



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi di logiche di gestione delle PdC in edifici con accumulo termico strutturale

M. Pieve, F. D'Annibale, L. Simonetti, R. Trinchieri

ANALISI DI LOGICHE DI GESTIONE DELLE PDC IN EDIFICI CON ACCUMULO TERMICO STRUTTURALE

M. Pieve, F. D'Annibale, L. Simonetti, R. Trinchieri

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: Tecnologie

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

Work package: Pompe di calore

Linea di attività: PdC integrate ad accumuli strutturali: Ottimizzazione delle logiche di gestione di un accumulo non convenzionale

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Raniero Trinchieri, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 SINTESI DEI CASI ANALIZZATI	5
2.2 SINTESI DEI RISULTATI.....	6
2.2.1 <i>Consumi energetici</i>	7
2.2.2 <i>Influenza del numero di occupanti</i>	8
2.2.3 <i>Influenza della tipologia abitativa</i>	9
2.2.4 <i>Influenza della zona climatica</i>	14
2.2.5 <i>Analisi del comfort dell'utenza</i>	16
2.2.6 <i>Analisi degli intervalli di accensione/spegnimento della pompa di calore e della modulazione</i>	21
2.2.7 <i>Analisi delle prestazioni - COP</i>	25
2.2.8 <i>Analisi delle logiche di funzionamento e possibili modifiche</i>	25
2.2.9 <i>Effetto dell'aumento della taglia della pompa di calore</i>	33
2.2.10 <i>Proposte migliorative</i>	36
3 CONCLUSIONI.....	37
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	39
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	39
APPENDICE A – CONSUMI ENERGETICI PER LA STAGIONE INVERNALE NELLE VARIE LOCALITÀ – CASO BASE	40

Sommario

La presente LA ha per obiettivo l'analisi critica dei risultati ottenuti dalla campagna di simulazioni dinamiche di una LA precedente, con conseguente identificazione di logiche di gestione, in particolare intervalli di funzionamento e livelli di modulazione dell'impianto a pompa di calore aria-aria per il riscaldamento di unità immobiliari residenziali, che migliorino le prestazioni energetiche stagionali dell'impianto, garantendo le condizioni di comfort termico interno.

Per le varie tipologie edilizie simulate, è stata studiata e confrontata l'influenza dei principali parametri: numero di occupanti, tipologia abitativa, zona climatica. Dopo un esame di tutti i casi proposti dalla campagna di simulazione sono stati effettuati approfondimenti, definendo criteri di confronto per le prestazioni energetiche e per il comfort. Come indicatori energetici sono stati scelti il consumo termico per unità di superficie dell'abitazione e il valore medio del COP. Per il comfort è stata considerata la distribuzione temporale delle temperature, intesa come frequenza di occorrenza delle varie temperature durante la stagione di riscaldamento, oltre ad una ripartizione in fasce di comfort in base allo scostamento della temperatura interna rispetto ad un set-point di riferimento (20 °C).

In aggiunta sono stati indagati alcuni parametri indicativi del funzionamento della pompa di calore, come la frequenza degli intervalli di accensione/spegnimento della macchina, la sua modulazione, l'incidenza delle ore di funzionamento rispetto alla presenza dell'utente.

Dopo aver esaminato i risultati delle simulazioni effettuate con una logica definita di base sono stati studiati gli effetti di alcune modifiche. In particolare, sono state considerate le modifiche della scala di proporzionalità della modulazione in funzione della differenza di temperatura, con due alternative aventi proprietà opposte, rispetto al caso base, misurando gli effetti sugli indicatori energetici e di comfort. È stato valutato e quantificato anche il vantaggio dell'accumulo termico nelle strutture con un algoritmo appositamente studiato per caricare la struttura edilizia durante gli intervalli in cui la pompa di calore fornisce prestazioni con COP più elevato. Riguardo all'esiguo vantaggio della soluzione innovativa prospettata, si deve ricordare che non sono state condotte ottimizzazioni. Sono state infine analizzate le simulazioni riguardanti l'aumento di taglia della macchina, con il confronto tra queste e le soluzioni con modulazione alternativa

La complessità della valutazione del miglioramento conseguibile rispetto al caso base è stata ben evidenziata mostrando che in generale una riduzione dei consumi energetici si associa ad un peggioramento del comfort (es. MOD10) e viceversa (MOD40, Aumento di taglia). Tuttavia, è stato possibile identificare, tra due scelte entrambe più dispendiose del caso base (aumento di taglia e modifica della modulazione), quella più conveniente per entrambi gli indicatori. A chiusura dell'attività sono state proposte soluzioni più complesse, oggetto di possibili indagini future.

1 Introduzione

Con il modello di simulazione energetica dinamica proposto e validato in precedenti LA [1-2] è stato prodotto un set di dati molto esteso, potenzialmente replicabile per qualsiasi località di cui siano note le condizioni climatiche, per edifici con proprietà termofisiche prefissate e riscaldati con un sistema di climatizzazione a pompa di calore aria-aria. Per sua stessa natura, una tale macchina non è dotata di accumulo termico tradizionale di tipo idronico, pertanto è importante indagare anche le potenzialità di accumulo dell'energia prodotta nella struttura dell'edificio.

Nella presente LA viene svolta un'analisi complessiva e ragionata dei risultati ottenuti con le simulazioni, osservando da un lato i comportamenti degli edifici al variare dei parametri inclusi nel modello e dall'altro approfondendo in modo dettagliato i punti di forza e le criticità delle logiche di gestione proposte per la pompa di calore, riguardanti in particolare l'effetto degli intervalli di accensione/spegnimento, dei livelli di modulazione, della modifica della taglia della macchina e dell'interazione con la presenza dell'utente.

In sintesi, l'ambito di indagine [1] ha riguardato una varietà significativa di parametri in termini di:

- Zone climatiche: sono state considerate 4 località rappresentative delle zone climatiche B, C, D ed E, ovvero Palermo, Napoli, Roma e Milano. Per ciascuna di esse è stato adottato il corrispondente anno termico, con le rispettive date di accensione e spegnimento dell'impianto.
- Tipologie abitative: sono state modellate e simulate 4 tipologie rappresentative, con riferimento alle condizioni al contorno e al rapporto S/V tra superficie disperdente dell'involucro e volume riscaldato, ovvero l'unità monofamiliare (UAM), quella a schiera, differenziata per tener conto della posizione laterale (UAS1L) o centrale (UAS2L), e quella in condominio (UAC).
- Profili di occupazione: sono stati considerati nuclei abitativi con 1, 2, 3 e 4 persone. Per ciascun nucleo è stata operata una distinzione tra giorno caratteristico feriale e giorno caratteristico festivo.
- Tipologie costruttive: con un'operazione di *clusterizzazione* effettuata in una LA precedente [3], ed ivi dettagliatamente descritta, sono state identificate 8 categorie principali di involucro, contrassegnate come C01, C02, C03, C04, C05, C06, C07 e C08, con stratigrafie più o meno pesanti e ed efficienti per quanto riguarda l'isolamento termico, secondo quanto meglio dettagliato più sotto, ai fini di una maggiore comprensione delle analisi che seguono.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Sintesi dei casi analizzati

I cluster costruttivi possono essere raggruppati in due gruppi da 3 cluster ciascuno oltre a due casi estremi: in particolare, i cluster C01, C02 e C03 sono caratterizzati da quasi tutti i componenti costruttivi più scarsi in termini di prestazioni termiche, pur presentando una struttura massiva (tecnicamente: la più bassa resistenza termica combinata con la maggiore capacità termica). Hanno in comune le pareti dell'involucro in pietra. Le differenze tra C01, C02 e C03 riguardano in un caso (C02) il solaio di copertura e quello interpiano, laddove presente (unità monofamiliare UAM e unità a schiera, UAS1L e UAS2L) e nell'altro quello controterra e delle tramezzature interne (C03).

I cluster C05, C06 e C07 hanno struttura tradizionale in laterizio, quindi massiva, anche se meno dei corrispondenti edifici in pietra, con la presenza di materiale termicamente isolante nei muri perimetrali esterni. La differenza principale riguarda il posizionamento dell'isolante nella stratigrafia dell'involucro, potendo essere esterno (C05), interno (C07) o intermedio (di spessore doppio rispetto agli altri 2, C06).

Il cluster C04 è analogo ai cluster C05-C07, ma è privo di isolamento termico. Il cluster C08, infine, rappresenta una soluzione avanzata, caratterizzata da tutti i componenti migliori dal punto di vista

dell'isolamento termico, combinato con un involucro in legno, risultando così quello con la minore capacità termica. La Tabella 1 riassume le proprietà di resistenza termica (intesa come inverso della trasmittanza termica unitaria) e di capacità termica per unità di superficie dei vari elementi costruttivi, secondo la nomenclatura già utilizzata nei precedenti report, alla quale si rimanda per approfondimenti [1,3].

Tabella 1: proprietà termofisiche dei componenti strutturali delle varie unità immobiliari

	Elemento	Resistenza termica [m ² K/W]	Capacità termica [J/m ² K]
Solaio contro terra	S _{ct,1}	0,591	938.000
	S _{ct,2}	0,935	1.045.000
Solaio interpiano	S _{int,1}	0,636	378.000
	S _{int,2}	0,52	123.000
Solaio copertura	S _{cop,1}	0,523	461.500
	S _{cop,2}	1,473	50.900
Pareti involucro	P _{env,pt}	0,471	1.564.000
	P _{env,lat1}	0,846	314.000
	P _{env,lat2}	2,214	333.000
	P _{env,lat3}	3,288	194.000
	P _{env,lat4}	2,214	333.000
	P _{env,legno}	5,99	95.000
Tramezzi	T _{int,1}	0,667	267.000
	T _{int,2}	0,633	106.000
	T _{int,3}	0,661	27.000

La Tabella 2 fornisce l'indicazione sommaria della costituzione di ciascun cluster.

Tabella 2: sintesi della composizione strutturale dei vari cluster

Cluster	Solaio c/terra	Solaio interpiano	Copertura	Involucro	Tramezzi
C01	S _{ct,1}	S _{int,1}	S _{cop,1}	P _{env,pt}	T _{int,1}
C02	S _{ct,1}	S _{int,2}	S _{cop,2}	P _{env,pt}	T _{int,1}
C03	S _{ct,2}	S _{int,1}	S _{cop,1}	P _{env,pt}	T _{int,2}
C04	S _{ct,2}	S _{int,1}	S _{cop,1}	P _{env,lat1}	T _{int,2}
C05	S _{ct,2}	S _{int,1}	S _{cop,1}	P _{env,lat2}	T _{int,2}
C06	S _{ct,2}	S _{int,1}	S _{cop,1}	P _{env,lat3}	T _{int,2}
C07	S _{ct,2}	S _{int,1}	S _{cop,1}	P _{env,lat4}	T _{int,2}
C08	S _{ct,2}	S _{int,2}	S _{cop,2}	P _{env,legno}	T _{int,3}

Dalla combinazione di tutti i parametri elencati sono state tratte oltre 500 simulazioni del comportamento dinamico di un'unità immobiliare climatizzata per la stagione invernale con una pompa di calore aria-aria di taglia prefissata, la cui scelta è indicata in apposita sezione nel report della precedente LA [1]. In particolare, è stata considerata una pompa di calore con potenza elettrica nominale di 4 kW e COP variabile, su base oraria, con la temperatura della sorgente esterna, la temperatura della sorgente interna e il fattore di carico.

2.2 Sintesi dei risultati

I risultati sono stati presentati secondo due punti di vista principali, ovvero quello energetico e quello del comfort. Per quanto riguarda l'aspetto energetico, è stato calcolato il consumo elettrico in kWh per l'intera stagione di riscaldamento e il COP medio; il grado di comfort è stato calcolato come scostamento dalle

condizioni di temperatura interna di set-point. In aggiunta, sono state fornite indicazioni riguardanti lo stato di accensione/spengimento dell'impianto.

2.2.1 Consumi energetici

Dall'esame dei risultati è possibile innanzitutto analizzare alcuni comportamenti delle strutture, fissata la località e il tipo di abitazione. Per la località più fredda tra quelle indagate, Milano, con la tipologia UAM si riporta nella Tabella 3 la sintesi dei consumi energetici in termini di consumo elettrico stagionale, COP medio, energia termica complessivamente fornita per il riscaldamento ed energia per unità di superficie riscaldata. Si considerano tutti i profili di occupazione.

Tabella 3: consumi energetici per la stagione invernale a Milano – tipologia UAM

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	6655	4,59	30549	141,4
	C02	5873	4,49	26359	122
	C03	6610	4,58	30305	140,3
	C04	5024	4,37	21967	101,7
	C05	3610	4,14	14948	69,2
	C06	3292	4,08	13439	62,2
	C07	3619	4,15	15010	69,5
	C08	1726	3,78	6523	30,2
2p	C01	7064	4,55	32156	148,9
	C02	6177	4,45	27477	127,2
	C03	7014	4,55	31922	147,8
	C04	5230	4,34	22676	105
	C05	3646	4,08	14866	68,8
	C06	3292	4,02	13234	61,3
	C07	3655	4,08	14926	69,1
	C08	1606	3,72	5970	27,6
3p	C01	6969	4,57	31844	147,4
	C02	6094	4,46	27198	125,9
	C03	6916	4,56	31561	146,1
	C04	5156	4,33	22332	103,4
	C05	3585	4,08	14634	67,8
	C06	3229	4,02	12980	60,1
	C07	3591	4,09	14671	67,9
	C08	1552	3,7	5736	26,6
4p	C01	6753	4,57	30862	142,9
	C02	5918	4,46	26399	122,2
	C03	6702	4,56	30579	141,6
	C04	5015	4,33	21738	100,6
	C05	3499	4,09	14302	66,2
	C06	3155	4,03	12718	58,9
	C07	3505	4,09	14329	66,3
	C08	1516	3,69	5598	25,9

La Figura 1 riporta l'andamento dei consumi in termini di energia termica fornita per unità di superficie riscaldata per ciascun cluster ed ogni profilo di occupazione.

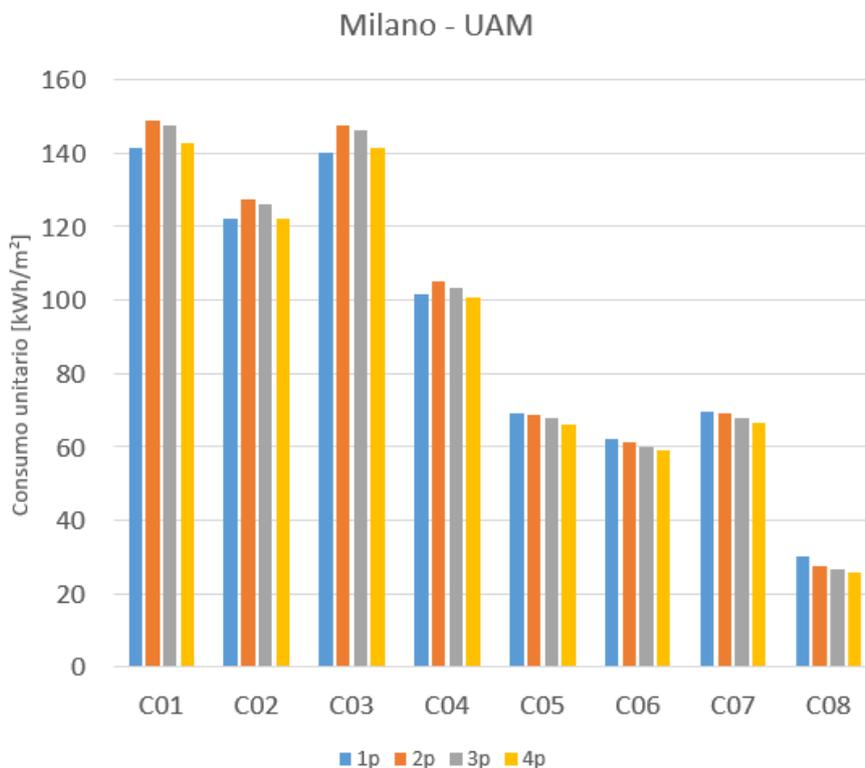


Figura 1: Consumi termici per unità di superficie dei vari cluster – Milano, unità monofamiliare

2.2.2 Influenza del numero di occupanti

Preliminarmente, si osserva che la numerosità degli occupanti, ovvero il relativo profilo di occupazione, non ha un’influenza sull’ordinamento relativo dei consumi energetici tra le varie tipologie costruttive, ovvero ogni cluster mantiene la stessa posizione relativamente agli altri per quanto riguarda la prestazione energetica stagionale. In particolare, fatta eccezione per il cluster C08, in tutti i casi la differenza percentuale tra energia minima e energia massima in funzione del numero di occupanti è sempre inferiore al 6%. Per il cluster C08, viceversa, la differenza è molto più marcata, a causa del ridotto fabbisogno in termini assoluti, cosicché l’apporto degli occupanti diventa più rilevante rispetto al fabbisogno stesso.

Per i cluster con le peggiori prestazioni si rileva che nel caso di un solo occupante, i consumi sono i più bassi. Tale effetto, apparentemente non coerente con gli altri, è dovuto alla minor percentuale di tempo trascorso dall’occupante nell’unità abitativa. Pertanto, il risparmio correlato allo spegnimento dell’impianto in assenza di occupanti supera quello degli apporti gratuiti quando essi occupano l’immobile. La Tabella 4 contribuisce a chiarire quanto sopra riportato. In essa sono riportati i contributi degli apporti termici dovuti all’occupazione e all’impiego degli elettrodomestici, sull’intera stagione di riscaldamento, il valore di apporto unitario di ciascun occupante e il numero di ore di assenza di occupazione dell’immobile. Tutte e tre le grandezze sono identiche per i vari cluster, dato che, com’è naturale, nel modello non è stata ipotizzata alcuna dipendenza tra i profili di occupazione e la tipologia di costruzione.

Tabella 4: contributo energetico degli occupanti durante la stagione invernale - Milano

Profilo di occupazione	Apporto stagionale [kWh]	Apporto unitario [kWh/occupante]	Ore senza occupazione [-]	Potenza media da occupazione [W]
1p	412,8	412,8	1177	128,4
2p	949,3	474,6	628	252,2
3p	1150,7	383,6	680	310
4p	1458,9	364,7	915	419,6

Si osserva che l'apporto unitario medio per l'intera stagione di riscaldamento è intorno a 408 kWh per ciascun occupante. Il numero di ore senza occupazione, ovvero senza alcun occupante nell'immobile, mostra un andamento che dipende dai criteri con cui sono stati determinati i vari profili di occupazione. Si evidenzia, in particolare, che quando gli occupanti sono almeno 2, c'è un aumento del tempo trascorso fuori dall'abitazione con l'aumentare della numerosità del nucleo, come se vi fosse maggiore omogeneità dell'intero nucleo rispetto alla gestione del tempo libero. Per quello che qui rileva, la differenza di apporto termico da occupazione tra il caso di un solo occupante e quello con 4 occupanti diventa via via più significativa man mano che il fabbisogno dell'edificio si riduce.

Un effetto interessante, infine, è quello che si osserva analizzando, invece dei consumi (precedente Figura 1), la somma dei consumi e dell'apporto degli occupanti, indicatore del fabbisogno dell'edificio con quella data occupazione (Figura 2).

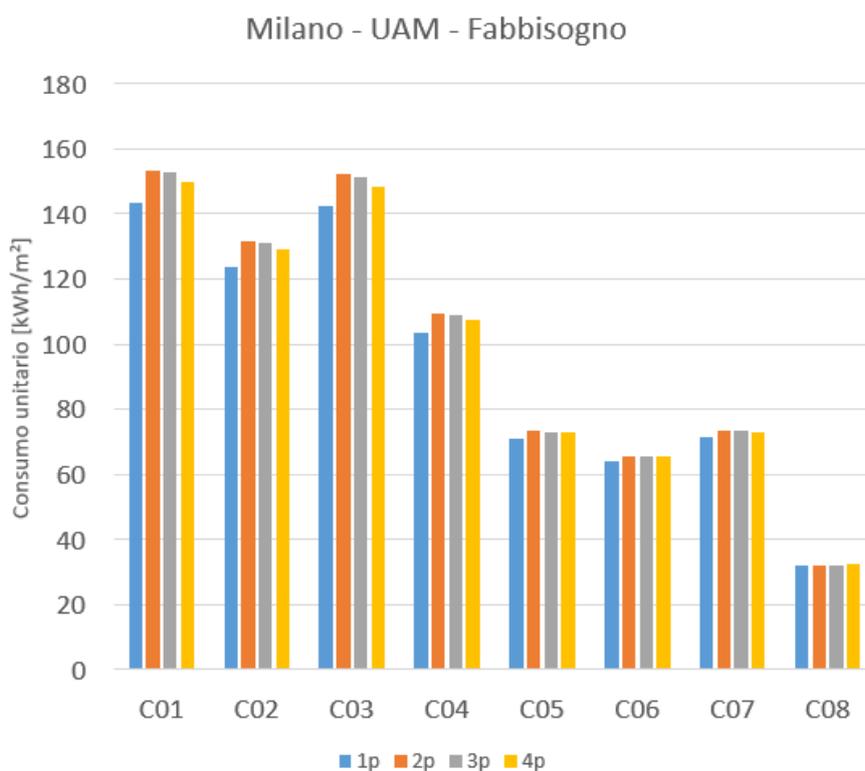


Figura 2: Fabbisogno termico per riscaldamento per unità di superficie – Milano, unità monofamiliare

In termini di fabbisogno, dalla Figura 2 emerge che l'occupazione ha più influenza per i cluster meno performanti, ovvero che su di essi si riscontrano differenze maggiori. Man mano che si procede verso strutture edilizie con prestazioni migliori le differenze si attenuano, fino quasi ad annullarsi nel caso del cluster C08. Tale tendenza può essere interpretata come conseguenza di un migliore impiego dell'energia nell'edificio, nel senso che, essendo le sue dispersioni molto ridotte rispetto agli altri, i ritmi di occupazione non influiscono molto sul fabbisogno. Per confronto, come già anticipato, nei cluster termicamente poco isolati (C01, C02 e C03), la minore richiesta di energia nel caso di un solo occupante va ascritta ad una sua presenza significativamente minore, che, per la logica implementata con il modello di simulazione [1], determina un ridotto intervento del sistema di climatizzazione.

2.2.3 Influenza della tipologia abitativa

Oltre alla tipologia UAM, monofamiliare, sono state considerate altre due tipologie di unità disperdenti da terra a tetto, con caratteristiche variabili per quanto riguarda le dispersioni dall'involucro perimetrale, ovvero la UAS1L e la UAS2L, ed una condominiale (UAC).

Per la tipologia UAS1L, i dati dei consumi sono riportati nella Tabella 5, secondo la stessa forma adottata per la Tabella 3.

Tabella 5: consumi energetici per la stagione invernale a Milano – tipologia UAS1L

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	4609	4,31	19845	140,6
	C02	4029	4,21	16960	120,2
	C03	4599	4,31	19822	140,5
	C04	3593	4,13	14847	105,2
	C05	2665	3,96	10558	74,8
	C06	2466	3,93	9688	68,7
	C07	2673	3,96	10581	75
	C08	1417	3,71	5259	37,3
2p	C01	4842	4,27	20657	146,4
	C02	4186	4,16	17421	123,5
	C03	4821	4,26	20550	145,6
	C04	3685	4,08	15038	106,6
	C05	2654	3,91	10377	73,5
	C06	2438	3,87	9437	66,9
	C07	2662	3,91	10414	73,8
	C08	1312	3,65	4785	33,9
3p	C01	4785	4,27	20425	144,8
	C02	4141	4,16	17225	122,1
	C03	4762	4,27	20334	144,1
	C04	3629	4,08	14795	104,9
	C05	2604	3,90	10159	72
	C06	2389	3,86	9218	65,3
	C07	2608	3,90	10175	72,1
	C08	1263	3,62	4576	32,4
4p	C01	4636	4,27	19792	140,3
	C02	4022	4,16	16727	118,5
	C03	4619	4,27	19708	139,7
	C04	3525	4,08	14370	101,8
	C05	2528	3,90	9865	69,9
	C06	2319	3,86	8960	63,5
	C07	2532	3,90	9886	70,1
	C08	1217	3,62	4404	31,2

In termini generali, si osserva che i valori assoluti dei consumi sono molto inferiori a quelli del caso UAM, poiché la superficie di riferimento per l'unità UAS1L è inferiore di circa 1/3 rispetto all'altra. Se si analizza invece il consumo per unità di superficie abitativa, i valori sono simili a quelli dell'unità monofamiliare isolata. Per i cluster termicamente meno isolati, essi sono molto vicini. Per quelli più performanti, viceversa, i valori peggiorano rispetto all'unità UAM, tanto più, in termini percentuali, quanto minore è il consumo.

Per spiegare almeno qualitativamente tale comportamento, si deve tenere conto che l'unità UAS1L, pur essendo simile a quella UAM per quanto riguarda l'indice di dispersione termica S/V (0,69 contro 0,73), ha una facciata non disperdente verso l'esterno (ovvero quella che la collega al resto della schiera di cui fa parte) che, nel modello di simulazione [1] è fissata con orientamento ad ovest. Da quel lato, pertanto, pur non disperdendo, l'immobile è privo di una significativa frazione di irraggiamento solare. Per contro, verso nord ha un'esposizione con superficie finestrata, elemento che favorisce un aumento delle dispersioni

rispetto all'unità UAM, che ne è priva. Se ne può dedurre che, se l'involucro dell'edificio comporta un livello di dispersione basso, ovvero un contenimento delle perdite per trasmissione, aumenta la sensibilità all'orientamento dell'edificio, sia in termini di apporto per irraggiamento che di dispersioni stesse.

Per la tipologia UAS2L in Tabella 6 sono riportati i consumi.

Tabella 6: consumi energetici per la stagione invernale a Milano – tipologia UAS2L

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	3543	4,11	14553	119,4
	C02	2943	4	11764	96,5
	C03	3521	4,1	14446	118,5
	C04	2978	4	11918	97,8
	C05	2508	3,92	9842	80,7
	C06	2416	3,91	9449	77,5
	C07	2511	3,93	9862	80,9
	C08	1576	3,75	5914	48,5
2p	C01	3650	4,06	14804	121,4
	C02	2964	3,95	11699	96
	C03	3614	4,05	14631	120
	C04	3008	3,96	11908	97,7
	C05	2502	3,88	9698	79,6
	C06	2402	3,85	9254	75,9
	C07	2504	3,87	9687	79,5
	C08	1479	3,70	5468	44,9
3p	C01	3592	4,05	14543	119,3
	C02	2911	3,94	11472	94,1
	C03	3554	4,05	14397	118,1
	C04	2947	3,96	11658	95,6
	C05	2446	3,86	9439	77,4
	C06	2344	3,85	9029	74,1
	C07	2446	3,86	9448	77,5
	C08	1421	3,68	5236	43
4p	C01	3481	4,05	14115	115,8
	C02	2821	3,94	11123	91,2
	C03	3447	4,04	13940	114,4
	C04	2853	3,96	11291	92,6
	C05	2365	3,86	9137	75
	C06	2268	3,85	8734	71,6
	C07	2367	3,87	9150	75,1
	C08	1364	3,69	5037	41,3

Si osserva una riduzione generale di quasi tutti i consumi assoluti rispetto al caso UAS1L, poiché la superficie abitativa è inferiore del 14% circa. Tuttavia, analizzando i dati più in dettaglio, si nota che per il cluster C08 i consumi aumentano del 13% circa. Se si considerano invece i consumi per unità di superficie abitativa, nel confronto con l'unità UAS1L si ripete un andamento simile a quello precedentemente osservato nel passaggio da UAM a UAS1L, con differenze più marcate.

Anche in questo caso, il fenomeno può essere interpretato tenendo presente le condizioni dell'edificio simulato rispetto all'orientamento e alle superfici finestrate. In particolare, nel modello UAS2L le 2 superfici disperdenti sono orientate a sud e nord, mentre sui prospetti est ed ovest l'unità immobiliare è adiacente

ad altre unità immobiliari. Il rapporto S/V è ridotto, rispetto alle altre tipologie abitative, ed è pari a 0,54 circa. Le superfici finestrate sono disposte per il 40% a nord e per il restante 60% a sud. Per confronto, nel caso UAS1L, la porzione di superficie finestrata esposta a nord rappresenta solo il 10% del totale delle superfici trasparenti. Sul fronte delle dispersioni attraverso componenti opachi, si può calcolare che la superficie dell'involucro perimetrale rispetto al totale della superficie disperdente si riduce dal 45% (UAS1L) circa al 31% circa (UAS2L). Tuttavia, nonostante tale riduzione, aumenta l'incidenza percentuale della superficie disperdente sul lato nord rispetto alla superficie disperdente perimetrale, cosicché aumenta, seppur di poco (passando dal 14,1% al 15,6%) il rapporto tra la superficie disperdente lato nord e il totale della superficie disperdente.

All'aumento delle dispersioni si somma l'effetto del ridotto irraggiamento causato dall'aderenza ad altre due unità immobiliari sui lati est ed ovest. In termini semplificati, la differenza di comportamento che si riscontra tra i cluster termicamente meno isolati (C01, C02, C03 e C04), per i quali i consumi unitari diminuiscono nel passaggio da UAS1L a UAS2L, e quelli con prestazioni migliori (C05, C06, C07 e C08) si può ricondurre al peso relativo che hanno le dispersioni per trasmissione rispetto agli apporti solari: nel primo gruppo di edifici le dispersioni sono molto elevate, cosicché una riduzione dell'apporto dell'irraggiamento non incide molto. Nelle strutture edilizie con dispersioni contenute (C05, C06, C07) o molto contenute (C08), la differenza tra dispersioni termiche per trasmissione ed apporti solari si riduce molto. Pertanto, se in queste ultime si elimina una parete molto isolata, e avente anche alcune aperture orientate convenientemente (com'è il caso delle esposizioni ad est ed ovest), la minore dispersione termica non compensa la significativa perdita dell'irraggiamento, con il risultato di far peggiorare leggermente l'indicatore di consumo unitario.

A conclusione dell'analisi dei consumi si riporta in Tabella 7 l'andamento delle grandezze di interesse per l'unità abitativa in appartamento, UAC.

Tabella 7: consumi energetici per la stagione invernale a Milano – tipologia UAC

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	1554	3,75	5829	79,7
	C02	1558	3,76	5856	80,1
	C03	1553	3,76	5835	79,8
	C04	1012	3,73	3779	51,7
	C05	545	3,66	1997	27,3
	C06	451	3,67	1654	22,6
	C07	547	3,67	2005	27,4
	C08	369	3,62	1337	18,3
2p	C01	1444	3,75	5416	74,1
	C02	1453	3,73	5418	74,1
	C03	1446	3,75	5419	74,1
	C04	878	3,74	3283	44,9
	C05	393	3,57	1404	19,2
	C06	303	3,53	1069	14,6
	C07	395	3,60	1421	19,4
	C08	229	3,55	815	11,1
3p	C01	1393	3,73	5200	71,1
	C02	1398	3,73	5208	71,2
	C03	1394	3,73	5202	71,2
	C04	826	3,71	3062	41,9
	C05	345	3,59	1237	16,9
	C06	260	3,53	916	12,5

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
	C07	346	3,59	1242	17
	C08	185	3,62	671	9,2
4p	C01	1325	3,71	4918	67,3
	C02	1330	3,73	4954	67,8
	C03	1327	3,71	4923	67,4
	C04	766	3,68	2816	38,5
	C05	297	3,54	1051	14,4
	C06	214	3,51	751	10,3
	C07	299	3,51	1047	14,3
	C08	143	3,58	511	7

I consumi complessivi e quelli unitari sono molto inferiori a quelli delle precedenti tipologie abitative, sia perché la superficie abitativa di riferimento è la minore tra tutte quelle analizzate (essendo inferiore del 40% rispetto a quella della tipologia UAS2L e sviluppata su un solo piano) sia perché ha un rapporto S/V molto basso, di circa 0,234. Si aggiunga che, nel modello di simulazione [1] per tale unità si ipotizza che le superfici disperdenti siano orientate a sud e ad ovest. La Figura 3, che riporta i consumi unitari per i vari cluster e per tutti i profili di occupazione, conferma alcune considerazioni introdotte nel precedente paragrafo a proposito dell'influenza del numero degli occupanti. In particolare, per i consumi unitari in funzione del numero degli occupanti, si osserva una piena coerenza tra gli andamenti nei cluster meno energivori osservati nella Figura 1 (C05, C06, C07 e C08) e quelli della tipologia abitativa UAC che, per i motivi sopra riportati, è caratterizzata da consumi stagionali unitari sempre inferiori a 80 kWh/m².

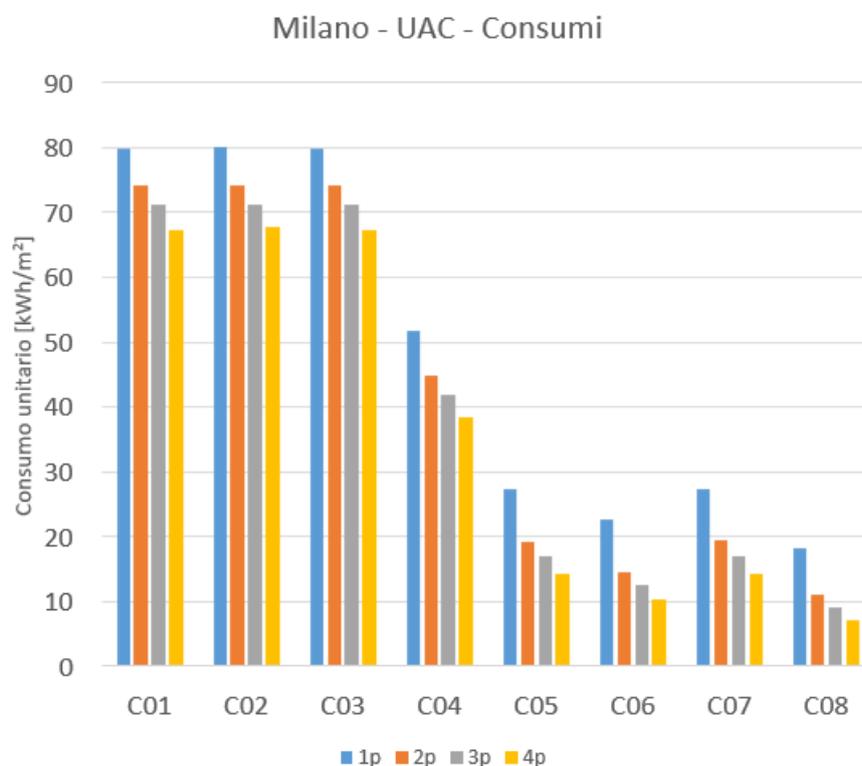


Figura 3: Consumi termici per unità di superficie dei vari cluster – Milano, unità UAC

Con tali livelli di consumi, il peso degli apporti termici da occupazione sul fabbisogno cresce sensibilmente con il numero degli occupanti stesso, dal 13% medio con un solo occupante al 45% medio con 4 occupanti. Nel caso estremo del cluster C08, questo effetto comporta, per 4 occupanti, un'incidenza degli apporti interni sul fabbisogno addirittura del 74%.

2.2.4 Influenza della zona climatica

Analizzando il comportamento di una stessa tipologia abitativa per varie località, il primo elemento che si evidenzia è una riduzione significativa dei consumi, a tal punto che la pompa di calore scelta può risultare sovradimensionata. Per semplicità, si riportano nella Figura 4 gli andamenti dei consumi termici unitari relativi alla sola tipologia UAM nella località di Roma. In termini generali, si osserva una riduzione del 50% circa per i cluster termicamente meno isolati e del 60% circa per quelli più isolati (C05, C06 e C07). Per il cluster C08 la riduzione è del 70% circa. La riduzione dei consumi unitari, quindi, è tanto maggiore quanto migliori sono le prestazioni termiche dell'abitazione. Questo andamento è correlato con il maggiore irraggiamento, e più in generale con le condizioni climatiche più favorevoli, della zona climatica D rispetto alla E. Inoltre, le migliori condizioni climatiche avvantaggiano maggiormente i cluster in cui è minore il fabbisogno, perché questi ultimi hanno minori perdite per trasmissione.

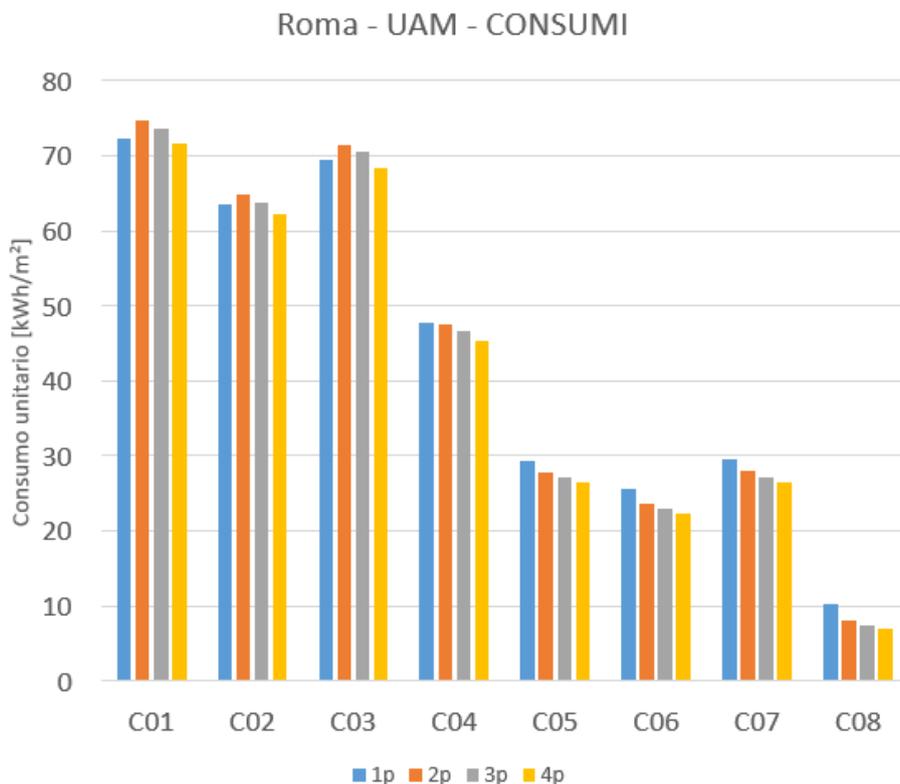


Figura 4: Consumi termici per unità di superficie dei vari cluster – Roma, unità UAM

Per quanto riguarda il comportamento dell'unità UAM per la località di Napoli (zona climatica C), si hanno gli andamenti riportati in Figura 5, con molte analogie rispetto a Roma, in termini di rapporti relativi tra i vari cluster e tra i vari profili di occupazione. Più in dettaglio, la riduzione dei consumi rispetto alla zona D è di circa il 25% per i primi quattro cluster, del 30% circa per quelli termicamente più isolati, e del 40% per il cluster C08.

Infine, per la località Palermo, rappresentativa della zona climatica B, i consumi unitari dell'unità UAM sono riportati in Figura 6. La diminuzione rispetto a Napoli è più contenuta, attestandosi per i 4 cluster più energivori al 14% in media, al 19% per C05, C06 e C07 e al 25% circa per il cluster C08.

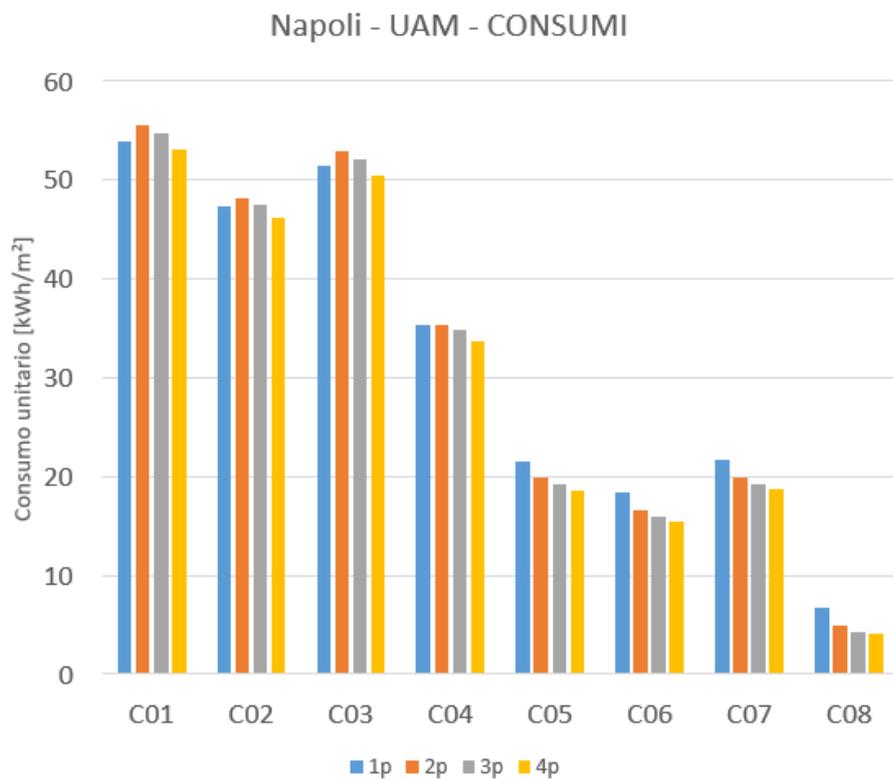


Figura 5: Consumi termici per unità di superficie dei vari cluster – Napoli, unità UAM

Per completezza, nell'Appendice A sono riportati tutti i dati relativi alle simulazioni effettuate in [1].

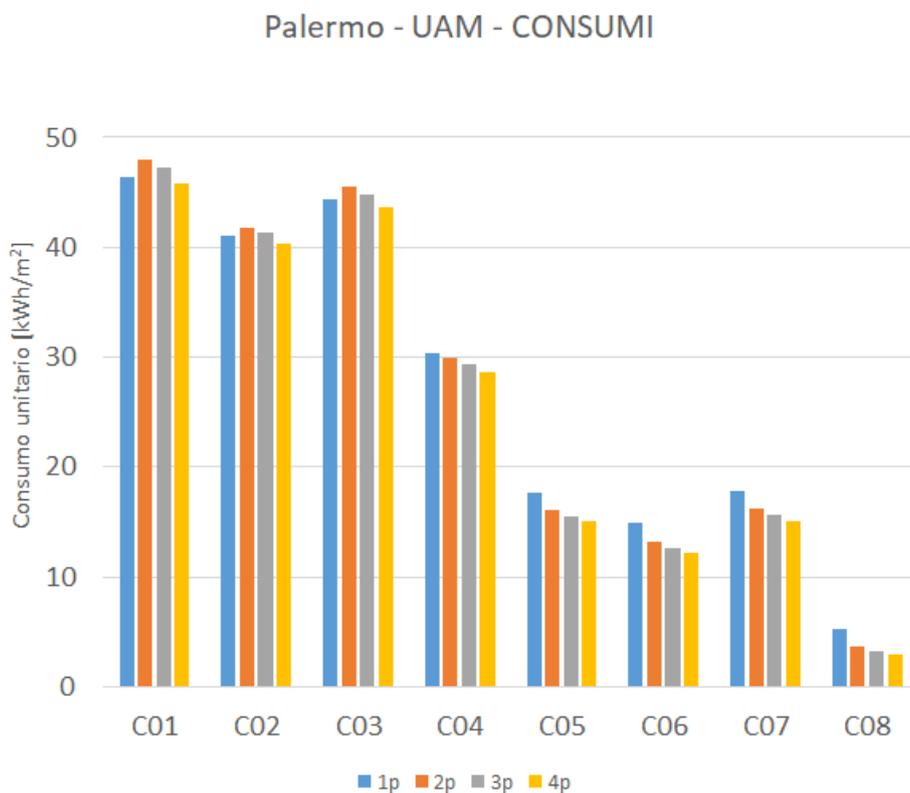


Figura 6: Consumi termici per unità di superficie dei vari cluster – Palermo, unità UAM

Un dato interessante che si può ricavare dalle analisi svolte è quello che correla la zona climatica con la differenza di consumo conseguibile al variare del tipo di cluster. Riferendosi per semplicità al solo caso UAM, il rapporto tra i consumi unitari relativi alle tipologie costruttive con consumo massimo e consumo minimo (C01 e C08), mediato sui vari profili di occupazione, ha un andamento decrescente con l'aumentare dei gradi giorno della località, come illustrato nella Tabella 8. Esso è interpretabile come combinazione di due effetti: da un lato la differenza assoluta di consumi tra C01 e C08 si riduce al diminuire dei gradi giorno (da circa 111 kWh/m² a Milano a 41 kWh/m² a Palermo) per effetto di un fabbisogno sempre minore. Dall'altro, nei cluster meno energivori, il guadagno derivante da migliori condizioni climatiche è sfruttato al massimo, proprio per le caratteristiche della struttura edilizia. Tra le due tendenze, quest'ultima prevale, facendo aumentare il rapporto. Se ne ricava che l'impiego di tipologie costruttive termicamente isolate consente un risparmio percentuale maggiore nelle zone climatiche più miti.

Tabella 8: rapporto tra consumi unitari massimi e minimi per UAM in funzione dei gradi giorno

Località	Gradi giorno [°C]	Rapporto consumi unitari medi UAM C01/C08 [-]
Milano	2404	5,3
Roma	1415	9,1
Napoli	1034	11,3
Palermo	751	13,1

2.2.5 Analisi del comfort dell'utenza

Il modello proposto [1] fornisce l'andamento orario della temperatura interna nelle varie unità immobiliari analizzate sulla base di alcune condizioni: in sintesi, fissata la temperatura di 20 °C come set point di riferimento, su base oraria l'accensione della pompa di calore viene controllata innanzitutto dalla verifica della presenza di almeno un occupante e, in caso di presenza, la modulazione della macchina è comandata in modo proporzionale dalla differenza tra il set point e la temperatura interna effettiva.

L'analisi del comfort dell'utenza può essere effettuata con opportuni indici che misurano statisticamente lo scostamento dalle condizioni di set point.

Un primo indice da analizzare è la distribuzione dei valori della temperatura interna durante la stagione di riscaldamento. In Figura 7, ad esempio, si illustra quello che si verifica per l'unità UAM, nei vari cluster, per un solo occupante.

Complessivamente considerata, la tipologia UAM 1p è caratterizzata da una temperatura di mantenimento che varia tra 17 e 21 °C. Si osserva che molte distribuzioni sono caratterizzate da più di un massimo. Il mantenimento delle condizioni di set-point è garantito solo dai cluster C05 (in parte), C06, C07 e C08, anche se solo per quest'ultimo il valore di 20 °C corrisponde effettivamente al massimo della frequenza. Nei cluster termicamente meno isolati il massimo principale della distribuzione è centrato intorno a 18÷18,5 °C. Per quanto riguarda l'effettivo mantenimento delle condizioni di comfort e l'interpretazione delle code delle distribuzioni, si deve precisare che gli andamenti illustrati vanno rapportati all'effettivo periodo di occupazione dell'utente. In altri termini, se si analizzano gli stessi andamenti della Figura 7 restringendo l'intervallo alle sole ore di presenza dell'utente, si ottengono i profili di Figura 8.

Si osserva una parziale riduzione del numero di ore in cui le condizioni non corrispondono al set point; tuttavia, in termini generali, si osservano gli stessi andamenti della figura precedente. In termini quantitativi, con riferimento ai soli intervalli di tempo in cui l'occupante è presente, e assumendo una condizione media di umidità relativa del 65% circa, si può analizzare la condizione di comfort definendo 5 stati: comfort (C), per temperature comprese entro $\pm 1,5$ °C dal set-point, discomfort per temperatura troppo bassa (DTb), che si verifica per temperature comprese tra 16 °C e 18,5 °C, discomfort per temperatura troppo alta (DTa), che si verifica per temperature comprese tra 21,5 °C e 24 °C, forte discomfort per temperatura troppo bassa (DDTb), assunto per temperature inferiori a 16 °C e forte discomfort per temperatura troppo alta (DDTa), assunto per temperature superiori a 24 °C. Nella Tabella 9 si riportano le percentuali, rispetto al tempo di presenza dell'occupante nell'abitazione, per ciascun cluster.

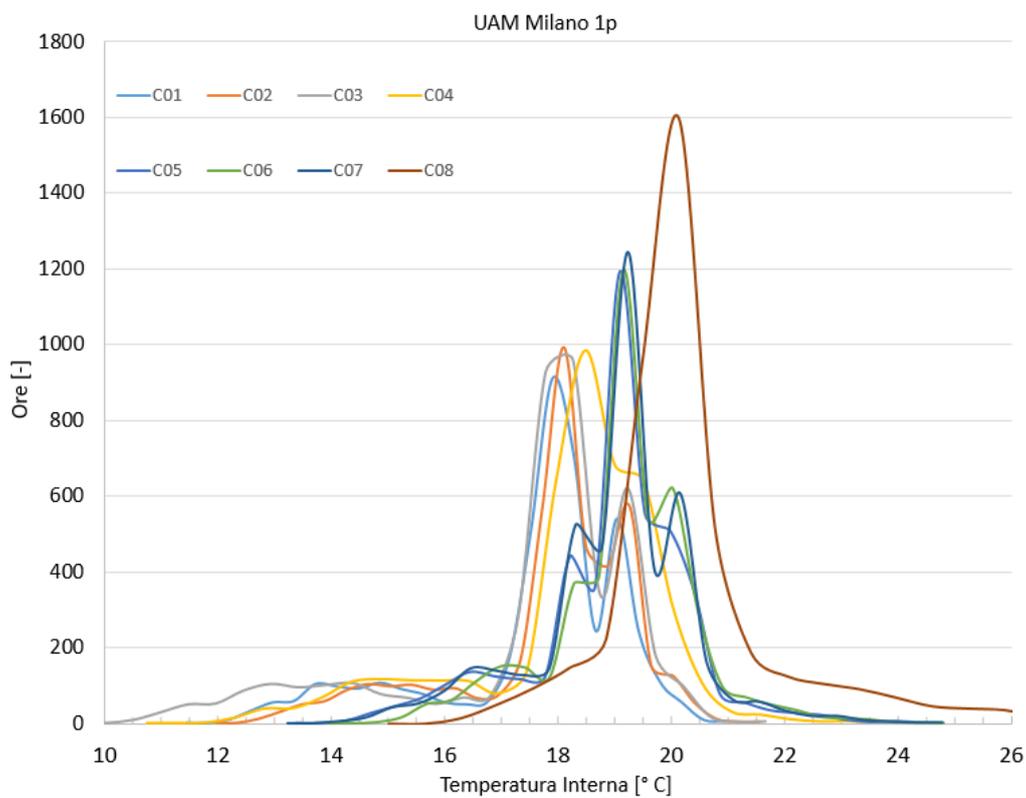


Figura 7: distribuzione di frequenza della T interna per i vari cluster nell'unità UAM Milano – 1 occupante

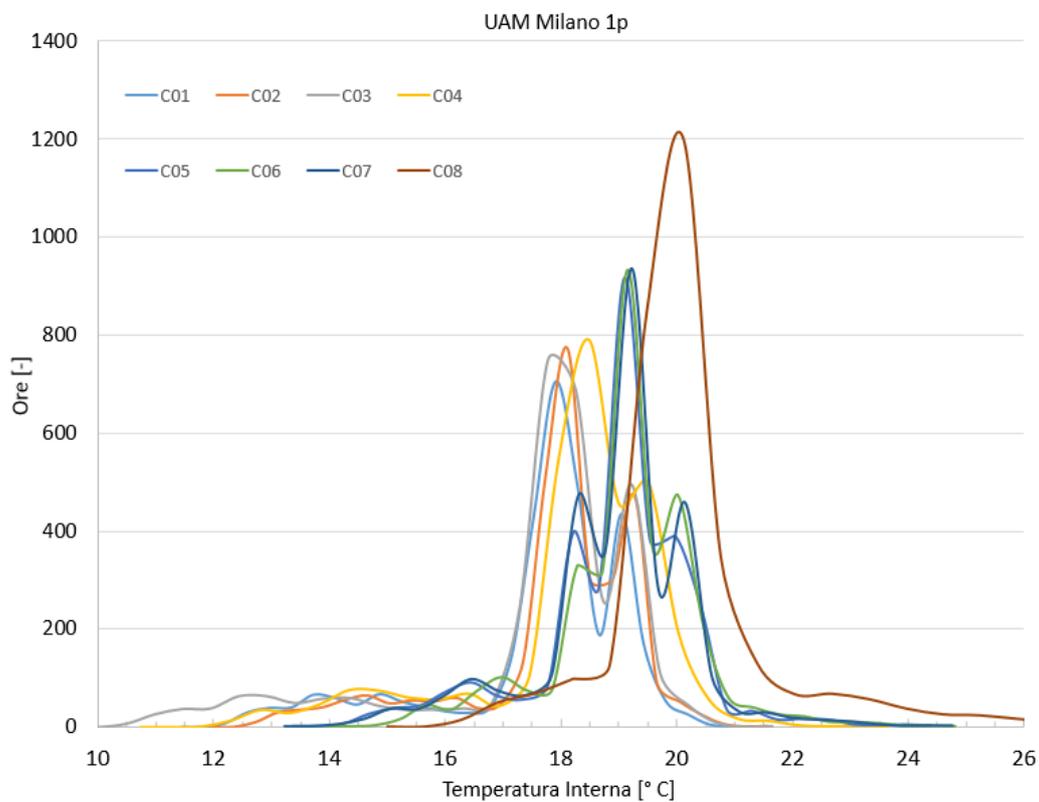


Figura 8: distribuzione di frequenza della T interna durante i periodi di occupazione dell'abitazione. UAM Milano – 1 occupante

Tabella 9: Condizioni di comfort e discomfort per l'utente nei vari cluster – Milano UAM – 1p

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
DDTb	15,3%	13,3%	16,8%	13,1%	5,8%	2,7%	5,1%	0,2%
DTb	60,7%	57,2%	58,9%	48,3%	27,3%	25,1%	28,4%	8,6%
C	24,0%	29,5%	24,3%	38,1%	65,3%	70,2%	64,7%	81,0%
DTa	0,0%	0,1%	0,1%	0,5%	1,6%	2,0%	1,7%	7,0%
DDTa	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	3,2%

Si osserva che nei cluster C01, C02, C03 e C04 la percentuale di tempo in cui la pompa di calore garantisce il mantenimento del set-point è compresa tra il 24% e il 30%. D'altro canto, la percentuale di tempo per cui si verificano condizioni di forte discomfort per temperatura troppo bassa non è trascurabile, essendo in media intorno al 15%. Nei cluster C05, C06 e C07 le condizioni di comfort sono garantite in media per i 2/3 del tempo di occupazione. In questi casi, quando si ha discomfort, questo è quasi sempre (percentuali > 80%) non forte.

Osservando gli stessi indici nel caso di 4 occupanti, sempre per la medesima unità UAM a Milano, si ottengono i valori di Tabella 10.

Tabella 10: Condizioni di comfort e discomfort per l'utente nei vari cluster – Milano UAM – 4p

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
DDTb	8,6%	7,5%	9,5%	7,4%	2,4%	0,8%	2,4%	0,0%
DTb	61,0%	55,1%	59,4%	40,7%	17,1%	12,7%	17,6%	3,7%
C	30,4%	37,3%	31,1%	51,2%	78,3%	83,2%	77,5%	80,6%
DTa	0,0%	0,1%	0,1%	0,7%	2,1%	3,1%	2,4%	9,9%
DDTa	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,2%	5,9%

Apparentemente, si potrebbe pensare che la pompa di calore non sia in grado di fornire il comfort richiesto dall'utenza. Per approfondire questo aspetto, si devono analizzare le condizioni in cui la pompa di calore è effettivamente in servizio, perché i dati delle due tabelle precedenti comprendono anche intervalli di tempo in cui è presente l'utenza mentre l'impianto è spento. Restringendo quindi l'intervallo alle sole ore in cui la pompa di calore è accesa, si ottengono le distribuzioni di Figura 9, con le percentuali di soddisfacimento delle condizioni di comfort della Tabella 11.

Dalle distribuzioni si evidenziano vari dettagli. Innanzitutto, per i cluster C01 e C03 (e in misura minore anche per C02 e C04) i picchi di frequenza principali riguardano temperature inferiori al set-point, tra 17,5 °C e 18,5 °C, anche se con frequenza minore sono presenti picchi a temperature intorno a 19 °C. Per i cluster C05, C06 e C07 si ha un picco di frequenza per 19 °C anche se il set point è presente con un picco minore.

Tabella 11: Condizioni di comfort per l'utente nei vari cluster durante i periodi di accensione dell'impianto – Milano UAM – 1p

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
DDTb	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
DTb	70,8%	65,5%	70,7%	56,0%	23,1%	17,9%	24,2%	0,1%
C	29,2%	34,6%	29,3%	44,0%	77,0%	82,1%	75,9%	100,0%
DTa	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
DDTa	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

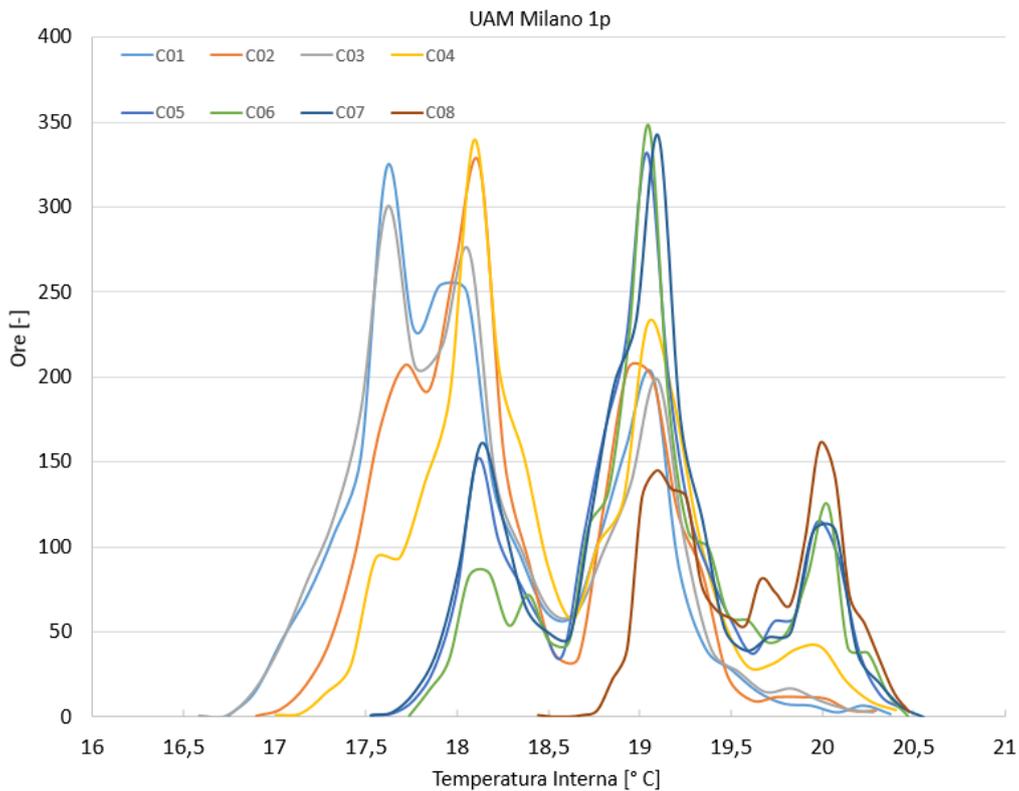


Figura 9: distribuzione di frequenza della T interna durante i periodi di accensione della pompa di calore. UAM Milano – 1 occupante

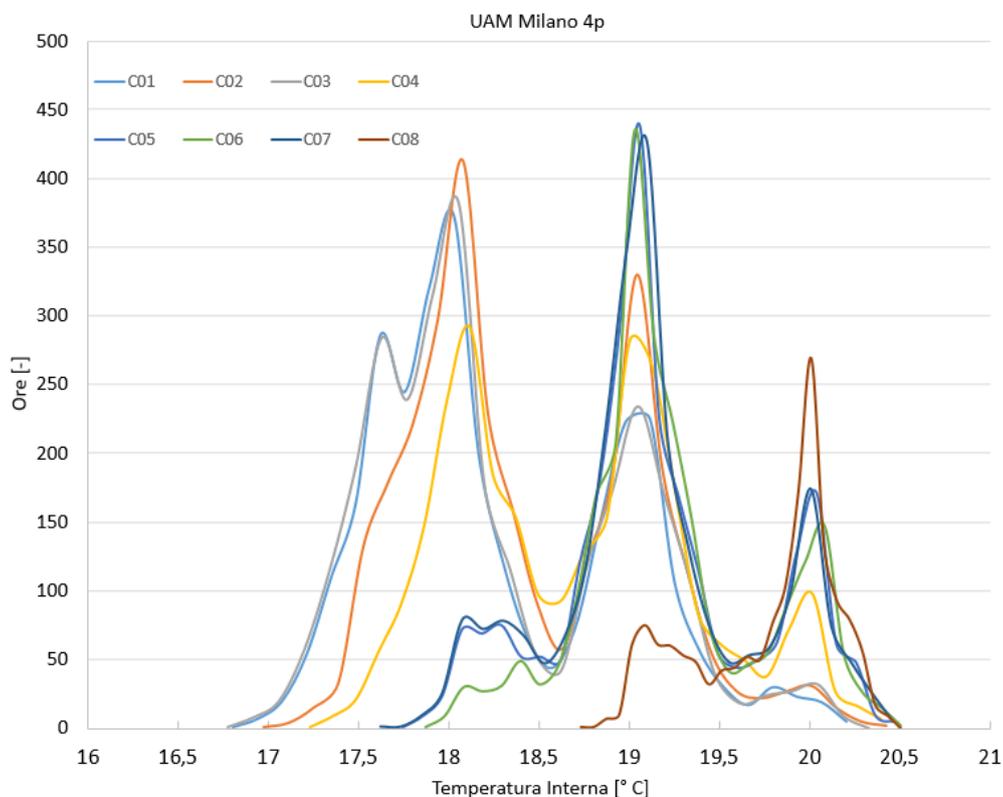


Figura 10: distribuzione di frequenza della T interna durante i periodi di accensione della pompa di calore. UAM Milano – 4 occupanti

Per lo stato di occupazione con 4 occupanti si osservano comportamenti qualitativamente simili, riportati in Figura 10. Si può affermare, in conclusione, che l'impiego dell'impianto migliora sensibilmente le condizioni di comfort, poiché non si verificano mai condizioni di forte discomfort, anche se la percentuale di tempo in cui il comfort è compreso nell'intervallo di set-point è insufficiente nei cluster da C01 a C04 nel caso di un solo occupante (e nei casi da C01 a C03 per l'occupazione con 4 persone).

Per le unità di tipo UAC si riportano direttamente (in Figura 11 per un occupante e in Figura 12 per 4 occupanti) gli andamenti delle distribuzioni di frequenza della temperatura interna durante i periodi di accensione della pompa di calore. Si osserva che le condizioni di comfort migliorano sensibilmente rispetto all'unità abitativa UAM, poiché aumentano le frazioni di tempo in cui viene garantito il mantenimento del set point. Nello stesso tempo, si deve tener presente che si riducono notevolmente i valori massimi delle distribuzioni, ovvero le ore di accensione dell'impianto.

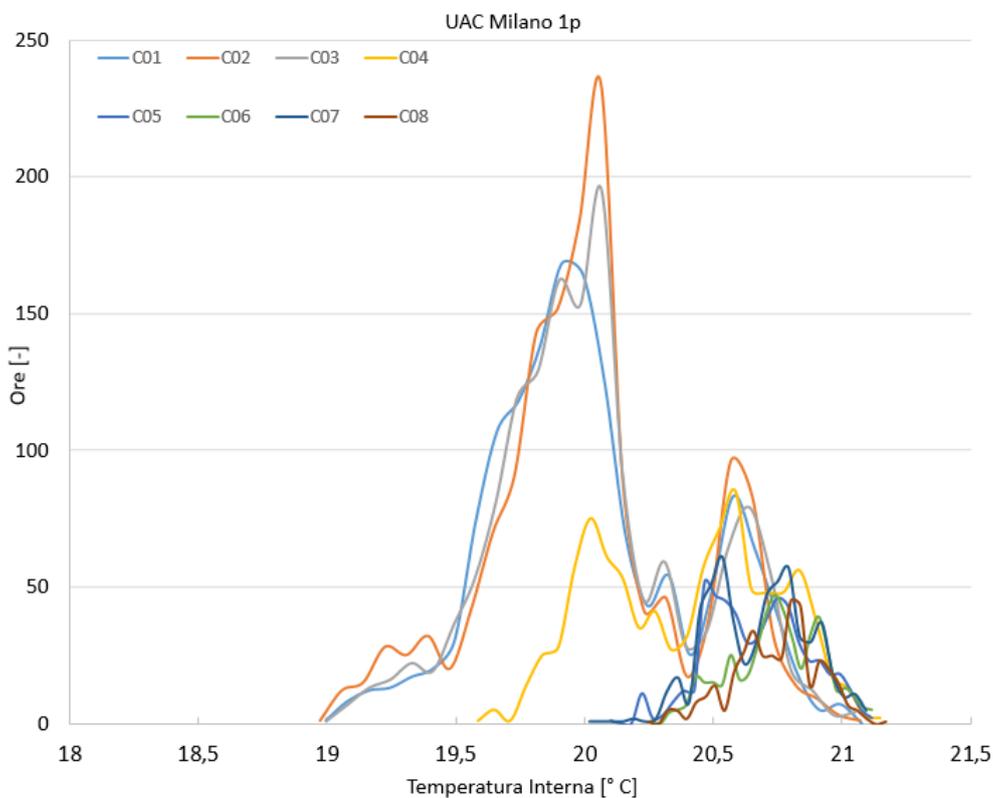


Figura 11: distribuzione di frequenza della T interna durante i periodi di accensione della pompa di calore. UAC Milano – 1 occupante

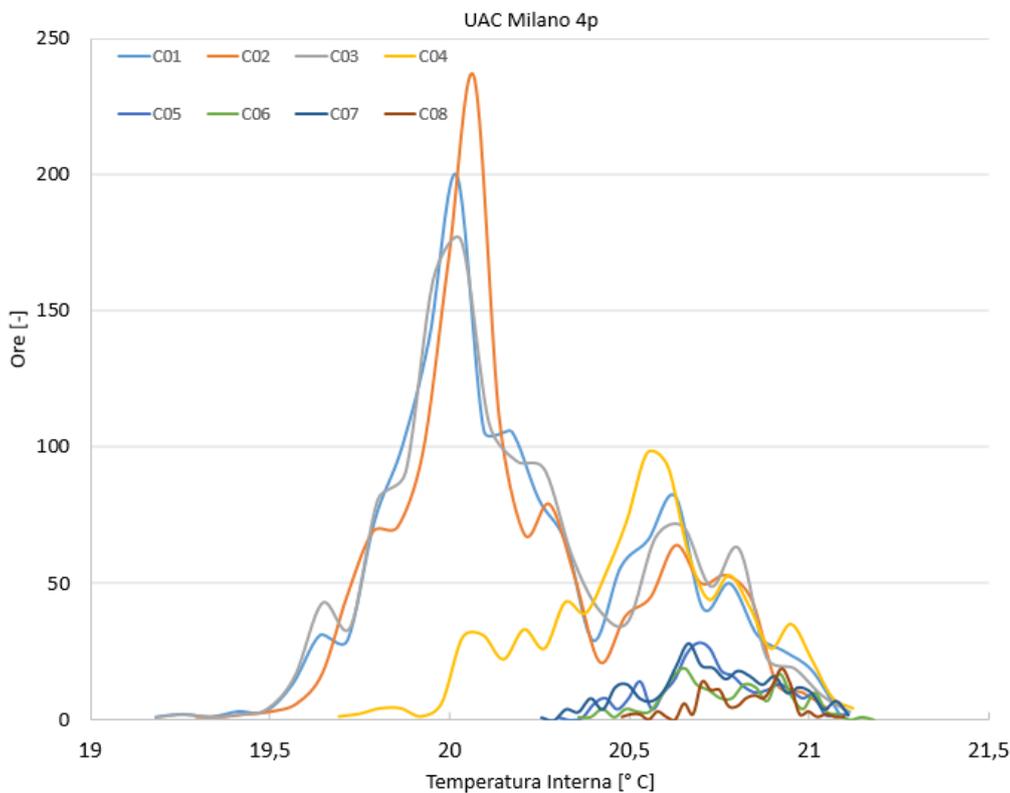


Figura 12: distribuzione di frequenza della T interna durante i periodi di accensione della pompa di calore. UAC Milano – 4 occupanti

2.2.6 Analisi degli intervalli di accensione/spegnimento della pompa di calore e della modulazione

Un primo importante indice del funzionamento della pompa di calore è quello che misura la frazione di tempo in cui la pompa di calore è accesa. Riferendosi alla località di Milano, per l'unità UAM la Tabella 12 riporta il rapporto tra le ore di accensione della pompa di calore e le ore di occupazione dell'immobile nei vari cluster, per tutti i profili di occupazione.

Tabella 12: Rapporto tra le ore di funzionamento della pompa di calore e le ore di occupazione dell'abitazione - Milano UAM

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
1p	98,8%	97,6%	98,0%	94,3%	87,5%	84,0%	87,1%	58,6%
2p	97,8%	96,1%	96,9%	92,3%	83,2%	79,3%	82,9%	49,4%
3p	98,2%	97,0%	97,5%	92,7%	83,1%	79,7%	82,8%	49,4%
4p	98,7%	97,8%	98,0%	93,8%	84,4%	81,1%	84,0%	51,0%

Per l'unità UAC si ottengono i valori illustrati in Tabella 13

Tabella 13: Rapporto tra le ore di funzionamento della pompa di calore e le ore di occupazione dell'abitazione - Milano UAC

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
1p	54,1%	56,0%	56,3%	34,3%	19,2%	16,9%	20,9%	12,7%
2p	47,5%	43,1%	45,5%	26,6%	11,1%	8,8%	11,6%	5,3%
3p	44,1%	44,2%	45,8%	25,8%	10,2%	7,1%	10,3%	4,7%
4p	43,7%	45,0%	44,4%	27,2%	8,1%	5,7%	9,1%	4,5%

Confrontando i dati delle due Tabelle precedenti con quelli sulla distribuzione delle temperature (Figure da 9 a 12), si possono effettuare alcune considerazioni riguardanti da un lato il dimensionamento e dall'altro il comfort. Ad esempio, si osserva che un'elevata percentuale di accensione dell'impianto combinata con un insufficiente mantenimento delle condizioni di comfort può essere interpretata come conseguenza di un sottodimensionamento della pompa di calore. Sarebbe necessario, tuttavia, approfondire se vi sia un legame tra queste condizioni ed il livello minimo di temperatura raggiunto nei periodi in cui l'occupante è assente. All'estremo opposto, la condizione per cui il set-point è mantenuto con una percentuale del tempo di occupazione molto alta e la pompa di calore resta accesa per un tempo molto basso potrebbe essere interpretata come conseguenza di un sovradimensionamento della pompa di calore. Effettuando valutazioni parametriche con il modello di simulazione è possibile ottimizzare la taglia della macchina sulla base della funzione obiettivo particolare. Si comprende bene come, nel caso di applicazione di una pompa di calore, anche la fase di dimensionamento richieda un'attenta valutazione delle proprietà termofisiche dell'edificio, della sua collocazione geografica e dello stato di occupazione.

Un ulteriore parametro che può essere indagato è quello del livello medio di modulazione con cui opera la pompa di calore durante la stagione invernale. Osservando la località Milano, per la tipologia UAM ed un solo occupante, si ha un valore medio di modulazione che va dal 51% del cluster C01 fino al 22% circa del cluster C08, come mostrato in Tabella 14, con una ripartizione tra i livelli (discretizzati per gradini del 20%, secondo il modello di simulazione proposto [1]) illustrata in Figura 13.

Tabella 14: Valori medi di modulazione durante il funzionamento della pompa di calore - Milano UAM 1p

C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
51,0%	45,4%	51,0%	39,8%	31,0%	29,2%	31,4%	21,6%

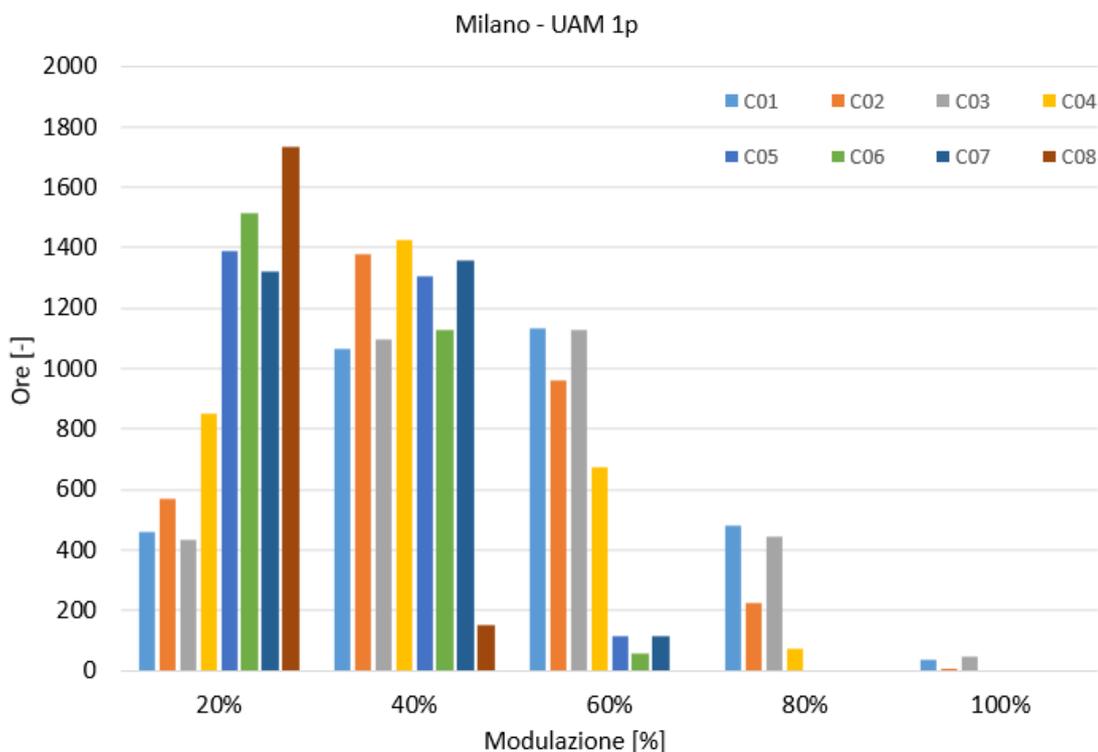


Figura 13: ripartizione temporale dei livelli di modulazione della pompa di calore – Milano UAM 1p

Il numero di occupanti sembra influire poco sul livello medio di modulazione: nel caso di 4 occupanti, infatti, la modulazione si attesta a livelli poco più bassi di quelli del caso 1p, come mostrato in Tabella 15 e Figura 14.

Tabella 15: Valori medi di modulazione durante il funzionamento della pompa di calore - Milano UAM 4p

C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
48,3%	42,2%	47,8%	35,9%	25,2%	22,8%	25,0%	10,7%

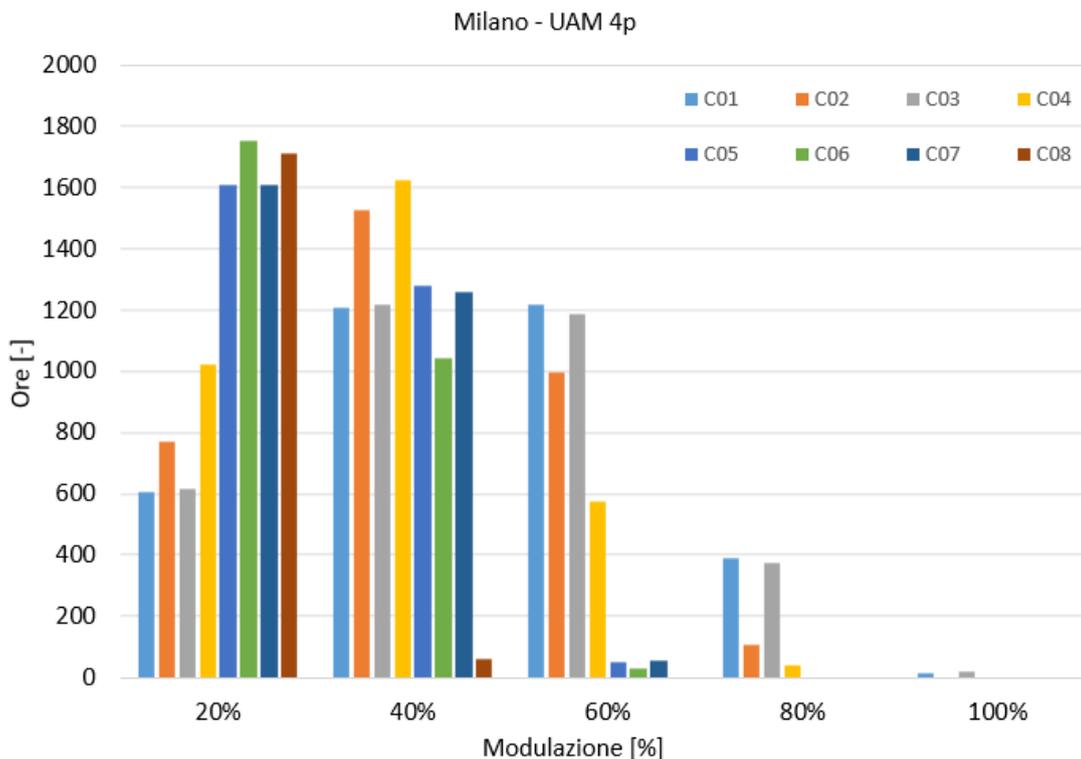


Figura 14: ripartizione temporale dei livelli di modulazione della pompa di calore – Milano UAM 4p

Per quanto riguarda i cicli on/off della pompa di calore, si può analizzare il numero di accensioni e spegnimenti nei vari casi esaminati. In particolare, partendo dal caso UAM di Milano, la Tabella 16 riporta le percentuali di ore in cui la pompa di calore è in fase di accensione (ovvero si è accesa in quell'ora) rispetto alle ore totali in cui essa è accesa.

Tabella 16: Percentuale del tempo di funzionamento con accensioni/spegnimenti della pompa di calore - Milano UAM

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
1p	11,5%	11,6%	11,7%	11,7%	13,2%	13,9%	13,2%	19,1%
2p	8,8%	9,0%	9,1%	9,5%	11,8%	12,3%	11,5%	21,8%
3p	5,3%	5,5%	5,6%	6,5%	8,7%	9,4%	8,8%	20,4%
4p	6,9%	7,1%	7,1%	8,0%	9,8%	10,6%	10,1%	20,9%

Si osserva, in generale, una bassa percentuale di tempo di accensione/spegnimento, più influenzata dal profilo di occupazione nei cluster più energivori. Nel caso della tipologia abitativa UAC, si hanno i valori riportati in Tabella 17.

Tabella 17: Percentuale del tempo di funzionamento con accensioni/spegnimenti della pompa di calore - Milano UAC

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
1p	31,1%	31,5%	29,9%	48,6%	73,9%	79,0%	71,2%	81,3%
2p	36,6%	40,5%	37,9%	57,4%	82,5%	76,8%	83,3%	81,3%
3p	37,6%	37,0%	35,7%	54,5%	82,1%	82,8%	80,8%	77,3%
4p	37,8%	37,8%	37,0%	50,2%	87,1%	80,9%	78,6%	81,0%

In questo caso le percentuali sono molto più elevate, con valori che superano ampiamente il 70% per i cluster termicamente più isolati.

Si può osservare anche la correlazione tra la percentuale di ore di accensione/spegnimento e il consumo termico unitario, come illustrato in Figura 15, in cui sono stati aggiunti anche i risultati relativi alle tipologie abitative UAS1L e UAS2L.

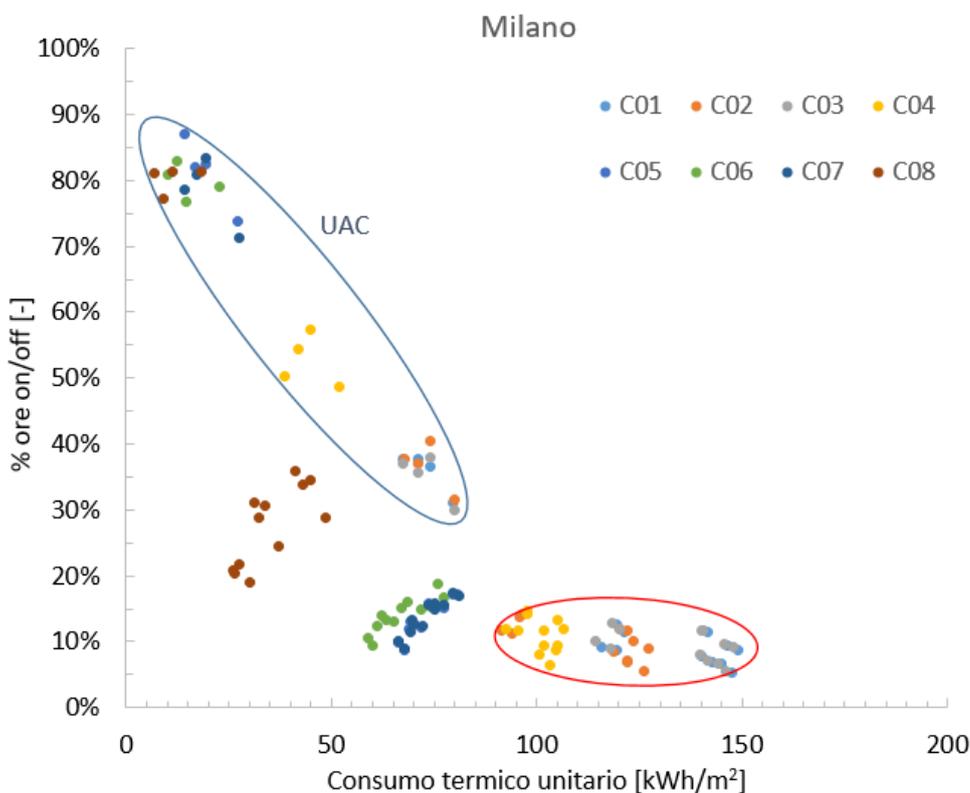


Figura 15: percentuale di ore di accensione/spegnimento in funzione del consumo unitario - Milano

Il grafico mostra che nel caso dell’unità UAC, come già evidenziato dalla Tabella, le percentuali sono le più elevate, come ci si può attendere per il fatto che i valori assoluti dei consumi sono i più bassi e, di conseguenza, la pompa di calore impiega meno tempo per fornire l’energia termica richiesta. È interessante notare anche che, al di sopra di un determinato consumo unitario, indicativamente a partire da 90 kWh/m² (regione delimitata in rosso in Figura), la percentuale di ore con accensioni/spegnimenti resta pressoché costante, con un possibile effetto di appiattimento su valori medi del 10% circa. Si può ipotizzare un legame tra tale andamento e il corretto dimensionamento della pompa di calore: più precisamente, un sovradimensionamento della pompa di calore potrebbe comportare un’eccessiva frequenza di cicli on/off, con evidenti ripercussioni sulle prestazioni e sulla durata stessa della macchina.

2.2.7 Analisi delle prestazioni - COP

Il COP medio, compreso tra i dati riportati nelle Tabelle 3, 5, 6 e 7, è calcolato come rapporto tra l'intera energia termica prodotta dalla pompa di calore nell'intera stagione di riscaldamento e l'energia elettrica necessaria per il suo funzionamento. Nella Figura 16 si riporta il suo andamento in funzione del consumo unitario, per le 4 località. In termini generali, per ciascuna località si osserva un andamento crescente all'aumentare del consumo unitario, da correlare presumibilmente con la riduzione del numero di accensioni/spegnimenti. Passando dalle località più fredde a quelle più calde si nota che, a parità di consumo unitario, il COP medio cresce, a causa delle condizioni climatiche più favorevoli.

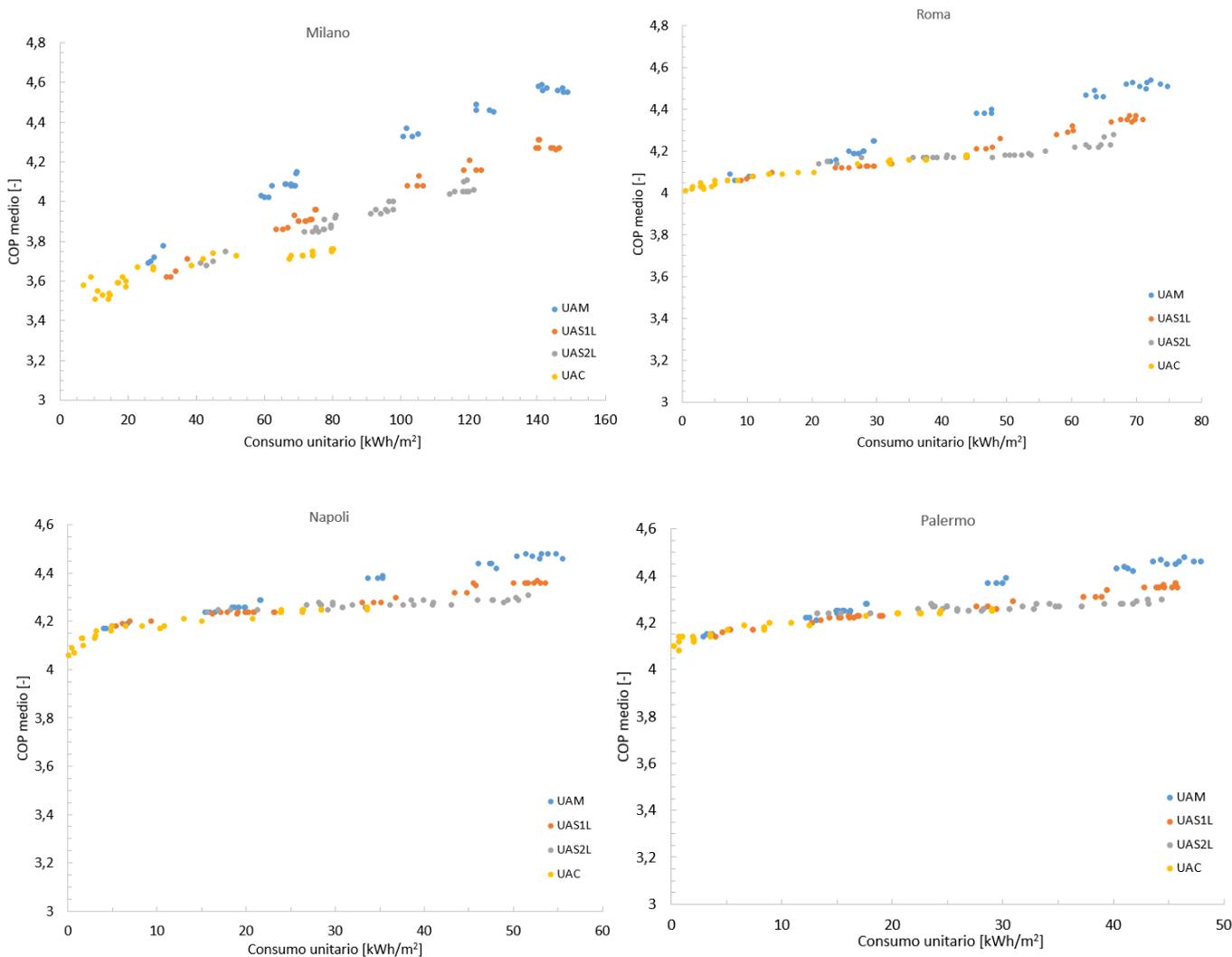


Figura 16: andamento del COP medio per le varie località in funzione del consumo unitario

2.2.8 Analisi delle logiche di funzionamento e possibili modifiche

Il modello di simulazione del comportamento edificio-impianto [1] è stato applicato con una logica di funzionamento dipendente dalla presenza di occupanti nell'abitazione (pompa di calore spenta in assenza di occupanti) e tenendo conto della differenza di temperatura tra il set-point di 20 °C e la temperatura dell'aria interna. In aggiunta, sono state simulate anche logiche di accensione/spegnimento orientate allo sfruttamento ottimale della pompa di calore, considerando la possibilità di far funzionare la macchina anche oltre tale set-point e a prescindere dalla presenza di occupanti nell'abitazione. La scelta delle logiche di gestione dei tempi di accensione/spegnimento e del livello di modulazione della pompa di calore può essere orientata secondo vari criteri, tra i quali rientrano quelli energetici e di comfort.

Per quanto riguarda l’ottimizzazione sotto il profilo del comfort per l’utenza, osservando che in varie condizioni di esercizio viene mantenuta una temperatura media interna lontana dal set-point e non sempre rientrando all’interno della fascia di comfort, si può pensare di impostare il funzionamento della pompa di calore aggiungendo, al controllo di tipo proporzionale previsto con il modello di simulazione [1], un controllo di tipo integrativo che tenga conto della differenza accumulata nel tempo tra set point e temperatura effettiva.

Per quanto riguarda l’ottimizzazione energetica, a tal fine può essere utile misurare il contributo proveniente dalla risposta dell’edificio in termini di accumulo termico. Più in particolare, l’effetto di caricamento termico della struttura può essere valutato modificando la logica di accensione della pompa di calore rispetto al set-point e sfruttando contemporaneamente le condizioni ambientali migliori. È stato proposto, ad esempio, [1] di sfruttare le condizioni ambientali in cui la differenza tra temperatura esterna ed interna è inferiore a 5 °C per far funzionare la pompa di calore, indipendentemente dalla presenza di occupanti nell’abitazione, con un set point maggiorato, a 22 °C (chiamato nel seguito set point 22), tale da consentire un caricamento termico delle strutture edilizie. Nel caso in cui la differenza tra temperatura esterna ed interna è superiore a 5 °C si segue la logica base.

L’effetto della logica set point 22 sul COP è praticamente trascurabile, come mostra la Tabella 18. Sui consumi, l’aumento è contenuto entro il 2%, con valori inferiori allo 0,5% per i cluster termicamente più isolati.

Tabella 18: Variazioni percentuali dei consumi e del COP medio con set point modificato a 22 °C - Milano UAM 1p

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
Consumo termico	1,9%	1,4%	1,9%	0,9%	0,4%	0,3%	0,4%	0,1%
COP medio	-0,02%	-0,06%	-0,10%	0,03%	-0,04%	-0,01%	0,02%	0,05%

La Figura 17 illustra la distribuzione della temperatura interna.

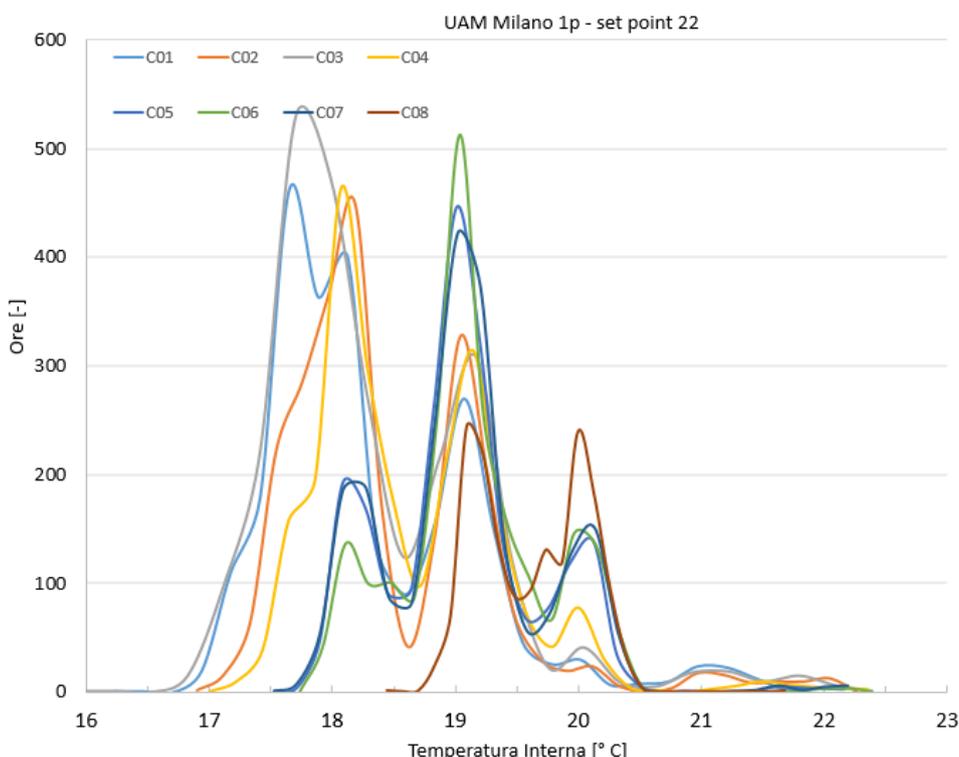


Figura 17: distribuzione di frequenza della T interna durante i periodi di accensione della pompa di calore. UAM Milano – 1 occupante – set point 22

Una delle variazioni più importanti, rispetto al caso base, è il restringimento dei picchi e l'aumento della loro altezza, ovvero una minore dispersione dei valori. L'aumento delle condizioni di comfort, seppure piuttosto basso, è quantificato nella Tabella 19.

Tabella 19: Condizioni di comfort per l'utente nei vari cluster durante i periodi di accensione dell'impianto – Milano UAM – 1p – set point 22

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
DDTb	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
DTb	67,9%	63,6%	67,4%	55,6%	23,2%	17,7%	23,7%	0,1%
C	31,7%	35,2%	31,6%	43,6%	76,2%	81,8%	75,5%	99,9%
DTa	0,4%	1,2%	0,9%	0,8%	0,6%	0,5%	0,8%	0,1%
DDTa	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Il rapporto tra le ore di funzionamento della pompa di calore e quelle di occupazione dell'abitazione, illustrato nella Tabella 20, cresce leggermente rispetto al caso base, superando per i cluster C01, C02 e C03 la soglia del 100% in quanto la macchina, per la logica di funzionamento analizzata, ha facoltà di accendersi a prescindere dalla condizione di presenza dell'occupante.

Tabella 20: Rapporto tra le ore di funzionamento della pompa di calore e le ore di occupazione dell'abitazione - Milano UAM 1p – set point 22

C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
101,8%	100,1%	100,8%	95,3%	87,2%	84,5%	88,4%	59,4%

Rispetto al caso base, i valori medi di modulazione restano praticamente invariati, come si può vedere dalla Tabella 21 e dalla Figura 18

Tabella 21: Valori medi di modulazione durante il funzionamento della pompa di calore - Milano UAM 1p – set point 22

C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
50,7%	45,0%	50,4%	39,8%	30,9%	29,1%	31,3%	21,6%

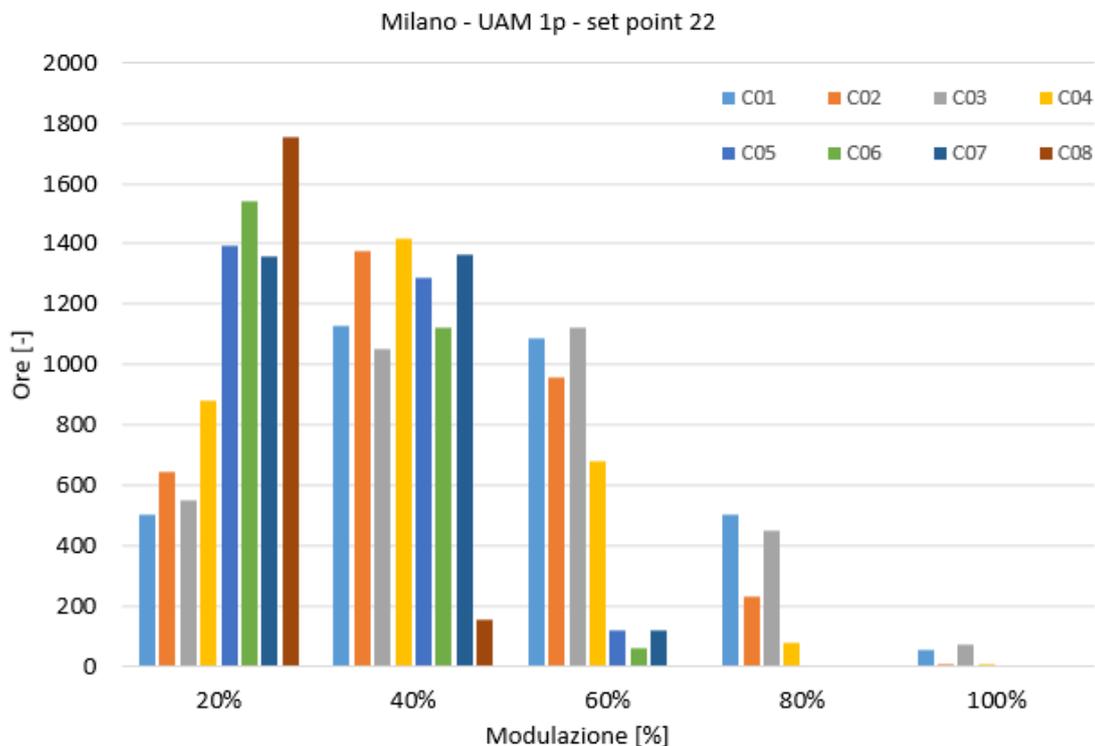


Figura 18: ripartizione temporale dei livelli di modulazione della pompa di calore – Milano UAM 1p – set point 22

I cicli on/off della pompa di calore con la logica set point 22, misurati come percentuale delle ore con accensione sul totale delle ore in cui la macchina è accesa, hanno valori quasi uguali a quelli del caso base e sono riassunti in Tabella 22.

Tabella 22: Percentuale del tempo di funzionamento con accensioni/spegnimenti della pompa di calore - Milano UAM – 1p – set point 22

C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
11,5%	11,7%	11,9%	12,1%	14,2%	14,1%	13,3%	19,4%

Le varie simulazioni [1] hanno compreso anche l’analisi di differenti logiche di modulazione. In particolare sono state definite due logiche alternative a quella per gradini costanti del 20%. Una è quella denominata MOD10, l’altra MOD40, secondo quanto riassunto in Figura 19, in cui ΔT rappresenta la differenza di temperatura tra quella di set-point (20 °C) e quella effettiva dell’aria interna. Rispetto alla logica di modulazione di base, quindi, MOD10 ha una caratteristica di intervento con velocità crescente con l’aumentare della differenza rispetto al set point (ovvero decrescente man mano che le condizioni si avvicinano a quelle di set point) e possibilità di arrivare fino al 10% della modulazione. Viceversa, la logica MOD40 ha una caratteristica di intervento che decresce all’aumentare della differenza rispetto al set point (quindi sempre più elevata all’avvicinarsi delle condizioni di set point) e come valore minimo di modulazione ha il 40% della potenza nominale.

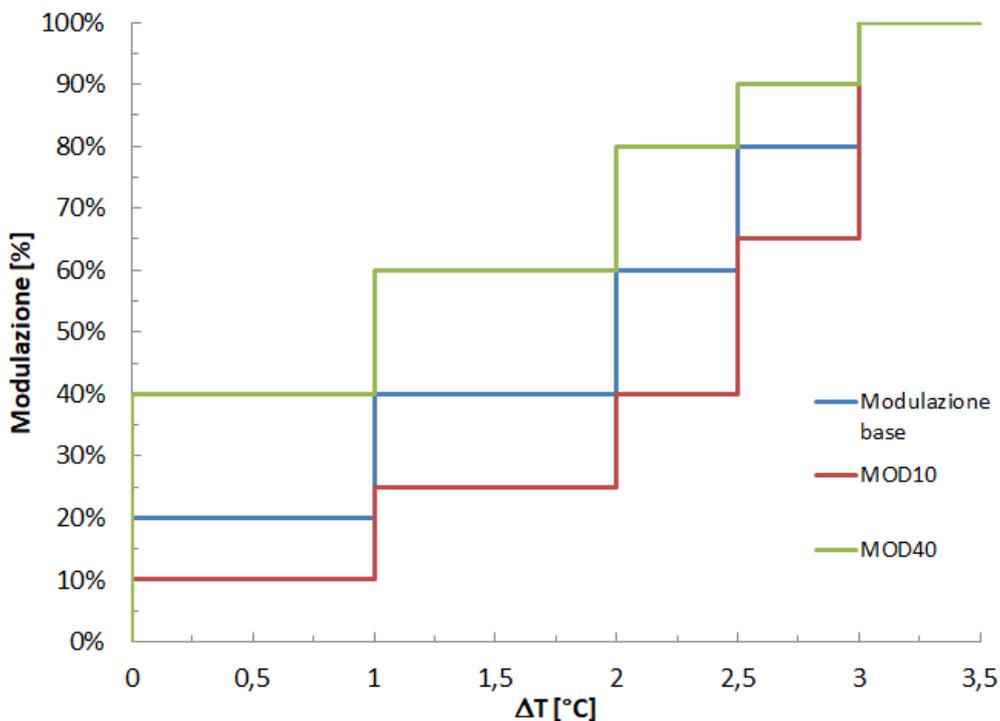


Figura 19: logiche di modulazione di base, MOD10, MOD40

L'azione delle logiche alternative a quella di base può essere misurata confrontandone gli effetti sulle grandezze principali (consumi, COP medio, accensioni/spengimenti)

Riferendosi per semplicità e per ragioni di spazio al solo caso UAM di Milano con 1 occupante, con le due logiche MOD10 e MOD40 in Tabella 23 si riportano le variazioni percentuali rispetto alla modulazione base.

Tabella 23: Variazioni percentuali dei consumi e del COP medio con logiche di modulazione MOD10 e MOD40 - Milano UAM 1p

Logica		C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
MOD10	Consumo termico	-6,0%	-6,3%	-5,2%	-5,6%	-6,6%	-6,4%	-6,7%	-5,1%
	COP medio	-0,3%	0,1%	0,0%	0,5%	1,9%	2,3%	1,7%	2,2%
MOD40	Consumo termico	7,3%	8,1%	6,2%	6,9%	6,1%	5,9%	6,0%	2,5%
	COP medio	-0,5%	-1,1%	-0,8%	-1,7%	-1,9%	-1,7%	-1,9%	1,3%

Una modulazione fino a valori del 10% del carico (MOD10) consente un risparmio termico superiore al 5% in tutti i cluster. Nei casi in cui si ha anche un concomitante miglioramento del COP medio ciò si traduce in un effettivo risparmio di energia elettrica, data la relazione tra consumi termici, consumi elettrici e COP medio. Quest'ultimo peggiora leggermente solo nel cluster C01, presumibilmente perché l'effetto delle minori dispersioni, legato ad una temperatura mediamente inferiore, a causa della logica di modulazione, non compensa la riduzione del COP per i regimi di modulazione più bassi, che evidentemente sono più frequenti di prima. (In particolare, nel caso base il prodotto delle ore con modulazione al 20% per l'energia a quella modulazione incide sul totale meno della metà dello stesso prodotto nel caso MOD10, calcolato per le modulazioni al 10% e al 25%)

Nel caso di modulazione fino al 40% del carico (MOD40) i consumi termici aumentano per tutti i cluster e, a causa della contemporanea riduzione del COP medio, in nessun caso si ottiene una riduzione del consumo elettrico stagionale.

Riferendosi al comfort, si può analizzare anche l’impatto delle logiche modificate sulla distribuzione delle temperature all’interno dell’abitazione. Per la logica MOD10 si riportano gli andamenti in Figura 20.

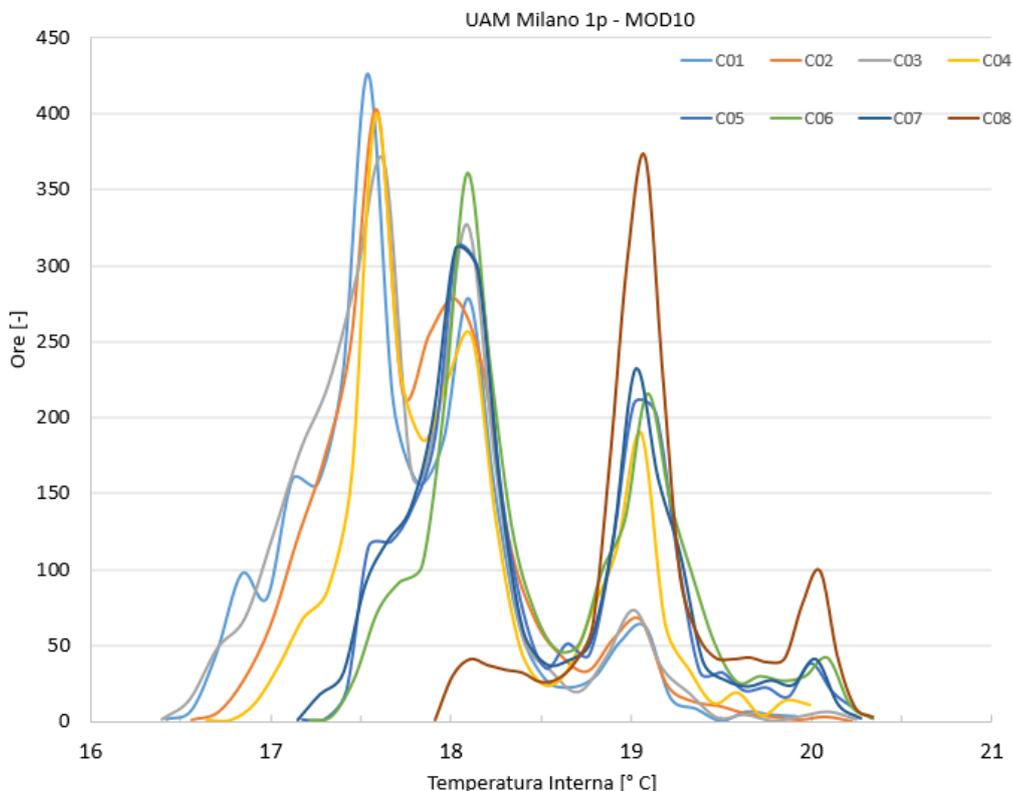


Figura 20: distribuzione di frequenza della T interna durante i periodi di accensione della pompa di calore. UAM Milano – 1p – MOD10

Rispetto al caso base, si osserva una riduzione della temperatura di alcuni picchi (cluster C02 e C03) e un peggioramento generalizzato delle condizioni di comfort. La Tabella 24 quantifica queste variazioni secondo la suddivisione in fasce di comfort definite in precedenza. Fatta eccezione per il cluster C08, nel quale si ha una riduzione delle condizioni di comfort del 10% circa, rispetto al caso base, in termini di tempo in cui esse vengono mantenute, nei cluster termicamente più isolati la condizione di comfort viene mantenuta per una percentuale indicativamente dimezzata. Nei cluster più energivori, invece, il comfort, già poco garantito nel caso base, peggiora ulteriormente, tanto che il mantenimento delle condizioni di comfort è assicurato per un tempo pari o inferiore al 10% del funzionamento della pompa di calore.

Tabella 24: Condizioni di comfort per l’utente nei vari cluster durante i periodi di accensione dell’impianto – Milano UAM – 1p – MOD10

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
DDTb	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
DTb	91,9%	90,0%	91,5%	76,4%	61,0%	57,0%	61,3%	10,1%
C	8,2%	10,0%	8,5%	23,7%	39,1%	43,0%	38,7%	89,9%
DTa	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
DDTa	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Adottando la logica di modulazione MOD40, le temperature si distribuiscono secondo quanto riportato in Figura 21. Si osserva che vari picchi di distribuzione si spostano a temperature più alte di circa 1 °C. La Tabella 25 riporta le percentuali in cui si ripartiscono le temperature nelle fasce di comfort.

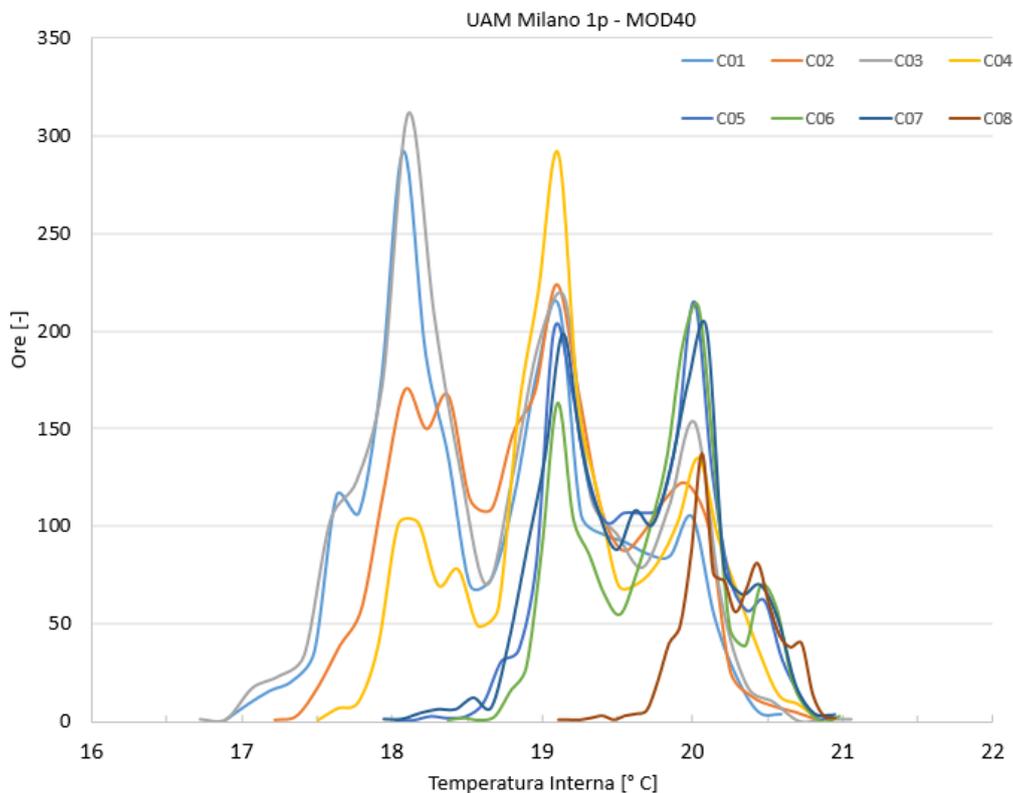


Figura 21: distribuzione di frequenza della T interna durante i periodi di accensione della pompa di calore. UAM Milano – 1p – MOD40

Tabella 25: Condizioni di comfort per l'utente nei vari cluster durante i periodi di accensione dell'impianto – Milano UAM – 1p – MOD40

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
DDTb	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
DTb	48,1%	35,2%	48,0%	20,2%	0,5%	0,2%	1,4%	0,0%
C	51,9%	64,8%	52,0%	79,8%	99,5%	99,8%	98,6%	100,0%
DTa	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
DDTa	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Nei cluster C01, C02 e C03 la percentuale di comfort migliora molto, arrivando sopra il 50% e in un caso quasi al 65%. Nei cluster termicamente più isolati viene sempre garantito il comfort.

Per quanto riguarda gli effetti sulla modulazione della pompa di calore (Tabella 26), con la logica MOD10 si ha una leggera diminuzione del valore medio per i cluster più energivori, che aumenta per i cluster termicamente più isolati. Mentre nei primi la distribuzione sui vari gradini non cambia molto (Figura 22), rispetto al caso base, nei secondi si sfruttano meglio i gradini di modulazione più bassi, essendo minore il fabbisogno.

Tabella 26: Valori medi di modulazione durante il funzionamento della pompa di calore - Milano UAM 1p – MOD 10 e MOD40

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
MOD10	47,3%	41,6%	47,5%	35,9%	26,7%	25,1%	26,6%	15,9%
MOD40	57,6%	53,0%	57,4%	49,0%	42,5%	41,6%	42,3%	40,0%

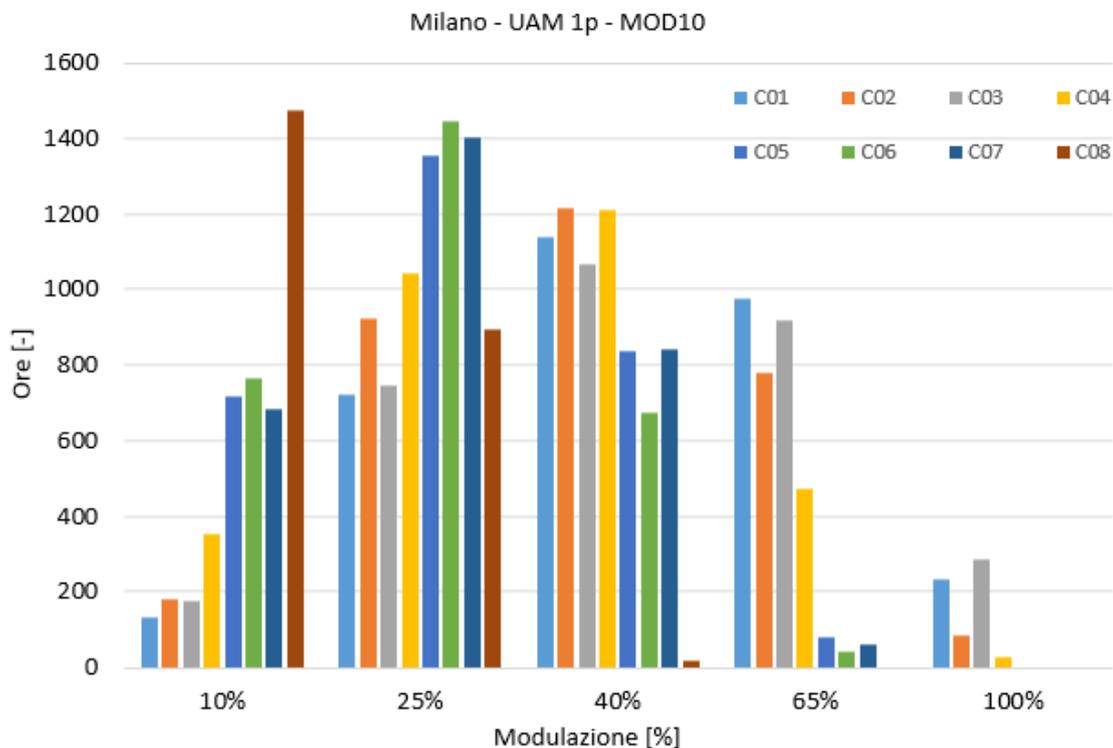


Figura 22: ripartizione temporale dei livelli di modulazione della pompa di calore – Milano UAM 1p - MOD10

La logica MOD40, viceversa, per sua stessa costruzione spinge i valori medi di modulazione verso l’alto, tanto più vicino al 40% (soglia minima) quanto più i valori medi del caso base sono lontani da tale valore. Ciò è evidente anche dall’andamento della distribuzione delle ore ai vari livelli di modulazione (Figura 23).

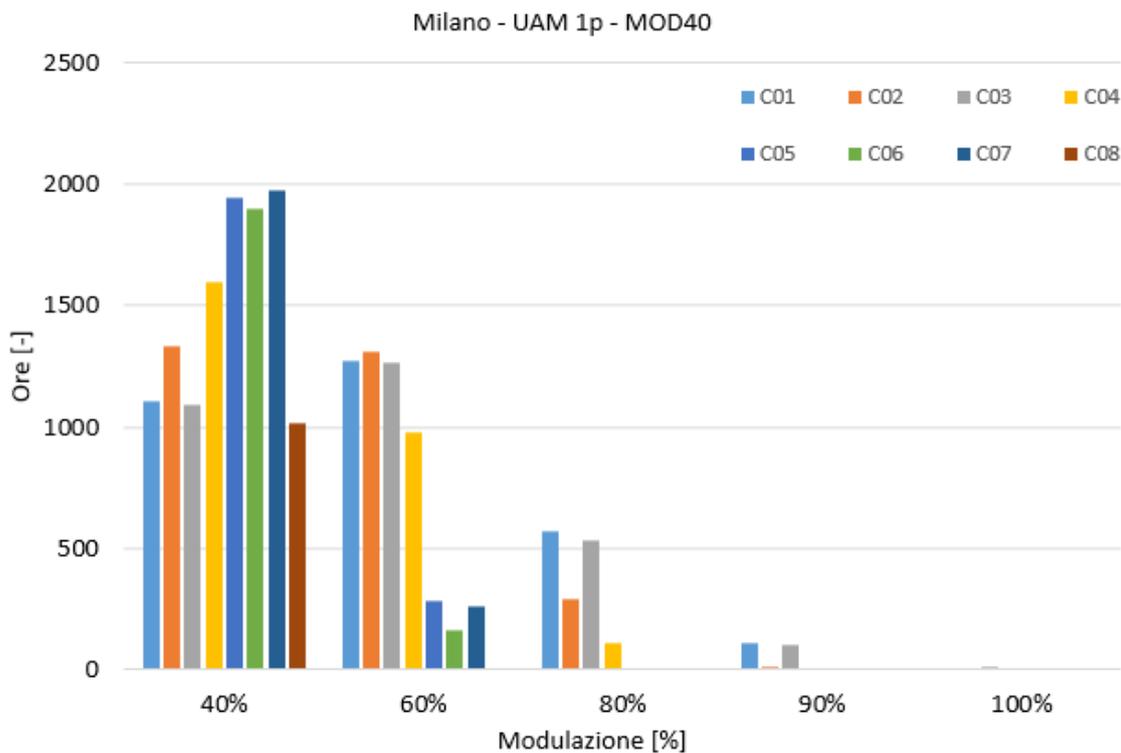


Figura 23: ripartizione temporale dei livelli di modulazione della pompa di calore – Milano UAM 1p – MOD40

Osservando il rapporto tra le ore di accensione e la presenza dell'utente (Tabella 27) si nota che con la logica MOD10 si ottiene l'effetto di mantenere accesa la pompa di calore per un tempo maggiore, grazie ad una capacità di modulare un carico più basso più a lungo, coerentemente con la forte riduzione delle ore (percentuali) di on/off riportata nella successiva Tabella 28. Con la logica di modulazione MOD40, viceversa, mentre per i cluster C01, C02 e C03 la riduzione della frazione di ore di funzionamento durante la presenza dell'utente è al massimo del 6%, per gli altri si hanno riduzioni che vanno dal 23% a più del 40% (cluster C08). Analizzando questo aspetto da un altro punto di vista, la pompa di calore funziona per un minor numero di ore con un gradino di modulazione minima molto elevato. In casi estremi (come in effetti si verifica nel caso UAC, qui non riportato) nei cluster termicamente più isolati la pompa di calore opera quasi sempre per un'ora per volta, con conseguenze negative per i continui transitori.

Tabella 27: Rapporto tra le ore di funzionamento della pompa di calore e le ore di occupazione dell'abitazione - Milano UAM 1p – MOD10 e MOD40

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
MOD10	99,5%	98,9%	99,2%	96,6%	92,8%	90,9%	92,9%	74,3%
MOD40	95,2%	91,6%	93,3%	83,6%	69,2%	64,1%	69,6%	31,7%

Per quanto riguarda i cicli di accensione/spegnimento, essi si modificano come in Tabella 28 (con la condizione di riferimento riportata nella prima riga della precedente Tabella 16)

Tabella 28: Percentuale del tempo di funzionamento con accensioni/spegnimenti della pompa di calore - Milano UAM – 1p MOD10 e MOD40

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
MOD10	11,4%	11,5%	11,4%	11,4%	11,6%	11,6%	11,3%	12,7%
MOD40	12,5%	13,4%	12,8%	16,0%	21,2%	23,0%	20,6%	45,5%

Con la logica di modulazione MOD10 le ore di accensione/spegnimento restano percentualmente quasi le stesse per i cluster C01, C02 e C03 e si riducono, portandosi nell'intorno della stessa percentuale, per tutti gli altri. In realtà, il numero di ore in cui la pompa di calore è accesa non varia molto per i primi 4 cluster, (essendo già molto sfruttata anche nel caso base), aumenta del 7% circa per i cluster C05, C06 e C07 ed è maggiore del 27% circa per il cluster C08. Nel caso della logica MOD40 la percentuale di accensioni/spegnimenti nei cluster C01, C02 e C03 aumenta leggermente, mentre l'aumento è sempre maggiore man mano che si considerano cluster termicamente più isolati. Contemporaneamente per tutti i cluster si riducono le ore in cui la pompa di calore è accesa.

2.2.9 Effetto dell'aumento della taglia della pompa di calore

È stato analizzato anche l'effetto dell'aumento di taglia della pompa di calore, considerando una macchina da 6 kW elettrici nominali. Di seguito si illustrano i risultati per il caso UAM di Milano 1p, il più critico relativamente al mantenimento delle condizioni di comfort.

Per quanto riguarda i consumi, la Tabella 34 riporta i dati riassuntivi delle variazioni del consumo termico, e del COP rispetto al caso base. Si osserva un aumento generalizzato dei consumi termici correlato ad un contemporaneo peggioramento del COP medio. Quest'ultimo aspetto è da correlare con un maggior impiego della pompa di calore a temperature ambiente più basse, rispetto al caso base, poiché a parità di modulazione viene immessa più energia, pertanto si riduce la temperatura media esterna a cui opera la pompa di calore.

Tabella 29: Variazioni percentuali dei consumi e del COP medio con pompa di calore da 6 kW - Milano UAM 1p

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
Consumo termico	6,2%	6,1%	5,3%	5,5%	4,0%	3,9%	4,0%	1,9%
COP medio	-5,2%	-5,0%	-5,3%	-5,1%	-4,5%	-4,2%	-4,6%	-3,0%

Con la pompa di calore di taglia maggiore si ottiene la distribuzione delle temperature (riguardante i periodi di accensione della pompa di calore) mostrata in Figura 24. Si osserva un aumento di circa 0,5 °C della temperatura di maggior frequenza nei cluster C01, C02 e C03 ma, contemporaneamente aumenta in modo significativo la frequenza del picco a 19 °C.

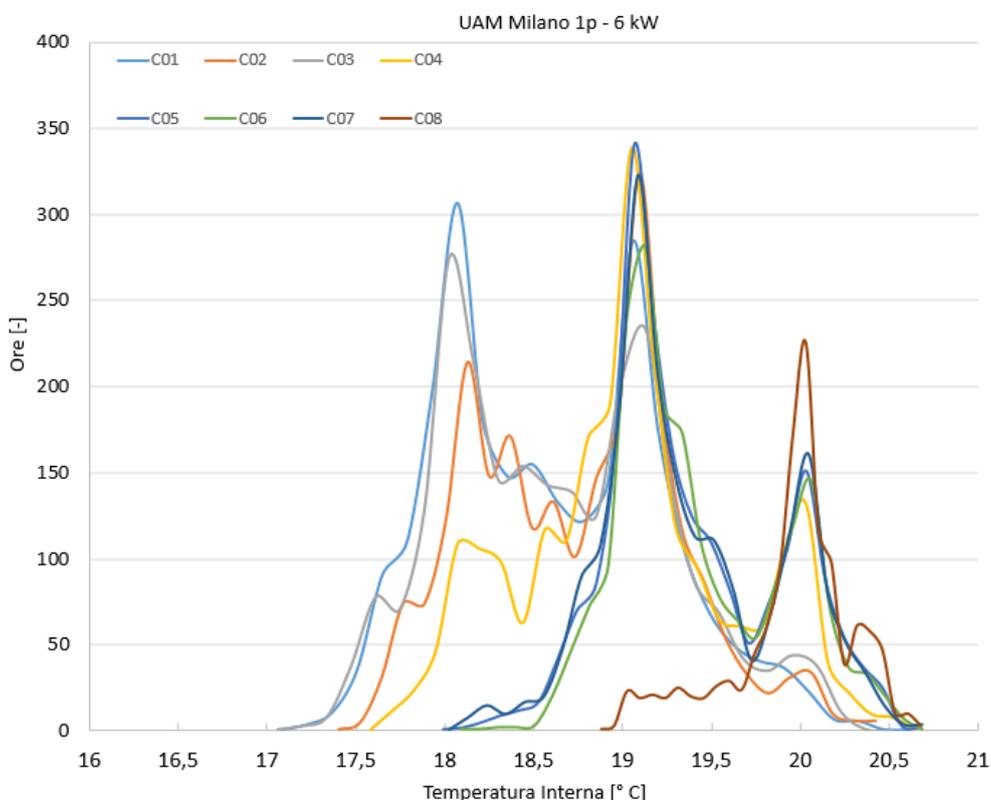


Figura 24: distribuzione di frequenza della T interna durante i periodi di accensione della pompa di calore. UAC Milano – 1 occupante – pompa di calore da 6 kW

La combinazione di questi due effetti è quantificata meglio osservando la ripartizione delle fasce di comfort come già analizzato in precedenza per il caso base. In particolare, riferendosi ai soli periodi di accensione della pompa di calore, si ottengono i risultati illustrati in Tabella 30.

Tabella 30: Condizioni di comfort per l'utente nei vari cluster durante i periodi di accensione dell'impianto – Milano UAM – 1p – 6 kW

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
DDTb	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
DTb	50,9%	39,8%	48,7%	21,9%	2,0%	0,5%	3,0%	0,0%
C	49,1%	60,2%	51,3%	78,1%	98,0%	99,6%	97,0%	100,0%
DTa	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
DDTa	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Nei cluster C01, C02 e C03 la percentuale di comfort è molto superiore al caso base, arrivando fino al 50% e in un caso al 60%. Nei cluster termicamente più isolati viene garantito il comfort con percentuali uguali superiori al 97%.

Per quanto riguarda le ore di accensione rispetto alla presenza dell'utente (Tabella 31), con la pompa di calore più grande si osserva che nei cluster C01, C02 e C03 la percentuale rimane superiore al 95%, per i cluster C05, C06 e C07 tale valore si riduce di 8÷10 punti percentuali rispetto al caso base, e del 15% circa per il cluster C08. Essendo il profilo di occupazione rimasto il medesimo, questo dato indica anche che, eccettuati i cluster C01, C02 e C03, si riducono sensibilmente le ore di accensione (del 10% circa per i cluster C05, C06 e C07 e del 25% per il C08).

Tabella 31: Rapporto tra le ore di funzionamento della pompa di calore e le ore di occupazione dell'abitazione - Milano UAM 1p – 6 kW

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
1p	97,4%	95,8%	96,7%	90,5%	79,2%	74,9%	79,4%	43,5%

L'andamento della modulazione è riassunto in Tabella 32 per quanto riguarda il valore medio e in Figura 25. Il livello medio si riduce del 20÷25% circa, tranne che per il C08, per il quale si riduce molto meno.

Tabella 32: Valori medi di modulazione durante il funzionamento della pompa di calore - Milano UAM 1p – 6 kW

C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
38,4%	34,4%	38,1%	30,8%	24,8%	23,7%	24,8%	20,1%

Milano - UAM 1p - 6 kW

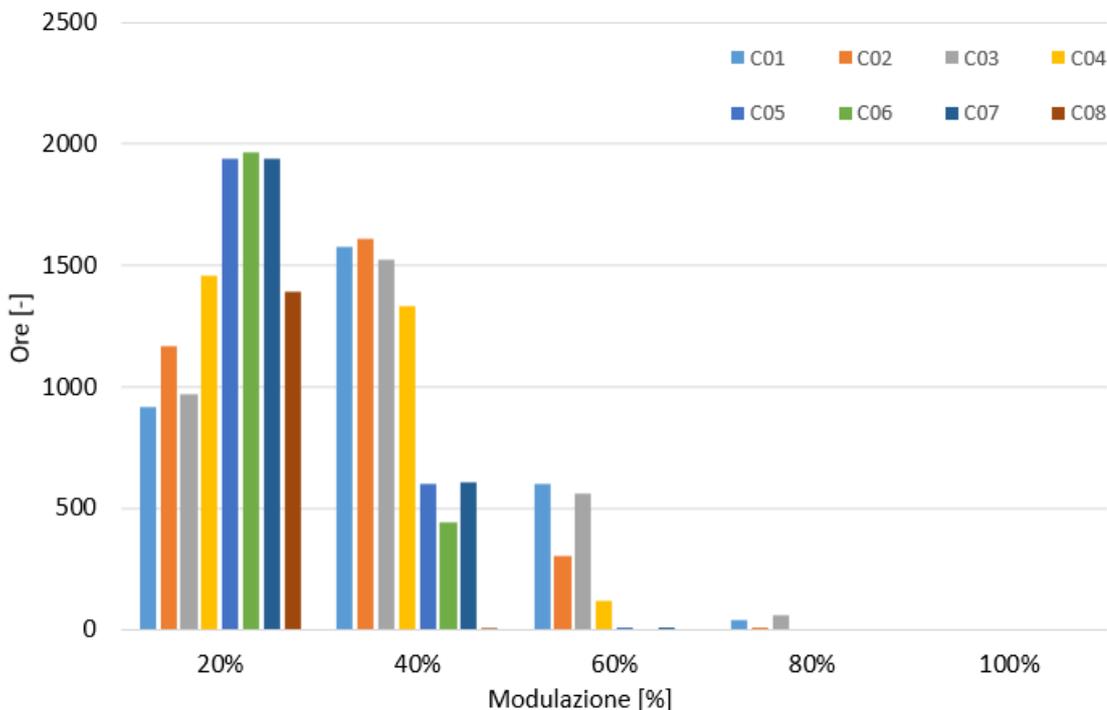


Figura 25: ripartizione temporale dei livelli di modulazione della pompa di calore – Milano UAM 1p – 6 kW

Analizzando i cicli di accensione/spegnimento della pompa di calore, in analogia con quanto effettuato per il caso base, la Tabella 33 illustra le percentuali di ore nelle quali la pompa di calore è in fase di accensione rispetto alle ore totali in cui essa è accesa.

Tabella 33: Percentuale del tempo di funzionamento con accensioni/spegnimenti della pompa di calore - Milano UAM 1p – 6 kW

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
1p	11,7%	11,9%	11,7%	13,4%	16,4%	16,6%	15,9%	34,3%

Per quanto riguarda i consumi, la Tabella 34 riporta i dati riassuntivi delle variazioni del consumo termico, e del COP rispetto al caso base. Si osserva un aumento generalizzato dei consumi termici correlato ad un contemporaneo peggioramento del COP medio. Quest'ultimo aspetto è da correlare con un maggior impiego della pompa di calore a temperature ambiente più basse, rispetto al caso base, poiché a parità di modulazione viene immessa più energia, pertanto si riduce la temperatura media esterna a cui opera la pompa di calore.

Tabella 34: Variazioni percentuali dei consumi e del COP medio con pompa di calore da 6 kW - Milano UAM 1p

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08
Consumo termico	6,2%	6,1%	5,3%	5,5%	4,0%	3,9%	4,0%	1,9%
COP medio	-5,2%	-5,0%	-5,3%	-5,1%	-4,5%	-4,2%	-4,6%	-3,0%

A conclusione dell'analisi degli effetti di varie modifiche rispetto alla configurazione di base, si ritiene utile far notare la complessità di valutare attraverso un solo parametro il miglioramento conseguibile. Ad esempio, confrontando tra loro gli effetti sul comfort della soluzione MOD40 e della macchina da 6 kW, si può osservare che essi sono simili, con condizioni leggermente migliori nel primo caso (Tabella 25 vs Tabella 30). Tra le due soluzioni, i consumi elettrici sono inferiori per il MOD40 (cfr. Tabella 23 e Tabella 34). In questo caso, l'adozione di una logica opportuna comporta vantaggi sia energetici che di comfort rispetto ad un semplice sovradimensionamento.

2.2.10 Proposte migliorative

Sulla base dei risultati analizzati in questa LA, sarebbe utile valutare anche logiche più complesse di quelle qui esaminate. Ulteriori sviluppi migliorativi, principalmente orientati al comfort dell'utenza nelle tipologie costruttive meno performanti dal punto di vista energetico, potrebbero essere i seguenti:

- L'aggiunta, al controllo proporzionale previsto dal modello di simulazione, di un controllo di tipo integrativo basato sulla differenza cumulata nel tempo tra set point e temperatura effettiva.
- L'inserimento di un controllo sul livello di temperatura dell'abitazione a prescindere dall'occupazione dello stesso, per limitare i transitori più gravosi, soprattutto in caso di scarsa occupazione.
- L'introduzione, anche solo in forma semplificata, di alcuni dei principi del Demand Side Management [4] come ad esempio l'anticipo dell'accensione/spegnimento dell'impianto rispetto all'effettivo profilo di occupazione, pur in assenza di un accumulo termico tradizionale.

3 Conclusioni

Nella presente LA è stata effettuata un'analisi puntuale dei risultati prodotti dalle simulazioni dinamiche prodotte con modello sviluppato in una precedente LA [1].

Sono stati definiti criteri di confronto relativamente alle prestazioni energetiche e al comfort dell'utenza. Per le prime sono stati utilizzati il consumo termico per unità di superficie riscaldata e il valore medio del COP, per il secondo sono state elaborate le distribuzioni di frequenza della temperatura dell'abitazione e sono state definite fasce di comfort con appositi intervalli di scostamento rispetto al set-point.

Le analisi sono state ristrette ad alcuni casi significativi, estratti da quelli simulati (oltre 500), e mostrano in generale che le logiche di gestione degli intervalli di accensione/spegnimento e dei livelli di modulazione di una pompa di calore aria-aria (quindi priva di accumulo tradizionale) debbono essere attentamente calibrate in base ad alcune caratteristiche principali: zona climatica, tipo di costruzione dell'edificio (ovvero involucro e proprietà disperdenti), profilo di occupazione. Rispetto ad un impianto di tipo tradizionale, che nella maggior parte dei casi viene dimensionato per il servizio più gravoso in termini di potenza richiesta (ovvero la produzione di acqua calda sanitaria) e la cui scelta, pertanto, è molto spesso slegata da una vera procedura di dimensionamento, nel caso di pompa di calore aria-aria (ad esclusivo scopo di riscaldamento, quindi), la valutazione della migliore taglia e delle logiche di accensione/spegnimento deve essere condotta in modo integrato. L'attività di analisi puntuale dei risultati delle simulazioni mostra l'influenza di molti parametri sul corretto dimensionamento della pompa di calore, sui consumi finali per riscaldamento, sulle prestazioni della pompa di calore e sulle condizioni di comfort per l'utenza. In particolare, si può confermare, sulla base di risultati quantitativi, la necessità che la struttura edilizia abbia caratteristiche di isolamento termico superiori ad un livello minimo, pena l'impossibilità di garantire il comfort in tutte le condizioni climatiche, anche se si fa ricorso al sovradimensionamento della macchina e/o a logiche di gestione ottimizzate.

Dopo aver esaminato i risultati delle simulazioni effettuate con una logica definita di base, che prevede l'accensione dell'impianto di riscaldamento solo in presenza dell'utente e con una modulazione della potenza termica prodotta proporzionale alla differenza tra un set point fisso a 20 °C e la temperatura effettiva con retroazione su base oraria, è stato possibile studiare gli effetti di alcune modifiche.

Un'importante modifica indagata è stata quella della scala di proporzionalità della modulazione in funzione della differenza di temperatura, con due alternative aventi risposta iniziale più rapida o più lenta di quella di base e livello di modulazione minimo rispettivamente più basso o più alto. Riferendosi ad una specifica casistica (Milano, unità monofamiliare, 1 solo occupante) si è osservato che con la riduzione del livello di modulazione minima dal 20% al 10% si ottengono riduzioni del consumo termico superiori al 5% in tutti i casi analizzati, a costo di un generale peggioramento delle condizioni di comfort, che risulta inadeguato per le tipologie di edifici termicamente meno isolati. Viceversa, con una modulazione minima aumentata dal 20% al 40%, il comfort migliora sensibilmente anche per gli edifici con prestazioni energetiche più scarse, anche se i consumi termici crescono di una percentuale del 7% circa rispetto al caso base.

In più, è stato valutato il vantaggio dell'accumulo termico nelle strutture con un algoritmo appositamente studiato per caricare la struttura edilizia durante gli intervalli in cui la pompa di calore fornisce prestazioni con COP più elevato. In questo caso, si consegue un piccolo vantaggio di comfort, rispetto al caso base, con un altrettanto piccolo incremento dei consumi (< 2%).

Avendo verificato, per il caso base scelto, un possibile effetto di sottodimensionamento della pompa di calore, è stato indagato l'effetto dell'aumento della taglia della macchina. La simulazione del comportamento di una PdC da 6 kW ha fornito come risultati un miglioramento delle condizioni di comfort rispetto al caso base, con un significativo aumento dei consumi elettrici, fino oltre il 10% in alcuni casi, per la combinazione dell'aumento di quelli termici e del peggioramento del COP medio. Il confronto tra due soluzioni diverse, una con diversa modulazione (MOD40) ed una con aumento di taglia, ha evidenziato bene la complessità della valutazione del miglioramento conseguibile rispetto al riferimento di base. Nel caso specifico, pur garantendo condizioni di comfort simili tra loro, la prima soluzione garantisce minori consumi

elettrici. La soluzione innovativa rappresentata dal caricamento termico della struttura in corrispondenza delle fasi giornaliere di miglior prestazione della pompa di calore, fornisce pochi punti percentuali di vantaggio anche se, su questo fronte, non sono state condotte ottimizzazioni.

A conclusione dell'analisi sono state proposte alcune soluzioni più complesse, che potranno essere oggetto di ulteriori indagini in attività successive.

4 Riferimenti bibliografici

1. G. Salvadori, F. Fantozzi, F. Leccese, G. Lamberti, L. Formicola, Simulazioni del comportamento energetico dinamico di edifici con PdC e accumuli idronici assenti o trascurabili per la climatizzazione invernale, Report RdS/PTR2021/341
2. M. Pieve, F. D'Annibale, L. Simonetti, R. Trinchieri, Validazione di modello grey-box di simulazione dinamica degli edifici, Report RdS/PTR2021/340
3. G. Salvadori, L. Formicola, G. Lamberti, Campione rappresentativo di edifici residenziali presenti sul territorio nazionale e modellazione del loro comportamento energetico dinamico, Report RdS/PTR 2020/044.
4. N.J. Hewitt, Heat pumps and energy storage – the challenges of implementation, Applied Energy, 89 (2012), pp. 37-44.

5 Abbreviazioni ed acronimi

COP: Coefficient Of Performance

DSM: Demand side management

PdC: Pompa di Calore

UAC: Unità abitativa in condominio

UAM: Unità abitativa monofamiliare

UAS1L: Unità abitativa a schiera contigua per 1 lato

UAS2L: Unità abitativa a schiera contigua per 2 lati

Appendice A – consumi energetici per la stagione invernale nelle varie località – caso base

Tabella 35: consumi energetici per la stagione invernale a Roma – tipologia UAM

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	3438	4,54	15598	72,2
	C02	3060	4,49	13725	63,5
	C03	3309	4,53	14981	69,4
	C04	2337	4,40	10294	47,7
	C05	1496	4,25	6356	29,4
	C06	1319	4,20	5545	25,7
	C07	1502	4,25	6385	29,6
	C08	546	4,08	2228	10,3
2p	C01	3584	4,51	16157	74,8
	C02	3138	4,46	13987	64,8
	C03	3433	4,5	15447	71,5
	C04	2346	4,38	10275	47,6
	C05	1433	4,2	6016	27,9
	C06	1231	4,16	5118	23,7
	C07	1440	4,2	6048	28
	C08	432	4,06	1757	8,1
3p	C01	3524	4,52	15914	73,7
	C02	3087	4,46	13778	63,8
	C03	3374	4,51	15230	70,5
	C04	2297	4,38	10065	46,6
	C05	1397	4,19	5853	27,1
	C06	1194	4,15	4956	22,9
	C07	1401	4,19	5875	27,2
	C08	393	4,09	1595	7,4
4p	C01	3416	4,53	15470	71,6
	C02	3005	4,47	13437	62,2
	C03	3273	4,52	14784	68,4
	C04	2232	4,38	9776	45,3
	C05	1363	4,19	5709	26,4
	C06	1165	4,15	4835	22,4
	C07	1367	4,19	5725	26,5
	C08	373	4,06	1512	7

Tabella 36: consumi energetici per la stagione invernale a Roma – tipologia UAS1L

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	2257	4,37	9869	69,9
	C02	1962	4,32	8486	60,1
	C03	2224	4,37	9722	68,9
	C04	1625	4,26	6920	49
	C05	1094	4,14	4531	32,1
	C06	977	4,13	4034	28,6
	C07	1100	4,14	4556	32,3
	C08	476	4,1	1954	13,8
2p	C01	2299	4,35	9999	70,9
	C02	1975	4,3	8488	60,2
	C03	2254	4,34	9778	69,3
	C04	1600	4,22	6750	47,8
	C05	1005	4,13	4151	29,4
	C06	879	4,12	3620	25,7
	C07	1010	4,13	4171	29,6
	C08	378	4,08	1543	10,9
3p	C01	2265	4,35	9847	69,8
	C02	1955	4,29	8380	59,4
	C03	2220	4,35	9664	68,5
	C04	1567	4,21	6601	46,8
	C05	970	4,13	4007	28,4
	C06	844	4,12	3478	24,6
	C07	974	4,13	4025	28,5
	C08	343	4,07	1396	9,9
4p	C01	2191	4,35	9530	67,5
	C02	1898	4,28	8130	57,6
	C03	2148	4,34	9322	66,1
	C04	1518	4,21	6388	45,3
	C05	934	4,13	3852	27,3
	C06	809	4,12	3334	23,6
	C07	937	4,13	3871	27,4
	C08	315	4,06	1278	9,1

Tabella 37: consumi energetici per la stagione invernale a Roma – tipologia UAS2L

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	1893	4,28	8102	66,5
	C02	1624	4,2	6814	55,9
	C03	1855	4,27	7926	65
	C04	1553	4,19	6513	53,4
	C05	1277	4,17	5321	43,7
	C06	1222	4,17	5093	41,8
	C07	1279	4,17	5334	43,8
	C08	807	4,17	3361	27,6
2p	C01	1901	4,23	8043	66
	C02	1567	4,18	6552	53,8
	C03	1851	4,22	7819	64,1
	C04	1495	4,18	6241	51,2
	C05	1190	4,17	4963	40,7
	C06	1128	4,17	4703	38,6
	C07	1191	4,18	4976	40,8
	C08	701	4,14	2905	23,8
3p	C01	1858	4,23	7858	64,5
	C02	1524	4,18	6371	52,3
	C03	1807	4,22	7633	62,6
	C04	1449	4,18	6057	49,7
	C05	1146	4,17	4778	39,2
	C06	1084	4,17	4523	37,1
	C07	1147	4,17	4781	39,2
	C08	657	4,15	2727	22,4
4p	C01	1794	4,23	7584	62,2
	C02	1475	4,18	6161	50,5
	C03	1746	4,22	7369	60,5
	C04	1397	4,17	5831	47,8
	C05	1099	4,17	4580	37,6
	C06	1038	4,17	4326	35,5
	C07	1099	4,17	4582	37,6
	C08	617	4,14	2555	21

Tabella 38: consumi energetici per la stagione invernale a Roma – tipologia UAC

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	765	4,17	3192	43,7
	C02	767	4,18	3207	43,9
	C03	765	4,18	3197	43,7
	C04	477	4,14	1974	27
	C05	240	4,09	982	13,4
	C06	194	4,08	792	10,8
	C07	242	4,09	988	13,5
	C08	155	4,06	628	8,6
2p	C01	658	4,16	2739	37,5
	C02	660	4,16	2747	37,6
	C03	659	4,16	2738	37,5
	C04	362	4,1	1484	20,3
	C05	126	4,06	512	7
	C06	84	4,03	338	4,6
	C07	127	4,06	515	7
	C08	52	4,03	210	2,9
3p	C01	614	4,16	2554	34,9
	C02	615	4,16	2555	35
	C03	615	4,16	2559	35
	C04	320	4,1	1310	17,9
	C05	91	4,04	369	5,1
	C06	52	4,05	212	2,9
	C07	92	4,06	375	5,1
	C08	29	4,03	117	1,6
4p	C01	561	4,15	2327	31,8
	C02	564	4,14	2336	32
	C03	562	4,16	2337	32
	C04	276	4,09	1129	15,4
	C05	58	4,03	234	3,2
	C06	28	4,02	111	1,5
	C07	59	4,02	238	3,3
	C08	9,4	4,01	38	0,5

Tabella 39: consumi energetici per la stagione invernale a Napoli – tipologia UAM

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	2597	4,48	11637	53,9
	C02	2298	4,44	10215	47,3
	C03	2482	4,48	11113	51,4
	C04	1738	4,39	7629	35,3
	C05	1084	4,29	4645	21,5
	C06	931	4,26	3970	18,4
	C07	1089	4,29	4672	21,6
	C08	345	4,19	1447	6,7
2p	C01	2685	4,46	11990	55,5
	C02	2350	4,42	10396	48,1
	C03	2560	4,46	11419	52,9
	C04	1743	4,38	7628	35,3
	C05	1004	4,26	4279	19,8
	C06	840	4,24	3565	16,5
	C07	1009	4,26	4303	19,9
	C08	254	4,18	1061	4,9
3p	C01	2640	4,48	11827	54,8
	C02	2311	4,44	10255	47,5
	C03	2514	4,47	11249	52,1
	C04	1714	4,38	7511	34,8
	C05	970	4,26	4137	19,2
	C06	808	4,24	3429	15,9
	C07	974	4,26	4157	19,2
	C08	224	4,17	935	4,3
4p	C01	2558	4,48	11461	53,1
	C02	2244	4,44	9965	46,1
	C03	2435	4,47	10879	50,4
	C04	1663	4,38	7285	33,7
	C05	943	4,26	4021	18,6
	C06	785	4,24	3328	15,4
	C07	947	4,26	4038	18,7
	C08	209	4,17	870	4

Tabella 40: consumi energetici per la stagione invernale a Napoli – tipologia UAS1L

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	1700	4,37	7432	52,7
	C02	1486	4,35	6462	45,8
	C03	1669	4,36	7286	51,6
	C04	1207	4,3	5192	36,8
	C05	767	4,24	3256	23,1
	C06	678	4,24	2871	20,3
	C07	772	4,24	3276	23,2
	C08	312	4,2	1309	9,3
2p	C01	1735	4,36	7562	53,6
	C02	1484	4,36	6413	45,5
	C03	1694	4,36	7383	52,3
	C04	1159	4,28	4959	35,1
	C05	691	4,24	2929	20,8
	C06	598	4,24	2533	17,9
	C07	695	4,24	2945	20,9
	C08	233	4,2	979	6,9
3p	C01	1716	4,36	7483	53
	C02	1464	4,32	6321	44,8
	C03	1674	4,36	7295	51,7
	C04	1129	4,28	4834	34,3
	C05	662	4,24	2807	19,9
	C06	569	4,24	2413	17,1
	C07	666	4,24	2819	20
	C08	204	4,19	857	6,1
4p	C01	1658	4,36	7233	51,3
	C02	1420	4,32	6125	43,4
	C03	1620	4,36	7062	50
	C04	1089	4,28	4657	33
	C05	632	4,23	2675	19
	C06	541	4,23	2290	16,2
	C07	636	4,24	2696	19,1
	C08	183	4,18	766	5,4

Tabella 41: consumi energetici per la stagione invernale a Napoli – tipologia UAS2L

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	1464	4,31	6307	51,7
	C02	1227	4,27	5240	43
	C03	1426	4,3	6134	50,3
	C04	1167	4,27	4985	40,9
	C05	954	4,26	4069	33,4
	C06	912	4,27	3892	31,9
	C07	956	4,26	4076	33,4
	C08	611	4,25	2595	21,3
2p	C01	1438	4,29	6163	50,6
	C02	1168	4,28	4997	41
	C03	1393	4,28	5967	48,9
	C04	1108	4,27	4733	38,8
	C05	882	4,26	3758	30,8
	C06	837	4,25	3559	29,2
	C07	883	4,26	3761	30,8
	C08	522	4,25	2219	18,2
3p	C01	1402	4,29	6016	49,4
	C02	1135	4,29	4864	39,9
	C03	1356	4,29	5819	47,7
	C04	1072	4,27	4582	37,6
	C05	848	4,28	3624	29,7
	C06	802	4,28	3433	28,2
	C07	848	4,27	3624	29,7
	C08	485	4,25	2060	16,9
4p	C01	1353	4,29	5805	47,6
	C02	1093	4,29	4687	38,5
	C03	1308	4,29	5606	46
	C04	1030	4,27	4396	36,1
	C05	809	4,27	3453	28,3
	C06	765	4,27	3265	26,8
	C07	810	4,27	3457	28,4
	C08	451	4,24	1915	15,7

Tabella 42: consumi energetici per la stagione invernale a Napoli – tipologia UAC

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	577	4,25	2455	33,6
	C02	577	4,26	2459	33,6
	C03	577	4,26	2455	33,6
	C04	359	4,21	1510	20,7
	C05	180	4,17	751	10,3
	C06	145	4,18	607	8,3
	C07	180	4,17	752	10,3
	C08	114	4,18	476	6,5
2p	C01	488	4,25	2075	28,4
	C02	488	4,25	2074	28,4
	C03	488	4,25	2074	28,4
	C04	260	4,2	1093	15
	C05	84	4,16	352	4,8
	C06	53	4,13	218	3
	C07	85	4,18	356	4,9
	C08	30	4,1	125	1,7
3p	C01	453	4,25	1925	26,3
	C02	453	4,24	1921	26,3
	C03	454	4,25	1929	26,4
	C04	225	4,21	948	13
	C05	55	4,14	230	3,1
	C06	27	4,13	112	1,5
	C07	56	4,16	234	3,2
	C08	12	4,07	50	0,7
4p	C01	411	4,25	1746	23,9
	C02	412	4,24	1743	23,8
	C03	412	4,24	1744	23,9
	C04	189	4,18	791	10,8
	C05	28	4,13	114	1,6
	C06	6,9	4,09	28	0,4
	C07	29	4,13	119	1,6
	C08	1	4,06	3,9	0,1

Tabella 43: consumi energetici per la stagione invernale a Palermo – tipologia UAM

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	2239	4,48	10028	46,4
	C02	1991	4,44	8851	41
	C03	2144	4,47	9573	44,3
	C04	1491	4,39	6545	30,3
	C05	890	4,28	3809	17,6
	C06	757	4,25	3213	14,9
	C07	895	4,28	3831	17,7
	C08	269	4,17	1123	5,2
2p	C01	2321	4,46	10352	47,9
	C02	2044	4,42	9032	41,8
	C03	2213	4,45	9845	45,6
	C04	1480	4,37	6473	30
	C05	818	4,24	3470	16,1
	C06	673	4,21	2837	13,1
	C07	823	4,25	3495	16,2
	C08	191	4,15	794	3,7
3p	C01	2286	4,46	10207	47,3
	C02	2015	4,43	8930	41,3
	C03	2177	4,45	9686	44,8
	C04	1450	4,37	6342	29,4
	C05	787	4,25	3343	15,5
	C06	642	4,22	2709	12,5
	C07	792	4,25	3363	15,6
	C08	167	4,15	691	3,2
4p	C01	2220	4,46	9906	45,9
	C02	1963	4,43	8706	40,3
	C03	2114	4,46	9428	43,6
	C04	1412	4,37	6174	28,6
	C05	766	4,24	3248	15
	C06	623	4,22	2627	12,2
	C07	769	4,25	3267	15,1
	C08	153	4,14	635	2,9

Tabella 44: consumi energetici per la stagione invernale a Palermo – tipologia UAS1L

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	1472	4,37	6431	45,6
	C02	1282	4,34	5564	39,4
	C03	1442	4,36	6285	44,5
	C04	1015	4,29	4360	30,9
	C05	632	4,23	2674	18,9
	C06	552	4,22	2329	16,5
	C07	638	4,23	2696	19,1
	C08	249	4,17	1038	7,4
2p	C01	1485	4,35	6457	45,8
	C02	1273	4,31	5494	38,9
	C03	1448	4,35	6298	44,6
	C04	974	4,26	4152	29,4
	C05	561	4,23	2370	16,8
	C06	478	4,22	2016	14,3
	C07	566	4,23	2392	17
	C08	180	4,17	748	5,3
3p	C01	1469	4,35	6394	45,3
	C02	1258	4,31	5420	38,4
	C03	1432	4,35	6221	44,1
	C04	946	4,27	4042	28,6
	C05	534	4,23	2256	16
	C06	451	4,21	1898	13,5
	C07	538	4,22	2269	16,1
	C08	156	4,16	649	4,6
4p	C01	1426	4,35	6201	43,9
	C02	1222	4,31	5261	37,3
	C03	1388	4,35	6033	42,8
	C04	913	4,27	3894	27,6
	C05	507	4,22	2143	15,2
	C06	426	4,2	1791	12,7
	C07	512	4,22	2157	15,3
	C08	137	4,14	568	4

Tabella 45: consumi energetici per la stagione invernale a Palermo – tipologia UAS2L

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	1258	4,3	5408	44,4
	C02	1060	4,27	4520	37,1
	C03	1224	4,3	5259	43,1
	C04	995	4,27	4243	34,8
	C05	806	4,25	3429	28,1
	C06	770	4,25	3274	26,9
	C07	807	4,26	3435	28,2
	C08	518	4,24	2199	18
2p	C01	1232	4,28	5270	43,2
	C02	1002	4,27	4280	35,1
	C03	1191	4,28	5094	41,8
	C04	939	4,26	4003	32,8
	C05	742	4,26	3158	25,9
	C06	701	4,26	2983	24,5
	C07	743	4,25	3158	25,9
	C08	441	4,24	1870	15,3
3p	C01	1199	4,29	5138	42,1
	C02	974	4,28	4171	34,2
	C03	1158	4,28	4958	40,7
	C04	908	4,27	3876	31,8
	C05	711	4,27	3033	24,9
	C06	671	4,28	2868	23,5
	C07	712	4,27	3038	24,9
	C08	408	4,24	1729	14,2
4p	C01	1159	4,28	4968	40,8
	C02	940	4,28	4023	33
	C03	1118	4,28	4783	39,2
	C04	873	4,26	3725	30,6
	C05	678	4,27	2895	23,7
	C06	639	4,26	2720	22,3
	C07	679	4,27	2897	23,8
	C08	378	4,24	1604	13,2

Tabella 46: consumi energetici per la stagione invernale a Palermo – tipologia UAC

Occupanti		Consumo elettrico [kWh]	COP medio	Energia per riscaldamento [kWh]	Consumo annuo unitario [kWh/m ²]
1p	C01	499	4,26	2123	29
	C02	498	4,25	2117	29
	C03	498	4,25	2117	29
	C04	304	4,23	1285	17,6
	C05	146	4,17	611	8,4
	C06	116	4,19	484	6,6
	C07	147	4,18	613	8,4
	C08	89	4,17	370	5,1
2p	C01	419	4,24	1778	24,3
	C02	419	4,24	1780	24,3
	C03	419	4,25	1781	24,4
	C04	218	4,19	912	12,5
	C05	61	4,14	253	3,5
	C06	34	4,14	140	1,9
	C07	62	4,15	258	3,5
	C08	17,8	4,14	74	1
3p	C01	389	4,24	1649	22,6
	C02	388	4,24	1647	22,5
	C03	389	4,24	1649	22,6
	C04	188	4,2	787	10,8
	C05	35	4,13	144	2
	C06	12,6	4,14	52	0,7
	C07	36	4,12	149	2
	C08	4	4,1	16	0,2
4p	C01	353	4,24	1496	20,5
	C02	352	4,24	1492	20,4
	C03	353	4,24	1496	20,5
	C04	155	4,2	651	8,9
	C05	12	4,08	48	0,7
	C06	0	-	0	0
	C07	13	4,12	54	0,7
	C08	0	-	0	0