compressione di vapore ad azionamento elettrico, come quelle considerate nel presente studio, la determinazione delle prestazioni a pieno carico, in condizioni diverse da quelle dichiarate può effettuarsi con interpolazione lineare tra i valori del rendimento di secondo principio, come descritto nel report relativo alla LA16. In Tabella 2, a titolo di esempio, si riportano una serie di dati tipologici, ricavati da datasheet forniti da produttore per  $T_c = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_{f1} = 2^\circ\text{C}$  e  $T_{f2} = 12^\circ\text{C}$ , per alcuni modelli di pompe di calore già indicati nel report relativo alle attività della LA16. I termini  $T_{f1}$  e  $T_{f2}$  rappresentano i due punti estremi per il calcolo proporzionale del rendimento di secondo principio. Tale intervallo, come prescritto nei Paragrafi 9.4.3.2 e 9.4.3.3 della UNI TS 11300-4 [3], può essere esteso per ulteriori 5 Kelvin mantenendo costante il valore del rendimento di secondo principio.

**Tabella 2 – Esempi di caratteristiche prestazionali di pompe di calore aria-aria (dati dichiarati da produttori)**

Produttore	Modello	COP_1	$\eta_{II,1}$	COP_2	$\eta_{II,2}$
	MXZ-2F33VF3	4.11	0.18	4.70	0.13
	MXZ-2F53VF3	4.78	0.21	5.48	0.15
	MXZ-4F80VF3	4.30	0.19	4.92	0.13

Tale prescrizione di fatto consente di determinare in maniera algebrica il valore di  $\eta_{II}$  in un range che varia tra  $-3^{\circ}\text{C}$  e  $+17^{\circ}\text{C}$  (avendo scelto  $T_{f1} = 2^{\circ}\text{C}$  e  $T_{f2} = 12^{\circ}\text{C}$ ), oltre tali estremi l'espressione perde di validità come riportato nella UNI TS 11300-4. In ottica di condurre una modellazione semplificata, il valore del rendimento di secondo principio viene calcolato mediante l'equazione riportata precedentemente per tutti i valori interni all'intervallo di riferimento, mentre per valori esterni a tale intervallo si assume  $\eta_{II}$  costante pari ai valori determinati ai due punti di estremità. Infine, è opportuno ricordare che, se si utilizza una logica di regolazione della potenza erogata dalla pompa di calore di tipo proporzionale alla differenza di temperatura tra la temperatura di set-point e la temperatura effettiva dell'aria interna, il COP effettivo sarà ottenuto operando una correzione in funzione del fattore di carico CR, definito come il rapporto tra la potenza termica erogata dalla macchina e quella massima erogabile. La correzione viene effettuata secondo l'equazione seguente [4]:

$$COP_{PL} = COP (1 - (1 - CR)/4)$$

dove:  $COP_{PL}$  = COP effettivo a carico parziale, COP = COP a fattore di carico  $CR=1$ , CR = fattore di carico della pompa di calore.

Nelle Figure 6 e 7 sono riportate le rappresentazioni schematiche dei modelli su piattaforma Matlab/Simulink implementate per il calcolo del rendimento di secondo principio e del coefficiente di prestazione. Il calcolo di quest'ultimo è effettuato a valle del calcolo di  $\eta_{II}$  e CR. Essendo una modellazione semplificata che non tiene espressamente conto di tutti i fenomeni fisici che determinano il comportamento della PdC sono stati imposti due limiti logici al valore del COP, un valore minimo pari a 1.5 ed un valore di COP massimo pari a 5.5. Nella Figura 8 è riportata la logica di modulazione scelta come riferimento per il funzionamento della pompa di calore, essa è di tipo proporzionale determinata con passo orario in funzione della differenza tra la temperatura di setpoint impostata a  $20^{\circ}\text{C}$  e la temperatura dell'aria interna variabile dinamicamente. La differenza tra le due temperature viene determinata con passo orario. Gli intervalli di temperatura ed il relativo termine di modulazione sono riportati in Tabella 3. Non essendo le logiche di accensione/spegnimento ottimizzate oggetto del presente studio, è stato deciso di regolare accensione/spegnimento della pompa di calore nel modo più semplice, cioè in base all'occupazione dell'unità abitativa. La ricerca della temperatura di set-point, attraverso l'immissione in ambiente interno di potenza termica da parte della pompa di calore, viene dunque garantita esclusivamente in presenza di almeno un occupante dell'unità abitativa, negli altri casi (unità abitativa inoccupata) la pompa di calore viene tenuta spenta. In funzione della logica operativa appena descritta, viene valutata l'energia elettrica utilizzata su base oraria dalla pompa di calore.

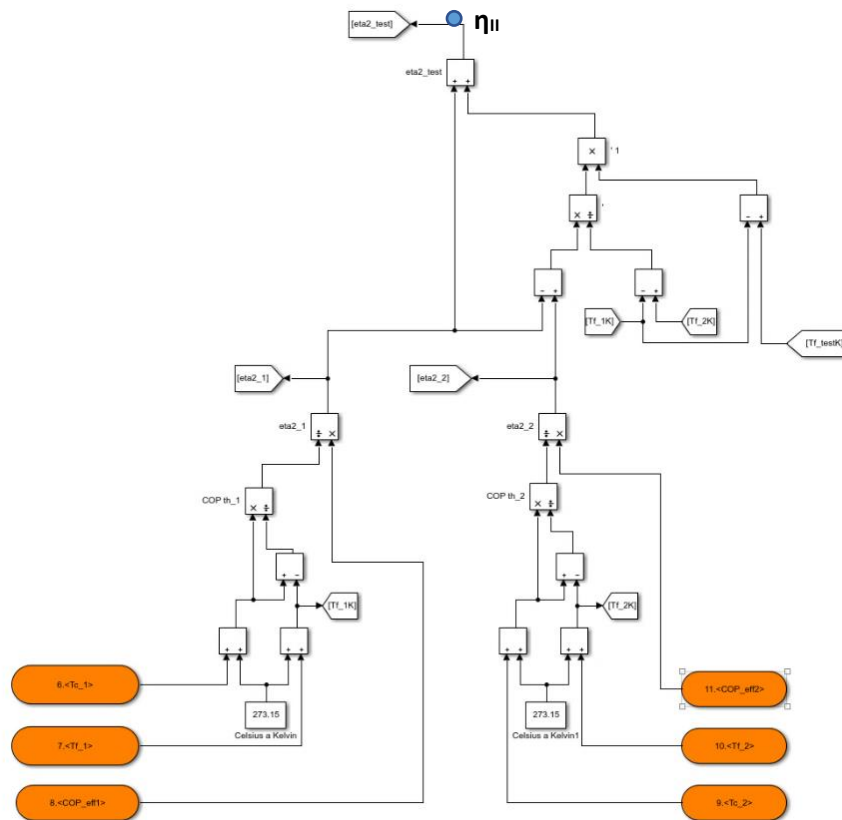


Figura 6 – Rappresentazione schematica del modello logico per il calcolo del rendimento di secondo principio realizzato su Matlab/Simulink

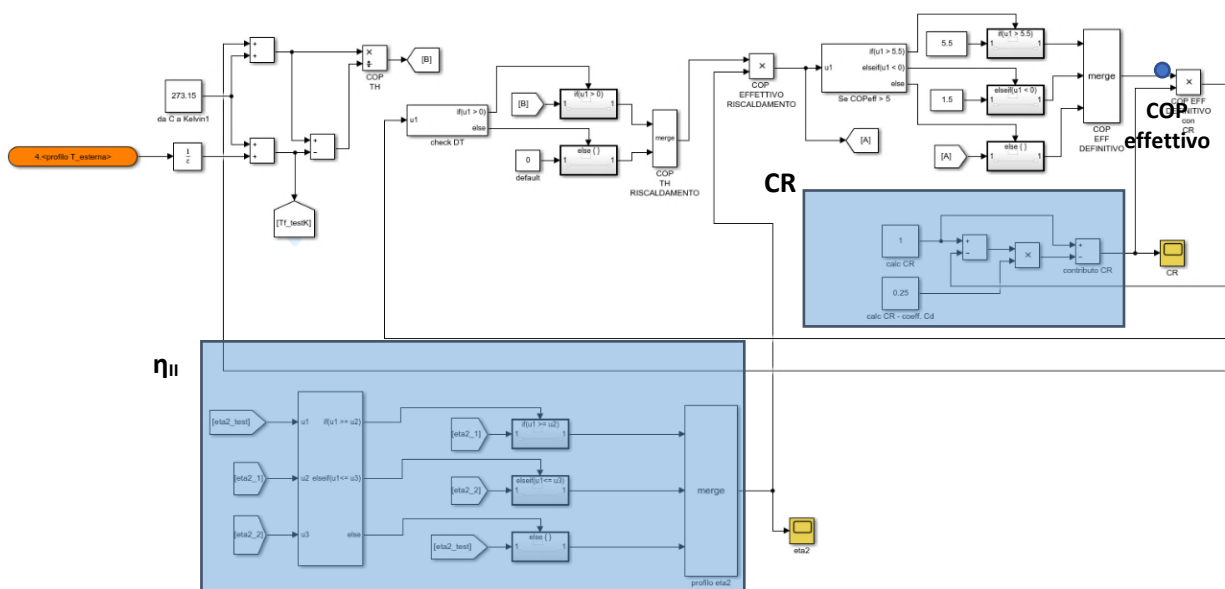
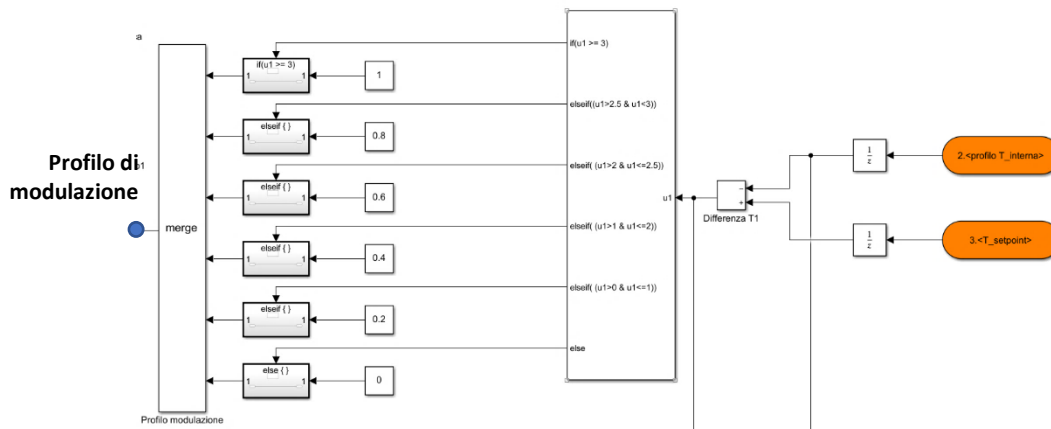


Figura 7 – Rappresentazione schematica del modello logico per il calcolo del COP effettivo realizzato su Matlab/Simulink



**Figura 8 – Rappresentazione schematica del modello logico per il calcolo del COP effettivo realizzato su Matlab/Simulink**

**Tabella 3 – Intervalli di riferimento per la modulazione della potenza della pompa di calore**

$\Delta T$ °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%

### 2.3.1 Esportazione dei parametri di funzionamento della pompa di calore

Definita la logica di gestione e controllo dell’impianto di climatizzazione invernale a pompa di calore con accumulo idronico trascurabile o assente, a seguito di ciascuna simulazione vengono esportati una serie di parametri attraverso la predisposizione di blocchi logici e script in linguaggio Matlab. Attraverso tali strumenti i seguenti parametri vengono esportati con passo orario:

- Profilo di modulazione
- Andamento del fattore di carico CR
- COP effettivo
- Andamento del rendimento di secondo principio  $\eta_{II}$
- Consumo elettrico in kWh

L’insieme di questi parametri consentirà analisi specifiche che verranno esplicitate secondo i criteri indicati nei paragrafi del presente report scientifico.

## 2.4 Importazione Database dati climatici ed esportazione risultati delle simulazioni

Il principio dell'analogia elettrica consente di schematizzare un edificio come un sistema articolato di resistenze e condensatori al fine di studiarne il comportamento termo-energetico in regime di scambio termico transitorio. Per poter simulare il comportamento in regime dinamico sono necessari dei dati di ingresso, tra cui i dati climatici della località di ubicazione e i dati relativi alla modalità di occupazione dell'edificio. I dati climatici delle località di ubicazione, considerate in questo studio, sono riportati per il periodo di riferimento annuale nel report relativo alle attività condotte nella LA16 [1]. Al fine di avere la certezza che il sistema schematizzato raggiungesse un regime di funzionamento stabilizzato, è stata effettuata una campagna di simulazioni preliminari considerando il periodo dei dati climatici non limitato ad un anno (che contiene una unica stagione di riscaldamento), ma esteso a più anni. Il periodo esteso è stato creato semplicemente ripetendo i dati climatici dell'anno di riferimento più volte. Una volta individuata la durata che consentiva il raggiungimento della condizione stabilizzata, sono state condotte tutte le simulazioni utilizzate per i commenti esposti nelle sezioni successive. Si ricorda che i commenti esposti successivamente si riferiscono unicamente ai risultati ottenuti per la stagione di riscaldamento. Lo script utilizzato per importare il database dal file Excel di partenza all'ambiente Matlab/Simulink è riportato nell'Allegato A al presente report.

Per quanto riguarda l'esportazione dei dati relativi alle simulazioni è stato realizzato uno script dedicato che consente di estrapolare i dati dall'ambiente di lavoro Simulink. L'esportazione sfrutta un blocco "Scope" che genera una struttura definita "time-series" di dati, ovvero ad ogni specifico istante di tempo è associato un determinato valore. Successivamente la struttura creata viene associata ad un foglio di calcolo Excel attraverso la funzione "writetable". Questo script, eseguito al termine di ogni simulazione di ogni modello permette di memorizzare i dati all'interno dello spreadsheet. Lo script utilizzato per l'esportazione dei dati a seguito delle simulazioni è riportato nell'Allegato B del presente report.

Infine, con l'obiettivo di effettuare considerazioni finalizzate alla valutazione degli effetti dei parametri che caratterizzano la matrice tipologica considerata (quali: zona climatica, tipologia abitativa, profilo di utilizzo e tipologia costruttiva), è stato scelto di esportare i seguenti parametri di output con l'obiettivo di confrontare le prestazioni individuali ottenute da ciascun modello. Le variabili esportate dopo ogni simulazione mediante relativi script sono state le seguenti:

- intervalli orari di riferimento;
- profilo temperatura interna;
- profilo di modulazione pompa di calore;
- profilo fattore di carico pompa di calore;
- profilo coefficiente di prestazione pompa di calore;
- profilo dei consumi elettrici pompa di calore.

### 3. Introduzione alla campagna di simulazioni

Le implementazioni descritte nel Capitolo 2 del presente report consentono di avere un database omogeneo, uniforme e tale da poter seguire logiche operative analoghe indipendentemente dallo specifico caso investigato. Questo consente di confrontare i parametri esportati e le caratteristiche prestazionali ricavate in modo trasversale, rapido ed efficace. In questo Capitolo vengono riepilogate le caratteristiche fondamentali della campagna di simulazioni condotta.

#### 3.1 Caratteristiche del campione oggetto di simulazioni

La campagna di simulazioni condotta in questa linea di attività riguarda lo studio del comportamento termo-energetico in regime dinamico su base oraria di un set di edifici tipologici opportunamente identificati durante la precedente LA16 [1]. Queste simulazioni sono eseguite focalizzando l'attenzione sul periodo di riscaldamento invernale, per il quale si specifica che il generatore termico sarà una pompa di calore che sfrutta l'aria esterna come sorgente termica ed è caratterizzata da accumulo idronico trascurabile o assente.

In Tabella 4 e nei successivi Paragrafi 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 e 3.1.4 si riportano le sintesi dei caratteri di riferimento che hanno consentito la composizione del campione che sarà oggetto delle simulazioni.

**Tabella 4 – Riepilogo caratteristiche fondamentali della campagna di simulazione**

Intervallo temporale di riferimento per le simulazioni	Orario – 60 min
Caratteristiche del campione analizzato nella campagna di simulazioni	
<i>Paragrafo 3.1.1</i> n. di Zone climatiche di riferimento	4
<i>Paragrafo 3.1.2</i> n. di Tipologie abitative residenziali di riferimento	4
<i>Paragrafo 3.1.3</i> n. di Profili di occupazione di riferimento	4
<i>Paragrafo 3.1.4</i> n. di Tipologie costruttive di riferimento	8
Totale n. di edifici tipologici analizzati	512
Temperatura di set-point per aria interna (mantenuto esclusivamente quando almeno una persona è presente all'interno dell'unità abitativa).	20°C

##### 3.1.1 Riepilogo località climatiche di riferimento

In funzione di quanto analizzato nel Paragrafo 2.1 della Sezione A del report relativo alla linea di attività 16 [1], tenendo in considerazione la classificazione in gradi giorno invernali, sono state identificate quattro "Zone climatiche di progetto" si vedano Tabella 5 e Figura 9. Per ciascuna di queste, mediante una valutazione sulla popolazione residente, è stata identificata la località di riferimento riportata in Tabella 6. Per i dettagli del metodo di identificazione si rimanda al report relativo alle attività della LA16 [1]. Per ciascuno di queste località di riferimento è stato individuato un database di dati climatici, tra le possibilità a disposizione è stato scelto il database fornito dal Joint Research Center (JRC) [5] come più funzionale ed adatto alla campagna di simulazioni in oggetto. La struttura dei database si compone di 12 "mesi-tipo", l'intervallo temporale sui cui essi sono stati identificati è compreso tra l'anno 2006 e l'anno 2017. I parametri ambientali che verranno utilizzati nelle successive campagne di simulazione relativamente ai mesi tipo sono i seguenti:

- temperatura dell'aria esterna [ °C ]
- irraggiamento solare su superfici orizzontali [  $\frac{W}{m^2}$  ]
- irraggiamento solare su superfici verticali [  $\frac{W}{m^2}$  ]

Al fine di essere utilizzato come dato di ingresso nelle simulazioni, è stato dunque creato un database ad-hoc (estrapolando dal database JRC i soli dati di interesse) relativo a ciascuna località di riferimento. I database creati sono stati organizzati in schede tipologiche caratterizzanti la località di riferimento. In Tabella 7, a titolo di esempio, si riporta la scheda tipologica redatta per la località di Palermo.

**Tabella 5 - Zone climatiche di progetto**

Zona Climatica di Progetto	Gradi Giorno (GG)	Comuni (2018)	Abitanti (2018)
ZCP_1	GG<900	159	3240554
ZCP_2	900<GG<1400	981	12826700
ZCP_3	1400<GG<2100	1572	15168668
ZCP_4	GG>2100	5202	29124000
Totale		7914	60359922



**Figura 9 – Suddivisione del territorio nazionale in Zone Climatiche di Progetto (ZCP)**

**Tabella 6 - Comuni di riferimento per zone climatiche di progetto (ZCP)**

Zona Climatica di Progetto	Città di riferimento	Abitanti	Gradi Giorno Medi
ZCP_1	Palermo	663401	751
ZCP_2	Napoli	959188	1034
ZCP_3	Roma	2856133	1415
ZCP_4	Milano	1378689	2404

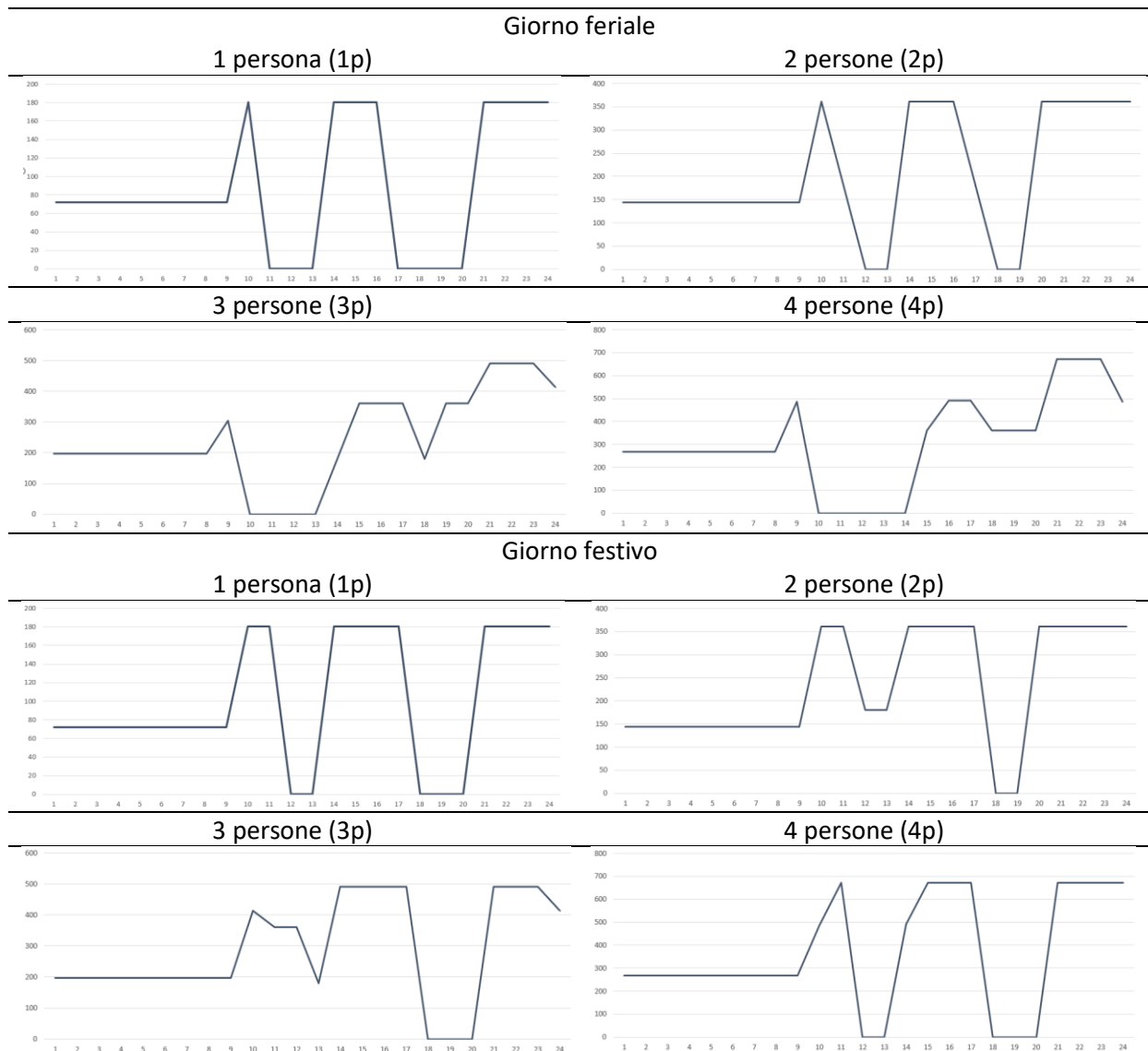




### 3.1.3 Riepilogo profili di occupazione di riferimento

Nella definizione di modelli semplificati da utilizzare per la previsione del comportamento energetico dinamico di un edificio, l'attenzione ai profili temporali di occupazione dell'edificio da parte degli utenti risulta di grande importanza [6]. Essi infatti influiscono sia sui valori delle grandezze ambientali che debbono essere mantenuti all'interno degli edifici (uno su tutti: il valore della temperatura dell'aria interna che, per la stagione invernale, nel caso in cui l'edificio sia occupato viene generalmente considerato pari a 20°C), sia sugli apporti termici interni generati nell'edificio.

**Tabella 9 – Riepilogo degli apporti termici dovuti alla presenza di persone (orario in ascisse, apporto in W ordinate)**



Con il termine “*profilo di occupazione*” si intende il resoconto temporale, su base oraria, delle abitudini e delle attività dei componenti di ogni nucleo familiare che, nel caso residenziale, occupa l’edificio o l’unità abitativa [7]. Ricavati attraverso elaborazione di dati statistici resi disponibili dall’Istat in precedenti studi scientifici, sono stati estrapolati alcuni profili di occupazione maggiormente rappresentativi, determinati in funzione della frequenza con cui essi si manifestano all’interno del panorama completo delle possibilità. In particolare sono stati identificati quattro pattern settimanali di utilizzo composti da cinque giorni feriali e due festivi per nuclei familiari composti da 1, 2, 3, 4 persone. Per ciascun pattern è stato calcolato l’apporto metabolico complessivo identificando i profili di apporto energetico interno dovuto alla presenza di persone. I profili sono riportati in Tabella 9 distinguendo due giorni tipologici, giorno feriale e giorno festivo (si vedano i dettagli nel report relativo alle attività della LA16 [1]).

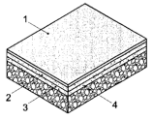
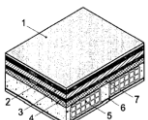
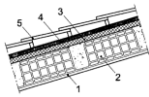
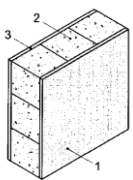
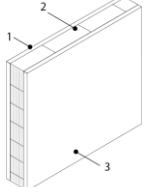
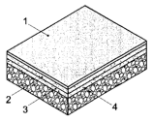
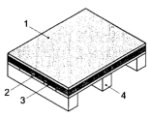
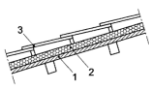
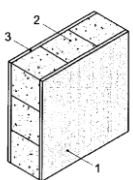
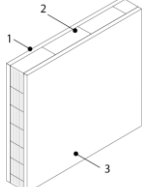
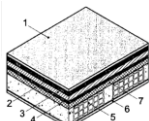
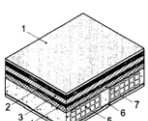
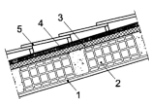
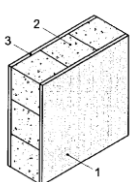
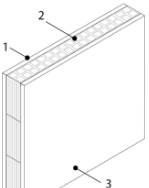
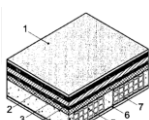
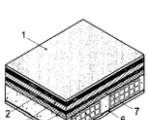
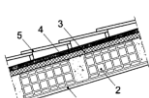
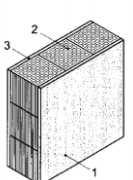
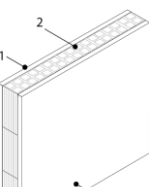
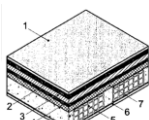
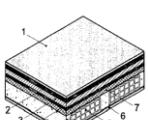
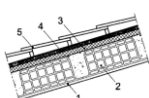
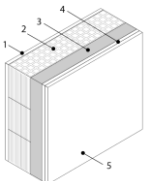
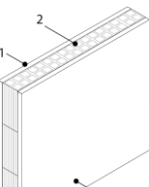
Parallelamente ai profili di occupazione è necessario considerare gli apporti interni dovuti all’utilizzo di dispositivi elettronici. In merito a questi ultimi in letteratura non si trovano specifiche regole riguardo gli edifici ad uso residenziale, la stessa UNI TS 11300-1 fornisce solamente dei valori complessivi per gli apporti interni [8]. A tale scopo, attraverso una indagine condotta sulla letteratura scientifica esistente sono stati definiti due valori maggiormente significativi riferiti ad unità di superficie:

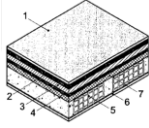
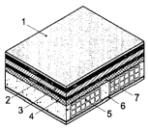
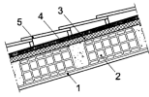
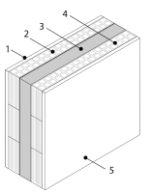
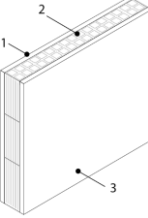
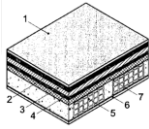
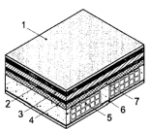
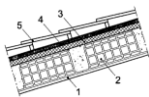
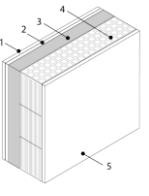
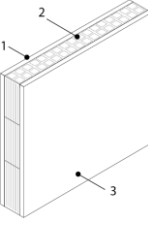
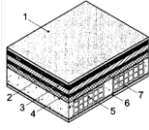
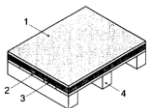
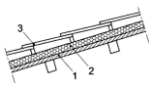
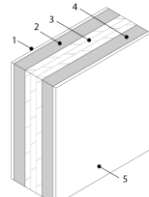
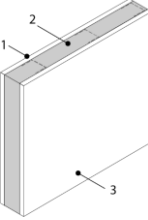
- 5 W/m<sup>2</sup>, per il periodo diurno se ci sono persone presenti e attive;
- 1 W/m<sup>2</sup>, per il periodo notturno se ci sono persone presenti ed inattive e per il periodo diurno quando non ci sono persone presenti.

### 3.1.4 Riepilogo delle tipologie costruttive di riferimento

A chiudere il quadro relativo al campione che sarà oggetto della campagna di simulazioni si riporta di seguito la configurazione delle tipologie costruttive identificate come maggiormente significative. Attraverso una analisi delle soluzioni contenute all’interno dei progetti TABULA ed EPISCOPE è stato riscontrato come le differenti epoche di costruzione siano caratterizzate da differenti tipologie costruttive e che queste a loro volta hanno inciso sulla scelta dei materiali e tecniche costruttive. Combinando le soluzioni maggiormente diffuse nell’edilizia residenziale nazionale esistente con gli elementi costruttivi da schematizzare (soffitto orizzontale di copertura, soffitto orizzontale a terra, soffitto orizzontale interpiano, parete verticale verso esterno, divisorio interno) sono stati identificati otto cluster. Con la denominazione “*cluster*” si intende una combinazione di elementi costruttivi, ciascuno con la sua specifica funzione e le sue relative caratteristiche termofisiche. In Tabella 10 sono riportati i cluster che verranno applicati alle varie tipologie abitative. Per le caratteristiche fisiche relative a ciascun elemento costruttivo si fa riferimento all’Allegato C contenuto nella Sezione A del report relativo alla LA16 [1].

**Tabella 10 – Cluster con le soluzioni costruttive di riferimento**

ID Cluster	Tipo di elemento				
	S. Contro Terra	S. Interpiano	S. Copertura	P. Ext. Verticale	Tramezzi
C01	Sc_terra,01 	Sint,01 	Scop,01 	Penv,pietra 	Tint,01 
C02	Sc_terra,01 	Sint,02 	Scop,02 	Penv,pietra 	Tint,01 
C03	Sc_terra,02 	Sint,01 	Scop,01 	Penv,pietra 	Tint,02 
C04	Sc_terra,02 	Sint,01 	Scop,01 	Penv,lat,01 	Tint,02 
C05	Sc_terra,02 	Sint,01 	Scop,01 	Penv,lat,02 	Tint,02 

ID Cluster	Tipo di elemento				
	S. Contro Terra	S. Interpiano	S. Copertura	P. Ext. Verticale	Tramezzi
C06	Sc_terra,02 	Sint,01 	Scop,01 	Penv,lat,03 	Tint,02 
C07	Sc_terra,02 	Sint,01 	Scop,01 	Penv,lat,04 	Tint,02 
C08	Sc_terra,02 	Sint,02 	Scop,02 	Penv,legno 	Tint,03 

### 3.2 Caratteristiche della campagna di simulazione

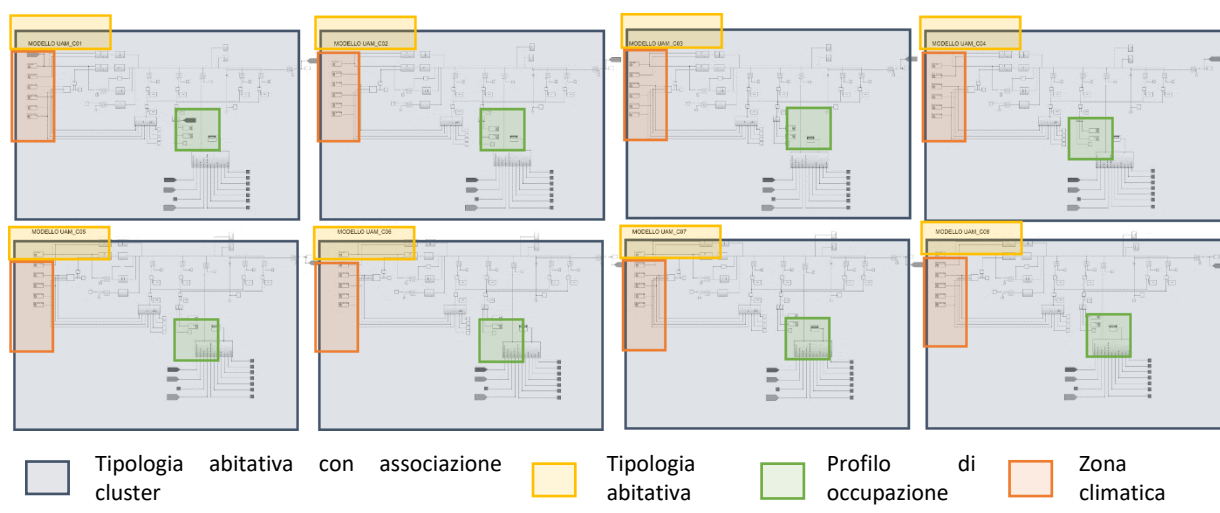
I caratteri tipologici di riferimento, definiti anche *macro-categorie* e riepilogati nel paragrafo 3.1, consentono di comporre un database estremamente eterogeneo. La variazione della zona climatica in combinazione con la variazione della tipologia abitativa, della tipologia costruttiva e dei profili di occupazione genera un database di 512 edifici con caratteristiche differenti schematizzati mediante modelli RC semplificati. Oltre a questi 512 edifici, al fine di investigare l’impatto delle caratteristiche dell’impianto e la possibilità di utilizzare la capacità termica delle strutture edili come accumulo termico non convenzionale in combinazione con una pompa di calore aria-aria, sono state aggiunte ulteriori variazioni (descritte più avanti nei capitoli 4 e 5) fino al raggiungimento di un database di circa 800 differenti configurazioni edificio-impianto, tutte dotate di un apposito modello. Ciascun modello appartenente a questo database è stato oggetto di simulazione energetica finalizzata allo studio del rispettivo comportamento termo-energetico dinamico su base oraria, con particolare riferimento al periodo di riscaldamento invernale. Quest’ultimo ha una durata che varia in funzione della zona climatica, la durata del periodo di riscaldamento associato a ciascuna città di riferimento è riportata in Tabella 11.

L’insieme delle simulazioni mira allo studio degli effetti delle singole caratteristiche che compongono ogni edificio campione ricercando il loro effetto sulle prestazioni termiche dinamiche sia in merito ai consumi energetici che al mantenimento delle condizioni di comfort interno. Le caratteristiche tipologiche sono state gestite sistematicamente associando ad ogni zona climatica tutte le tipologie

abitative a cui sono stati attribuiti tutti i cluster relativi alle tipologie costruttive e tutti i profili di occupazione. In Figura 10 si riporta la schermata tipologica di una simulazione eseguita all'interno dell'interfaccia Simulink.

**Tabella 11 – Durata del periodo di riscaldamento invernale**

Città di riferimento	Periodo di riscaldamento invernale		
	Giorno di inizio	Giorno di fine	Durata in ore
Palermo	1° dicembre	31 marzo	2904
Napoli	15 novembre	31 marzo	3288
Roma	1° novembre	15 aprile	3984
Milano	15 ottobre	15 aprile	4392



**Figura 10 – Esempio di interfaccia tipologica di una simulazione in ambiente Matlab/Simulink**

All'interno della schermata riportata in figura, ciascuna simulazione produce dati per n. 8 edifici campione, variando il profilo di occupazione e la zona climatica si ottengono n. 128 modelli, infine variando la tipologia abitativa si arriva alla composizione del database completo di n. 512 modelli.

Nei paragrafi seguenti prima di entrare nell'ambito delle simulazioni vere e proprie si riportano le grandezze esportate con i relativi grafici di trend unitamente alle grandezze statistiche e complementari determinate a partire dai dati di output di ciascuna simulazione.

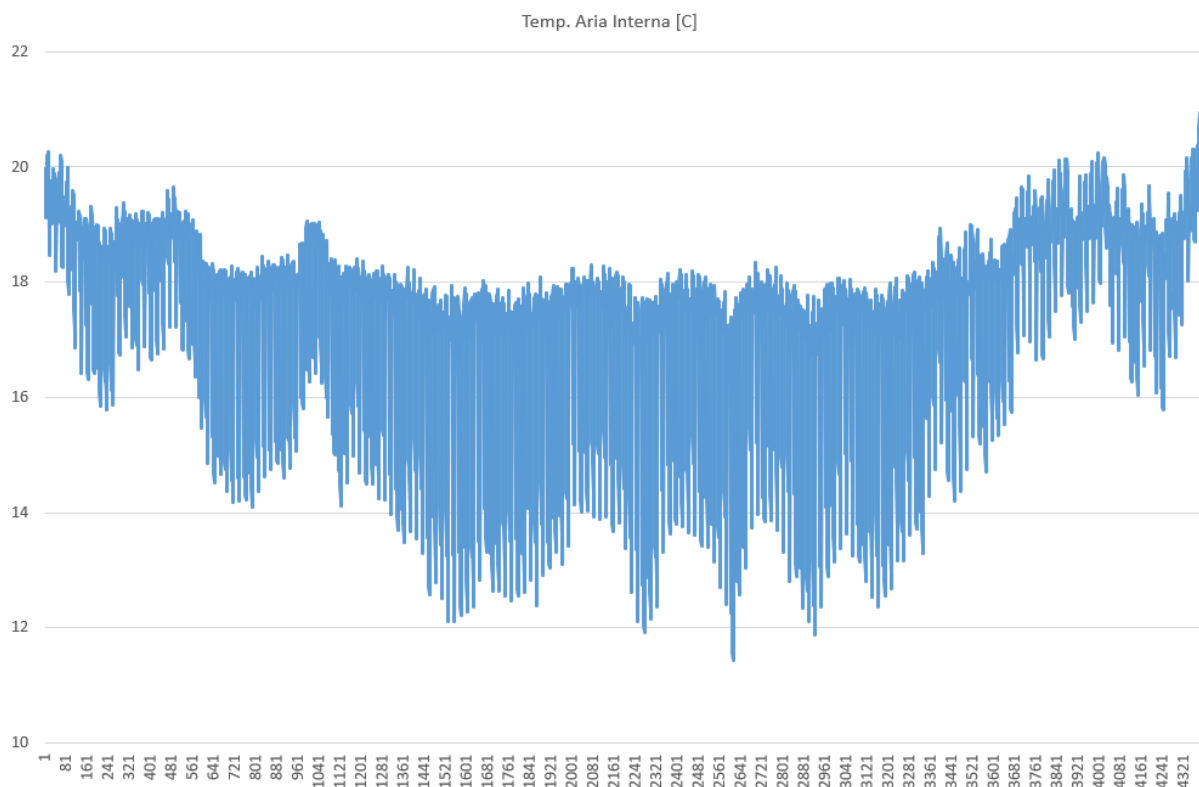
### 3.2.1 Parametri esportati da ciascuna simulazione – Dati di output

In accordo con quanto riportato nel Paragrafo 3.4 e con l'obiettivo di effettuare le considerazioni specifiche espresse nel precedente paragrafo al termine di ciascuna simulazione vengono esportate una serie di grandezze.

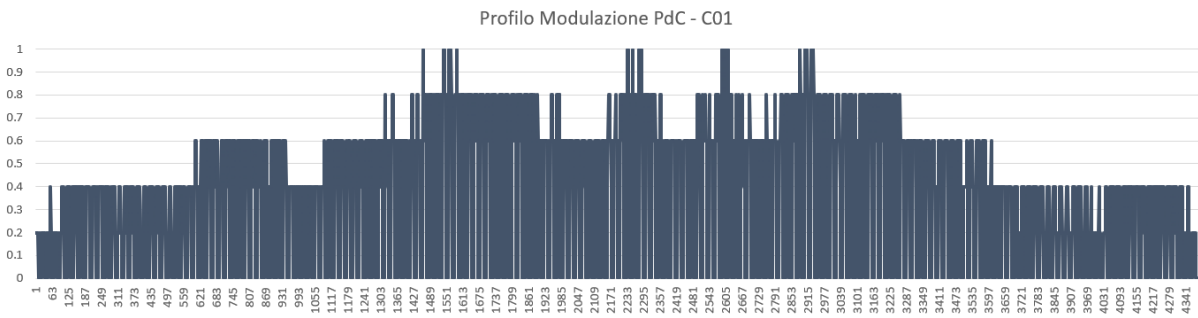
Le grandezze di cui vengono esportati i relativi andamenti, per un intervallo temporale di riferimento, sono le seguenti:

- temperatura dell'aria interna;
- modulazione pompa di calore;
- fattore di carico pompa di calore;
- coefficiente di prestazione pompa di calore;
- consumo elettrico pompa di calore.

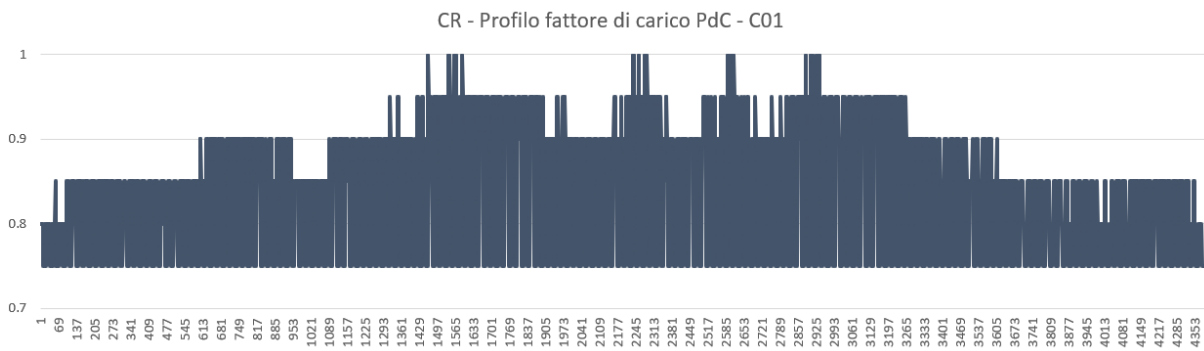
Questi dati vengono esportati come delle semplici sequenze definite "time-series", cioè a ciascun valore del parametro è associata l'ora di riferimento dall'inizio della simulazione; una volta esportati sono stati organizzati e gestiti su file xls in modo da ottenere le informazioni strettamente necessarie alle analisi. Nelle figure seguenti (da Figura 11 a Figura 15) si riportano gli andamenti, per tutta la stagione di riscaldamento, delle grandezze indicate. Da tali andamenti sono stati opportunamente estratti gli andamenti per periodi di tempo più contenuti (settimanale e giornaliero). A titolo di esempio, i dati riportati nelle figure seguenti fanno riferimento alla tipologia abitativa monofamiliare UAM a cui è associato il cluster costruttivo C01, sita in Milano e con profilo di utilizzo determinato da una persona. Tale situazione risulta la più critica dal punto di vista del fabbisogno energetico per riscaldamento, in quanto presenta il più svantaggioso rapporto superficie disperdente su volume lordo (data la tipologia edilizia UAM), il minor livello di isolamento termico (data la tipologia costruttiva C01), la località climatica più fredda (Milano) ed il più contenuto valore di apporti interni (profilo di occupazione 1p di una singola persona).



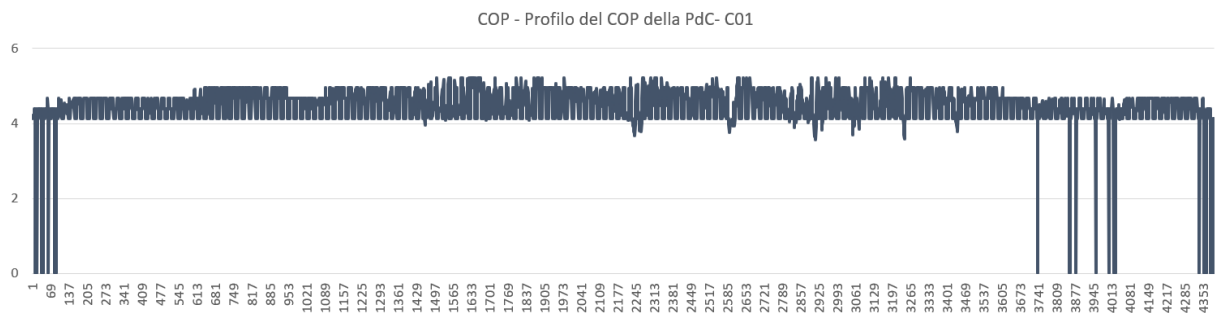
**Figura 11 – Andamento temperatura aria interna (Milano, UAM, C01, 1p)**



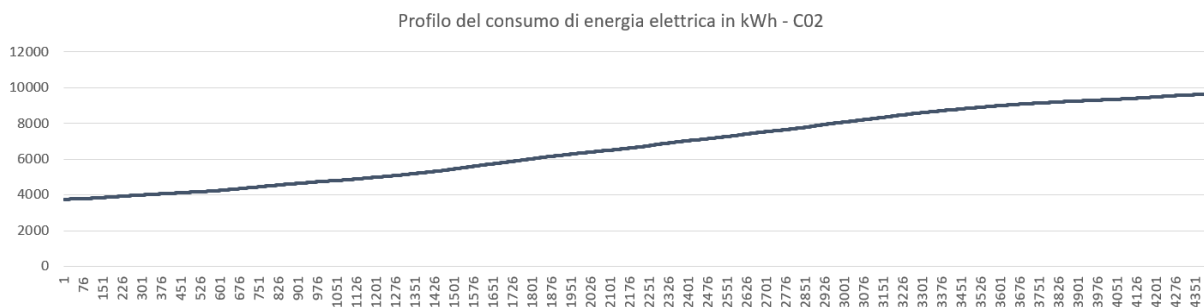
**Figura 12 – Andamento modulazione della pompa di calore (Milano, UAM, C01, 1p)**



**Figura 13 – Andamento fattore di carico della pompa di calore (Milano, UAM, C01, 1p)**



**Figura 14 – Andamento Coefficiente di Prestazione (COP) della pompa di calore (Milano, UAM, C01, 1p)**



**Figura 15 – Andamento consumo elettrico della pompa di calore (Milano, UAM, C01, 1p)**



### 3.2.2 Parametri statistici di confronto utilizzati per le valutazioni sul mantenimento delle condizioni di comfort

I dati esportati dalle simulazioni, di cui è stata riportata una sintesi nel paragrafo precedente, rappresentano il primo step per lo sviluppo di opportune considerazioni anche in merito al mantenimento delle condizioni di comfort, con particolare riferimento ai valori di temperatura dell'aria interna. Una volta esportate le *timeseries*, serie di dati con riferimento temporale, sono stati introdotti alcuni parametri statistici che consentono di effettuare analisi oggettive, classificare e confrontare i vari dati di output.

I parametri statistici introdotti consentono di confrontare l'impatto delle differenti caratteristiche che compongono gli edifici tipologici, infatti, unitamente alle analisi dei profili di gestione della pompa di calore ed al confronto con il valore di setpoint impostato come valore di riferimento per il comfort interno, i vari modelli possono essere caratterizzati in base alla capacità di mantenere la temperatura dell'aria nell'unità abitativa in specifici intervalli di comfort. Di seguito i parametri che sono stati utilizzati al suddetto scopo.

- ME - Mean Error: misura lo scostamento medio dei valori ottenuti dalla simulazione rispetto al valore di riferimento, secondo la seguente formula:

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

- MAD - Mean Absolute Deviation: misura lo scostamento medio, in valore assoluto, dei valori ottenuti dalla simulazione rispetto al valore di riferimento, secondo la seguente formula:

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

- MSE - Mean Squared Error: misura lo scarto quadratico medio fra i valori ottenuti dalla simulazione rispetto al valore di riferimento, secondo la seguente formula:

$$MSE = \sum_{t=1}^n \frac{(R_{v,t} - F_{v,t})^2}{n}$$

- RMSE - Root Mean Squared Error: misura la radice quadrata dello scarto quadratico medio, essa è detta anche deviazione standard. Con questo parametro si valuta la dispersione dei dati ottenuti rispetto al valore di riferimento, secondo la seguente formula:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{t=1}^n \frac{(R_{v,t} - F_{v,t})^2}{n}}$$

- MAPE - Mean Absolute Percentage of Error: permette di valutare l'accuratezza previsionale di un modello, espressa in percentuale, secondo la seguente formula:

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{R_{v,t} - F_{v,t}}{R_{v,t}} \right|}{n} \times 100$$

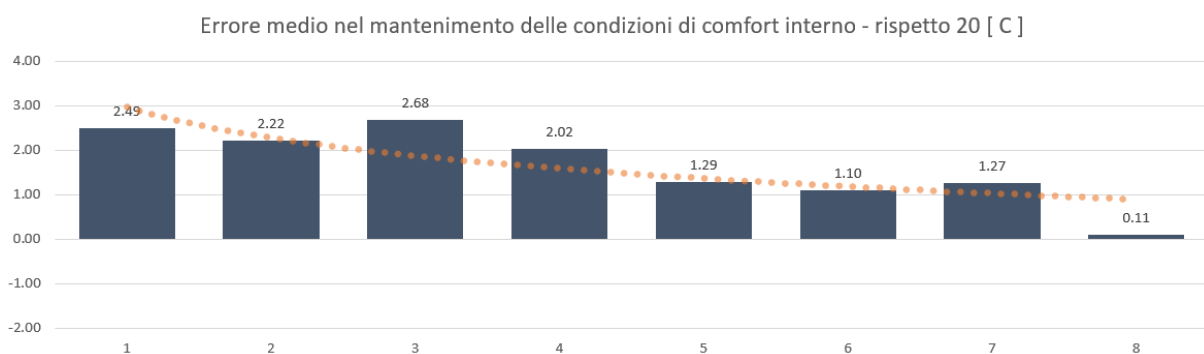
Nelle equazioni sopra riportate, i simboli hanno i seguenti significati:

$R_{v,t}$  : valore di riferimento al generico istante  $t$ , (nelle nostre elaborazioni corrisponde ad un valore pre-impostato);

$F_{v,t}$  : valore del generico parametro  $F$  ottenuto dalle simulazioni al generico istante  $t$ , che deve essere confrontato con il valore di riferimento  $R_{v,t}$ ;

$n$  : numero totale dei dati considerati.

A titolo di esempio, per l'unità abitativa già utilizzata nel Paragrafo 3.2.1, ubicata a Milano con tipologia edilizia monofamiliare (UAM) occupata da una persona (1p), nella Tabella 12 sono riportati i valori dei parametri statistici introdotti, con riferimento alla capacità di mantenere la temperatura di comfort di 20 °C, manifestata da ogni singolo cluster costruttivo riscaldato con una pompa di calore aria-aria, della stessa taglia (taglia in grado di soddisfare le condizioni più sfavorevoli indicate al paragrafo precedente) e delle stesse caratteristiche prestazionali. Dalla Tabella 12 si nota che i differenti cluster presentano prestazioni notevolmente diverse. In particolare, dal grafico di Figura 16 si nota come le tipologie costruttive investigate evidenzino comportamenti che possono essere raggruppati in due macro-categorie con due eccezioni. A parità delle altre condizioni, i cluster caratterizzati da strutture massive (pietra) e con livello di isolamento termico scadente (C01, C02, C03) hanno un comportamento molto simile tra loro, i cluster caratterizzati da strutture piuttosto massive (laterizio) termicamente isolate (C05, C06, C07) hanno un comportamento simile tra loro (indipendentemente dalla posizione del materiale isolante) e ben diverso da quelle termicamente non isolate. Il cluster C04 (pareti in laterizio non isolato) ha un comportamento intermedio tra le due macro-categorie evidenziate ed il cluster C08 (pareti leggere molto isolate) ha un comportamento migliore di tutte in riferimento al mantenimento delle condizioni di comfort. La suddivisione in macro-categorie appena descritta, sarà evidenziata anche in successive analisi sul comportamento energetico del sistema edificio-impianto a pompa di calore, effettuate nel capitolo successivo.



**Figura 16 – Scostamento medio tra valore di riferimento e valori ottenuti dalle simulazioni per la temperatura dell'aria interna (esempio di Milano, UAM, 1p, tutti i cluster)**

Nell'esempio considerato è possibile notare come l'errore medio tra il valore di riferimento per la temperatura dell'aria interna (20 °C) e quelli ottenuti dalle simulazioni sia circa 2.5 °C per i cluster C01, C02, C03, intorno a 1.2 °C per il cluster C05, C06, C07, 2.0 °C per il cluster C04 e 0.1 °C per il cluster C08.

**Tabella 12 – Esempio di valutazione dei parametri statistici**

Tipologia Abitativa Monofamiliare: UAM

Profilo di occupazione ed utilizzo: 1 Persona

Località di riferimento per la simulazione: Milano

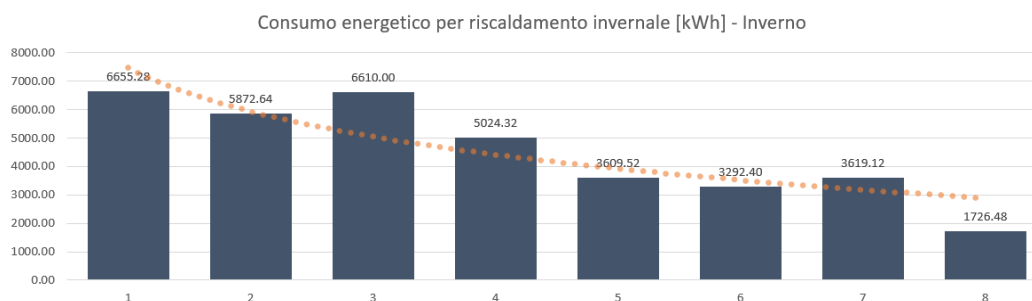
Cluster C01		Cluster C02	
Confronto mantenimento comfort interno 20 [C]		Confronto mantenimento comfort interno 20 [C]	
num. dati	4393.00	num. dati	4393.00
MAD - mean absolute deviation	2.61	MAD - mean absolute deviation	2.33
MSE - mean square error	9.69	MSE - mean square error	7.82
RMSE - root mean square error	3.11	RMSE - root mean square error	2.80
MAPE - mean absolute percentage of error	16.3%	MAPE - mean absolute percentage of error	14.2%
ME - mean Error	2.61	ME - mean Error	2.32
Cluster C03		Cluster C04	
Confronto mantenimento comfort interno 20 [C]		Confronto mantenimento comfort interno 20 [C]	
num. dati	4393.00	num. dati	4393.00
MAD - mean absolute deviation	2.81	MAD - mean absolute deviation	2.14
MSE - mean square error	12.29	MSE - mean square error	7.32
RMSE - root mean square error	3.51	RMSE - root mean square error	2.71
MAPE - mean absolute percentage of error	18.5%	MAPE - mean absolute percentage of error	13.1%
ME - mean Error	2.80	ME - mean Error	2.07
Cluster C5		Cluster C06	
Confronto mantenimento comfort interno 20 [C]		Confronto mantenimento comfort interno 20 [C]	
num. dati	4393.00	num. dati	4393.00
MAD - mean absolute deviation	1.45	MAD - mean absolute deviation	1.30
MSE - mean square error	3.57	MSE - mean square error	2.82
RMSE - root mean square error	1.89	RMSE - root mean square error	1.68
MAPE - mean absolute percentage of error	8.3%	MAPE - mean absolute percentage of error	7.2%
ME - mean Error	1.27	ME - mean Error	1.07
Cluster C07		Cluster C08	
Confronto mantenimento comfort interno 20 [C]		Confronto mantenimento comfort interno 20 [C]	
num. dati	4393.00	num. dati	4393.00
MAD - mean absolute deviation	1.44	MAD - mean absolute deviation	1.07
MSE - mean square error	3.46	MSE - mean square error	3.09
RMSE - root mean square error	1.86	RMSE - root mean square error	1.76
MAPE - mean absolute percentage of error	8.2%	MAPE - mean absolute percentage of error	5.1%
ME - mean Error	1.25	ME - mean Error	-0.08

### 3.2.3 Parametri utilizzati per valutazioni inerenti le prestazioni energetiche

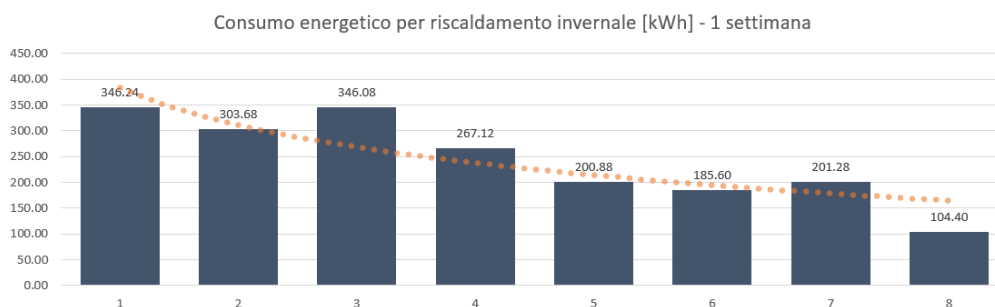
A complemento dei parametri riportati nel paragrafo precedente, sono stati introdotti i seguenti parametri utili a valutazioni delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto a pompa di calore:

- valore medio del coefficiente di prestazione, determinato tenendo in considerazione gli intervalli di tempo in cui la pompa di calore è funzionante;
- valore medio, espresso in percentuale, del profilo di modulazione tenendo in considerazione l'intero periodo di riferimento;
- valore medio, espresso in percentuale, del profilo di modulazione determinato tenendo in considerazione gli intervalli di tempo in cui la pompa di calore è funzionante;
- numero di ore in cui la pompa di calore è spenta;
- rapporto, espresso in percentuale, tra quantitativo di ore in cui la pompa di calore è spenta e durata complessiva del periodo di riferimento;
- consumo di energia elettrica in kilowattora [kWh] della pompa di calore, ricavato su tutto il periodo invernale, sulla settimana tipo e per giorni tipo.

Tutti i parametri sopra menzionati, dipendono da numerosi fattori il cui impatto sarà discusso nel prossimo capitolo. A titolo di esempio, per l'unità abitativa già utilizzata nel Paragrafo 3.2.1, ubicata a Milano con tipologia edilizia monofamiliare (UAM) occupata da una persona (1p), nella Tabella 13 sono riportati i valori dei parametri sopra menzionati, come ottenuti dalle simulazioni. Mentre nelle Figure da 17 a 20, ancora nelle stesse condizioni (Milano, UAM, 1p, tutti i cluster) sono riportati i consumi energetici (energia elettrica) dovuti al funzionamento della pompa di calore rispettivamente per tutta la stagione di riscaldamento invernale, per una settimana tipo del mese di dicembre (mese più freddo), per un giorno tipico feriale del mese di dicembre e per un giorno tipico festivo dello stesso mese (in accordo ai diversi profili di occupazione).



**Figura 17 – Esempio di consumo elettrico stagionale in kWh della pompa di calore (Milano, UAM, 1p, tutti i cluster)**



**Figura 18 – Esempio di consumo elettrico settimanale in kWh della pompa di calore (Milano, UAM, 1p, tutti i cluster, settimana tipo del mese di dicembre)**

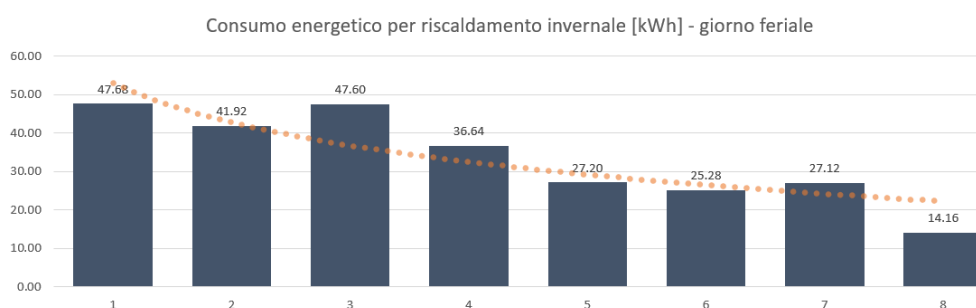
**Tabella 13 – Esempio di valori ottenuti per i parametri utilizzati nelle valutazioni energetiche**

Tipologia Abitativa Monofamiliare: UAM

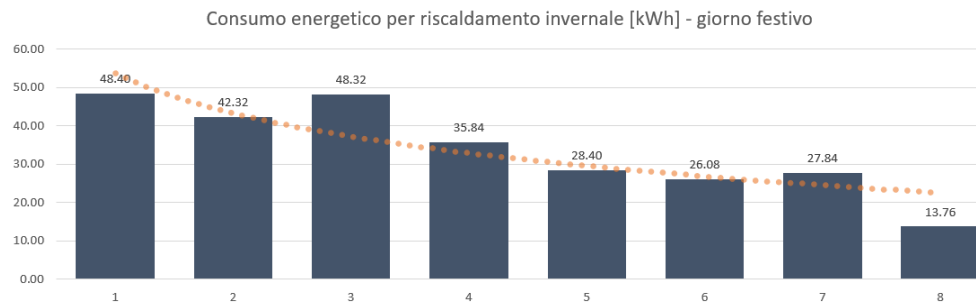
Profilo di occupazione ed utilizzo: 1 Persona

Località di riferimento per la simulazione: Milano

Cluster C01		Cluster C02	
valore medio COP	4.51	valore medio COP	4.44
valore medio MODULAZIONE tot	36.89%	valore medio MODULAZIONE tot	32.46%
valore medio MODULAZIONE pdc on	50.99%	valore medio MODULAZIONE pdc on	45.42%
quante ore pdc spenta	1215	quante ore pdc spenta	1254
rapporto ore tot/ore pdc off	27.66%	rapporto ore tot/ore pdc off	28.55%
Consumo elettrico stagione invernale PdC (kWh)	6655	Consumo elettrico stagione invernale PdC (kWh)	5873
Cluster C03		Cluster C04	
valore medio COP	4.51	valore medio COP	4.35
valore medio MODULAZIONE tot	36.57%	valore medio MODULAZIONE tot	27.49%
valore medio MODULAZIONE pdc on	50.99%	valore medio MODULAZIONE pdc on	39.83%
quante ore pdc spenta	1242	quante ore pdc spenta	1361
rapporto ore tot/ore pdc off	28.27%	rapporto ore tot/ore pdc off	30.98%
Consumo elettrico stagione invernale PdC (kWh)	6610	Consumo elettrico stagione invernale PdC (kWh)	5024
Cluster C05		Cluster C06	
valore medio COP	4.17	valore medio COP	4.13
valore medio MODULAZIONE tot	19.83%	valore medio MODULAZIONE tot	17.95%
valore medio MODULAZIONE pdc on	30.96%	valore medio MODULAZIONE pdc on	29.20%
quante ore pdc spenta	1580	quante ore pdc spenta	1692
rapporto ore tot/ore pdc off	35.97%	rapporto ore tot/ore pdc off	38.52%
Consumo elettrico stagione invernale PdC (kWh)	3610	Consumo elettrico stagione invernale PdC (kWh)	3292
Cluster C07		Cluster C08	
valore medio COP	4.18	valore medio COP	3.87
valore medio MODULAZIONE tot	20.00%	valore medio MODULAZIONE tot	9.28%
valore medio MODULAZIONE pdc on	31.39%	valore medio MODULAZIONE pdc on	21.62%
quante ore pdc spenta	1593	quante ore pdc spenta	2508
rapporto ore tot/ore pdc off	36.26%	rapporto ore tot/ore pdc off	57.09%
Consumo elettrico stagione invernale PdC (kWh)	3619	Consumo elettrico stagione invernale PdC (kWh)	1726



**Figura 19 – Esempio di consumo elettrico giornaliero in kWh della pompa di calore (Milano, UAM, 1p, tutti i cluster, giorno feriale tipo del mese di dicembre)**



**Figura 20 – Esempio di consumo elettrico giornaliero in kWh della pompa di calore (Milano, UAM, 1p, tutti i cluster, giorno festivo tipo del mese di dicembre)**

Analogamente a quanto già osservato per lo scostamento della temperatura dell'aria rispetto al valore di riferimento, dal comportamento dei cluster è possibile riconoscere ancora le due macro-categorie menzionate in precedenza. La macrocategoria dei cluster C01, C02, C03 presenta un consumo energetico stagionale (energia elettrica) nella fascia 5800-6700 kWh. La macrocategoria dei cluster C05, C06, C07 presenta un consumo energetico quasi dimezzato, attestandosi nella fascia 3200-3700 kWh. Il cluster C04 manifesta un consumo energetico stagionale intermedio (5024 kWh). Il cluster C08 manifesta il consumo energetico stagionale inferiore (1726 kWh). La trend-line arancione, riportata nelle figure, sottolinea qualitativamente quanto descritto.

Si osservi che le informazioni presentate a titolo di esempio in questo paragrafo e nel paragrafo precedente sono state ottenute per tutte le simulazioni effettuate, investigando complessivamente 512 diverse combinazioni.

## 4. Campagna di simulazioni

In questa sezione viene descritta la campagna di simulazioni condotta in questa linea di attività. Tale campagna è volta ad analizzare gli effetti che le variazioni di condizioni climatiche esterne, tipologia edilizia, profilo di occupazione e caratteristiche dell'impianto possono avere sui consumi energetici e sul mantenimento delle condizioni di set-point interno, 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, nella configurazione considerata e di seguito descritta, su specifici intervalli di tempo (stagionale, settimanale, giornaliero).
- I dati riportati e commentati nei sottoparagrafi seguenti, in merito al mantenimento delle condizioni di comfort, si riferiscono alla capacità del sistema edificio-impianto di mantenere le condizioni di set-point impostato, cioè una temperatura dell'aria interna uguale a 20 °C. Nel sottoparagrafo dedicato all'impatto delle condizioni climatiche esterne, sono effettuate considerazioni in merito all'utilizzo di differenti modelli di comfort termico (in particolare un modello basato sul mantenimento di un livello di temperatura fissata ed un modello di tipo adattivo).
- Per chiarezza espositiva, ogni singolo paragrafo del presente capitolo è dedicato sistematicamente alla valutazione dell'effetto della variazione di uno degli elementi caratterizzanti il modello sopra indicati (condizioni climatiche esterne, tipologia edilizia, profilo di occupazione e caratteristiche dell'impianto). In ciascun paragrafo sono considerati tutti i cluster costruttivi con cui possono essere realizzati gli edifici (C01-C08). Ciascun paragrafo è suddiviso in due sottoparagrafi, uno dedicato a dati e considerazioni inerenti i consumi energetici e l'altro a dati e considerazioni inerenti il mantenimento delle condizioni di comfort. L'organizzazione sistematica in cui è strutturato il capitolo è parsa idonea a commentare i risultati di un elevato numero di casi investigati (complessivamente circa 800) e con caratteristiche molto eterogenee tra loro.
- Gli effetti delle variazioni di condizioni climatiche esterne, tipologia edilizia e profilo di occupazione sono investigati utilizzando la medesima pompa di calore aria-aria, caratterizzata da una potenza elettrica nominale di 4000 W e prestazioni, in particolare valore del COP a fattore di carico unitario e sua variazione in funzione della temperatura dell'aria esterna, medie tra quelle indicate in Tabella 2. La taglia della pompa di calore è stata selezionata a seguito di un pre-dimensionamento condotto effettuando un bilancio termico in condizioni stazionarie sulla tipologia edilizia UAM con cluster costruttivo C01, profilo di occupazione 1p, ubicata a Milano (caso maggiormente svantaggioso), considerando la temperatura media mensile del mese più freddo. La pompa di calore è considerata modulante, con logica di modulazione precisata in Tabella 3. Per effettuare valutazioni sulle variazioni di caratteristiche di impianto, nello specifico sottoparagrafo dedicato, sono considerate variazioni di taglia e di logica di modulazione.
- L'ottimizzazione della gestione della pompa di calore non è oggetto del presente studio. Per non introdurre ulteriori condizioni variabili alle già molte presenti, la pompa di calore viene considerata in funzione (con temperatura di set-point pari a 20 °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. Quando la pompa di calore è in funzione, essa opera secondo la logica di modulazione proporzionale precisata in Tabella 3 (fa eccezione il sottoparagrafo dedicato alle variazioni di caratteristiche dell'impianto dove vengono analizzate anche logiche proporzionali differenti). La precisazione di questo aspetto risulta importante, perché tecniche di gestione ottimizzate possono consentire miglioramenti delle condizioni di comfort e contenimenti dei consumi energetici.

## 4.1 Analisi per zona climatica

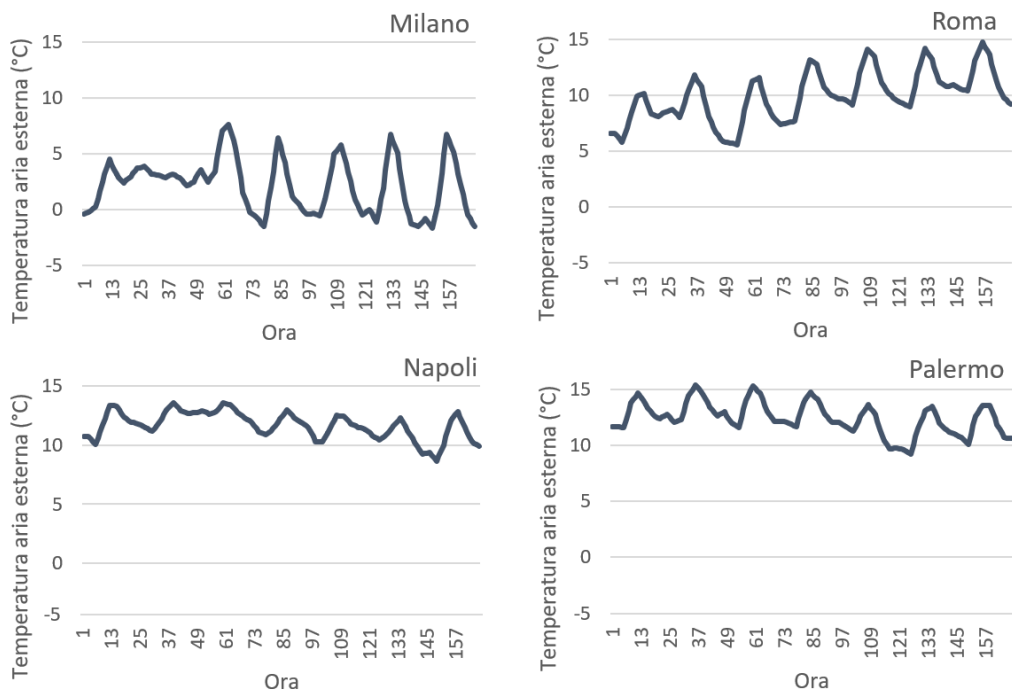
Al fine di analizzare l'impatto delle condizioni climatiche esterne sui consumi energetici necessari al funzionamento della pompa di calore (in accordo alla modalità di gestione impostata) e sul mantenimento delle condizioni di comfort termico interno, sono stati confrontati i risultati delle simulazioni ottenute per le località prese in considerazione (Milano, Roma, Napoli, Palermo) a parità di tutte le altre condizioni (tipologia edilizia, tipologia costruttiva, profilo di occupazione). In questo paragrafo, per chiarezza espositiva, i dati ottenuti sono riportati e commentati in due sottoparagrafi distinti (uno relativo ai consumi energetici ed uno alle condizioni di comfort). I suddetti sottoparagrafi sono preceduti da alcuni brevi commenti riguardo le condizioni climatiche esterne per le quattro località di riferimento, a vantaggio di una migliore interpretazione dei dati successivamente riportati.

### 4.1.1 Condizioni climatiche esterne

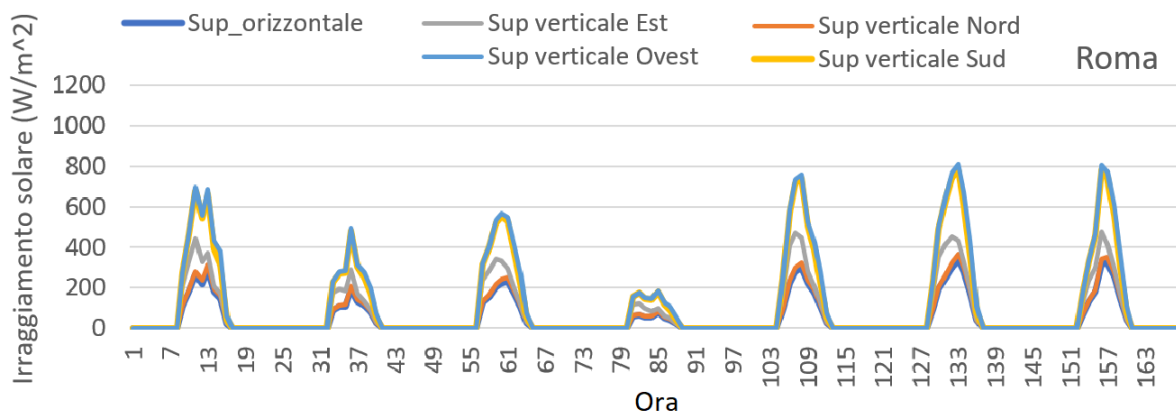
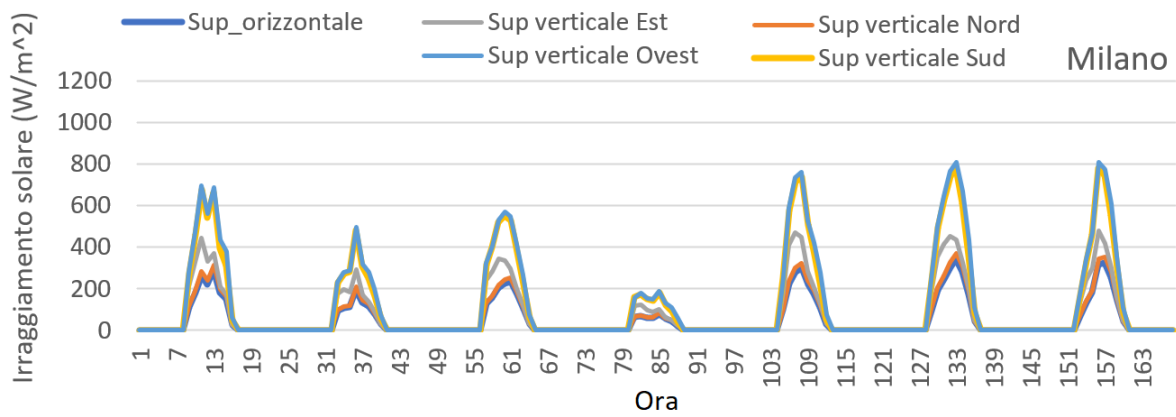
Le condizioni climatiche esterne possono largamente influenzare l'ambiente interno e, di conseguenza, i consumi energetici ed il comfort negli edifici, ciò vale in particolare per tipologie impiantistiche che, come nel caso in questione, hanno prestazioni significativamente variabili in funzione delle condizioni climatiche esterne. Le quattro località considerate nel presente studio presentano valori dei gradi giorno invernali significativamente differenti tra loro (si veda Tabella 6). Inoltre, in funzione della località climatica in cui è ubicato l'edificio, il periodo invernale identificato dalla legislazione nazionale, e considerato per il calcolo dei fabbisogni energetici per la climatizzazione invernale, è variabile e va dal 15 ottobre al 15 aprile per Milano, dal 1° novembre al 15 aprile per Roma, dal 15 novembre al 31 marzo per Napoli e dal 1° dicembre al 31 marzo per Palermo. Per confrontare l'influenza delle condizioni climatiche esterne sui consumi e sul mantenimento delle condizioni di comfort, sono state considerate le variazioni di parametri di interesse su diversi intervalli di tempo: sulla completa stagione di riscaldamento, su di una settimana significativa della stagione invernale (ultima settimana del mese di dicembre), su di un giorno feriale e su uno festivo, presi in una settimana significativa. A titolo di esempio, gli andamenti della temperatura dell'aria esterna per la settimana considerata sono riportati in Figura 21, per le quattro località considerate. Gli andamenti dell'irraggiamento solare sono invece mostrati in Figura 22.

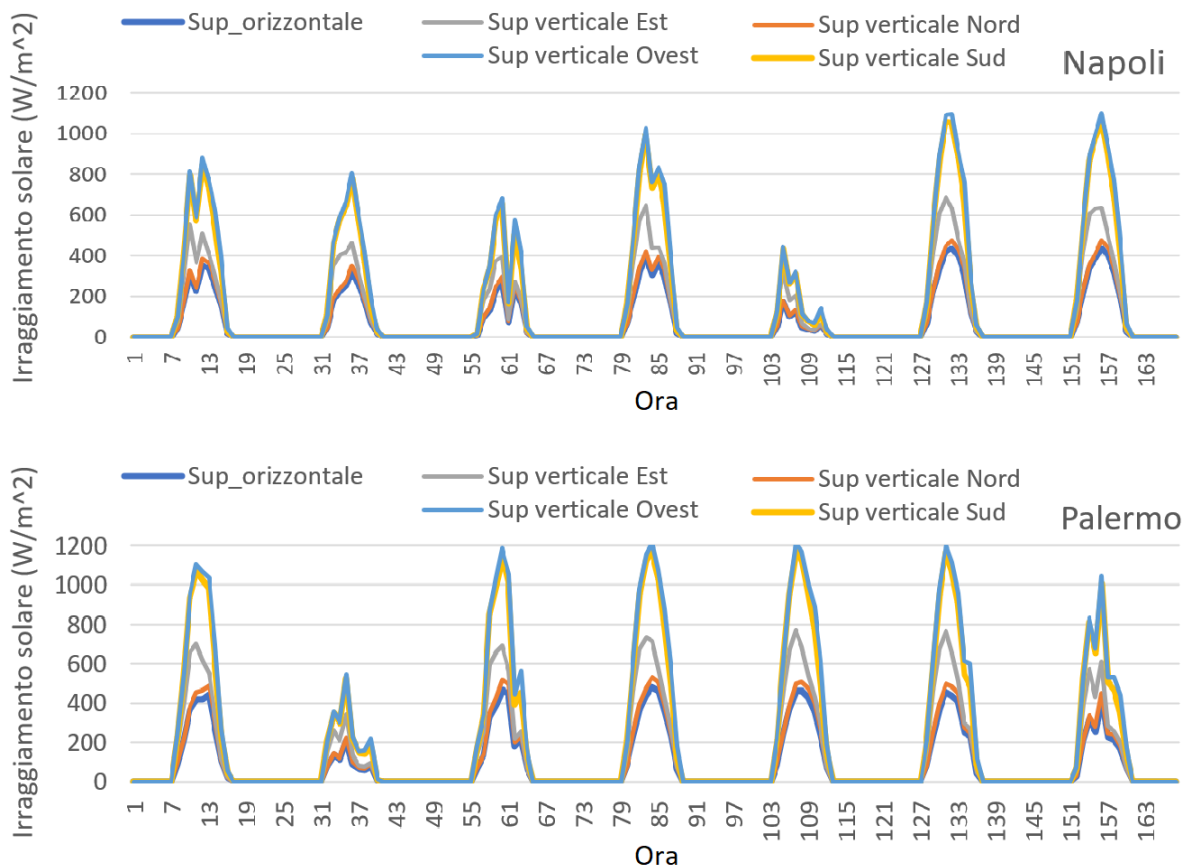
Considerando la temperatura dell'aria esterna (Figura 21) è possibile notare come i suoi andamenti nelle località di Palermo e Napoli non differiscano di molto, con oscillazioni prevalentemente contenute nell'intervallo 10÷15 °C. Differenze più marcate si apprezzano spostandosi verso nord, per Roma l'intervallo di oscillazione risulta più ampio 5÷15 °C e per Milano, come prevedibile, risulta collocato a valori medi significativamente inferiori -2÷7 °C. Considerando la radiazione solare disponibile su superficie orizzontale (Figura 22) è possibile notare come i suoi andamenti nelle località di Roma e Milano non differiscano di molto, con valori massimi giornalieri contenuti nell'intervallo 200÷800 W/m<sup>2</sup>. Differenze più marcate si apprezzano spostandosi verso sud, per Napoli l'intervallo dei valori massimi giornalieri risulta 400÷1100 W/m<sup>2</sup> e per Palermo, come prevedibile, l'intervallo dei valori massimi giornalieri risulta collocato a valori più elevati 600÷1200 W/m<sup>2</sup>.





**Figura 21 – Andamento della temperatura esterna nella settimana tipo per le quattro località climatiche considerate**

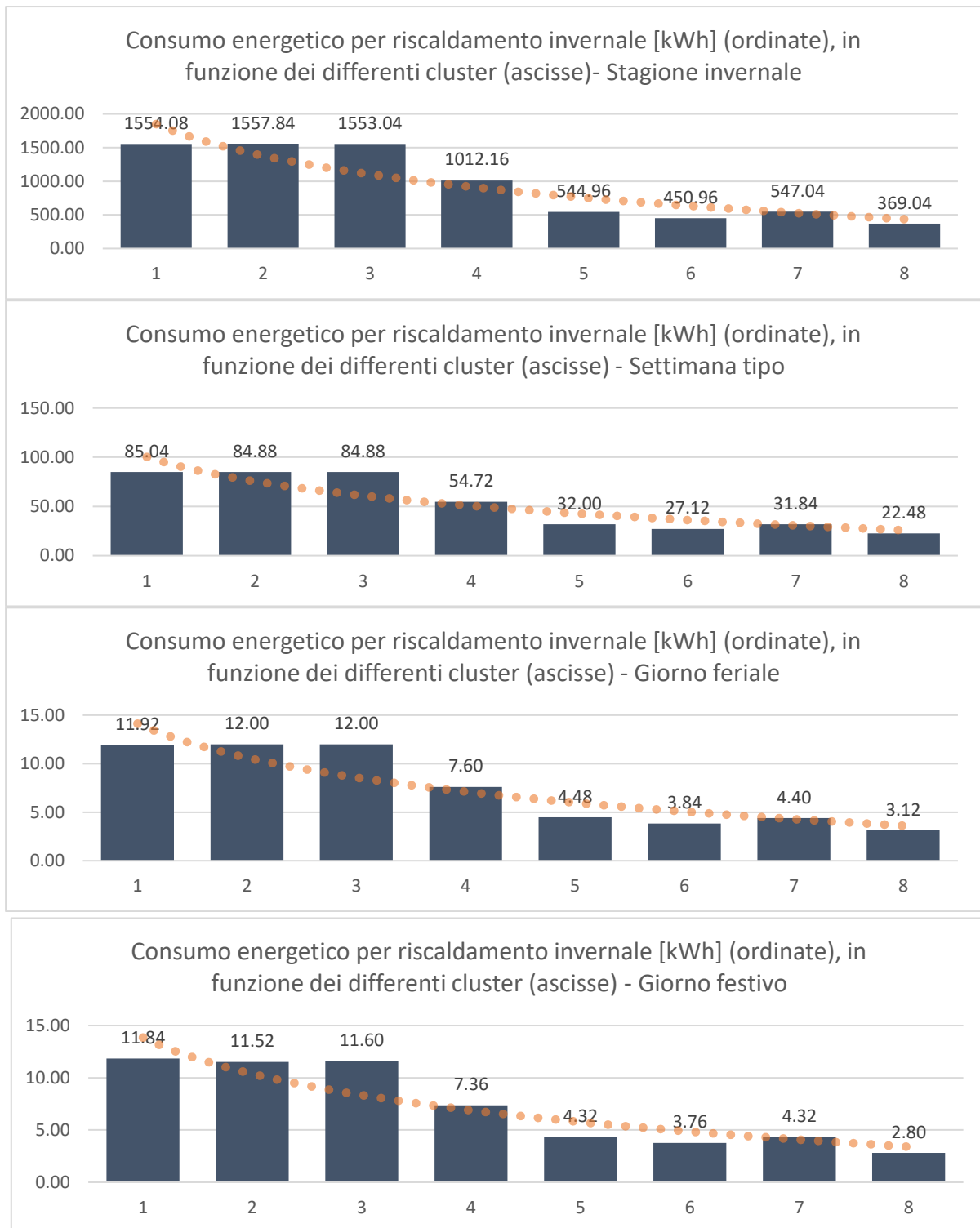




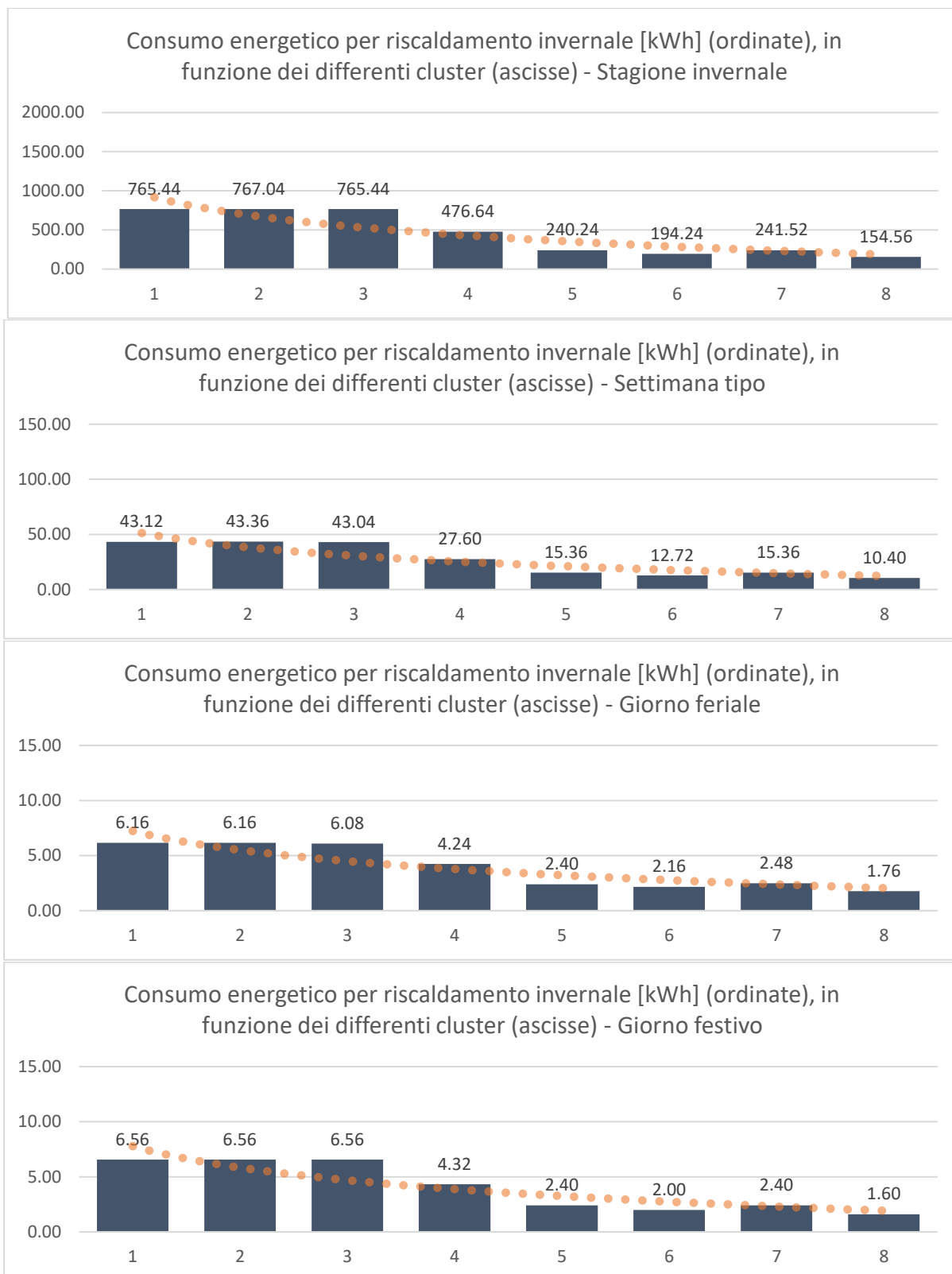
**Figura 22 – Andamento dell’irraggiamento solare nella settimana tipo per le quattro località climatiche considerate**

#### 4.1.2 Analisi dei consumi energetici

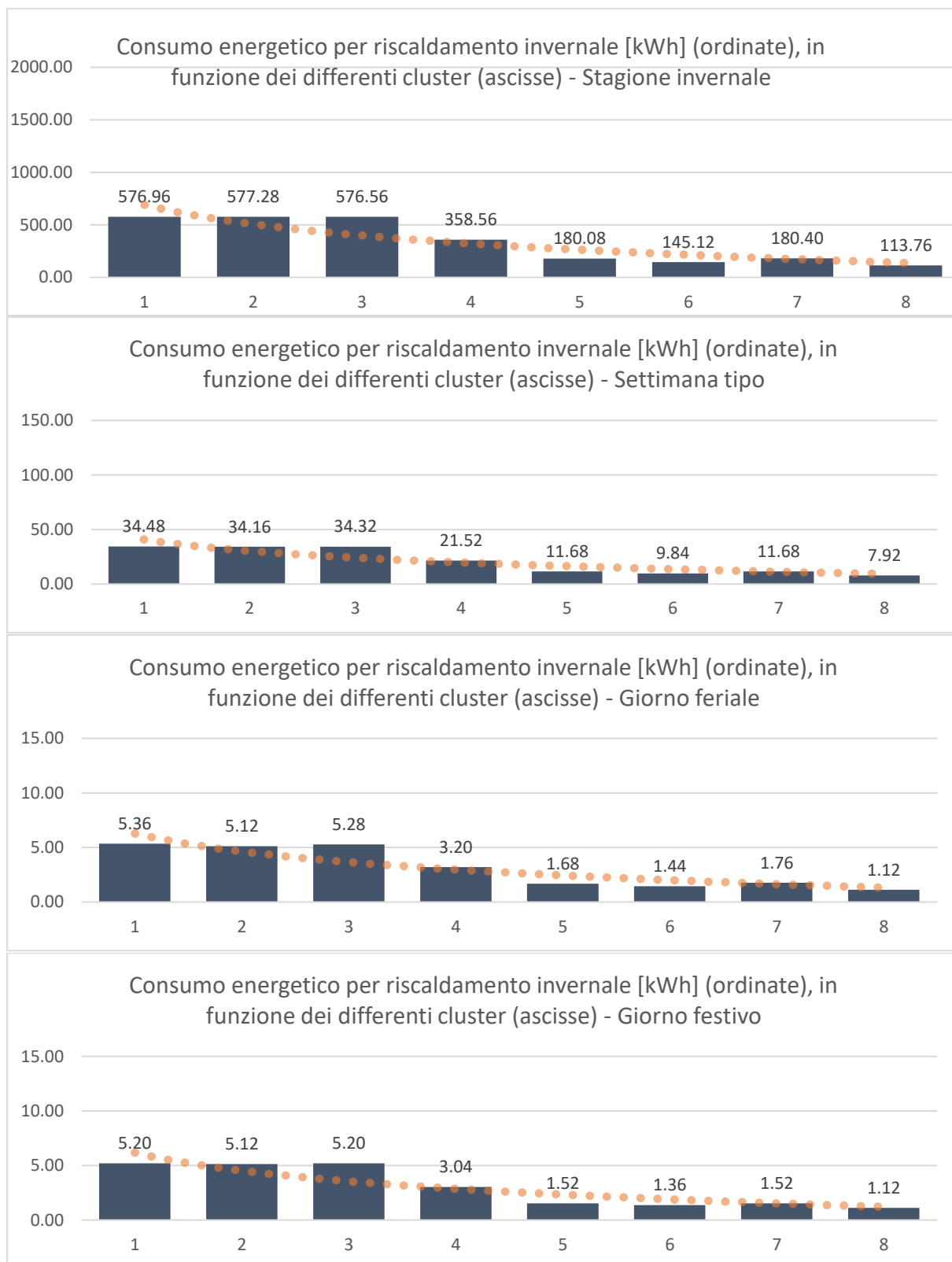
In questo sottoparagrafo sono discussi gli impatti delle località climatiche considerate sui consumi energetici delle unità immobiliari, riscaldate con pompa di calore aria-aria con accumulo idronico trascurabile o assente. A titolo di esempio, per la tipologia edilizia inserita in condomino (UAC, tipologia selezionata perché di larga diffusione nelle città di medio-grandi dimensioni come quelle considerate) e con nucleo familiare composto da una persona (profilo di occupazione 1p), nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti dei consumi energetici per riscaldamento invernale relativi rispettivamente a: tutta la stagione invernale, la settimana tipo e i due giorni tipo con profilo di occupazione feriale e festivo. Tali andamenti sono ricavati per le località climatiche considerate: Milano (Figura 23), Roma (Figura 24), Napoli (Figura 25) e Palermo (Figura 26). Andamenti analoghi sono stati ricavati per le diverse tipologie edilizie (UAM, UAS1L, UAS2L) e per i diversi profili di occupazione (2, 3, 4 persone); gli impatti di tali caratteristiche saranno discussi nelle sezioni successive.



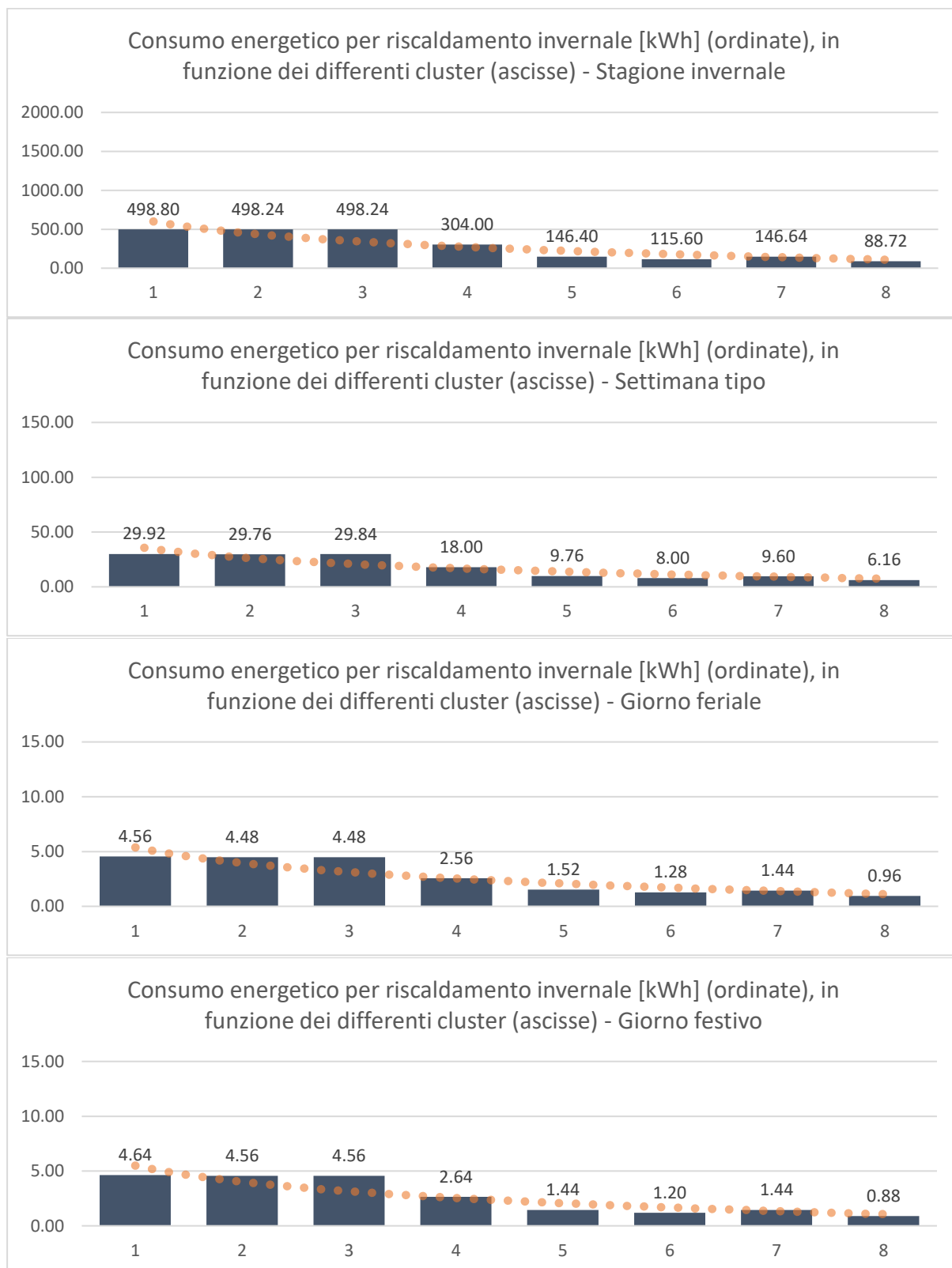
**Figura 23 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per la città di Milano, unità abitativa UAC, profilo di occupazione 1p**



**Figura 24 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per la città di Roma, unità abitativa UAC e profilo di occupazione 1p**



**Figura 25 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per la città di Napoli, unità abitativa UAC e profilo di occupazione 1p**

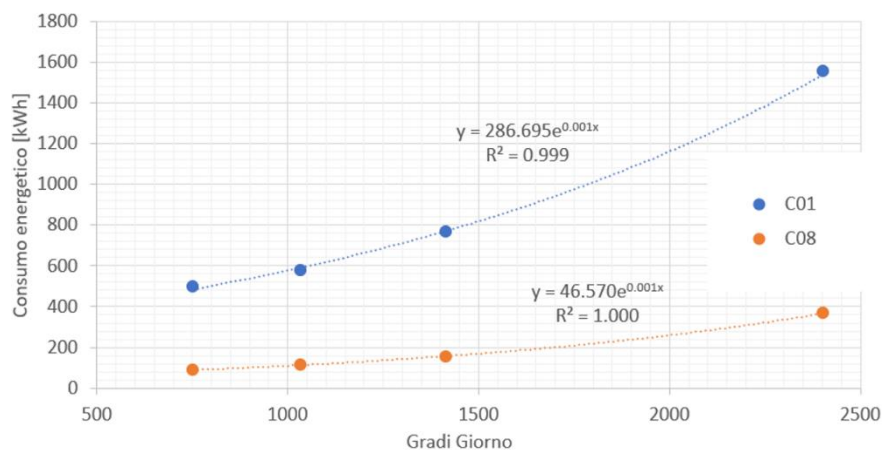


**Figura 26 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per la città di Palermo, unità abitativa UAC e profilo di occupazione 1p**

Osservando i grafici riportati nelle figure menzionate, confermati qualitativamente anche nelle altre condizioni, è possibile notare come la variazione di località climatica influisca sui valori assoluti dei consumi energetici, ma non influenzi significativamente la distribuzione dei consumi sulle differenti tipologie costruttive (clusters da C01 a C08). Per tutte le località infatti, i consumi energetici per i clusters C01, C02 e C03 sono molto simili, così come quelli per i clusters C05, C06, C07. Per tutte le località il cluster C04 ha consumi intermedi tra i due gruppi sopra indicati e il cluster C08, anche grazie al suo elevato livello di isolamento termico, presenta consumi inferiori a tutti gli altri.

Una interessante considerazione sull’impatto della località climatica sui consumi energetici può essere effettuata con l’aiuto della Figura 27. In Figura 27 sono riportati i consumi energetici sostenuti per l’intera stagione di riscaldamento in funzione dei gradi giorno invernali della località di ubicazione, come definiti nella legislazione nazionale (si veda Tabella 6), a titolo di esempio per i due clusters con caratteristiche più distanti: C01 (caratteristico di una tipologia costruttiva massiva e termicamente non isolata) e C08 (caratteristico di una tipologia costruttiva più leggera e termicamente ben isolata).

L’andamento del consumo energetico ottenuto per singola tipologia costruttiva è rappresentato con una eccellente approssimazione da una curva esponenziale. Ciò contrasta con quanto indicato in varie procedure semplificate per la predizione dei consumi energetici degli edifici (p.e. la procedura che era stata introdotta con il D.M. 26/06/2009, prima versione delle linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici), che suggeriscono relazioni semi-empiriche con dipendenza lineare dei consumi energetici dai gradi giorno invernali della località. Evidentemente tali procedure semplificate meglio si adattano ad edifici che utilizzano generatori di calore tradizionali. Nel caso di utilizzo di pompe di calore, in particolare aria-aria come nel caso specifico, la deviazione dal comportamento lineare può essere giustificata dall’effetto aggiuntivo di riduzione significativa delle prestazioni medie del generatore di calore con l’aumento dei gradi giorno, a differenza di quanto avviene per i generatori di calore tradizionali.



**Figura 27 – Consumo energetico per riscaldamento invernale in funzione dei gradi giorno della località per i cluster C01 e C08**

#### 4.1.3 Analisi delle condizioni di comfort

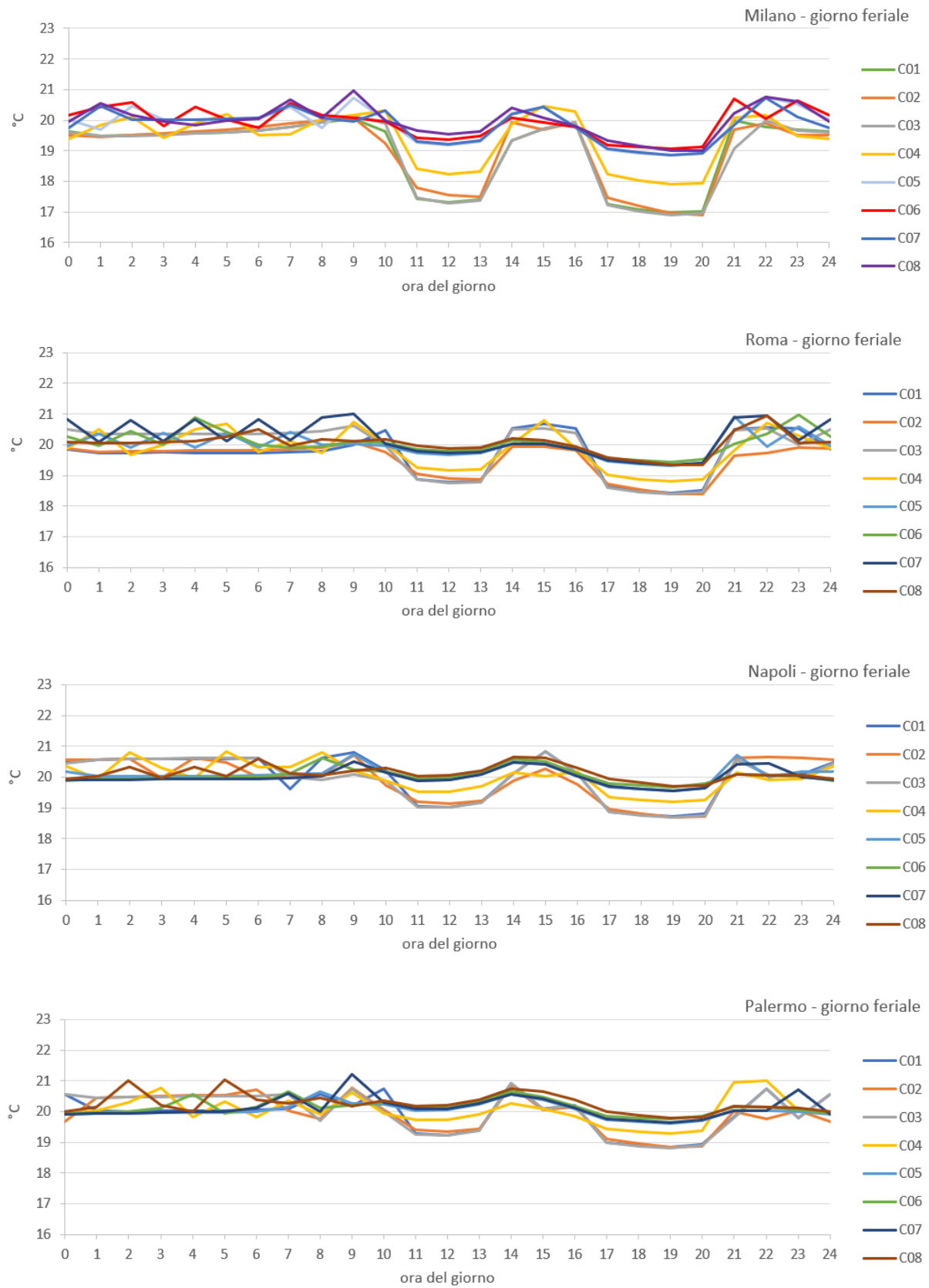
Per la valutazione delle condizioni di comfort sono stati analizzati tutti gli andamenti delle temperature dell’aria interna e i valori degli indicatori statistici introdotti nel paragrafo 3.2.2, per tutte le simulazioni condotte. I commenti di seguito riportati si riferiranno in particolare ai parametri temperatura dell’aria interna, indicatore statistico MAD ed indicatore statistico RMSE ritenuti più significativi in relazione alle analisi e considerazioni effettuate. In particolare, l’andamento della

temperatura sarà analizzato nel giorno tipo, mentre gli indicatori statistici nella settimana tipo, durante il periodo di occupazione degli ambienti. La scelta di valutare il profilo della temperatura interna nel giorno tipo è dovuta al fatto che, per una corretta analisi del comfort, è maggiormente utile la visualizzazione dell'andamento della temperatura nel corso della giornata, piuttosto che nella settimana o ancora nella stagione invernale (periodo di tempo più utile per considerazioni di carattere energetico). Gli indici MAD e RMSE sono invece valutati in relazione alla settimana tipo, in modo da considerare lo scostamento delle temperature dalle condizioni di comfort su un periodo di lunghezza significativa per l'analisi, considerando sia i giorni feriali che i gironi festivi.

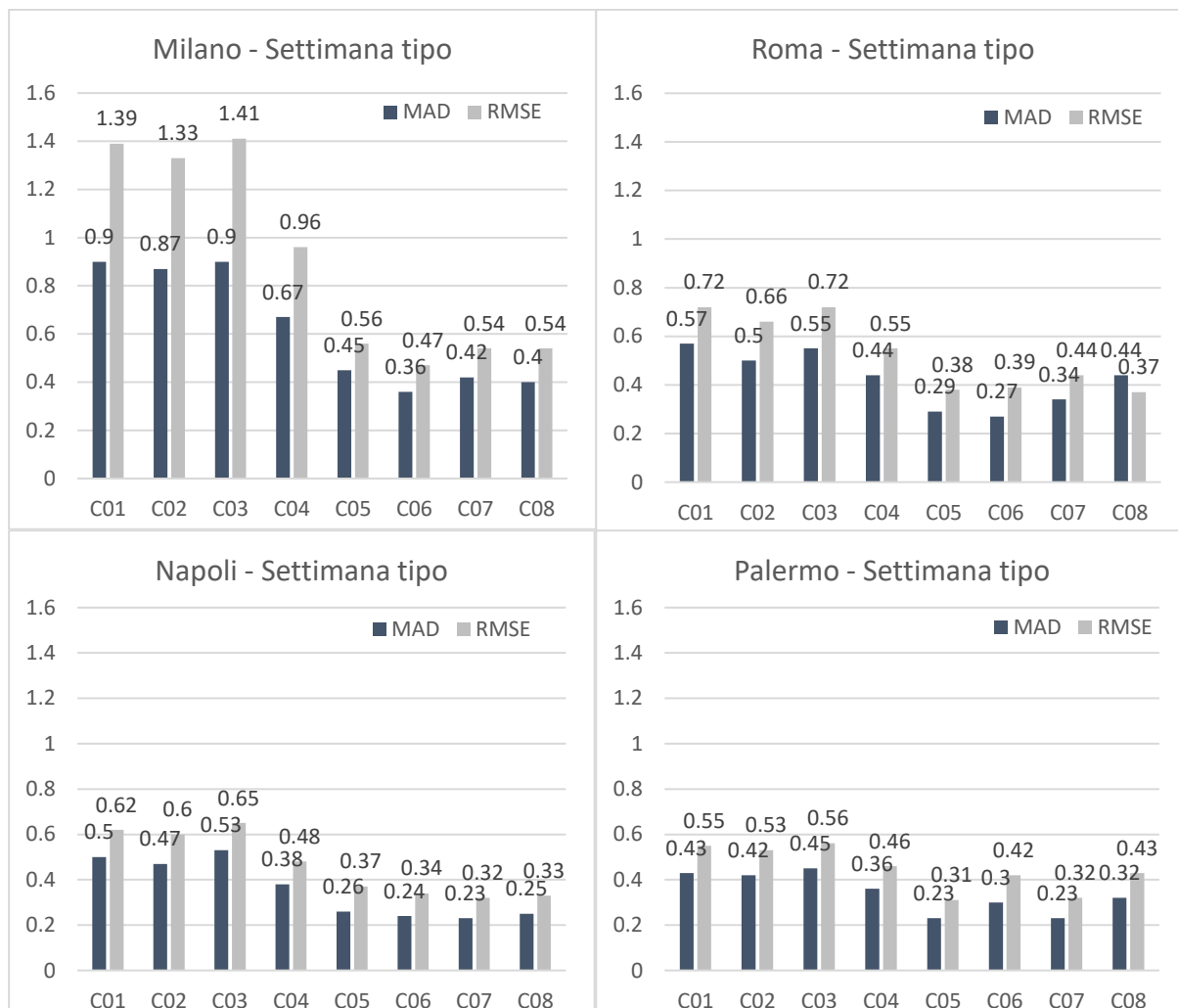
A titolo di esempio, analogamente a quanto fatto per i consumi energetici, per la tipologia edilizia inserita in condominio (UAC) e con nucleo familiare composto da una persona (profilo di occupazione 1p), nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti delle temperature dell'aria interna per il giorno con profilo di occupazione feriale (Figura 28), e gli andamenti degli indicatori MAD e RMSE per la settimana tipo (Figura 29). Tali andamenti sono ricavati per le 4 località climatiche considerate al variare del cluster costruttivo. Andamenti analoghi sono stati ricavati per le diverse tipologie edilizie (UAM, UAS1L, UAS2L) e per i diversi profili di occupazione (2, 3, 4 persone); gli impatti di tali caratteristiche saranno discussi nelle sezioni successive. Analizzando le Figure 28 e 29, è possibile notare come le condizioni di comfort siano più favorevoli nei cluster da C05 a C08 (cluster dotati di isolamento termico) a prescindere dalla zona climatica considerata, come si può notare sia dalla minore oscillazione delle temperature attorno alla temperatura di set-point (Figura 28), sia dal decrescere degli indici MAD e RMSE nei cluster più performanti (Figura 29). In relazione alle condizioni climatiche, si noti come la specifica combinazione di tipologia costruttiva e impianto abbia più difficoltà a rispondere alle ampie oscillazioni di temperatura che si verificano nella località a clima più rigido (Milano), riducendo i livelli di comfort attesi nell'unità abitativa. Ciò si verifica indipendentemente dal cluster utilizzato, con effetti accentuati ovviamente per i cluster con isolamento termico scadente.

A livello quantitativo, è stata analizzata l'influenza delle condizioni climatiche sul mantenimento del comfort attraverso lo studio della relazione esistente tra l'indice MAD e la temperatura esterna media nella settimana tipo ( $T_{ex,med}$ ). In particolare, l'indice MAD nella settimana tipo sembra l'indicatore maggiormente significativo per definire lo scostamento della temperatura interna dai 20°C, intesi come condizioni di comfort in edilizia residenziale secondo i modelli basati su bilanci termici tra l'ambiente e il corpo umano [9]. Il valore medio della temperatura dell'aria esterna nella settimana tipo è stata scelta in quanto parametro significativamente rappresentativo delle condizioni esterne, nell'intervallo di tempo settimanale investigato. Le osservazioni di seguito riportate sono effettuate considerando con particolare riferimento i cluster con caratteristiche più diversificate tra loro (C01 e C08), ed uno con caratteristiche intermedie (C04). Per gli altri cluster si è osservato un comportamento compreso tra le estreme considerate. I valori di MAD in funzione della  $T_{ex,med}$  sono riportati, per i suddetti cluster, in Figura 30. Dalla figura è evidente, come ci si poteva aspettare, la miglior propensione della pompa di calore a mantenere la temperatura di comfort per località con clima meno rigido, rispetto a quelle con clima più rigido. Tuttavia è interessante osservare come, per i cluster con livelli di isolamento molto scadente o medio-basso (C01 e C04), vi sia una relazione lineare tra l'indice MAD e  $T_{ex,med}$ , dato che le condizioni interne sono molto legate alle condizioni esterne. Tale relazione risulta via via meno marcata con l'incremento dei livelli di isolamento, come si nota dal comportamento del cluster C08. In quest'ultimo caso infatti, l'utilizzo della pompa di calore nella configurazione investigata consente un eccellente mantenimento delle condizioni interne a prescindere dalla zona climatica considerata, come si nota dalla diminuzione dell'indice MAD per le quattro località climatiche. Analisi di questo tipo possono essere utili a supportare la scelta della taglia ottimizzata delle pompe di calore aria-aria utilizzate per il riscaldamento invernale.

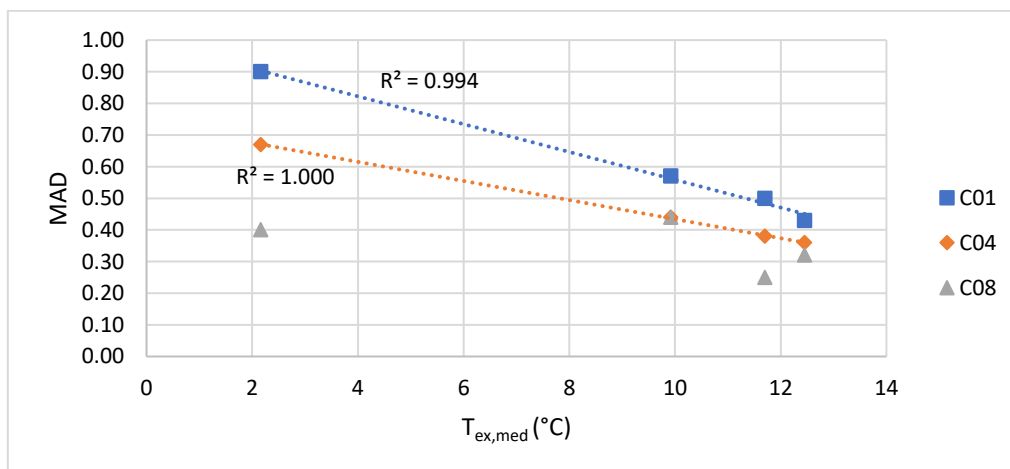




**Figura 28 – Andamento della temperatura dell’aria interna nel giorno feriale per le quattro località climatiche considerate, unità abitativa UAC e profilo di occupazione 1p**



**Figura 29 – Valori di MAD (°C) e RMSE (°C) nella settimana tipo le quattro località climatiche considerate, unità abitativa UAC e profilo di occupazione 1p**



**Figura 30 – Relazione tra  $T_{ex,med}$  e MAD per la settimana di riferimento nel caso di unità abitativa UAC e profilo di occupazione 1p**

Come approfondimento relativo al mantenimento delle condizioni di comfort, oltre ad un modello a temperatura interna fissata e pari a 20 °C è stato considerato anche un modello di comfort adattivo [10], che relaziona le condizioni di comfort indoor al clima esterno. Secondo questo modello, è possibile calcolare le temperature di comfort in funzione di un indice relativo alle condizioni esterne, che in questo caso è stato assunto pari a  $T_{ex,med}$ . La temperatura di comfort ( $T_{comf}$ ) è stata quindi calcolata in accordo all'equazione seguente:

$$T_{comf} = 0.33 \cdot T_{ex,med} + 18.8$$

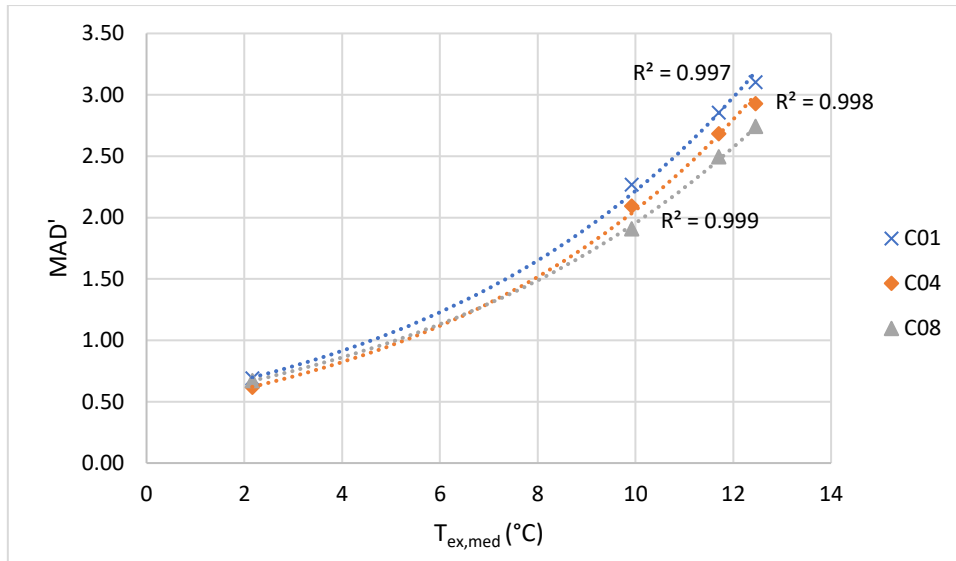
Si è quindi calcolato l'indice MAD', ovvero la Mean Absolute Deviation tra la temperatura interna ottenuta dalla simulazione e la temperatura di comfort calcolata secondo la precedente relazione. La Tabella 14 riporta i valori della  $T_{ex,med}$ ,  $T_{comf}$  e MAD' per i cluster C01, C04 e C08 nelle quattro località climatiche di riferimento. In accordo al modello adattivo, si nota subito come la temperatura di set-point fissata a 20°C sia vicina alla temperatura di comfort per Milano, ma non sia perfettamente in linea con le condizioni di comfort per le altre località di riferimento, che presentano  $T_{comf}$  più elevate. In Figura 31 sono mostrate le relazioni tra MAD' e  $T_{ex,med}$  per i cluster C01, C04 e C08. Dalla figura è possibile notare come in questo caso la relazione tra MAD' e  $T_{ex,med}$  non sia lineare ma esponenziale e come lo scostamento dalle condizioni di comfort (calcolate secondo il modello adattivo) salga all'aumentare della temperatura media esterna, al contrario di quanto accade per il lo scostamento dal valore fissato di 20°C. Inoltre, la relazione è ben definita a prescindere dal cluster di riferimento, nonostante MAD' si mantenga generalmente più basso per i cluster più performanti.

**Tabella 14 –  $T_{ex,med}$ ,  $T_{comf}$  e MAD' nei cluster C01, C04 e C08 e per i quattro comuni di riferimento nel caso di unità abitativa UAC e profilo di occupazione 1p**

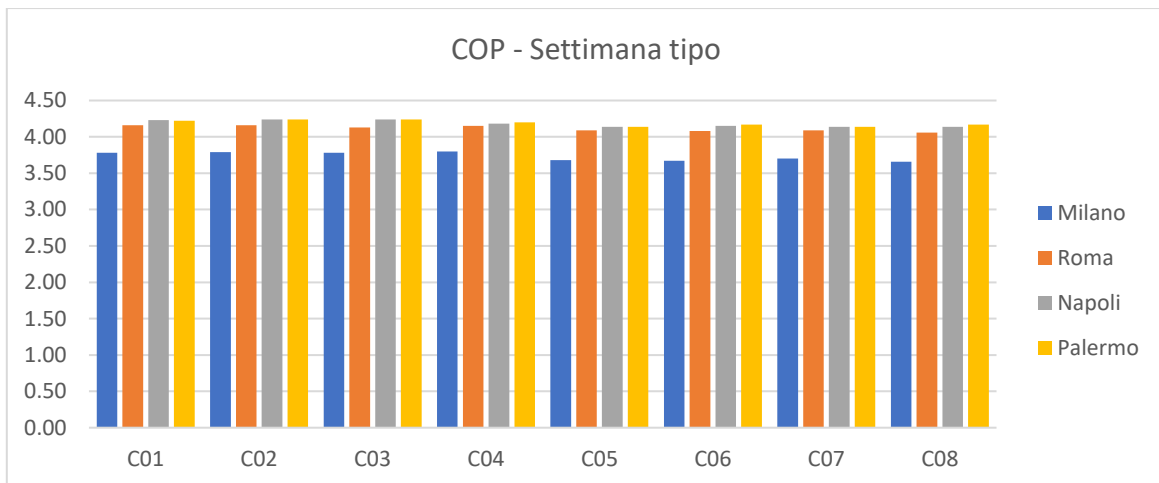
Comune	$T_{ex,med}$	$T_{comf}$	MAD' (C01)	MAD' (C04)	MAD' (C08)
Milano	2.16	19.51	0.69	0.62	0.67
Roma	9.92	22.07	2.27	2.09	1.91
Napoli	11.7	22.66	2.85	2.68	2.49
Palermo	12.45	22.91	3.10	2.93	2.74

In conclusione, si può affermare che MAD e MAD' sono più bassi per i cluster più performanti, in linea con quanto visto nell'analisi energetica. Inoltre, si nota come in funzione dell'indicatore di comfort analizzato (MAD o MAD') si ottengono risultati ben diversi. Considerando il modello basato sull'equazione di bilancio termico tra il corpo umano e l'ambiente definito secondo la normativa ISO 7730 [2], la temperatura di comfort durante il periodo di riscaldamento può essere fissata a 20°C per l'edilizia residenziale in Categoria II. In questo caso, la relazione tra MAD e  $T_{ex,med}$  è lineare e dipende ampiamente dal cluster di riferimento, con l'indice MAD diminuisce all'aumentare della temperatura esterna media considerata. Analizzando invece le temperature di comfort secondo il modello adattivo definito dalla ISO 16798-1, anche le temperature di comfort variano in funzione delle condizioni climatiche esterne, perciò l'uso di una temperatura di set-point fissata a 20°C fa in modo che MAD' aumenti esponenzialmente all'incrementare della  $T_{ex,med}$ . Si nota quindi come il modello di comfort selezionato può essere importante sia nella scelta della taglia della pompa di calore che nelle strategie di regolazione.

Per completezza di indagine, in riferimento alla settimana tipo investigata, in Figura 32 si riportano i COP medi ai quali la pompa di calore ha lavorato nell'obiettivo di mantenere le condizioni di temperatura impostate. Lo scostamento risulta significativo tra i valori medi ottenuti a Milano e quelli ottenuti nelle altre località, per tutti i cluster investigati.



**Figura 31 – Relazione tra  $T_{ex,med}$  e MAD' per la settimana di riferimento nel caso di unità abitativa UAC e profilo di occupazione 1p**



**Figura 32 – Valore medio del COP nella settimana tipo per le quattro località climatiche, nel caso di unità abitativa UAC e profilo di occupazione 1p**

## 4.2 Analisi per tipologia di edificio

Al fine di analizzare l'impatto della tipologia di edificio sui consumi energetici necessari al funzionamento della pompa di calore (in accordo alla modalità di gestione impostata) e sul mantenimento delle condizioni di comfort termico interno, sono stati confrontati i risultati delle simulazioni ottenute per le tipologie edilizie prese in considerazione a parità di tutte le altre condizioni (località, tipologia costruttiva, profilo di occupazione). Le tipologie edilizie prese in considerazione sono (si veda anche Paragrafo 3.1.2):

- Unità Abitativa Monofamiliare – UAM;
- Unità Abitativa a Schiera con edificio contiguo su 1 Lato (testa della schiera) – UAS1L;
- Unità Abitativa a Schiera con edificio contiguo su 2 Lati (centro della schiera) – UAS2L;
- Unità Abitativa inserita in un Condomino – UAC.

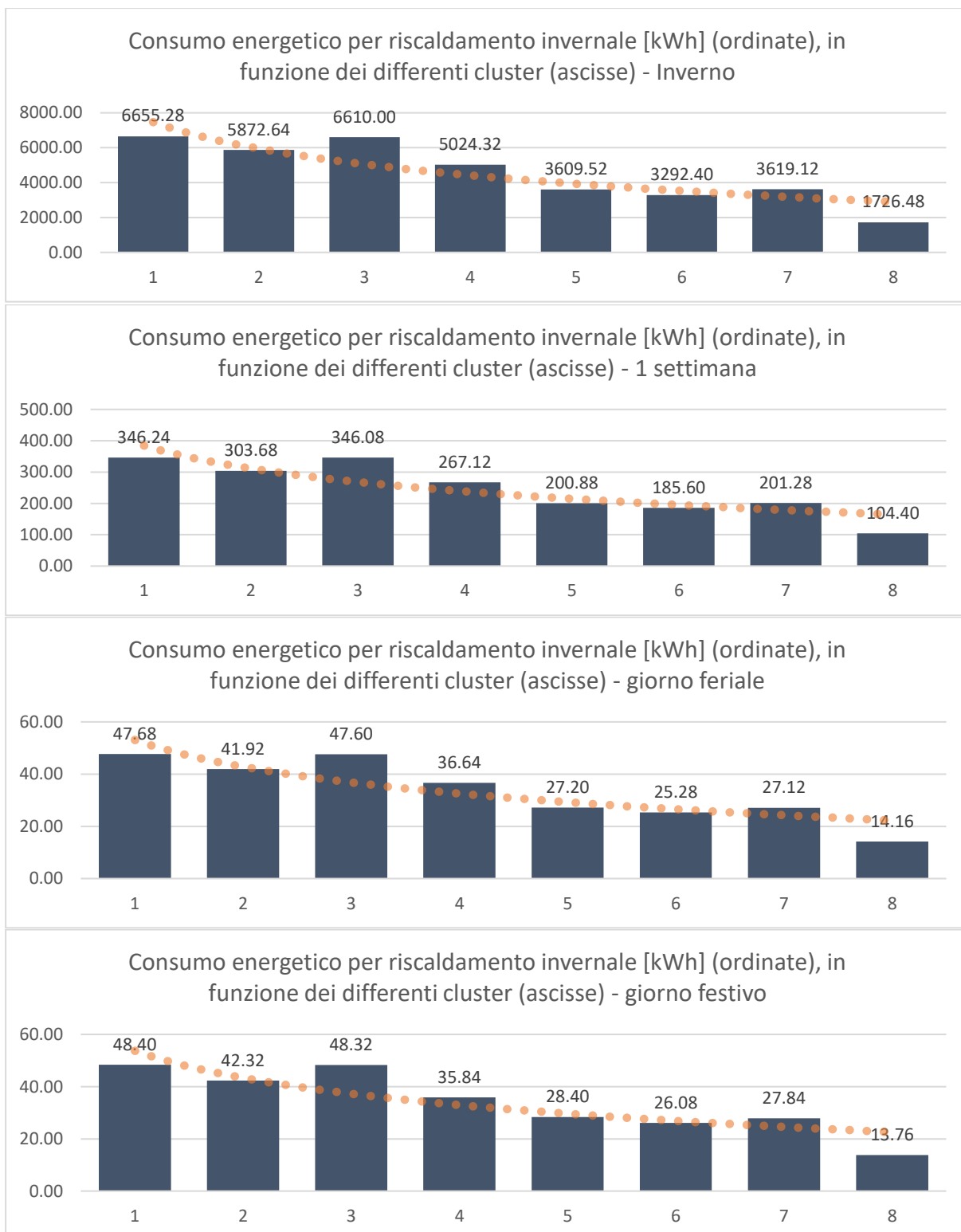
In questo paragrafo, per chiarezza espositiva, i dati ottenuti sono riportati e commentati in due sottoparagrafi distinti (uno relativo ai consumi energetici ed uno alle condizioni di comfort).

### 4.2.1 Analisi dei consumi energetici

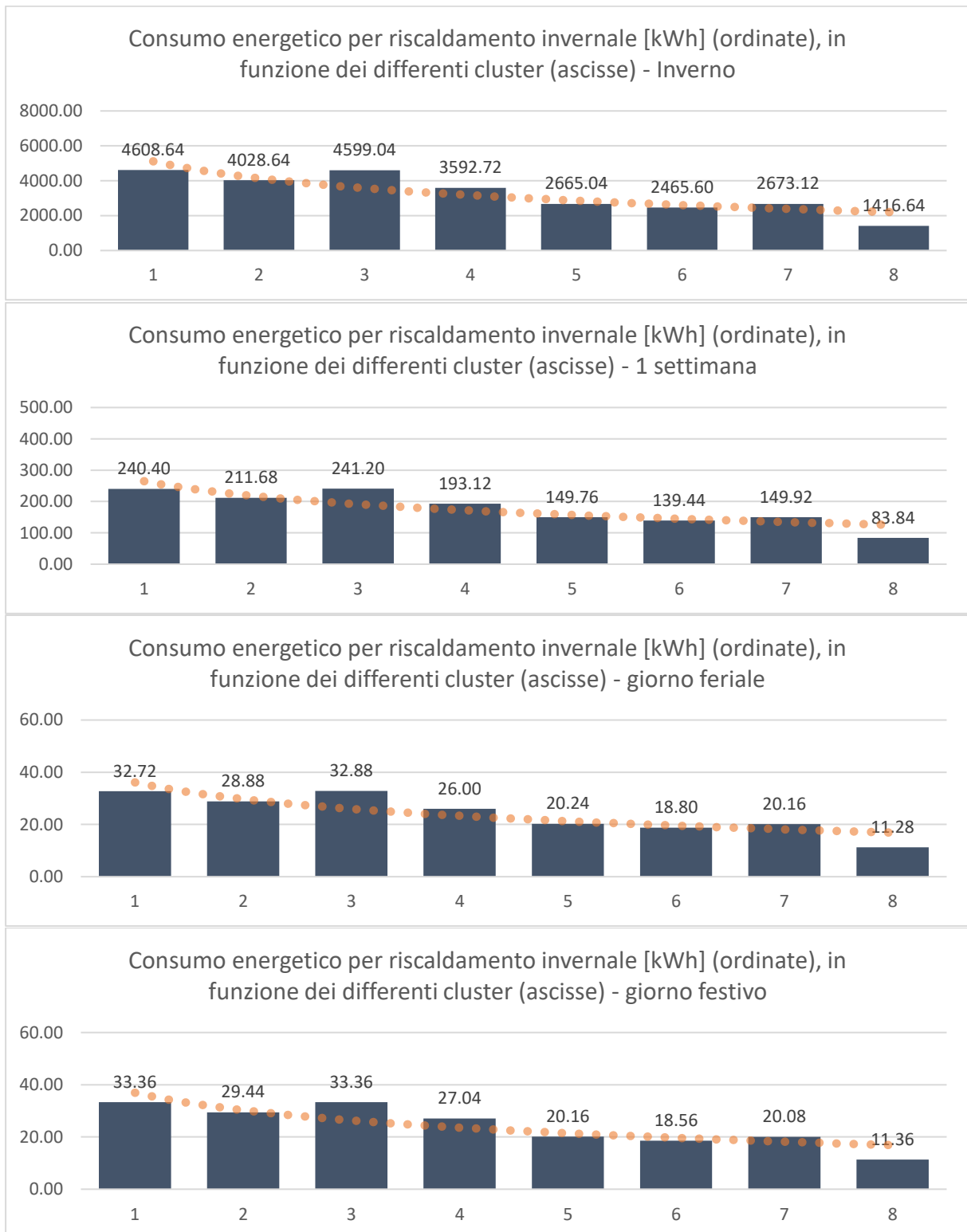
In questo sottoparagrafo sono discussi gli impatti delle tipologie edilizie considerate sui consumi energetici delle unità immobiliari, riscaldate con pompa di calore aria-aria con accumulo idronico trascurabile o assente. A titolo di esempio, per una unità immobiliare ubicata a Milano con nucleo familiare composto da una persona (profilo di occupazione 1p), nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti dei consumi energetici per riscaldamento invernale relativi rispettivamente a: tutta la stagione invernale, la settimana tipo e i due giorni tipo con profilo di occupazione feriale e festivo. Tali andamenti sono ricavati per le tipologie edilizie considerate: UAM (Figura 33), UAS1L (Figura 34), UAS2L (Figura 35), UAC (Figura 23, paragrafo 4.1.2). Andamenti analoghi sono stati ricavati per le diverse località di ubicazione (Roma, Napoli, Palermo) e per i diversi profili di occupazione (2, 3, 4 persone); gli impatti di tali caratteristiche sono discussi nelle sezioni precedenti e successive.

Osservando i grafici riportati nelle figure menzionate, è possibile notare come la variazione di tipologia edilizia influisca prevalentemente sui valori assoluti dei consumi energetici, questo per effetto delle maggiori superfici disperdenti (a parità di volume) che caratterizzano alcune tipologie rispetto alle altre. Ad esempio, considerando le figure menzionate, la tipologia edilizia UAM (con rapporto superficie disperdente su volume lordo pari a 0.73) manifesta il maggior consumo energetico, mentre la tipologia edilizia UAC (con rapporto superficie disperdente su volume lordo pari a 0.23) manifesta il minor consumo energetico; le tipologie UAS1L e UAS2L (con rapporti superficie disperdente su volume lordo pari rispettivamente a 0.70 e 0.54) manifestano consumi energetici intermedi. Le osservazioni fatte valgono per tutte le tipologie costruttive analizzate.

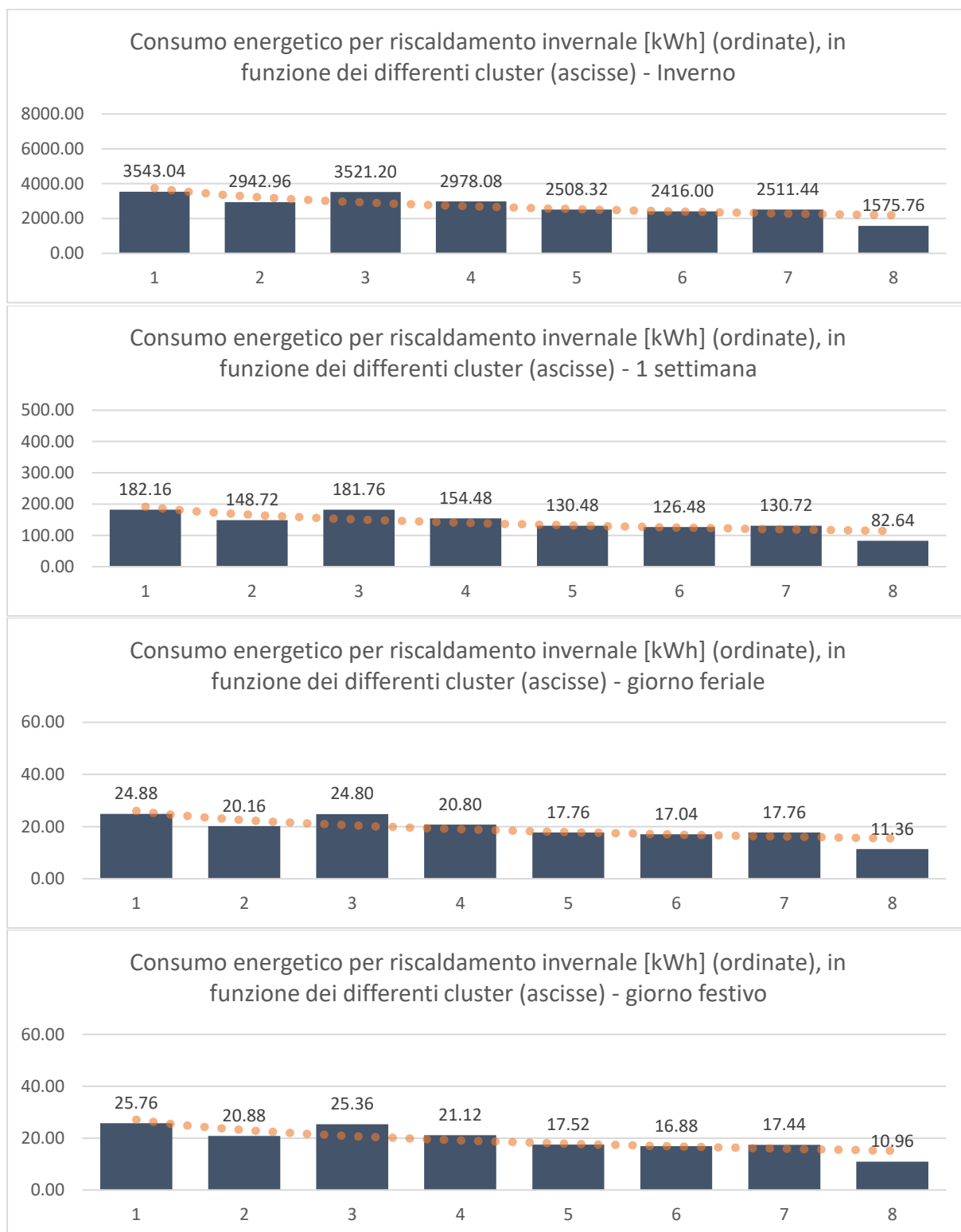
E' interessante però osservare come le riduzioni dei consumi energetici per l'intera stagione di riscaldamento, che si verificano variando la tipologia edilizia e quindi il rapporto superficie disperdente su volume lordo, siano quantitativamente differenti in funzione delle tipologie costruttive, si veda a questo proposito la Figura 36. Soffermandoci in particolare sul confronto dei consumi delle tipologie costruttive più diffuse nell'edilizia esistente, cioè quelle realizzate con pareti massive (clusters da C01 a C07), si nota come il passaggio da UAM a UAC (massima riduzione del rapporto superficie disperdente su volume lordo) consenta una riduzione dei consumi energetici inferiore (nel range 73-77%) per gli edifici termicamente non isolati (clusters da C01 a C03) ed una riduzione superiore (nel range 85-86%) per edifici termicamente isolati (clusters da C05 a C07). Ciò a sottolineare l'importanza dell'attenzione verso l'isolamento termico di edifici tradizionali, riscaldati con pompe di calore aria-aria, anche quando le unità immobiliari hanno bassi valori del rapporto superficie disperdente su volume lordo.



**Figura 33 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per la tipologia abitativa UAM, profilo di occupazione 1p a Milano**

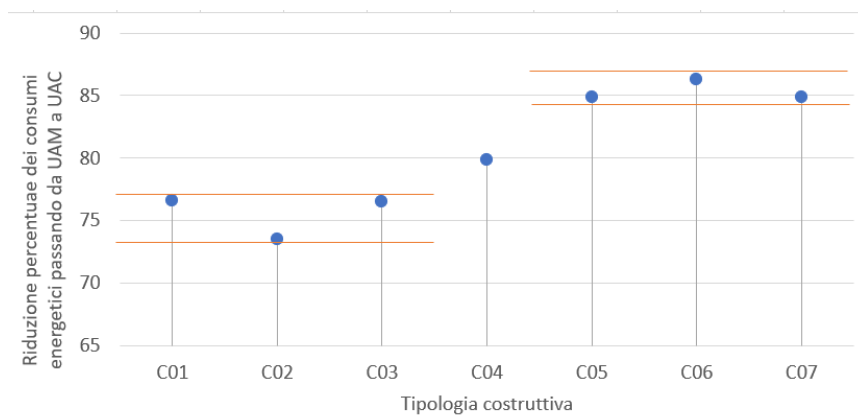


**Figura 34 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per la tipologia abitativa UAS1L, profilo di occupazione 1p a Milano**



**Figura 35 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per la tipologia abitativa UAS2L, profilo di occupazione 1p a Milano**



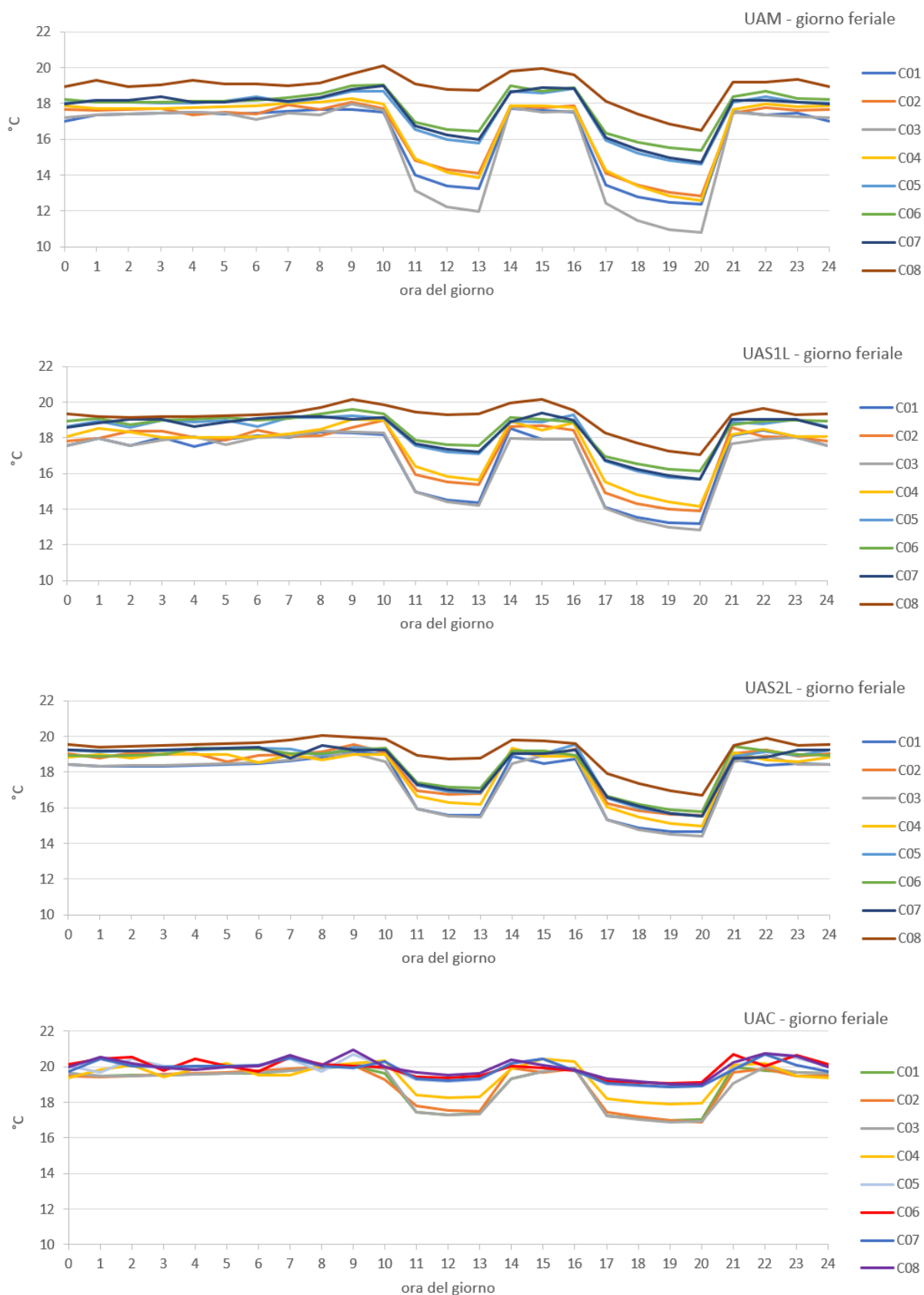


**Figura 36 – Riduzione percentuale del consumo energetico per riscaldamento invernale passando dalla tipologia edilizia UAM a quella UAC, per i clusters C01 e C07**

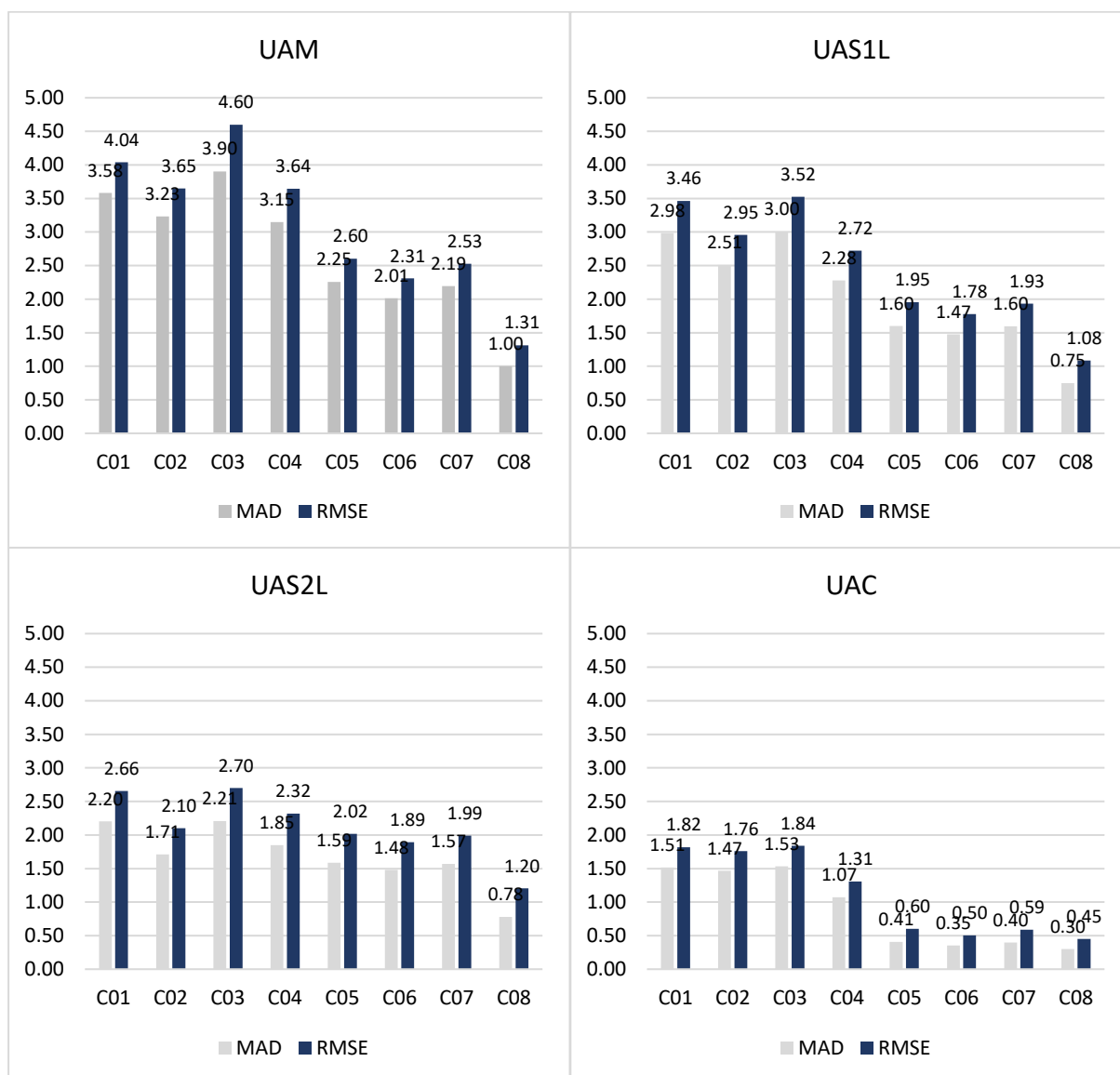
#### 4.2.2 Analisi del comfort termico

In analogia a quanto fatto nei paragrafi precedenti, la valutazione delle condizioni di comfort è stata condotta analizzando tutti gli andamenti delle temperature dell'aria interna e i valori degli indicatori statistici introdotti, ottenuti a seguito delle variazioni di tipologia edilizia. I commenti di seguito riportati si riferiranno in particolare ai parametri temperatura dell'aria interna (esaminata in particolare sul periodo giornaliero), indicatore statistico MAD ed indicatore statistico RMSE (esaminati in particolare sul periodo settimanale), dato che sono stati ritenuti i più significativi in relazione alle analisi e considerazioni effettuate (per i motivi precedentemente indicati).

A titolo di esempio, analogamente a quanto fatto per i consumi energetici, considerando la località di Milano e un nucleo familiare composto da una persona (profilo di occupazione 1p), nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti delle temperature dell'aria interna per il giorno con profilo di occupazione feriale (Figura 37), e gli andamenti degli indicatori MAD e RMSE per la settimana tipo (Figura 38). Tali andamenti sono ricavati per le 4 tipologie edilizie considerate al variare del cluster costruttivo. Andamenti analoghi sono stati ricavati per le diverse località climatiche (Roma, Napoli, Palermo) e per i diversi profili di occupazione (2, 3, 4 persone); gli impatti di tali caratteristiche sono discussi nelle sezioni precedenti e successive. Analizzando le Figure 37 e 38, è possibile notare come il ruolo dell'isolamento termico è ancora di primo piano, infatti le migliori condizioni di comfort si hanno per il cluster C08 a prescindere dalla tipologia edilizia. Considerando invece le varie tipologie edilizie, si può notare come le temperature interne oscillino maggiormente per la tipologia UAM, dove le temperature sono tendenzialmente più basse anche durante il periodo di occupazione a causa delle maggiori dispersioni verso l'esterno (maggior rapporto S/V). Si osserva inoltre una maggiore difficoltà della pompa di calore a mantenere la temperatura di set-point per le tipologie UAM e UAS1L, tipologie edilizie dove la differenza massima tra la temperatura di set-point e quella dell'aria interna raggiunge il valore più elevato in corrispondenza del cluster C03. La tipologia UAC, grazie al suo ridotto rapporto superficie disperdente su volume lordo (S/V) consente una forte riduzione dei valori degli indicatori MAD e RMSE, ad esempio nel passaggio da UAM a UAC si ha una riduzione dell'indicatore MAD nell'intervallo 60-70 % in funzione del cluster costruttivo.



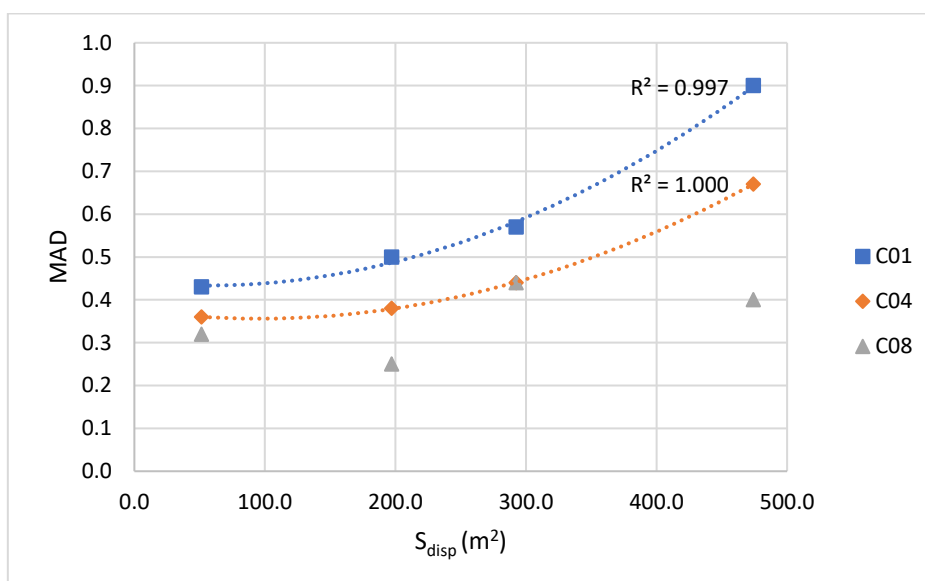
**Figura 37 – Andamento della temperatura interna nel giorno feriale per le quattro tipologie edilizie considerate, località Milano e profilo di occupazione 1p**



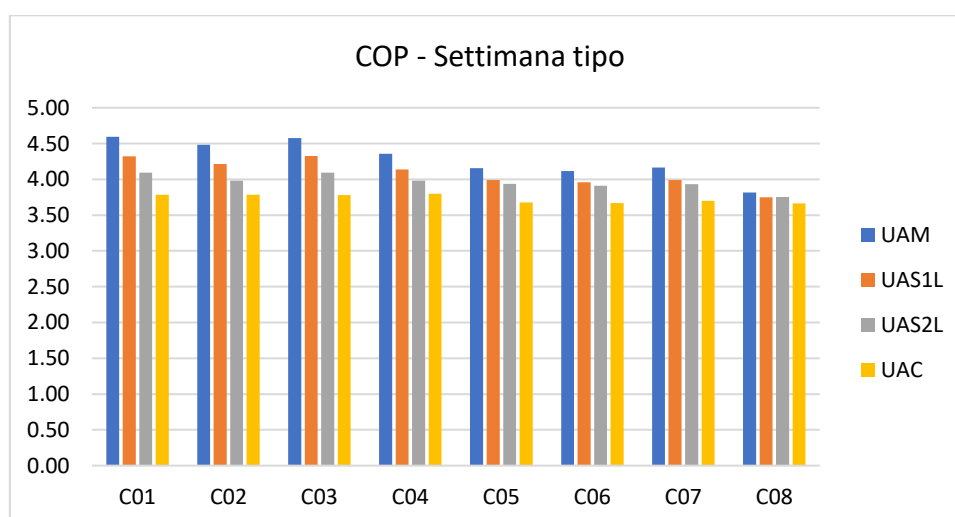
**Figura 38 – Valori di MAD (°C) e RMSE (°C) nella settimana tipo per le quattro tipologie edilizie considerate, località Milano e profilo di occupazione 1p**

Alcune osservazioni aggiuntive possono essere fatte considerando l'indice MAD, che indica lo scostamento delle temperature interne dalla temperatura di comfort pari a 20 °C (secondo il modello di scambio termico tra l'ambiente e il corpo umano). Per l'analisi dell'effetto della tipologia abitativa sul mantenimento delle condizioni di comfort interno, sono state considerate sia la superficie disperdente ( $S_{disp}$ ), sia il rapporto tra la superficie disperdente e il volume dell'edificio ( $S/V$ ), che sono state poi correlate all'indice MAD. Per quanto riguarda il rapporto  $S/V$ , non è stata riscontrata una correlazione particolarmente significativa, ma solo una diretta proporzionalità tra l'indice MAD e il rapporto  $S/V$ . È invece risultata rilevante la relazione tra l'indice MAD e la superficie disperdente ( $S_{disp}$ ) associata alle varie tipologie abitative, considerando la settimana tipo (Figura 39). In particolare, sono stati considerati il cluster molto massivo ma peggiore dal punto di vista dell'isolamento termico (C01), quello massivo ed intermedio dal punto di vista dell'isolamento termico (C04) e quello leggero ma migliore dal punto di vista dell'isolamento termico (C08). Si nota come all'aumentare della superficie disperdente incrementi la difficoltà della pompa di calore nella

configurazione investigata, soprattutto per i cluster meno performanti, le cui temperature interne dipendono maggiormente dalle condizioni esterne. Per questi cluster, come può essere notato dalla Figura 39, la relazione tra  $S_{disp}$  e MAD è di tipo quadratico, per cui si ha un aumento considerevole delle condizioni di discomfort all'aumentare della superficie disperdente. Per il cluster C08 invece non si riscontra questa tendenza e l'indice MAD non manifesta una evidente dipendenza dalla superficie disperdente. Questi risultati confermano il fatto che il mantenimento delle condizioni di comfort nelle tipologie costruttive più performanti è molto meno legato a fattori quali la tipologia di edificio o le condizioni climatiche esterne, perciò la scelta della taglia e della regolazione della pompa di calore diventano relativamente meno importanti.



**Figura 39 – Relazione tra indice MAD e superficie disperdente per il profilo di occupazione 1p a Milano, cluster C01, C04, C08**



**Figura 40 – Valore medio del COP nella settimana tipo per le quattro tipologie edilizie, nel caso di Milano e profilo di occupazione 1p**

Per completezza di indagine, in riferimento alla settimana tipo investigata, in Figura 40 si riportano i COP medi ai quali la pompa di calore ha lavorato nell'obiettivo di mantenere le condizioni di temperatura impostate. Dalla figura si nota che il valore medio del COP varia in funzione della tipologia edilizia in maniera apprezzabile, eccetto per l'edificio molto isolato termicamente (C08). La riduzione del valore medio del COP per tipologie edilizie con rapporto S/V più contenuto e per tipologie costruttive termicamente più isolate, a parità di condizioni climatiche esterne, è giustificata dalla riduzione del valore medio del fabbisogno di potenza termica necessaria al riscaldamento e dunque alla condizione di lavoro della pompa di calore a fattore di carico mediamente più basso. Ciò comporta un degrado del COP secondo quanto indicato al paragrafo 2.3.

### 4.3 Analisi per profilo di utilizzo

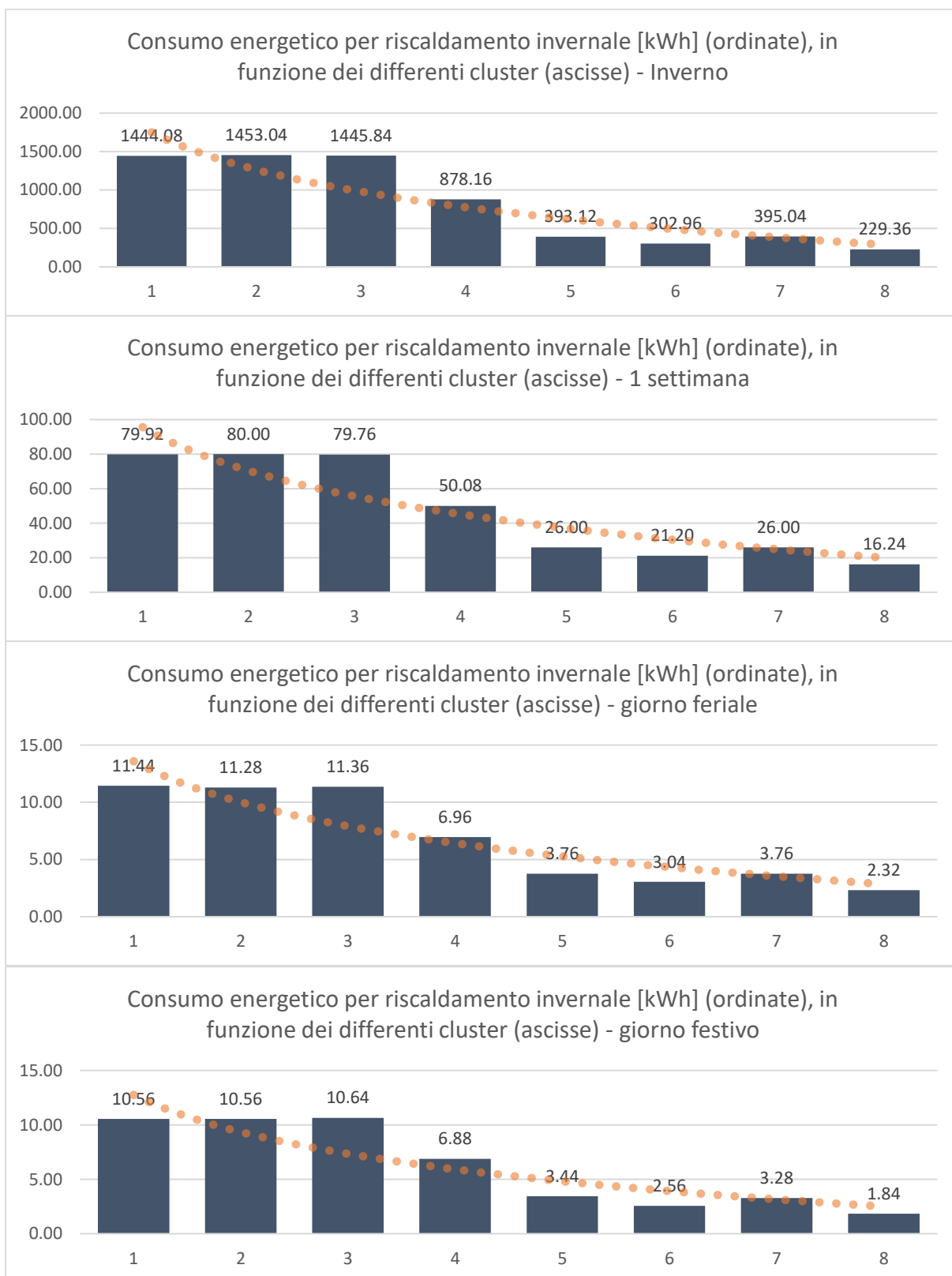
Al fine di analizzare l'impatto del profilo di utilizzo sui consumi energetici necessari al funzionamento della pompa di calore (in accordo alla modalità di gestione impostata) e sul mantenimento delle condizioni di comfort termico interno, sono stati confrontati i risultati delle simulazioni ottenute per i profili di occupazione presi in considerazione a parità di tutte le altre condizioni (località, tipologia edilizia, tipologia costruttiva, profilo di occupazione). I profili di occupazione presi in considerazione sono (si veda anche Paragrafo 3.1.3 e per ulteriori dettagli il report relativo al W.P. 3, L.A. 16 del presente progetto):

- Nucleo familiare composto da 1 persona – Profilo di occupazione 1p;
- Nucleo familiare composto da 2 persone – Profilo di occupazione 2p;
- Nucleo familiare composto da 3 persone – Profilo di occupazione 3p;
- Nucleo familiare composto da 4 persone – Profilo di occupazione 4p.

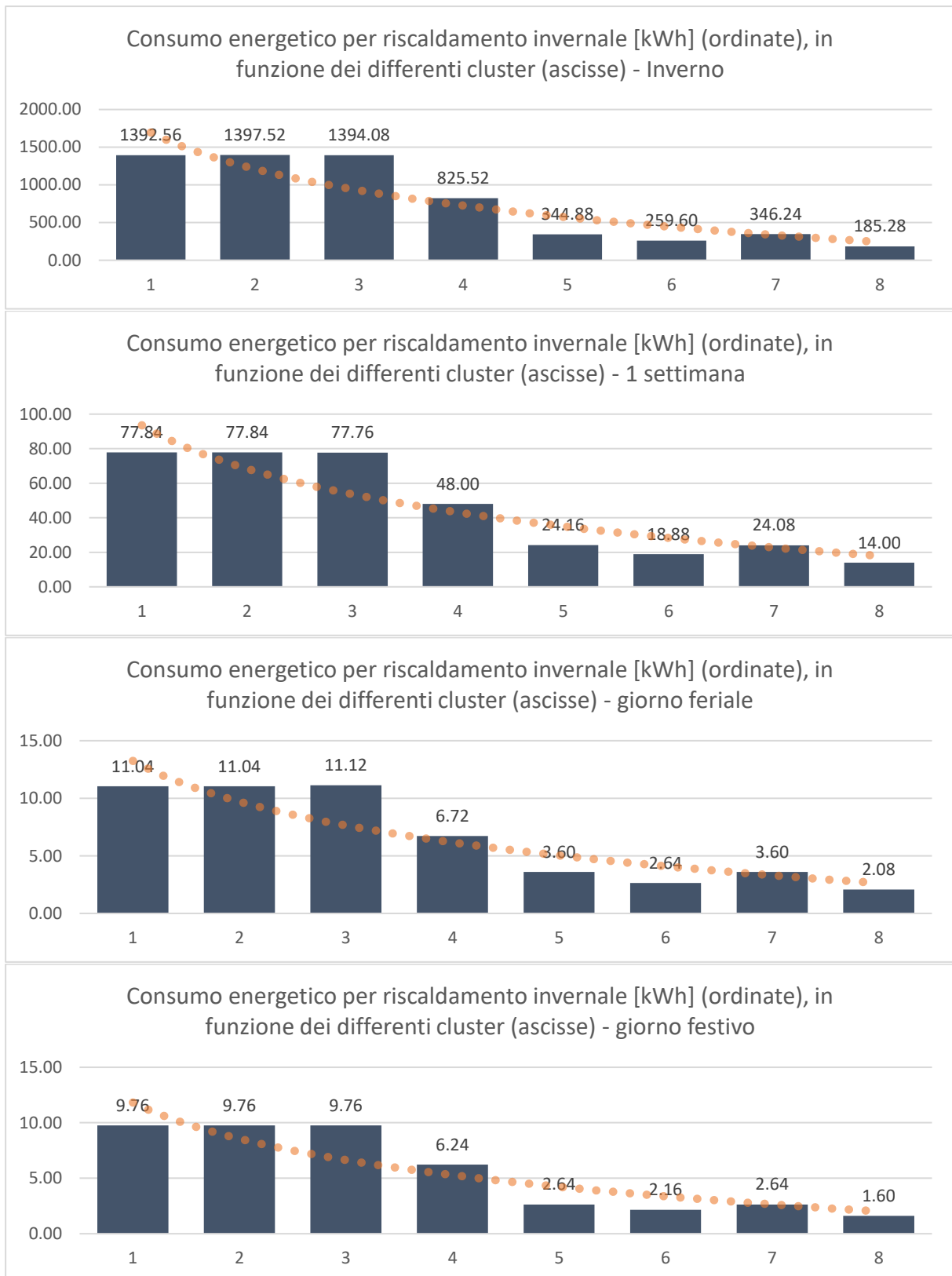
In questo paragrafo, per chiarezza espositiva, i dati ottenuti sono riportati e commentati in due sottoparagrafi distinti (uno relativo ai consumi energetici ed uno alle condizioni di comfort).

#### 4.3.1 Analisi dei consumi energetici

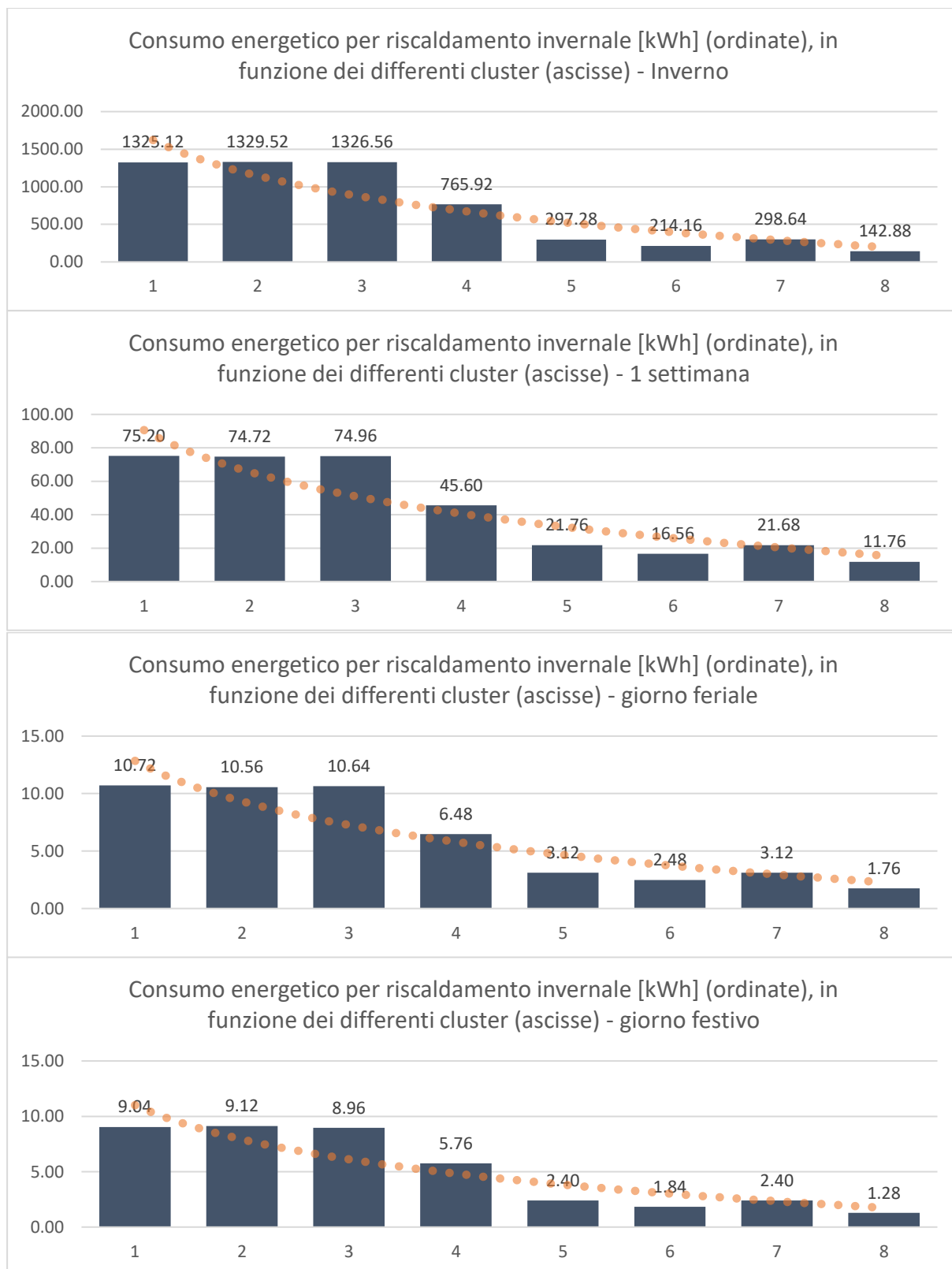
In questo sottoparagrafo sono discussi gli impatti dei profili di utilizzo considerati sui consumi energetici delle unità immobiliari, riscaldate con pompa di calore aria-aria con accumulo idronico trascurabile o assente. A titolo di esempio, per la tipologia edilizia inserita in condomino (UAC) e ubicata a Milano, nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti dei consumi energetici per riscaldamento invernale relativi rispettivamente a: tutta la stagione invernale, la settimana tipo e i due giorni tipo con profilo di occupazione feriale e festivo. Tali andamenti sono ricavati per i profili di utilizzo considerati: profilo di occupazione 1p (Figura 23, paragrafo 4.1.2), 2p (Figura 41), 3p (Figura 42) e 4p (Figura 43). Andamenti analoghi sono stati ricavati per le diverse tipologie edilizie (UAM, UAS1L, UAS2L) e per le diverse località climatiche (Roma, Napoli, Palermo); gli impatti di tali caratteristiche sono discussi nelle sezioni precedenti. Osservando i grafici riportati nelle figure menzionate, è possibile notare come, anche in questo caso, il profilo di utilizzo influenzi i valori assoluti dei consumi energetici ma non significativamente la distribuzione dei consumi sulle differenti tipologie costruttive (clusters da C01 a C08). Come già evidenziato in precedenza, anche per tutti i profili considerati, i consumi energetici stagionali possono essere raggruppati in fasce: quella dei consumi elevati (caratteristici dei clusters C01, C02 e C03 che presentano consumi molto simili tra loro), quella dei consumi contenuti (caratteristici dei clusters C05, C06, C07 anch'essi molto simili tra loro). Oltre a queste fasce si ha un cluster con consumo intermedio (cluster C04) ed uno con consumo fortemente contenuto (cluster C08). Tali risultati sono coerenti con i livelli di isolamento termico previsto per ciascun cluster, che continua ad essere la caratteristica maggiormente dominante per l'ottenimento di consumi energetici stagionali ridotti.



**Figura 41 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per il profilo di occupazione 2p, tipologia UAC a Milano**



**Figura 42 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per il profilo di occupazione 3p, tipologia UAC a Milano**



**Figura 43 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per riscaldamento per il profilo di occupazione 4p, tipologia UAC a Milano**

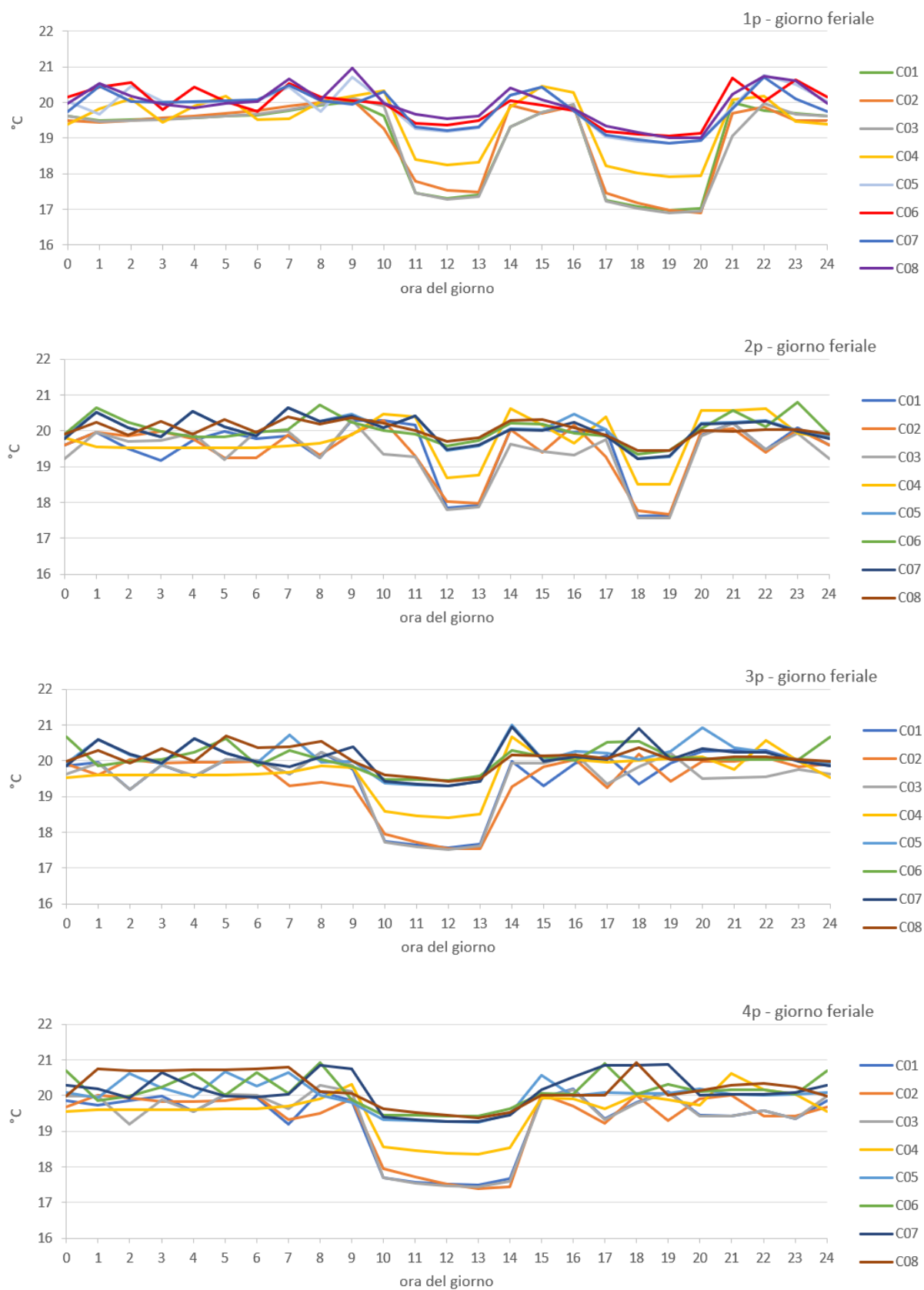


In riferimento ai differenti profili di occupazione, dai risultati ottenuti, è possibile effettuare una utile considerazione. Il profilo di occupazione impatta sui consumi energetici con un duplice effetto, passando dal profilo 1p al profilo 4p, da un lato aumentano le ore complessive per le quali almeno una persona è presente nella unità abitativa e di conseguenza deve essere mantenuto il valore di set-point della temperatura dell'aria interna, dall'altro aumentano gli apporti termici interni generati nell'unità abitativa, che vengono sfruttati anche ai fini di una riduzione del fabbisogno energetico per riscaldamento. Di questi due effetti contrastanti, l'impatto maggiore sui consumi energetici è dato dall'aumento degli apporti termici interni, infatti si osserva una riduzione graduale dei consumi energetici stagionali passando dal profilo 1p al profilo 4p, a parità di tutte le altre condizioni. La maggior riduzione percentuale dei consumi energetici si osserva passando dal profilo 1p al profilo 2p, per tutti i clusters considerati, con riduzioni quasi doppie di quelle che si osservano passando dal 2p al 3p e dal 3p al 4p. La riduzione percentuale dei consumi energetici stagionali nel passaggio da 1p a 2p diventa sempre più consistente con il graduale aumento dei livelli di isolamento termico dell'edificio, passando da percentuali di poco inferiori al 10% per i clusters privi di isolamento termico (C01, C02, C03) fino ad oltre il 30% per il cluster con elevato livello di isolamento termico (C08).

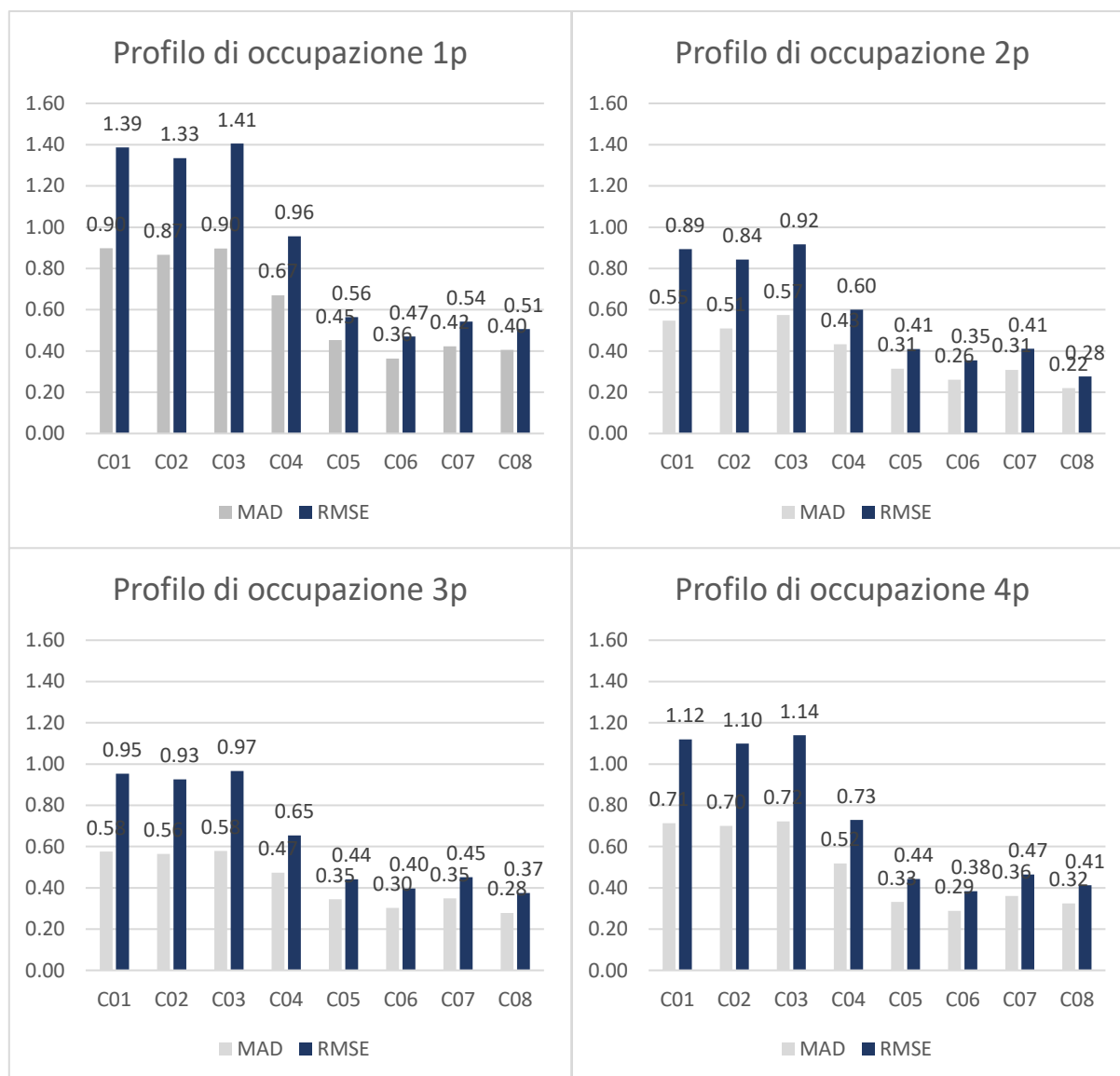
#### 4.3.2 Analisi del comfort termico

In analogia a quanto fatto nei paragrafi precedenti, la valutazione delle condizioni di comfort è stata condotta analizzando tutti gli andamenti delle temperature dell'aria interna e i valori degli indicatori statistici introdotti, ottenuti a seguito delle variazioni di tipologia edilizia. I commenti di seguito riportati si riferiranno in particolare ai parametri temperatura dell'aria interna (esaminata in particolare sul periodo giornaliero), indicatore statistico MAD ed indicatore statistico RMSE (esaminati in particolare sul periodo settimanale), dato che sono stati ritenuti i più significativi in relazione alle analisi e considerazioni effettuate (per i motivi precedentemente indicati).

A titolo di esempio, analogamente a quanto fatto per i consumi energetici, considerando la località di Milano e la tipologia edilizia UAC, nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti delle temperature dell'aria interna per il giorno con profilo di occupazione feriale (Figura 44), e gli andamenti degli indicatori MAD e RMSE per la settimana tipo (Figura 45). Tali andamenti sono ricavati per i 4 profili di occupazione considerati ed al variare del cluster costruttivo. Andamenti analoghi sono stati ricavati per le diverse località climatiche (Roma, Napoli, Palermo) e per le diverse tipologie edilizie (UAM, UAS1L, UAS2L); gli impatti di tali caratteristiche sono discussi nelle sezioni precedenti. Analizzando le Figure 44 e 45, si confermano le tendenze già evidenziate nelle indagini legate alle variazioni degli altri parametri. Le condizioni migliori in termini di comfort si riscontrano nuovamente per i cluster termicamente più isolati, a prescindere dal profilo di occupazione. Invece, in riferimento al profilo di occupazione, per effetto della presenza o meno di persone nell'abitazione e della regolazione della pompa di calore utilizzata, nei profili 1p e 2p si hanno due spegnimenti giornalieri completi della pompa di calore, nei profili 3p e 4p un solo spegnimento per un periodo più prolungato. Ciò è evidente dagli andamenti di Figura 44. Per i cluster C01-C03 allo spegnimento della pompa di calore si raggiungono temperature inferiori ai 18°C, per il cluster C04 si raggiungono temperature superiori a 18 °C ma inferiori a 19 °C e per il cluster C08 non si scende mai al di sotto di 19 °C. A causa degli effetti combinati di tempo di permanenza nell'abitazione ed apporti interni, il profilo di occupazione che garantisce, agli edifici riscaldati con la pompa di calore aria-aria nella configurazione utilizzata, un minor scostamento dalle temperature di comfort è il profilo 2p. Questo aspetto può essere osservato dai valori riportati in Figura 45.



**Figura 44 – Andamento della temperatura interna nel giorno feriale per i 4 profili di occupazione considerati, per tipologia edilizia UAC in località Milano**



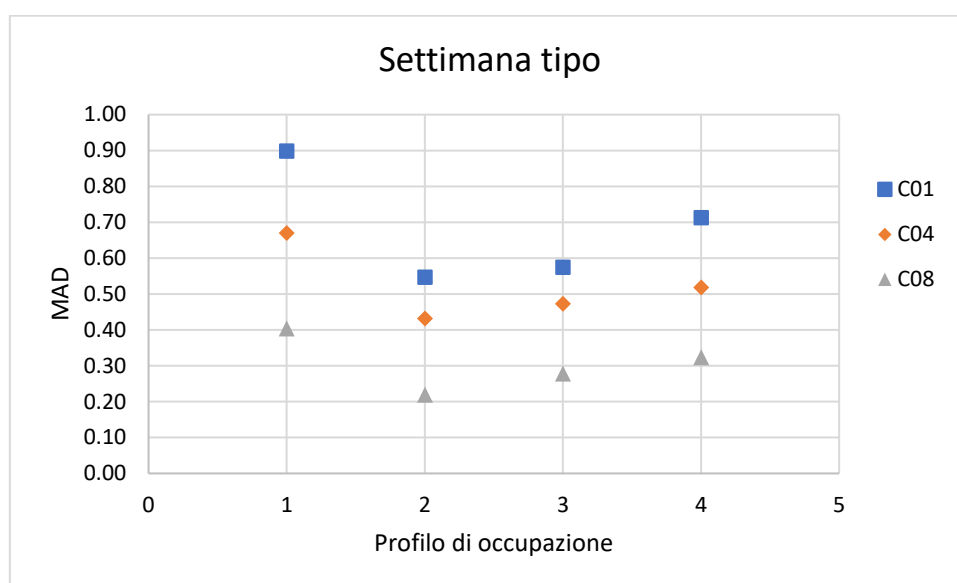
**Figura 45 – Valori di MAD (°C) e RMSE (°C) nella settimana tipo per i quattro profili di occupazione considerati, tipologia edilizia UAC in località Milano e profilo di occupazione 1p**

Analogamente a quanto fatto in precedenza, per l'analisi dell'influenza del profilo di occupazione sulle condizioni di comfort è stato utilizzato l'indice MAD, che valuta lo scostamento del profilo di temperatura interna dai 20°C, che è stato poi correlato al profilo di occupazione inteso come il numero di persone presenti nell'unità abitativa considerando la settimana tipo.

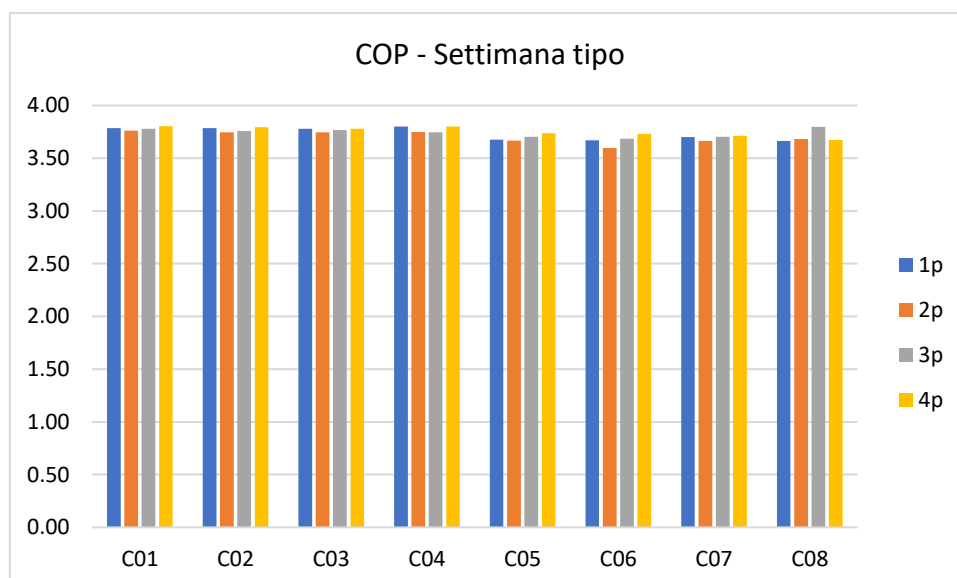
Il profilo di occupazione può infatti influenzare le condizioni interne sia in termini di apporti gratuiti, sia in termini di utilizzo e gestione dell'impianto. La Figura 46 mostra la relazione esistente tra l'indice MAD e il profilo di occupazione molto massivo ma peggiore dal punto di vista dell'isolamento termico (C01), quello massivo ed intermedio dal punto di vista dell'isolamento termico (C04) e quello leggero ma migliore dal punto di vista dell'isolamento termico (C08), per la settimana tipo. Dalla Figura 46 si nota come il valore del MAD non decresca in maniera monotona con il numero di occupanti e dunque con i profili di occupazione. Infatti il valore più elevato di MAD, per ogni singolo cluster, si ha in corrispondenza del profilo 1p. Mentre con i profili 2p e 3p, la pompa di calore, nella configurazione

considerata, garantisce un mantenimento più efficace delle condizioni di comfort e quindi si ottengono valori di MAD più bassi. Tali valori crescono di nuovo in corrispondenza del 4p.

Per completezza di indagine, in riferimento alla settimana tipo investigata, in Figura 47 si riportano i COP medi ai quali la pompa di calore ha lavorato con l'obiettivo di mantenere le condizioni di temperatura impostate. Dalla figura si nota che il valore medio del COP è poco influenzato dal profilo di occupazione rispetto alla variazione degli altri parametri già investigati.



**Figura 46 – Relazione tra indice MAD e profilo di occupazione per la tipologia edilizia UAC a Milano, cluster C01, C04, C08**



**Figura 47 – Valore medio del COP nella settimana tipo per le quattro tipologie edilizie, nel caso di Milano e profilo di occupazione 1p**

#### 4.4 Analisi per caratteristiche di impianto

Essendo l'attività di ricerca condotta concentrata sull'interazione edificio-impianto per il servizio di riscaldamento invernale, soddisfatto con un generatore a pompa di calore aria-aria, come variazioni di caratteristiche di impianto sono state considerate: variazioni di logica di modulazione della pompa di calore e variazioni di taglia della pompa di calore. Tali caratteristiche influenzano in maniera significativa l'interazione tra l'edificio e l'impianto.

Con riferimento alla logica di modulazione della pompa di calore, oltre a quella di riferimento utilizzata per tutte le precedenti simulazioni ed introdotta al paragrafo 2.3 (si veda in particolare Tabella 3), sono state considerate due ulteriori logiche. Le logiche sono state denominate MOD40, MOD20 (logica utilizzata per tutte le simulazioni precedenti, v. Tab.3), MOD10 in accordo alla capacità di scendere con livelli di modulazione rispettivamente al 40% al 20% al 10% della potenza nominale. In Tabella 15 sono riportate le caratteristiche delle logiche di regolazione.

**Tabella 15 – Differenti logiche di modulazione considerate per la pompa di calore**

$\Delta T$	MOD20	MOD10	MOD40
$\Delta T > 3^{\circ}\text{C}$	100%	100%	100%
$2.5^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 3.0^{\circ}\text{C}$	80%	65%	90%
$2.0^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 2.5^{\circ}\text{C}$	60%	40%	80%
$1.0^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 2.0^{\circ}\text{C}$	40%	25%	60%
$0.0^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 1.0^{\circ}\text{C}$	20%	10%	40%
$\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$	0%	0%	0%

$\Delta T$  rappresenta la differenza di temperatura tra la temperatura di set-point ( $20^{\circ}\text{C}$ ) e quella effettiva dell'aria interna

Con riferimento alla taglia della pompa di calore, oltre a quella di riferimento (potenza elettrica nominale 4000 W) utilizzata per tutte le precedenti simulazioni ed introdotta all'inizio del capitolo 4, sono state considerate anche ulteriori due taglie, una superiore (potenza elettrica nominale 6000 W) ed una inferiore (potenza elettrica nominale 2000 W), mantenendo invariata la dipendenza delle prestazioni (COP) dalla temperatura dell'aria esterna.

Queste variazioni di caratteristiche dell'impianto hanno richiesto una serie di simulazioni aggiuntive condotte su casi significativi. In particolare tali variazioni sono state applicate alternativamente alle tipologie edilizie UAM e UAC, ubicate nelle località di Milano e Palermo, occupate con profili 1p e 2p, per tutti i cluster costruttivi. Con queste ulteriori variazioni il set completo di configurazioni di edifici esaminati è aumentato di ulteriori 256 unità.

Al fine di analizzare l'impatto delle caratteristiche di impianto sui consumi energetici necessari al funzionamento della pompa di calore (in accordo con la modalità di gestione impostata) e sul mantenimento delle condizioni di comfort termico interno, sono stati confrontati i risultati delle simulazioni ottenute per le caratteristiche di impianto considerate a parità di tutte le altre condizioni (località, tipologia edilizia, tipologia costruttiva, profilo di occupazione).

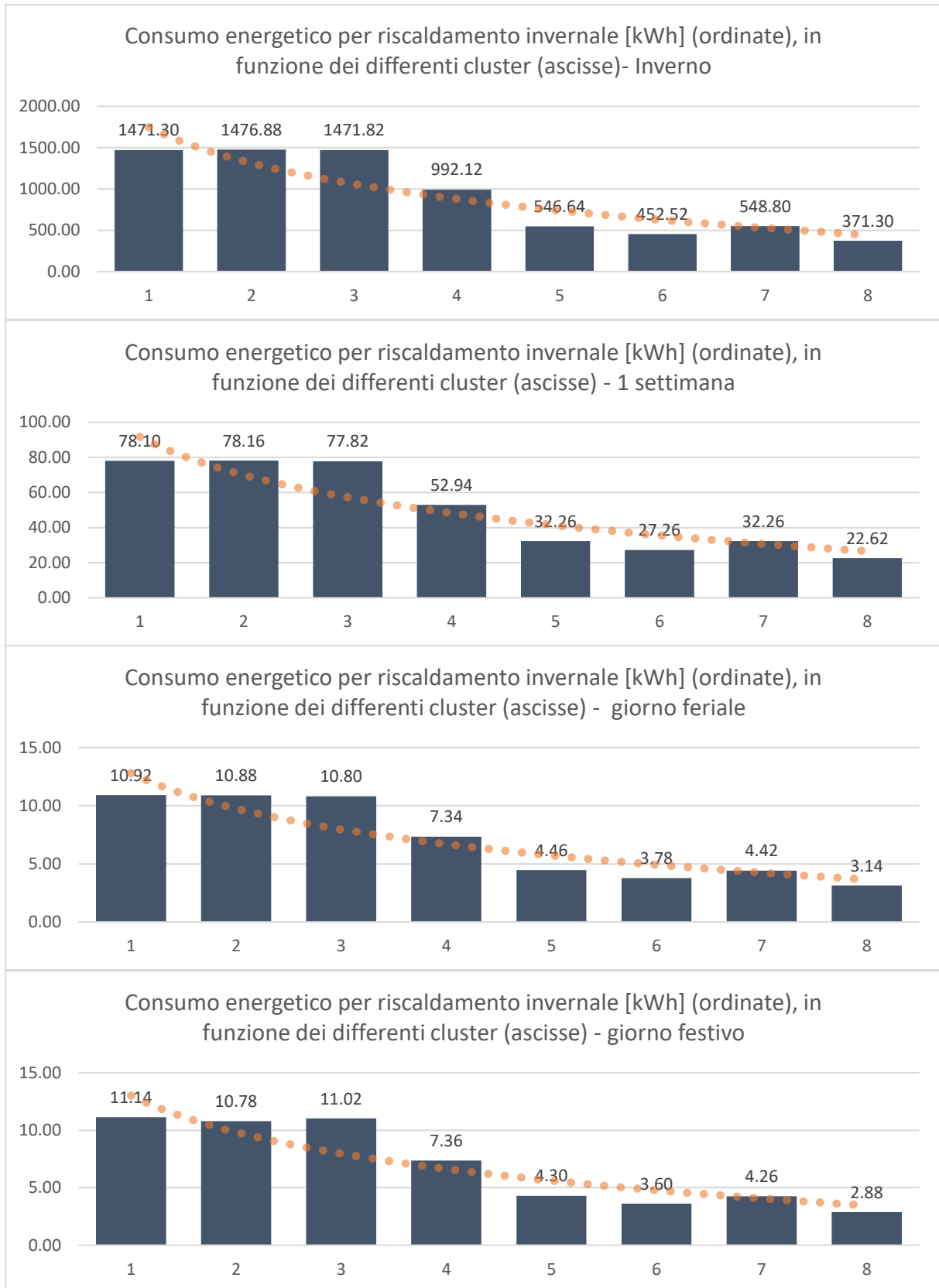
In questo paragrafo, per chiarezza espositiva, i dati ottenuti sono riportati e commentati in due sottoparagrafi distinti (uno relativo ai consumi energetici ed uno alle condizioni di comfort).

#### 4.4.1 Analisi dei consumi energetici

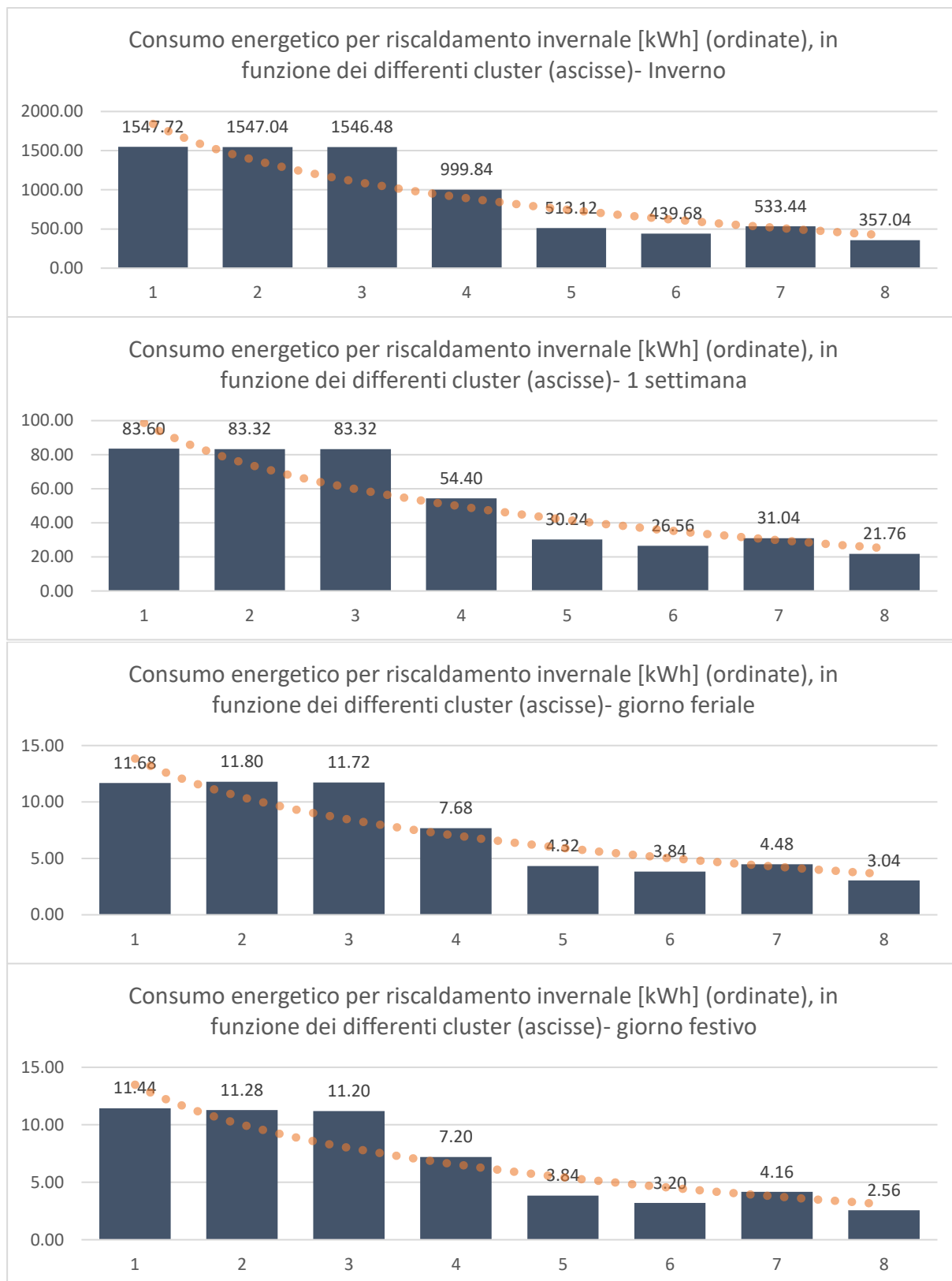
In questo sottoparagrafo sono discussi gli impatti delle caratteristiche di impianto considerate sui consumi energetici delle unità immobiliari, riscaldate con pompa di calore aria-aria con accumulo idronico trascurabile o assente.

Con riferimento alle variazioni di logica di modulazione, a titolo di esempio, per la tipologia edilizia inserita in condominio (UAC) ubicata a Milano ed occupata con profilo 1p, nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti dei consumi energetici per riscaldamento invernale relativi rispettivamente a: tutta la stagione invernale, la settimana tipo e i due giorni tipo con profilo di occupazione feriale e festivo. Tali andamenti sono ricavati per le tre logiche di modulazione considerate: logica MOD20 (Figura 23, paragrafo 4.1.2), logica MOD10 (Figura 48), logica MOD40 (Figura 49). Andamenti analoghi sono stati ricavati per la tipologia edilizia UAM, per la località di Palermo e per il profilo di occupazione 4p. Osservando i grafici riportati nelle figure menzionate e soprattutto il grafico riepilogativo di confronto riportato in Figura 50, è possibile notare come gli impatti delle logiche di modulazione considerate non siano marcati. La possibilità di avere modulazioni fino a più bassi regimi infatti introduce due effetti contrastanti: il primo riguarda le minori dispersioni che si hanno dal momento che si mantengono temperature lievemente più basse tendendo al set-point più lentamente (ciò comporta una riduzione dei consumi), il secondo riguarda la riduzione del COP della pompa di calore a causa della correzione legata al fattore di carico CR (ciò comporta un aumento dei consumi). I due effetti tendono a bilanciarsi nella maggior parte dei casi esaminati. Soltanto per gli edifici con cluster costruttivi con più basso livello di isolamento termico (C01-C03), il primo effetto è leggermente dominante, infatti si nota che passando ad una modulazione MOD10 si ottiene un risparmio energetico stagionale di circa il 5% rispetto alle altre modulazioni. Per i cluster più performanti dal punto di vista dell'isolamento termico, l'attenzione deve al contrario essere spostata sul cercare di far lavorare la pompa di calore con fattori di carico più frequentemente prossimi all'unità, poiché un'eccessiva modulazione potrebbe far in modo che l'effetto di aumento dei consumi dovuto alla riduzione del COP sia superiore alla riduzione dovuta alla diminuzione delle dispersioni termiche. In questo senso, l'attenzione al dimensionamento della pompa di calore diventa molto importante.

Con riferimento al dimensionamento della pompa di calore, a titolo di esempio per la tipologia edilizia inserita in condominio (UAC) ubicata a Milano ed occupata con profilo 1p, in Tabella 15 sono riportati i consumi energetici stagionali ottenuti utilizzando le differenti taglie considerate. I risultati riportati in Tabella 15 sono facilmente interpretabili: i consumi calano passando da cluster meno performanti dal punto di vista dell'isolamento termico a cluster più performanti, a parità di taglia della pompa di calore, e calano al ridursi della taglia della pompa di calore a parità di cluster. Tuttavia è opportuno osservare che tali dati di consumo debbono necessariamente essere letti e commentati insieme a quelli relativi al mantenimento delle condizioni di comfort, perché a taglie diverse potrebbero corrispondere soddisfacimenti delle condizioni di comfort ben diversi tra loro (come ci si aspetta per esempio riducendo troppo la taglia della pompa di calore in cluster poco performanti dal punto di vista dell'isolamento termico). Il considerare congiuntamente dati di consumo energetico con dati di soddisfacimento delle condizioni di comfort, entrambi su base dinamica, dovrebbe essere un criterio guida da adottare nelle valutazioni per la scelta delle soluzioni impiantistiche da installare a servizio di edifici, specialmente quando si utilizzano pompe di calore come quelle oggetto del presente studio.



**Figura 48 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per la logica MOD10, tipologia UAC a Milano con profilo di occupazione 1p**



**Figura 49 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per la logica MOD40, tipologia UAC a Milano con profilo di occupazione 1p**



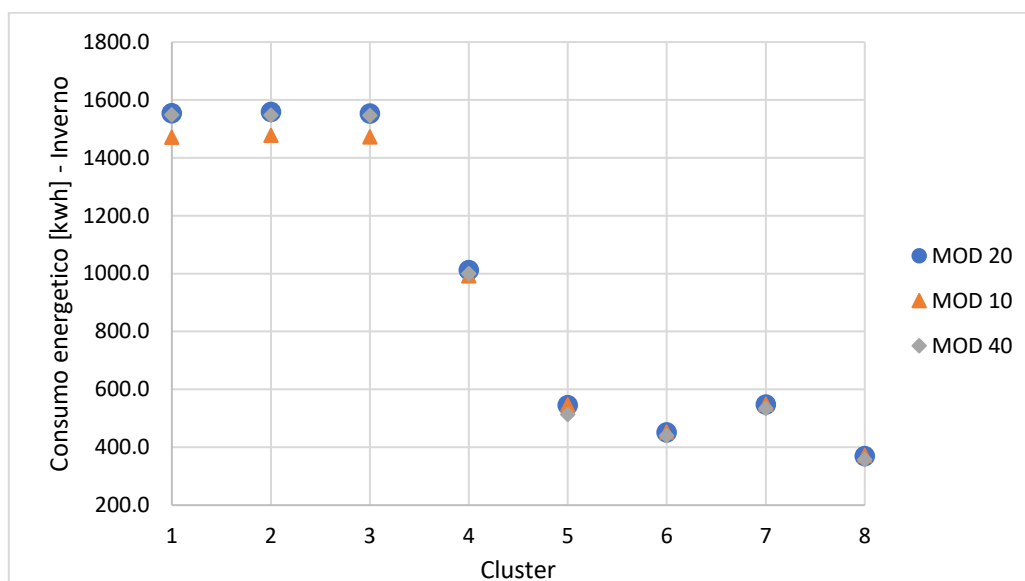


Figura 50 – Confronto dei consumi energetici per riscaldamento invernale per le tre logiche di modulazione, tipologia UAC a Milano con profilo di occupazione 1p

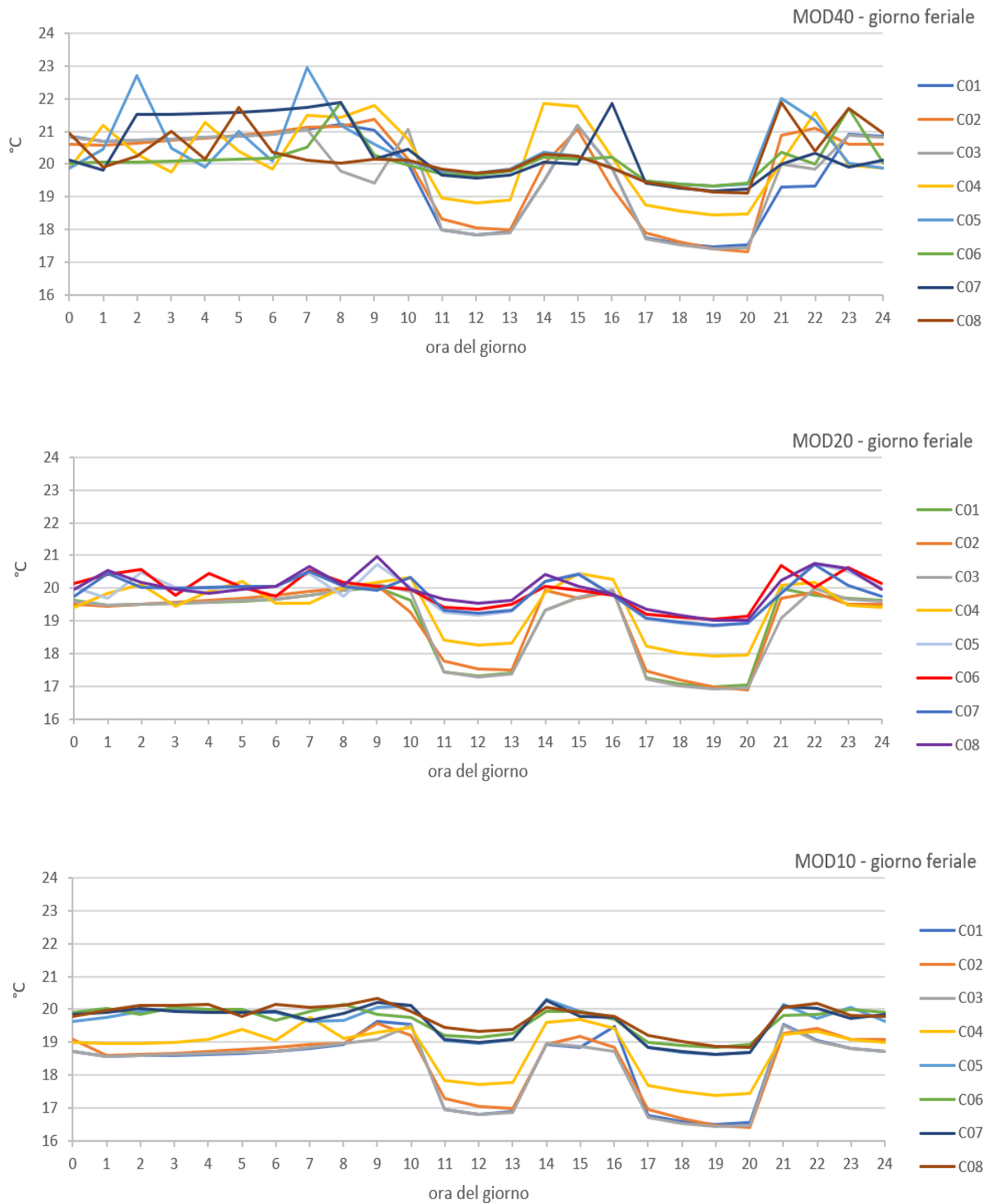
Tabella 15 – Valori del consumo energetico stagionale della pompa di calore in kWh, per differenti potenze elettriche nominali della pompa di calore e per tutti i cluster analizzati, caso di UAC ubicata a Milano

		Pot. elettrica nominale PdC [W]		
		6000	4000	2000
Cluster	1	1586.64	1554.08	1413.72
	2	1591.44	1557.84	1419.16
	3	1586.52	1553.04	1414.08
	4	1038.24	1012.16	962.60
	5	555.48	544.96	529.96
	6	459.60	450.96	438.92
	7	557.52	547.04	531.96
	8	374.64	369.04	360.08

#### 4.4.2 Analisi del comfort termico

In analogia a quanto fatto nei paragrafi precedenti, la valutazione delle condizioni di comfort è stata condotta analizzando tutti gli andamenti delle temperature dell'aria interna e i valori degli indicatori statistici introdotti, ottenuti a seguito delle variazioni di caratteristiche di impianto. I commenti di seguito riportati si riferiranno in particolare ai parametri temperatura dell'aria interna (esaminata in particolare sul periodo giornaliero), indicatore statistico MAD ed indicatore statistico RMSE (esaminati in particolare sul periodo settimanale), dato che sono stati ritenuti i più significativi in relazione alle analisi e considerazioni effettuate (per i motivi precedentemente indicati). In questo caso specifico, alcuni commenti saranno effettuati anche per l'indicatore statistico ME.

A titolo di esempio, analogamente a quanto fatto per i consumi energetici, considerando la tipologia edilizia inserita in condomino (UAC) ubicata a Milano ed occupata con profilo 1p, nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti delle temperature dell'aria interna per il giorno con profilo di occupazione feriale (Figura 51), e gli andamenti degli indicatori MAD e RMSE per la settimana tipo (Figura 52).



**Figura 51 – Andamento della temperatura interna nel giorno feriale per le tre logiche di modulazione considerate, per tipologia edilizia UAC in località Milano**

Tali andamenti sono ricavati per le 3 logiche di modulazione considerate ed al variare del cluster costruttivo. Andamenti analoghi sono stati ricavati per la tipologia edilizie UAM, per la località di Palermo e per il profilo di occupazione 4p. Analizzando le Figure 51 e 52, si nota che le condizioni migliori in termini di comfort termico si riscontrano nuovamente per i cluster più performanti, a prescindere dal profilo di modulazione. In riferimento al profilo di temperatura interna, le condizioni migliori si hanno per il profilo di modulazione MOD 10, che presenta una diminuzione delle oscillazioni di temperatura durante il periodo di occupazione (si ricordi che esse sono una delle maggiori cause di discomfort). Nonostante la temperatura interna sia più bassa per la MOD 10 nei cluster meno performanti, le temperature restano nei limiti di comfort per le abitazioni, dal momento che non scendono mai al di sotto dei 18°C. Al contrario, la MOD 40 presenta oscillazioni consistenti, raggiungendo temperature di 23°C che non costituiscono di per sè una situazione di discomfort, ma possono essere associate a tale sensazione nel caso in cui si abbiano brusche variazioni di temperatura in un breve intervallo di tempo, come effettivamente accade con questa logica di modulazione.

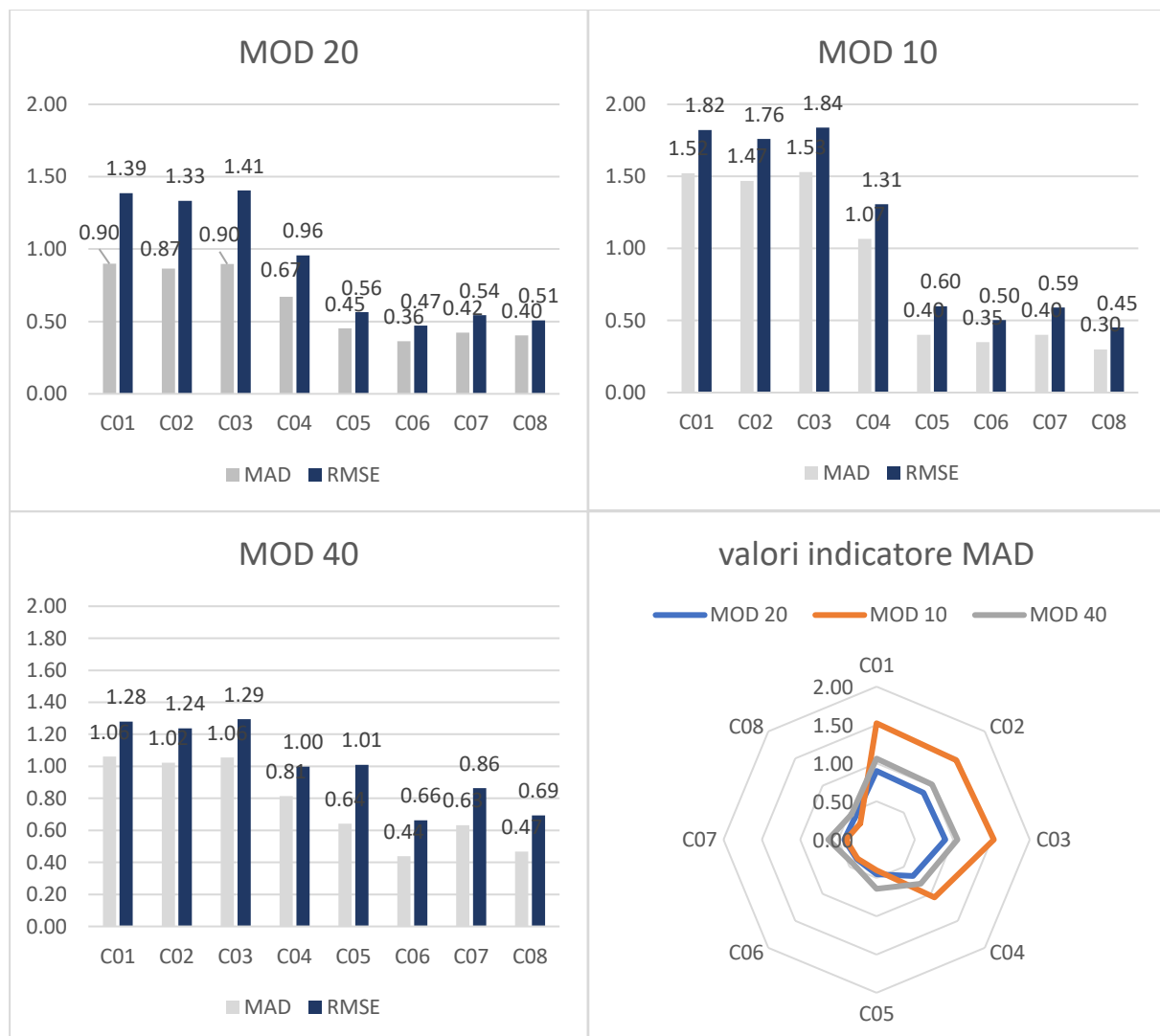
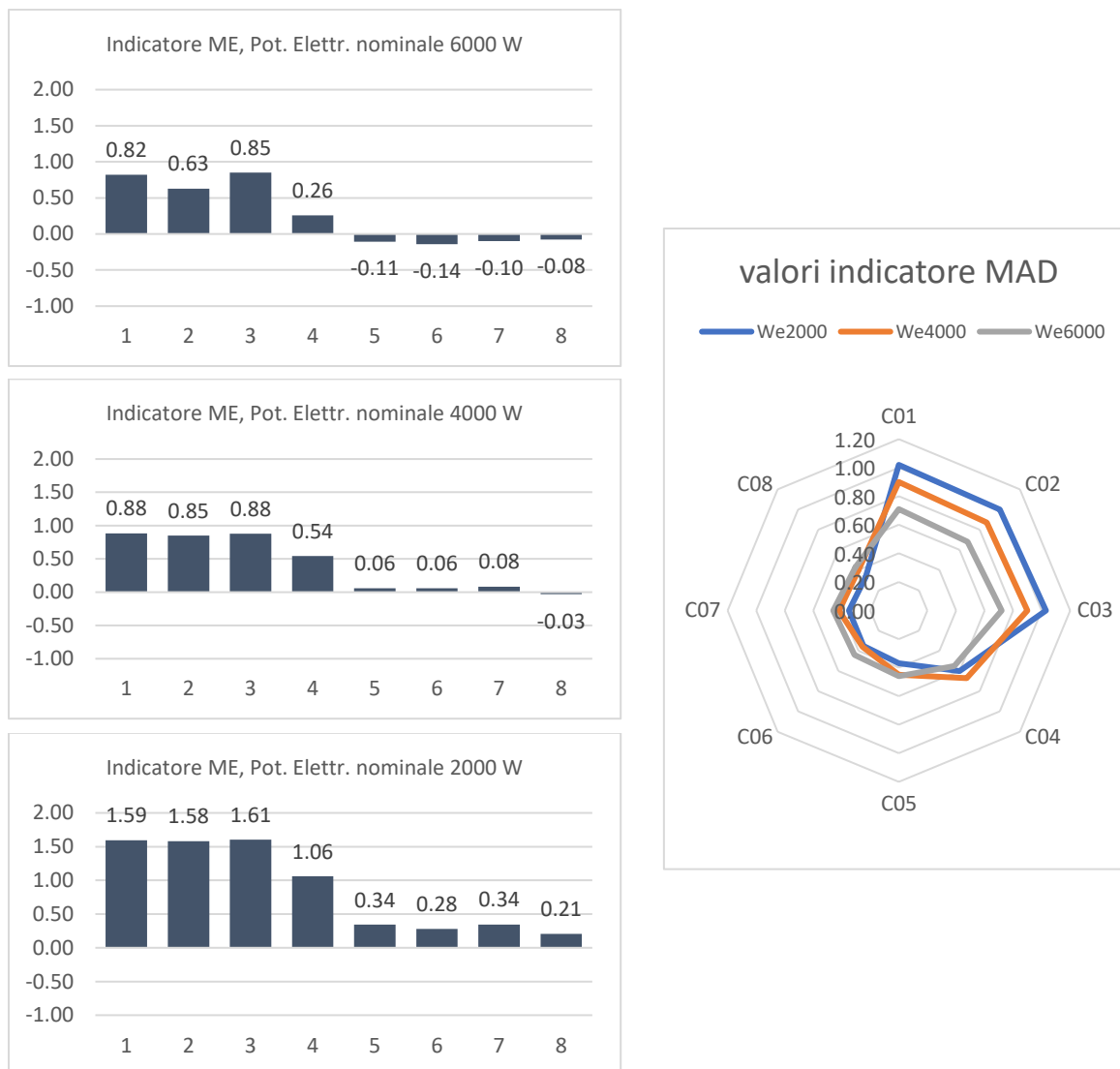


Figura 52 - Valori di MAD (°C) e RMSE (°C) nella settimana tipo per i tre tipi di modulazione testati, tipologia edilizia UAC in località Milano e profilo di occupazione 1p



**Figura 53 - Valori di ME (°C) e MAD (°C) nella settimana tipo per i tre tipi di modulazione testati, tipologia edilizia UAC in località Milano e profilo di occupazione 1p**

Osservando i valori degli indicatori MAD e RMSE, si nota come per i cluster C01-C04 le logiche di modulazione con le quali la pompa di calore riesce a garantire maggiormente il comfort sono la MOD20 e MOD40, poiché con la MOD10, seppur risultino consumi energetici inferiori (si veda il sottoparagrafo precedente), le temperature restano frequentemente più basse dei 20°C. Nei cluster C05-C08 la condizione migliore si ha invece per la MOD10, poiché con questi cluster termicamente isolati, tale logica riesce a mantenere la temperatura interna più costante e più prossima ai 20°C.

Dai risultati ottenuti è quindi ragionevole ritenere che, l'utilizzo di una logica di modulazione più raffinata per garantire un miglior mantenimento delle condizioni di comfort termico sia giustificato solo per edifici caratterizzati da contenute dispersioni termiche (tipiche dei cluster costruttivi con buon livello di isolamento termico), mentre non sia giustificato per edifici caratterizzati da importanti dispersioni termiche (tipiche dei cluster costruttivi con scadente livello di isolamento termico). Tale osservazione è evidente dall'analisi del grafico radar di Figura 52. Quest'ultima considerazione è in contrasto con quanto ottenuto per i consumi energetici (si veda il sottoparagrafo precedente). E'

evidente che la selezione di una logica di modulazione dovrà essere condotta con opportuna ponderazione di entrambi gli aspetti (consumo energetico e mantenimento del comfort).

Con riferimento al dimensionamento della pompa di calore, a titolo di esempio per la tipologia edilizia inserita in condominio (UAC) ubicata a Milano ed occupata con profilo 1p, in Figura 53 sono riportati gli andamenti degli indicatori MAD e ME al variare della taglia della pompa di calore e per tutti i cluster costruttivi considerati, nella settimana tipo del mese di dicembre. Come è evidente dal grafico a radar di Figura 53, la taglia che consente di garantire un migliore mantenimento del comfort termico per i cluster costruttivi con scadente livello di isolamento termico (in particolare C01, C02, C03) è quella con potenza elettrica nominale di 6000 W. Al contrario, la taglia che consente di garantire un migliore mantenimento del comfort termico per i cluster costruttivi con buon livello di isolamento termico (in particolare C05, C06, C07, C08) è quella con potenza elettrica nominale di 2000 W. Per ulteriori considerazioni in merito all’impatto della taglia della pompa di calore sul mantenimento delle condizioni di comfort termico, è utile considerare anche i valori ottenuti per l’indicatore ME. Si ricordi che l’indicatore ME (errore medio) è una misura dello scostamento del valore effettivo della grandezza (in questo caso temperatura aria interna) da quello di riferimento (in questo caso 20 °C) espresso con segno, cioè scostamenti positivi significano valori effettivi della grandezza inferiori a quello di riferimento e, contrariamente, valori negativi significano valori effettivi superiori a quello di riferimento. Se si osservano gli istogrammi di Figura 53, si ha la conferma che la pompa di calore garantisce un miglior mantenimento delle condizioni di comfort in corrispondenza dei cluster più performanti dal punto di vista dell’isolamento termico (da C05 a C08), per tutte le taglie. Ma alla luce dei valori dell’indicatore ME è evidente come per questi cluster sia del tutto inutile utilizzare una pompa di calore con potenza elettrica nominale superiore a 4000 W (con connesso aumento dei consumi energetici, si veda il sottoparagrafo precedente), assumendo tali valori segno negativo. Il cluster C08 è l’unico, nelle condizioni riportate e con riferimento al mantenimento del comfort termico, per il quale potrebbe essere giustificato l’utilizzo di una pompa di calore con potenza nominale pari a 2000 W. Al fine di migliorare le condizioni di comfort termico nei cluster da C01 a C04, nelle condizioni riportate, è invece preferibile l’utilizzo di una pompa di calore con potenza nominale pari a 6000 W.

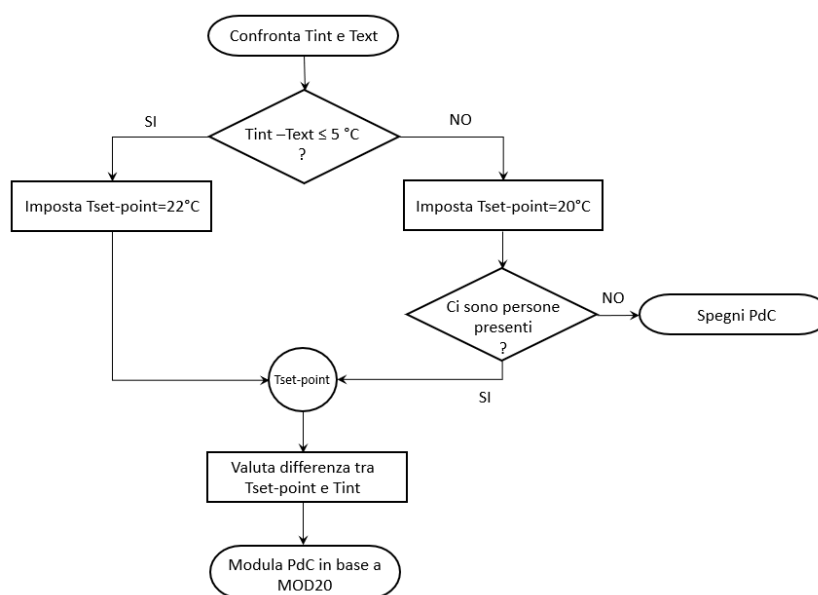
In generale, è evidente che anche variando uno solo degli elementi caratterizzanti l’unità abitativa tra località climatica, tipologia edilizia, tipologia costruttiva e profilo di occupazione, vi è la possibilità che la taglia della pompa di calore richiesta sia differente, tuttavia la selezione di essa dovrebbe essere condotta accuratamente bilanciando esigenze di risparmio energetico con esigenze di comfort termico, attraverso analisi analoghe a quelle riportate in questo sottoparagrafo.

#### **4.5 Analisi dello sfruttamento della capacità termica delle pareti come sistema di accumulo**

Uno degli obiettivi della presente linea 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 in questo studio utilizzando due tecniche in combinazione: la prima utilizza una modalità di gestione dell’accensione/spengimento della pompa di calore differente dalla modalità semplice utilizzata per tutte le simulazioni precedenti (si veda descrizione al paragrafo 2.3), la seconda utilizza l’incremento della capacità termica della parete.

Per quanto riguarda la modalità di gestione avanzata della pompa di calore, essa è rappresentata schematicamente nel diagramma di flusso di Figura 54. 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 rispetto a quanto fatto in precedenza. Ciò consente di ottenere un caricamento termico delle strutture edili in corrispondenza di condizioni per le quali i livelli prestazionali (in particolare COP) della pompa di calore sono più alti. Le configurazioni analizzate, che sfruttano la modalità di gestione appena descritta, sono identificate nel seguito con una sigla alfanumerica che comincia con la lettera "C" (che indica l'effetto di caricamento termico). Tali configurazioni si differenziano dalla configurazione "Base" che sfrutta la modalità di gestione utilizzata in tutte le simulazioni precedentemente analizzate (si noti che la modalità "Base" è rappresentata dal solo ramo destro del diagramma di flusso di Figura 54).



**Figura 54 – Diagramma di flusso della gestione avanzata della pompa di calore, utilizzata per analizzare il possibile sfruttamento della capacità di accumulo delle pareti**

Per quanto riguarda l'incremento della capacità termica delle pareti, esso è stato ottenuto aggiungendo uno strato sul lato interno della parete (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 sono stati considerati: due, dieci, cento. 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. Le configurazioni analizzate, che sfruttano gli incrementi della capacità termica appena descritti, sono identificate nel seguito con una sigla alfanumerica che termina rispettivamente con "CAP2", "CAP10", "PCM". Al fine di analizzare la possibilità di sfruttare la capacità termica delle strutture edili come sistema di accumulo in relazione agli effetti prodotti su consumi energetici necessari al funzionamento della pompa di calore (in accordo alla modalità di gestione impostata) e sul mantenimento delle condizioni di comfort termico interno, sono stati confrontati i risultati delle simulazioni ottenute per diverse configurazioni di modalità di gestione della pompa di calore e capacità termica delle pareti.

Le configurazioni prese in considerazione sono:

- Nessuna tecnica (risultati ottenuti in precedenza) – Base;
- Modalità di gestione “C” e nessun incremento della capacità termica “CAP” – C-CAP;
- Modalità di gestione “C” e incremento della capacità termica “CAP2” – C-CAP2;
- Modalità di gestione “C” e incremento della capacità termica “CAP10” – C-CAP10;
- Modalità di gestione “C” e incremento della capacità termica “PCM” – C-PCM.

Come detto, la configurazione “Base” si riferisce ai risultati precedentemente ottenuti ed è stata utilizzata come situazione di riferimento per i confronti effettuati. Le configurazioni sopra descritte sono state applicate ad un set di casi significativi, ristretto rispetto a tutti i casi analizzati in precedenza. Il set è composto dalle combinazioni di due località con condizioni climatiche diverse (Milano e Palermo), due tipologie edilizie molto diverse (UAC e UAM), tre cluster costruttivi significativamente diversi (C01, C06, C08), un profilo di occupazione 1p, per un numero complessivo di ulteriori 48 modelli.

In analogia a quanto fatto in precedenza per chiarezza espositiva, anche in questo paragrafo i risultati ottenuti sono riportati e commentati in due sottoparagrafi distinti (uno relativo ai consumi energetici ed uno alle condizioni di comfort).

#### 4.5.1 Analisi dei consumi energetici

In questo sottoparagrafo sono discussi gli effetti delle configurazioni di modalità di gestione della pompa di calore e capacità termica delle pareti sui consumi energetici delle unità immobiliari, riscaldate con pompa di calore aria-aria (come rappresentative di sistemi con accumulo idronico trascurabile o assente).

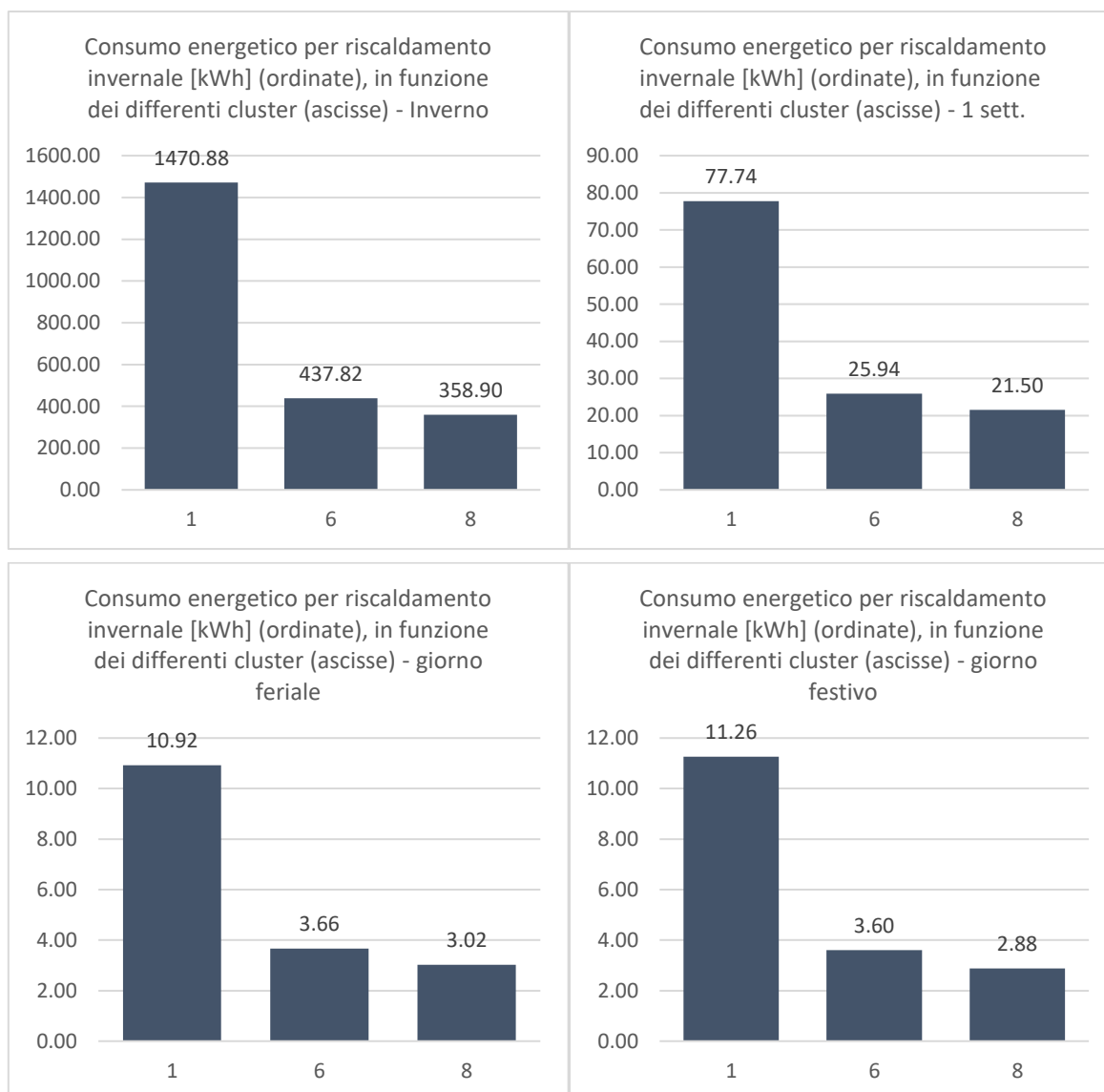
Con riferimento alle configurazioni testate, a titolo di esempio, per la tipologia edilizia inserita in condomino (UAC) ubicata a Milano ed occupata con profilo 1p, nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti dei consumi energetici per riscaldamento invernale relativi rispettivamente a: tutta la stagione invernale, la settimana tipo e i due giorni tipo con profilo di occupazione feriale e festivo. Tali andamenti sono riportati per le tre configurazioni: C-CAP (Figura 55), logica C-CAP2 (Figura 56), C-CAP10 (Figura 57). Andamenti analoghi sono stati ricavati per la tipologia edilizia UAM, per la località di Palermo. Osservando i grafici riportati nelle figure menzionate, è possibile notare come tra le varie configurazioni per le settimane tipiche invernali, per il giorno tipo feriale e per il giorno tipo festivo non vi siano differenze significative. Ciò non deve stupire, in quanto la settimana tipo, il giorno tipo feriale e quello festivo sono ancora quelli utilizzati per tutte le analisi precedenti e scelti nel mese di dicembre, nel quale le condizioni di riscaldamento sono più critiche (tale scelta era giustificata da tutte le analisi condotte nei paragrafi precedenti). Per queste settimane, la condizione di attivazione del caricamento termico impostata e descritta nello schema di Figura 54 di fatto non avviene e quindi non si ha alcun effetto significativamente apprezzabile dovuto alla variazione di configurazione. Per questo motivo le considerazioni legate al risparmio energetico, eventualmente ottenibile sfruttando il comportamento termico dinamico delle strutture edili, saranno effettuate sulla stagione completa di riscaldamento. Le condizioni di attivazione del caricamento termico infatti avverranno prevalentemente nel periodo di bordo (iniziali e finali) della stagione di riscaldamento. Maggior differenza si riscontra invece sui dati relativi al consumo energetico stagionale nelle differenti configurazioni (si vedano grafici in alto a sinistra nelle Figure 55, 56, 57).

L'effetto complessivamente ottenuto e visibile dai grafici delle suddette figure dipende principalmente da 4 aspetti, alcuni in contrasto tra loro, il cui esito combinato era di difficile predizione a priori. Il primo aspetto produce un effetto positivo per l'incremento delle prestazioni della pompa di calore e dunque della riduzione dei consumi energetici, ossia l'incremento di COP legato ad un maggior funzionamento della macchina nelle condizioni termiche favorevoli (differenze

di temperatura contenute tra le sorgenti di scambio termico) ed un ridotto funzionamento in quelle sfavorevoli. Il secondo aspetto produce un effetto negativo sulle prestazioni della pompa di calore, dovuto alla riduzione del fattore di carico (che comporta una correzione in diminuzione del COP) nei periodi di lavoro della macchina quando il set-point torna dalla condizione incrementata (caricamento termico) alla condizione standard. Il terzo aspetto è l'aumento delle dispersioni termiche nei periodi in cui l'abitazione non è occupata e si attiva l'azione di caricamento termico. E' evidente come il primo effetto (positivo) sia in contrasto con gli altri due (negativi). Il quarto aspetto è il diverso accumulo e rilascio termico delle strutture nelle varie configurazioni che influisce sulla temperatura dell'aria interna e che, congiuntamente con il profilo di occupazione, condiziona la distribuzione dei tempi di accensione e spegnimento della pompa di calore.

Per comprendere meglio l'effetto complessivamente generato nelle varie configurazioni, sono state considerate anche la configurazione C-PCM e tutte sono state confrontate con la configurazione Base, priva sia della gestione avanzata della pompa di calore che dell'incremento della capacità termica. A questo proposito in Tabella 16 sono riportati i valori medi stagionali del COP della pompa di calore, per le differenti configurazioni analizzate e per i differenti cluster costruttivi considerati (caso di UAC ubicata a Milano, occupata con profilo 1p). In Tabella 17 sono riportati i valori dei consumi energetici stagionali, per le differenti configurazioni analizzate e per i differenti cluster costruttivi considerati (caso di UAC ubicata a Milano, occupata con profilo 1p). Dai dati riportati in Tabella 16 è possibile osservare come l'effetto del caricamento termico produca, rispetto alla configurazione Base, un contenuto incremento del valore medio stagionale del COP, che si perde nella configurazione C-PCM. In questo caso infatti le oscillazioni di temperatura attorno al set-point sono più contenute rispetto agli altri casi e la pompa di calore lavora molto a fattori di carico ridotti, con correzione al ribasso del valore del COP. Dai valori riportati in Tabella 17 si apprezzano invece le riduzioni dei consumi energetici dalla configurazione base alle altre configurazioni. Le riduzioni percentuali ottenute sui consumi energetici rispetto alla configurazione Base sono graficate in Figura 58. Osservando la figura si nota che si ottengono riduzioni sull'intervallo di tempo stagionale che vanno da poco meno del 5% fino a valori molto alti nel caso della configurazione C-PCM. Le riduzioni tendono ad aumentare con l'incremento della capacità termica delle pareti; tale fenomeno (riduzione con l'incremento della capacità termica) è maggiormente evidente nei cluster costruttivi dotati di un medio-alto livello di isolamento termico, cluster per i quali si raggiungono le massime riduzioni in corrispondenza delle configurazioni C-CAP10 e C-PCM. Tuttavia deve essere evidenziato che le forti riduzioni notate per le configurazioni C-CAP10 e 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. In particolare osservando gli andamenti della temperatura dell'aria esterna e quelli dell'aria interna ottenuti dalle simulazioni, per le configurazioni C-CAP10 e C-PCM si nota un periodo di alcuni giorni (che aumenta con l'aumentare della capacità termica), collocato all'inizio della stagione di riscaldamento, per il quale le temperature dell'aria interna si mantengono a livelli superiori ai 20 °C, risentendo ancora degli effetti delle giornate precedenti più calde, e dunque la pompa di calore non si attiva. Il comportamento descritto, maggiormente evidente nei cluster costruttivi termicamente più isolati, è evidente nel grafico di Figura 59. Tale comportamento non si verifica per le altre configurazioni, che hanno capacità termiche inferiori.

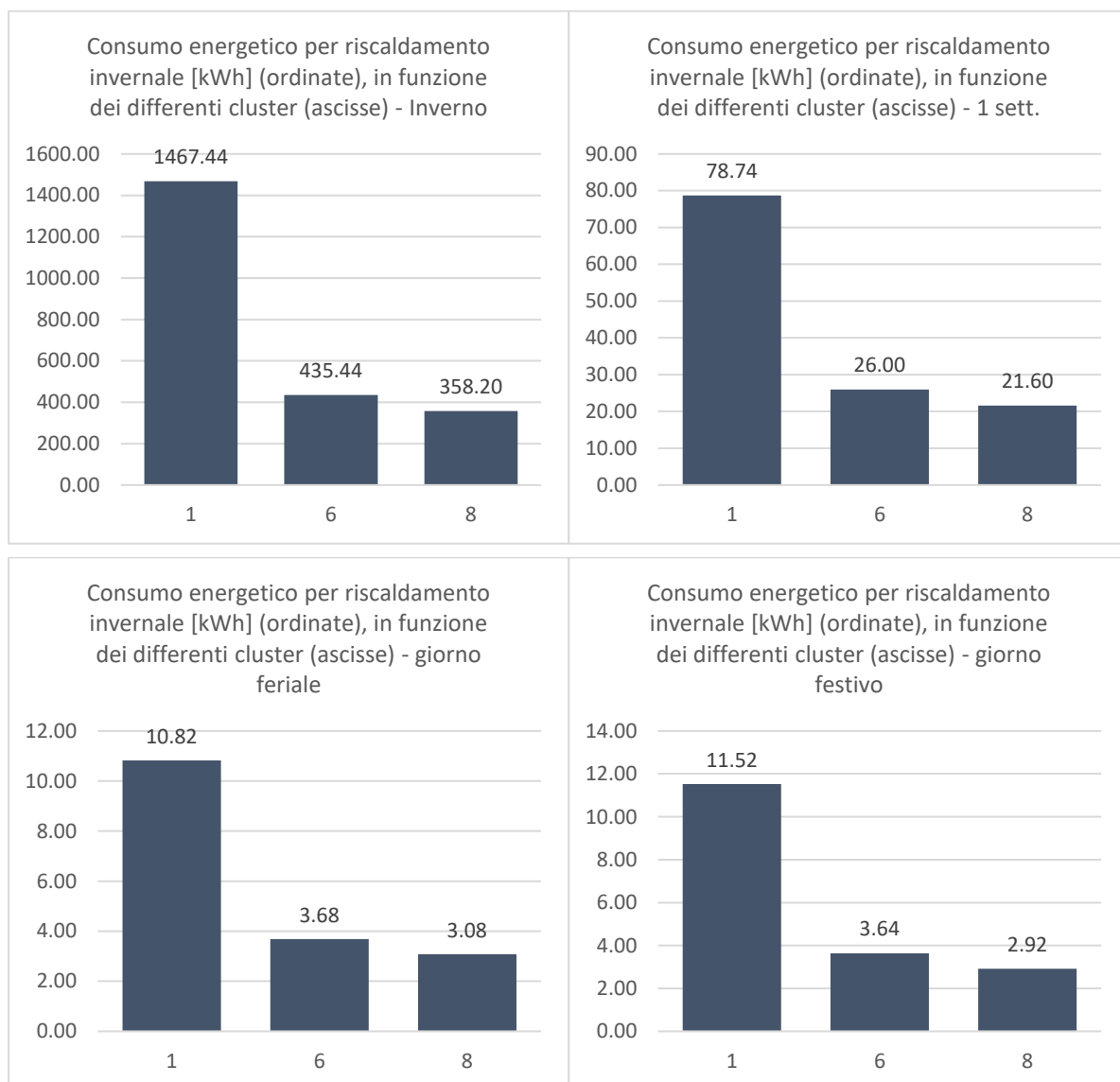




**Figura 55 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per la configurazione di funzionamento C-CAP, tipologia UAC a Milano con profilo di occupazione 1p**

**Tabella 16 – Valori medi stagionali del COP della pompa di calore, per le differenti combinazioni di configurazioni di funzionamento e cluster analizzate, caso di UAC ubicata a Milano occupata con profilo 1p**

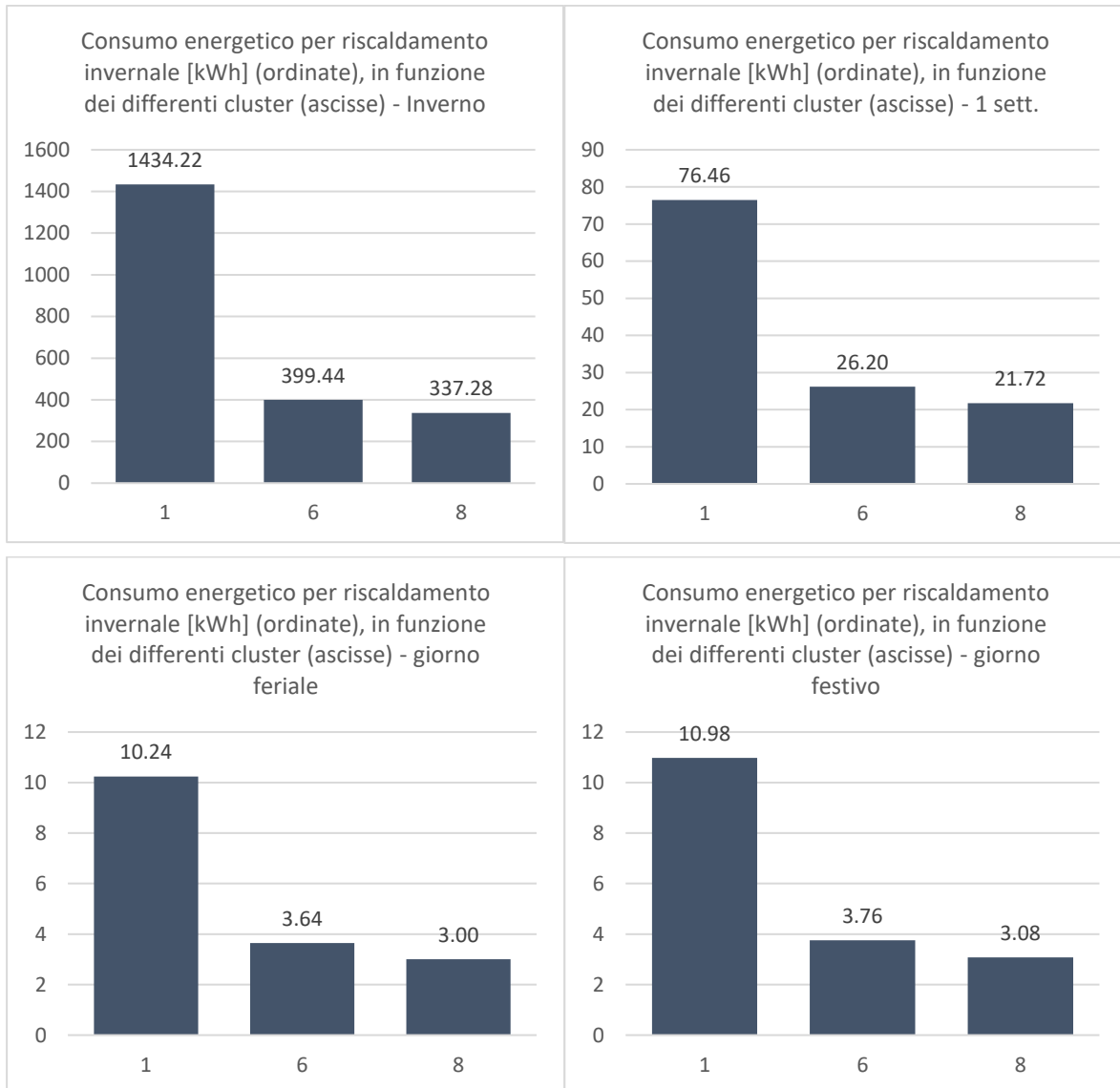
		Tipo di configurazione analizzata				
		Base	C-CAP	C-CAP2	C-CAP10	C-PCM
Cluster	1	3.91	3.94	3.93	3.93	3.92
	6	3.78	3.81	3.81	3.79	3.75
	8	3.75	3.80	3.80	3.79	3.73



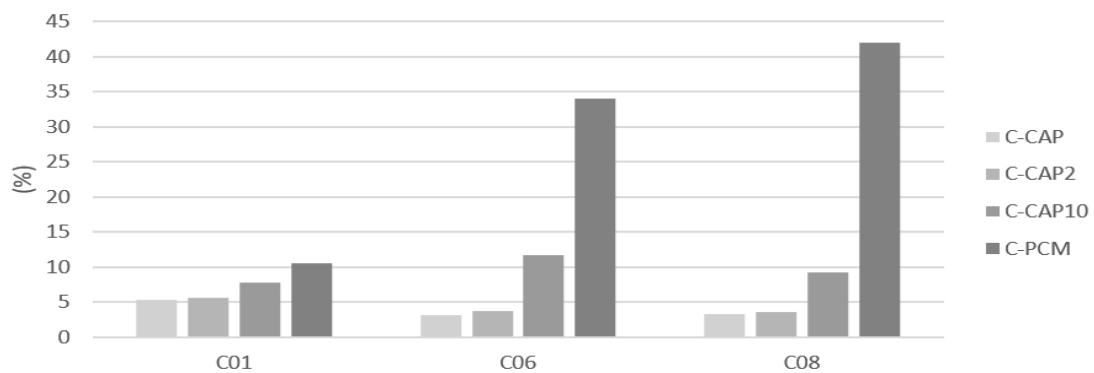
**Figura 56 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per la configurazione di funzionamento C-CAP2, tipologia UAC a Milano con profilo di occupazione 1p**

**Tabella 17 – Valori dei consumi energetici stagionali (kWh), per le differenti combinazioni (di configurazioni di funzionamento e cluster) analizzate, caso di UAC ubicata a Milano occupata con profilo 1p**

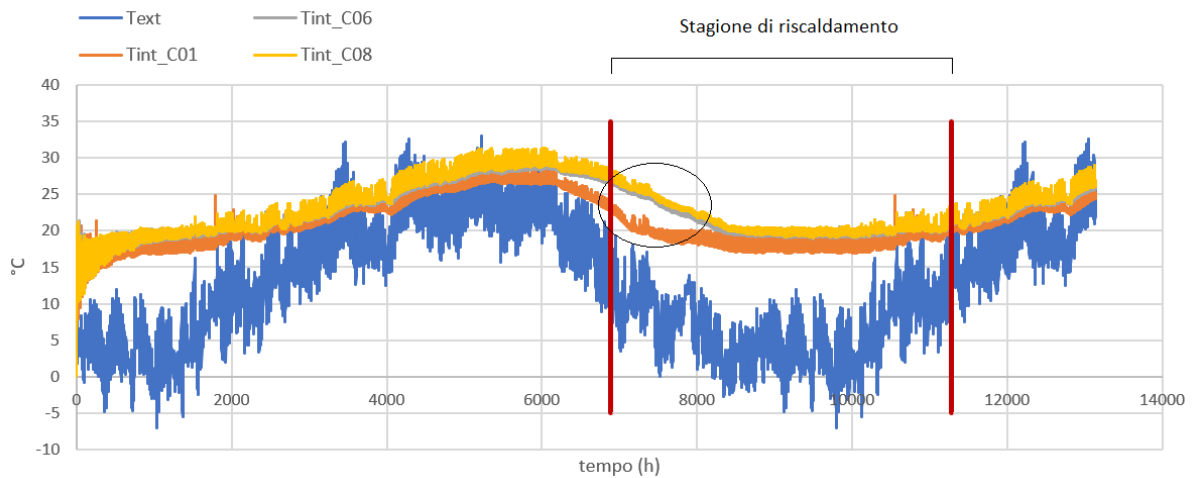
		Tipo di configurazione analizzata				
		Base	C-CAP	C-CAP2	C-CAP10	C-PCM
Cluster	1	1554	1471	1467	1434	1390
	6	451	438	435	399	298
	8	369	359	358	337	215



**Figura 57 – Consumo energetico per riscaldamento invernale per la configurazione di funzionamento C-CAP10, tipologia UAC a Milano con profilo di occupazione 1p**

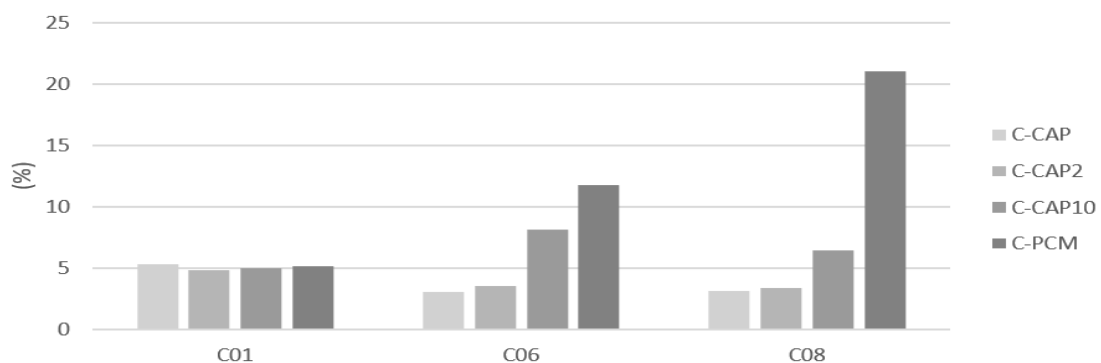


**Figura 58 – Riduzioni percentuali dei consumi energetici stagionali ottenuti per le differenti combinazioni (tra configurazioni di funzionamento e cluster costruttivi) analizzate, rispetto alla configurazione di base, caso di UAC ubicata a Milano occupata con profilo 1p**



**Figura 59 – Confronto tra andamenti di temperatura dell’aria esterna (Text) e dell’aria interna (Tint), su un periodo più lungo della stagione di riscaldamento. Nella zona cerchiata si evidenziano gli effetti resistivo-capacitivi delle strutture edili per i cluster costruttivi C01, C06 e C08. Caso di UAC, Milano, profilo 1P, C-PCM**

Per valutare il solo effetto del caricamento termico delle strutture, in base alle loro prestazioni in regime dinamico combinate all’uso della pompa di calore, il confronto con la configurazione Base è stato ripetuto per intervalli di tempo sotto-stagionali, ottenuti semplicemente togliendo dalla stagione di riscaldamento la fase iniziale per la quale si verificava il fenomeno sopra descritto. I risultati di tale confronto sono riportati in Figura 60. Gli andamenti qualitativi ottenuti in precedenza sono confermati, tuttavia dal punto di vista quantitativo, come era lecito aspettarsi, i valori della riduzione di consumo scendono; si osserva infatti una riduzione massima di circa il 20% per la configurazione C-PCM con cluster costruttivo C08. Sfruttando i risultati di tutte le simulazioni fatte, è stato possibile osservare come le riduzioni di consumi energetici diminuiscano per località nelle quali le oscillazioni di temperatura sono più contenute (con minori oscillazioni della temperatura si hanno minori oscillazioni delle prestazioni della pompa di calore e quindi minore convenienza dell’azione di caricamento termico) e diminuiscono per le unità abitative caratterizzate da un maggior rapporto S/V (maggiori dispersioni termiche a parità di tutti gli altri parametri).



**Figura 60 – Riduzioni percentuali dei consumi energetici su intervalli sotto-stagionali, ottenuti per le differenti combinazioni (di configurazioni di funzionamento e cluster) analizzate, rispetto alla configurazione di base, caso di UAC ubicata a Milano occupata con profilo 1p**

Alla luce dei risultati ottenuti dalle configurazioni testate, è possibile evidenziare che le strutture edili possono essere utilizzate come accumulo termico in combinazione con l'uso di pompe di calore aria-aria. Al fine di ottenere riduzioni apprezzabili dei consumi, l'azione di caricamento deve essere combinata con strutture edili dotate di elevati valori di capacità termica. In questo contesto, l'utilizzo di materiali innovativi, quali quelli a cambiamento di fase, ha mostrato risultati promettenti. Ulteriori indagini, fuori dagli scopi del presente studio, potrebbero essere condotte per determinare logiche di gestione della pompa di calore in grado di ottimizzare l'effetto del caricamento termico in corrispondenza di strutture di determinata capacità termica, e per validare, attraverso prove sperimentali su edifici reali, i risultati ottenuti.

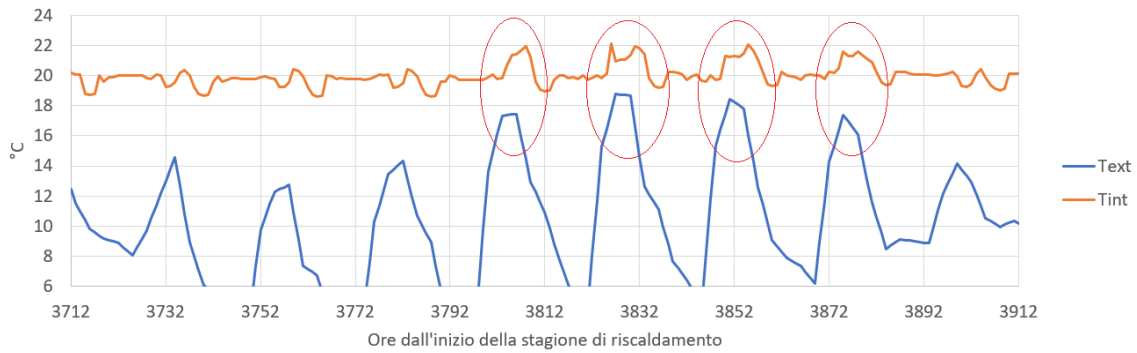
#### 4.5.2 Analisi del comfort termico

In questo sottoparagrafo sono discussi gli effetti delle configurazioni di modalità di gestione della pompa di calore e capacità termica delle pareti sul mantenimento delle condizioni di comfort nelle unità immobiliari, riscaldate con pompa di calore aria-aria.

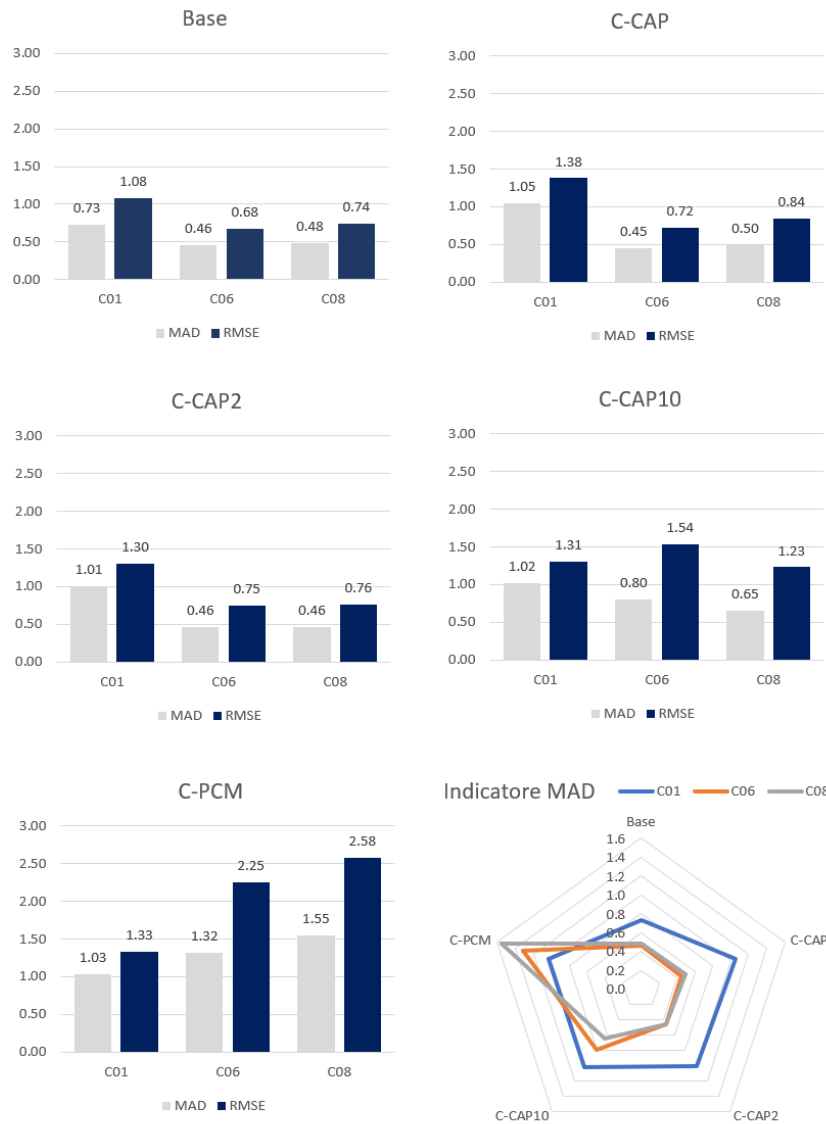
In analogia a quanto fatto nei paragrafi precedenti, la valutazione delle condizioni di comfort è stata condotta analizzando gli andamenti delle temperature dell'aria interna e i valori degli indicatori statistici introdotti, ottenuti a seguito delle variazioni di configurazioni precedentemente definite. I commenti di seguito riportati si riferiranno in particolare ai parametri temperatura dell'aria interna, indicatore statistico MAD ed indicatore statistico RMSE. In questo specifico caso, i valori dei suddetti parametri saranno riferiti all'intera stagione di riscaldamento, visto che (come già accennato in precedenza) per la settimana tipo, per il giorno tipo feriale e per quello festivo utilizzati per tutte le analisi precedenti e scelti nel mese di dicembre, i valori delle temperature delle sorgenti termiche (aria interna ed aria esterna) sono tali da non consentire l'attivazione del caricamento termico delle strutture edili (secondo lo schema di flusso della Figura 54).

In generale, l'effetto del caricamento termico delle strutture applicato in questo studio comporta incrementi delle temperature dell'aria interna negli specifici intervalli di tempo di attivazione del fenomeno. A titolo di esempio, per il caso di UAC con cluster C01 per la località di Milano con occupazione 1P e configurazione C-CAP2, in Figura 61 sono evidenziati intervalli di tempo in cui il caricamento termico delle strutture edili è attivo. Nelle zone cerchiata della figura, si nota l'effetto dell'impostazione di una temperatura di set-point (22 °C) superiore a quella standard (20 °C), che avviene con una differenza tra le temperature delle sorgenti termiche inferiore o uguale a 5 °C.

In Figura 62 sono riportati i valori ottenuti per gli indicatori MAD e RMSE per l'intera stagione di riscaldamento. Dai dati riportati in Figura 62, è possibile notare un incremento del valore degli indicatori con l'aumento della capacità termica delle pareti. Tale aumento è significativo per i cluster costruttivi più termicamente isolati (C06 e C08), come evidenziato dal grafico a radar della Figura 62. Tale incremento è giustificato dal fatto che, una volta effettuata l'azione di caricamento delle strutture ed aumentata anche la temperatura dell'aria interna rispetto a 20 °C (si vedano anche le zone cerchiata di Figura 61), per le configurazioni ad elevata capacità termica (in particolare C-CAP10 e C-PCM) la temperatura impiega più tempo a decrescere, con conseguente prolungato periodo di inattività della pompa di calore ma anche con scostamento più elevato rispetto alla condizione di comfort, qui considerata pari ad una temperatura dell'aria interna di 20 °C. Conseguentemente a quanto esposto, è possibile indicare che la riduzione dei consumi energetici, osservata per alcune delle configurazioni caratterizzate dal caricamento termico delle strutture (si veda sottoparagrafo precedente), corrisponde ad una maggiore difficoltà di mantenimento della temperatura di comfort, considerando l'intera stagione di riscaldamento.



**Figura 61 – Confronto tra andamenti di temperatura dell’aria esterna (Text) e dell’aria interna (Tint). Nelle zone cerchiare si evidenziano le accensioni della pompa di calore con set-point maggiorato. Caso di UAC, C01, Milano, profilo 1P, C-CAP2**



**Figura 62 - Valori di ME (°C) e MAD (°C) nella stagione di riscaldamento per le configurazioni Base, C-CAP, C-CAP2, C-CAP10, C-PCM. Caso di: tipologia edilizia UAC, cluster C01, C06, C08, località Milano, occupazione 1p**

A questo proposito è opportuno osservare che, se gli indicatori presentati in Figura 62 fossero calcolati considerando esclusivamente gli intervalli di tempo in cui nelle unità abitative è presente almeno una persona attiva, i rispettivi valori si ridurrebbero, avvicinandosi a quelli ottenuti nella configurazione base. A titolo di esempio, effettuando tale calcolo per la configurazione C-PCM, nel caso di UAC, C08, Milano, profilo 1P, si otterrebbero i seguenti valori: MAD=0.64 °C, RMSE=0.59 °C. Infine una ultima considerazione merita di essere fatta sul modello di comfort adottato per il confronto sistematico di tutte le simulazioni effettuate, che trascura la capacità di adattamento dell'utente. Nelle specifiche configurazioni (in particolare C-PCM e C-CAP10) in cui l'effetto del caricamento delle strutture porta ad un incremento degli indicatori calcolati (in particolare MAD e RMSE), la capacità di adattamento ridurrebbe senza dubbio la differenza evidenziata tra le configurazioni indicate e la configurazione base. Ripetendo il calcolo degli indicatori, utilizzando in luogo di un valore fissato a 20 °C, come rappresentativo delle condizioni di comfort, una fascia di valori ottenuta attraverso un modello adattivo, gli indicatori MAD e RMSE per le configurazioni indicate si ridurrebbero a livelli prossimi a quelli della configurazione base, in considerazione degli andamenti delle temperature dell'aria interna, che molto raramente superano i 22 °C nella stagione di riscaldamento.

## 5. Conclusioni

Nel presente report sono descritte le attività svolte nell'ambito della LA 3.18 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 3.18 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 servizio di climatizzazione invernale. La campagna di simulazioni condotta, e descritta nel presente report, ha avuto come obiettivo principale la valutazione dell'influenza di differenti caratteristiche distintive del sistema edificio-impianto a pompa di calore (quali caratteristiche climatiche esterne, tipologia edilizia, tipologia costruttiva, profilo di utilizzo, caratteristiche operative dell'impianto a pompa di calore) nei confronti dei consumi energetici e del mantenimento delle condizioni di comfort interno. Inoltre è stata valutata la possibilità di utilizzare la capacità termica delle strutture edili come sistema non convenzionale di accumulo ai fini di una riduzione dei consumi energetici. In questa fase dell'attività sono stati realizzati dei modelli numerici semplificati, per considerare l'incremento della capacità termica delle strutture, rappresentativo dell'utilizzo di soluzioni tecnologiche innovative quali ad esempio i materiali in cambiamento di fase.

Dai risultati ottenuti e discussi, è stato possibile apprezzare quantitativamente gli effetti singoli e combinati delle variazioni di caratteristiche sopra indicate. L'analisi accurata dei risultati, sia per consumi energetici che per mantenimento delle condizioni di comfort interno, ha dato la possibilità di effettuare considerazioni utili al dimensionamento delle pompe di calore con accumuli idronici trascurabili o assenti che sfruttano l'aria come sorgente termica esterna (come le pompe di calore aria-aria utilizzate nel presente studio). In particolare, dall'analisi riguardo la possibilità di utilizzare la capacità termica delle strutture edili come sistema non convenzionale di accumulo, sono stati osservati (per le configurazioni testate nel presente studio) effetti positivi di un eventuale caricamento termico delle strutture edili, nei confronti della riduzione dei consumi energetici. Tuttavia tali effetti sono significativi a condizione di utilizzare soluzioni tecnologiche in grado di incrementare la capacità termica delle strutture edili, quali ad esempio materiali in cambiamento di fase.

I modelli numerici di tipo grey-box utilizzati nel presente studio, seppur validati in precedenti fasi del progetto di ricerca (si veda LA 3.17), sono modelli di tipo semplificato, dunque una validazione sperimentale, utilizzando come caso di studio un edificio reale, dovrebbe essere effettuata per confermare le tendenze osservate dai risultati delle simulazioni ed evidenziate in questo report.



## Allegati

### Allegato A – Importazione database in ambiente Matlab/Simulink da Excel

%Importazione dei dati di input da spreadsheet realizzato durante la Fase 1  
 %del presente lavoro, la procedura di determinazione dei presenti dati è  
 %riportata nella SEZIONE A del presente report.

```
%Ripulitura Workspace e Command Window
clc;
clear;
```

```
% DATI INPUT - PALERMO %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Temperatura esterna
Text_Palermo = Simulink.SimulationData.Dataset;
time = xlsread('dati_input3.xlsx','Text','A3:A17522');
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Text','B3:B17522');
Text_Palermo{1} = timeseries(data,time);
Text_Palermo{1}.Name = 'Text_Palermo';
save Text_Palermo.mat Text_Palermo;
```

```
% Irraggiamento solare
```

```
% riferimento tempo
```

```
time = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','A3:A17522');
```

```
% superficie orizzontale
```

```
Qsol_Orizz_Palermo = Simulink.SimulationData.Dataset;
```

```
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','B3:B17522');
```

```
Qsol_Orizz_Palermo{1} = timeseries(data,time);
```

```
Qsol_Orizz_Palermo{1}.Name = 'Qsol_Orizz_Palermo';
```

```
save Qsol_Orizz_Palermo.mat Qsol_Orizz_Palermo;
```

```
% superficie verticale a nord
```

```
Qsol_Vert_N_Palermo = Simulink.SimulationData.Dataset;
```

```
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','C3:C17522');
```

```
Qsol_Vert_N_Palermo{1} = timeseries(data,time);
```

```
Qsol_Vert_N_Palermo{1}.Name = 'Qsol_Vert_N_Palermo';
```

```
save Qsol_Vert_N_Palermo.mat Qsol_Vert_N_Palermo;
```

```
% superficie verticale a est
```

```
Qsol_Vert_E_Palermo = Simulink.SimulationData.Dataset;
```

```
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','D3:D17522');
```

```
Qsol_Vert_E_Palermo{1} = timeseries(data,time);
```

```
Qsol_Vert_E_Palermo{1}.Name = 'Qsol_Vert_E_Palermo';
```

```
save Qsol_Vert_E_Palermo.mat Qsol_Vert_E_Palermo;
```

```
% superficie verticale a sud
```

```
Qsol_Vert_S_Palermo = Simulink.SimulationData.Dataset;
```

```
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','E3:E17522');
```

```
Qsol_Vert_S_Palermo{1} = timeseries(data,time);
```

```
Qsol_Vert_S_Palermo{1}.Name = 'Qsol_Vert_S_Palermo';
```

```
save Qsol_Vert_S_Palermo.mat Qsol_Vert_S_Palermo;
```

```
% superficie verticale a ovest
```

```
Qsol_Vert_O_Palermo = Simulink.SimulationData.Dataset;
```

```
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','F3:F17522');
```

```
Qsol_Vert_O_Palermo{1} = timeseries(data,time);
```

```
Qsol_Vert_O_Palermo{1}.Name = 'Qsol_Vert_O_Palermo';
```

```
save Qsol_Vert_O_Palermo.mat Qsol_Vert_O_Palermo;
```

```
% DATI INPUT - NAPOLI %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Temperatura esterna
```

```
Text_Napoli = Simulink.SimulationData.Dataset;
```

```

time = xlsread('dati_input3.xlsx','Text','A3:A17522');
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Text','C3:C17522');
Text_Napoli{1} = timeseries(data,time);
Text_Napoli{1}.Name = 'Text_Napoli';
save Text_Napoli.mat Text_Napoli;

% Irraggiamento solare
% riferimento tempo
time = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','A3:A17522');
% superficie orizzontale
Qsol_Orizz_Napoli = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','G3:G17522');
Qsol_Orizz_Napoli{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Orizz_Napoli{1}.Name = 'Qsol_Orizz_Napoli';
save Qsol_Orizz_Napoli.mat Qsol_Orizz_Napoli;
% superficie verticale a nord
Qsol_Vert_N_Napoli = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','H3:H17522');
Qsol_Vert_N_Napoli{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Vert_N_Napoli{1}.Name = 'Qsol_Vert_N_Napoli';
save Qsol_Vert_N_Napoli.mat Qsol_Vert_N_Napoli;
% superficie verticale a est
Qsol_Vert_E_Napoli = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','I3:I17522');
Qsol_Vert_E_Napoli{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Vert_E_Napoli{1}.Name = 'Qsol_Vert_E_Napoli';
save Qsol_Vert_E_Napoli.mat Qsol_Vert_E_Napoli;
% superficie verticale a sud
Qsol_Vert_S_Napoli = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','J3:J17522');
Qsol_Vert_S_Napoli{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Vert_S_Napoli{1}.Name = 'Qsol_Vert_S_Napoli';
save Qsol_Vert_S_Napoli.mat Qsol_Vert_S_Napoli;
% superficie verticale a ovest
Qsol_Vert_O_Napoli = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','K3:K17522');
Qsol_Vert_O_Napoli{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Vert_O_Napoli{1}.Name = 'Qsol_Vert_O_Napoli';
save Qsol_Vert_O_Napoli.mat Qsol_Vert_O_Napoli;

% DATI INPUT - ROMA %%%%%%%%%%%
% Temperatura esterna
Text_Roma = Simulink.SimulationData.Dataset;
time = xlsread('dati_input3.xlsx','Text','A3:A17522');
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Text','D3:D17522');
Text_Roma{1} = timeseries(data,time);
Text_Roma{1}.Name = 'Text_Roma';
save Text_Roma.mat Text_Roma;

% Irraggiamento solare
% riferimento tempo
time = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','A3:A17522');
% superficie orizzontale
Qsol_Orizz_Roma = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','L3:L17522');
Qsol_Orizz_Roma{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Orizz_Roma{1}.Name = 'Qsol_Orizz_Roma';
save Qsol_Orizz_Roma.mat Qsol_Orizz_Roma;
% superficie verticale a nord

```

```

Qsol_Vert_N_Roma = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','M3:M17522');
Qsol_Vert_N_Roma{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Vert_N_Roma{1}.Name = 'Qsol_Vert_N_Roma';
save Qsol_Vert_N_Roma.mat Qsol_Vert_N_Roma;
% superficie verticale a est
Qsol_Vert_E_Roma = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','N3:N17522');
Qsol_Vert_E_Roma{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Vert_E_Roma{1}.Name = 'Qsol_Vert_E_Roma';
save Qsol_Vert_E_Roma.mat Qsol_Vert_E_Roma;
% superficie verticale a sud
Qsol_Vert_S_Roma = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','O3:O17522');
Qsol_Vert_S_Roma{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Vert_S_Roma{1}.Name = 'Qsol_Vert_S_Roma';
save Qsol_Vert_S_Roma.mat Qsol_Vert_S_Roma;
% superficie verticale a ovest
Qsol_Vert_O_Roma = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','P3:P17522');
Qsol_Vert_O_Roma{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Vert_O_Roma{1}.Name = 'Qsol_Vert_O_Roma';
save Qsol_Vert_O_Roma.mat Qsol_Vert_O_Roma;

% DATI INPUT - MILANO %%%%%%%%%%%
% Temperatura esterna
Text_Milano = Simulink.SimulationData.Dataset;
time = xlsread('dati_input3.xlsx','Text','A3:A17522');
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Text','E3:E17522');
Text_Milano{1} = timeseries(data,time);
Text_Milano{1}.Name = 'Text_Milano';
save Text_Milano.mat Text_Milano;

% Irraggiamento solare
% riferimento tempo
time = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','A3:A17522');
% superficie orizzontale
Qsol_Orizz_Milano = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','Q3:Q17522');
Qsol_Orizz_Milano{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Orizz_Milano{1}.Name = 'Qsol_Orizz_Milano';
save Qsol_Orizz_Milano.mat Qsol_Orizz_Milano;
% superficie verticale a nord
Qsol_Vert_N_Milano = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','R3:R17522');
Qsol_Vert_N_Milano{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Vert_N_Milano{1}.Name = 'Qsol_Vert_N_Milano';
save Qsol_Vert_N_Milano.mat Qsol_Vert_N_Milano;
% superficie verticale a est
Qsol_Vert_E_Milano = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','S3:S17522');
Qsol_Vert_E_Milano{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Vert_E_Milano{1}.Name = 'Qsol_Vert_E_Milano';
save Qsol_Vert_E_Milano.mat Qsol_Vert_E_Milano;
% superficie verticale a sud
Qsol_Vert_S_Milano = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','T3:T17522');
Qsol_Vert_S_Milano{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Vert_S_Milano{1}.Name = 'Qsol_Vert_S_Milano';
save Qsol_Vert_S_Milano.mat Qsol_Vert_S_Milano;

```

```

% superficie verticale a ovest
Qsol_Vert_O_Milano = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qsol','U3:U17522');
Qsol_Vert_O_Milano{1} = timeseries(data,time);
Qsol_Vert_O_Milano{1}.Name = 'Qsol_Vert_O_Milano';
save Qsol_Vert_O_Milano.mat Qsol_Vert_O_Milano;

% DATI INPUT - APPORTI PER PROFILI DI OCCUPAZIONE %%%%%%%%%%%
% riferimento tempo
time = xlsread('dati_input3.xlsx','Qprsn','A3:A17522');
% 1P
Q_1p = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qprsn','B3:B17522');
Q_1p{1} = timeseries(data,time);
Q_1p{1}.Name = 'Q_1p';
save Q_1p.mat Q_1p;

% 2P
Q_2p = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qprsn','C3:C17522');
Q_2p{1} = timeseries(data,time);
Q_2p{1}.Name = 'Q_2p';
save Q_2p.mat Q_2p;

% 3P
Q_3p = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qprsn','D3:D17522');
Q_3p{1} = timeseries(data,time);
Q_3p{1}.Name = 'Q_3p';
save Q_3p.mat Q_3p;

% 4P
Q_4p = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qprsn','E3:E17522');
Q_4p{1} = timeseries(data,time);
Q_4p{1}.Name = 'Q_4p';
save Q_4p.mat Q_4p;

% DATI INPUT - APPORTI PER UTILIZZO UTENZE (illuminazione) %%%%%%%%%%%
% riferimento tempo
time = xlsread('dati_input3.xlsx','Qutnz','A3:A17522');
% utenze con 1P
Q_utnz1p = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qutnz','B3:B17522');
Q_utnz1p{1} = timeseries(data,time);
Q_utnz1p{1}.Name = 'Q_utnz1p';
save Q_utnz1p.mat Q_utnz1p;

% utenze con 2P
Q_utnz2p = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qutnz','C3:C17522');
Q_utnz2p{1} = timeseries(data,time);
Q_utnz2p{1}.Name = 'Q_utnz2p';
save Q_utnz2p.mat Q_utnz2p;

% utenze con 3P
Q_utnz3p = Simulink.SimulationData.Dataset;
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qutnz','D3:D17522');
Q_utnz3p{1} = timeseries(data,time);

```

```
Q_utnz3p{1}.Name = 'Q_utnz3p';  
save Q_utnz3p.mat Q_utnz3p;  
  
% utenze con 4P  
Q_utnz4p = Simulink.SimulationData.Dataset;  
data = xlsread('dati_input3.xlsx','Qutnz','E3:E17522');  
Q_utnz4p{1} = timeseries(data,time);  
Q_utnz4p{1}.Name = 'Q_utnz4p';  
save Q_utnz4p.mat Q_utnz4p;
```

## Allegato B - Esportazione dati simulazioni da Matlab/Simulink in Excel

```
%Esportazione dei dati dall'interfaccia simulink a spreadsheet
%Questa funzione consente di estrapolare attraverso i moduli scope il
%profilo di temperatura interna ed altri parametri utili ricavati dalle simulazioni.
%Questo script crea un foglio di calcolo con i dati di riferimento

clc;

%TEMPERATURA INTERNA
%creazione della tabella che associa tempo e valore registrato
T_interna = table(out.T_int_C01.time,out.T_int_C01.signals.values, out.T_int_C02.signals.values,
out.T_int_C03.signals.values, out.T_int_C04.signals.values, out.T_int_C05.signals.values, out.T_int_C06.signals.values,
out.T_int_C07.signals.values, out.T_int_C08.signals.values);
%assegnazione del nome alle colonne della tabella da esportare
T_interna.Properties.VariableNames = {'Tempo [h]' 'T_int C01 [C]' 'T_int C02 [C]' 'T_int C03 [C]' 'T_int C04 [C]' 'T_int C05 [C]'
'T_int C06 [C]' 'T_int C07 [C]' 'T_int C08 [C]'}
%creazione spreadsheet
writetable(T_interna,'outT_interna.xlsx')

%PROFILO DI MODULAZIONE PdC
%creazione della tabella che associa tempo e valore registrato
Modulazione = table(out.Modulazione_C01.time,out.Modulazione_C01.signals.values, out.Modulazione_C02.signals.values,
out.Modulazione_C03.signals.values, out.Modulazione_C04.signals.values, out.Modulazione_C05.signals.values,
out.Modulazione_C06.signals.values, out.Modulazione_C07.signals.values, out.Modulazione_C08.signals.values);
%assegnazione del nome alle colonne della tabella da esportare
Modulazione.Properties.VariableNames = {'Tempo [h]' 'Mod C01 [C]' 'Mod C02 [C]' 'Mod C03 [C]' 'Mod C04 [C]' 'Mod C05
[C]' 'Mod C06 [C]' 'Mod C07 [C]' 'Mod C08 [C]'}
%creazione spreadsheet
writetable(Modulazione,'outModulazione.xlsx')

%PROFILO RAPPORTO DI CARICO CR
%creazione della tabella che associa tempo e valore registrato
CR = table(out.CR_C01.time,out.CR_C01.signals.values, out.CR_C02.signals.values, out.CR_C03.signals.values,
out.CR_C04.signals.values, out.CR_C05.signals.values, out.CR_C06.signals.values, out.CR_C07.signals.values,
out.CR_C08.signals.values);
%assegnazione del nome alle colonne della tabella da esportare
CR.Properties.VariableNames = {'Tempo [h]' 'CR C01 [C]' 'CR C02 [C]' 'CR C03 [C]' 'CR C04 [C]' 'CR C05 [C]' 'CR C06 [C]' 'CR
C07 [C]' 'CR C08 [C]'}
%creazione spreadsheet
writetable(CR,'outCR.xlsx')

%PROFILO RENDIMENTO SECONDO PRINCIPIO eta2
%creazione della tabella che associa tempo e valore registrato
eta2 = table(out.eta2_C01.time,out.eta2_C01.signals.values, out.eta2_C02.signals.values, out.eta2_C03.signals.values,
out.eta2_C04.signals.values, out.eta2_C05.signals.values, out.eta2_C06.signals.values, out.eta2_C07.signals.values,
out.eta2_C08.signals.values);
%assegnazione del nome alle colonne della tabella da esportare
eta2.Properties.VariableNames = {'Tempo [h]' 'eta2 C01 [C]' 'eta2 C02 [C]' 'eta2 C03 [C]' 'eta2 C04 [C]' 'eta2 C05 [C]' 'eta2
C06 [C]' 'eta2 C07 [C]' 'eta2 C08 [C]'}
%creazione spreadsheet
writetable(eta2,'outEta2.xlsx')

%PROFILO COP DEFINITIVO
%creazione della tabella che associa tempo e valore registrato
COPdef = table(out.COPdef_C01.time,out.COPdef_C01.signals.values, out.COPdef_C02.signals.values,
out.COPdef_C03.signals.values, out.COPdef_C04.signals.values, out.COPdef_C05.signals.values,
out.COPdef_C06.signals.values, out.COPdef_C07.signals.values, out.COPdef_C08.signals.values);
%assegnazione del nome alle colonne della tabella da esportare
```

```
COPdef.Properties.VariableNames = {'Tempo [h]' 'COPdef C01 [C]' 'COPdef C02 [C]' 'COPdef C03 [C]' 'COPdef C04 [C]'  
'COPdef C05 [C]' 'COPdef C06 [C]' 'COPdef C07 [C]' 'COPdef C08 [C]'}  
%creazione spreadsheet  
writetable(COPdef,'outCOPdef.xlsx')  
  
%PROFILO CONSUMO ELETTRICO TOTALE in kWh  
%creazione della tabella che associa tempo e valore registrato  
kWh = table(out.kWh_C01.time,out.kWh_C01.signals.values, out.kWh_C02.signals.values, out.kWh_C03.signals.values,  
out.kWh_C04.signals.values, out.kWh_C05.signals.values, out.kWh_C06.signals.values, out.kWh_C07.signals.values,  
out.kWh_C08.signals.values);  
%assegnazione del nome alle colonne della tabella da esportare  
kWh.Properties.VariableNames = {'Tempo [h]' 'kWh C01 [C]' 'kWh C02 [C]' 'kWh C03 [C]' 'kWh C04 [C]' 'kWh C05 [C]' 'kWh  
C06 [C]' 'kWh C07 [C]' 'kWh C08 [C]'}  
%creazione spreadsheet  
writetable(kWh,'outKWh.xlsx')  
  
%UNA VOLTA CREATI I FILE EXCEL CON GLI OUTPUT LI UNISCO PER AVERE PIU  
%PRATICA L'IMPORTAZIONE DEI DATI NEI FOGLI DI CALCOLO CHE MI SERVONO PER LE  
%CONSIDERAZIONI  
  
a=xlsread('outT_interna.xlsx');  
b=xlsread('outModulazione.xlsx');  
c=xlsread('outCR.xlsx');  
d=xlsread('outEta2.xlsx');  
e=xlsread('outCOPdef.xlsx');  
f=xlsread('outKWh.xlsx');  
  
N=[a(1:13141,:) b(1:13141,:) c(1:13141,:) d(1:13141,:) e(1:13141,:) f(1:13141,:)]  
xlswrite('OUT_FILE_UNITI.xlsx',N);
```

## 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 P. Baggio, Valutazione delle prestazioni delle pompe di calore aria-acqua, AICARR Journal 23 (2013), 14-20.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 <https://ec.europa.eu/jrc/en> (accessed on January 2021).
- 6 O. Guerra Santin, L. Itard, H. Visscher. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. Energy and Buildings 41 (2009), 1223–1232.
- 7 F. D'Annibale, M. Pieve, G. Boccardi, L. Simonetti, R. Trinchieri. Individuazione Dei Casi Studio E Simulazione Software Di Sistemi Polisorgente Con Pdc A Co2. Report Ricerca Di Sistema Elettrico, Piano Triennale di Realizzazione 2017-2019, Report RdS/PTR2019/024 (2019).
- 8 UNI/TS 11300-1 (2014). Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.
- 9 UNI EN ISO 7730 (2006) Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.
- 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.
- 11 K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, C. Castelain. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications. International Conference on Emerging and Renewable Energy: Generation and Automation (ICEREGA'18), Sousse, Tunisia, pp. 1-6. Available at <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02375775> (accessed on December 2021).
- 12 A. Mourid, M. El Alami, F. Kuznik. Experimental investigation on thermal behavior and reduction of energy consumption in a real scale building by using phase change materials on its envelope. Sustainable Cities and Society 41 (2018), 35-43.