

Un **modello** di controllo per **ottimizzare** le prestazioni del pavimento **radiante** con un **ventilconvettore** canalizzato **a zone**



Lo studio ha analizzato e valutato i benefici, in termini prestazionali, di un sistema di controllo combinato rispetto a un controllo convenzionale

*D. Truffo, F. Fernández Hernández, J. Bandera Cantalejo**

Troviamo oggi la pompa di calore ad aria quale unico produttore di fluidi termovettori estivi e invernali. Soluzione unica per coprire le esigenze di climatizzazione e di produzione di acqua calda sanita-

ria (ACS), che viene poi collegata con diverse unità terminali quali radiatori, pavimenti radianti e ventilconvettori.

Il riscaldamento con pavimento

radiante è ampiamente utilizzato in climi molto freddi, grazie alle sue eccellenti prestazioni per il riscaldamento in termini di comfort ed efficienza (Hesa-

raki et al. 2022). Tuttavia, in modalità raffreddamento, la temperatura del pavimento è limitata dalla temperatura di rugiada dell'aria ambiente, per evitare la condensazione dell'umidità dell'aria, che ne riduce la capacità frigorifera a circa 50 W/m² (UNI 2009).

Per questo motivo nei climi caldi, un'alternativa è quella di combinarlo con i ventilconvettori, che funzionano con temperature di produzione meno favorevoli ma hanno una maggiore capacità di raffreddamento e tempi di risposta molto più rapidi ai cambiamenti di carico nella zona.

Tuttavia, la revisione della letteratura evidenzia una lacuna in quanto a ricerche che studino il controllo di entrambe le unità terminali combinate, in particolare nel settore residenziale.

Descrizione dei sistemi

In questo studio vengono presi a riferimento due diversi sistemi impiantistici:

1. Pavimento radiante con unico ventilconvettore canalizzato e zonificato a servizio di tutte le stanze;
2. Pavimento radiante con singoli ventilconvettori nelle stanze.

Pavimento radiante combinato con ventilconvettore canalizzato e zonificato (modalità combinata)

La Figura 1 mostra lo schema del sistema con i diversi elementi di regolazione. Il sistema di controllo è costituito da due elementi principali: la centrale della zonizzazione e quella di controllo della pompa di calore (PDC). Entrambi hanno delle interfacce di comunicazione, che, grazie ai protocolli applicati

alla pompa di calore e al ventilconvettore, possono controllare la velocità del ventilatore e la temperatura scorrevole sulla mandata della PDC.

Entrambe le schede di controllo ricevono informazioni dai termostati di zona: temperatura di zona (T_z), temperatura del setpoint ($T_{set,z}$) e umidità relativa (UR_z), ed è da queste informazioni che l'algoritmo di controllo stabilisce il funzionamento con la gestione dei seguenti parametri:

1. Ogni zona ha il proprio termostato e uscita motorizzata (D). Quando la temperatura dell'aria della zona arriva in comfort, un segnale di controllo viene inviato all'uscita motorizzata della zona, che interrompe l'immissione dell'aria nella zona. Inoltre, le zone rimangono spente se non sono occupate;
2. La velocità del ventilatore (F) viene selezionata in base al rapporto tra il numero di zone in richiesta e il numero di zone totali;
3. La temperatura di mandata della pompa di calore (PDC) viene obbligatoriamente determinata a seconda che si alimenti il pavimento radiante o il ventilconvettore;
4. Le valvole a pavimento (VS) e/o ventilconvettori (FC) controllano l'evoluzione della temperatura della zona;
5. La presenza di una valvola miscelatrice assicura che l'acqua fornita al pavimento radiante in modalità di raffreddamento non sia così bassa da causare condensa superficiale.

Pavimento radiante in riscaldamento e singoli ventilconvettori per il raffreddamento

Il sistema precedente è stato confrontato con una configurazione comune nel settore residenziale, dove nessun controllo combina entrambe le unità, dato che il pavimento radiante viene utilizzato per il riscaldamento e i ventilconvettori in ogni zona assicurano il raffrescamento. In questo caso, non esiste un'interfaccia di comunicazione per gestire la PDC, quindi la temperatura di produzione dell'acqua calda / fredda è fissa. La velocità del ventilatore di ogni ventilconvettore è regolata in base alla differenza di temperatura tra ambiente e il setpoint; un termostato installato in ogni zona assicura la zonizzazione termica.

Si tratta di un sistema di controllo avanzato, Figura 2, ma che non consente la combinazione simultanea di entrambe le unità terminali.

Modelli di sistemi di controllo

Sistema di controllo della zonizzazione termica

A livello di zona, il sistema è stato modellato come un

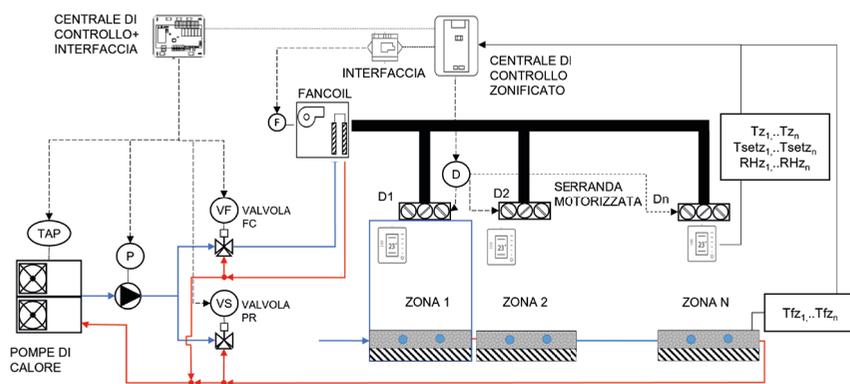


FIGURA 1 Schema di sistema in modalità combinata

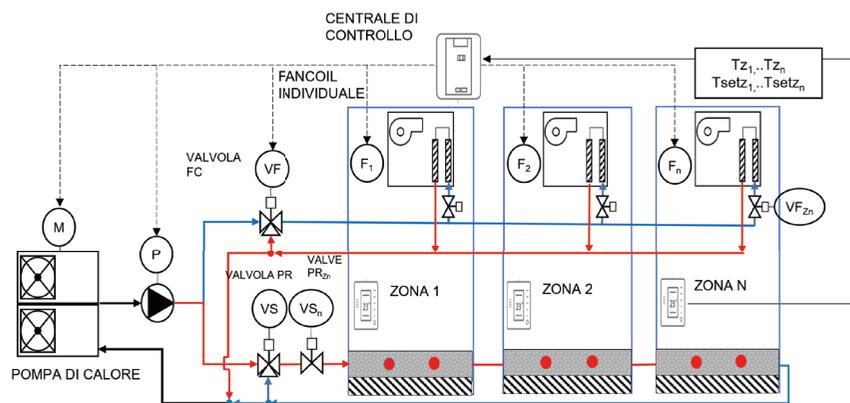


FIGURA 2 Schema pavimento radiante in riscaldamento e ventilconvettori per il raffreddamento

controllo off/on che accende e spegne continuamente l'unità HVAC a seconda della differenza con la temperatura della zona che può essere più o meno lontana dell'intervallo di temperatura della banda di comfort (in genere $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) rispetto al setpoint. Poiché ogni zona ha il proprio termostato e uscita motorizzata, quando la temperatura dell'aria della zona è nella banda di comfort, viene inviato un segnale di controllo all'uscita motorizzata della zona che interrompe l'alimentazione dell'aria alla zona.

Sistema di controllo in modalità combinata

La Modalità Combinata opera per garantire il comfort termico nella zona, dando priorità al pavimento radiante e attivando il ventilconvettore quando il primo non è ancora alla temperatura adeguata. La Figura 3 mostra il funzionamento del sistema in raffreddamento dove, a seconda della differenza dal set-point, avremo in funzione solo il pavimento radiante, oppure solo il ventilconvettore, oppure entrambi i sistemi contemporaneamente.

L'obiettivo è quello di portare la temperatura dell'aria nella zona di comfort il più velocemente possibile. Si osserva che al ridursi del differenziale tra temperatura ambiente e setpoint, la temperatura di produzione viene modificata tra 7 e 10 °C e la velocità del ventilatore è regolata dal massimo al minimo. Quando l'aria è 2 °C al di sopra della temperatura del setpoint, il pavimento radiante viene attivato. Quando la temperatura dell'aria è nella fascia di comfort, il ventilconvettore viene spento e si mantiene solo il pavimento radiante. Poiché viene data priorità al pavimento per gestire il carico sensibile della zona, la temperatura di mandata della PDC viene impostata alla temperatura superiore (18 °C).

Lo stesso funzionamento può essere applicato alla modalità di riscaldamento, come mostrato in Figura 4.

Sistema di controllo in modalità non combinata

Il pavimento radiante agisce solo in modalità riscaldamento e sono state valutate due opzioni:

1. Pavimento radiante suddiviso in zone. L'acqua viene inviata a ciascuna zona solo se la zona è in richiesta termica. Il set point dell'acqua della pompa di calore fissato a 35 °C. La valvola di ogni pavimento radiante (VSn) viene aperta in base alla differenza di temperatura tra ambiente e setpoint, analogamente alla fase radiante della Figura 3. Questa strategia evita il surriscaldamento nella zona e nella superficie del pavimento;

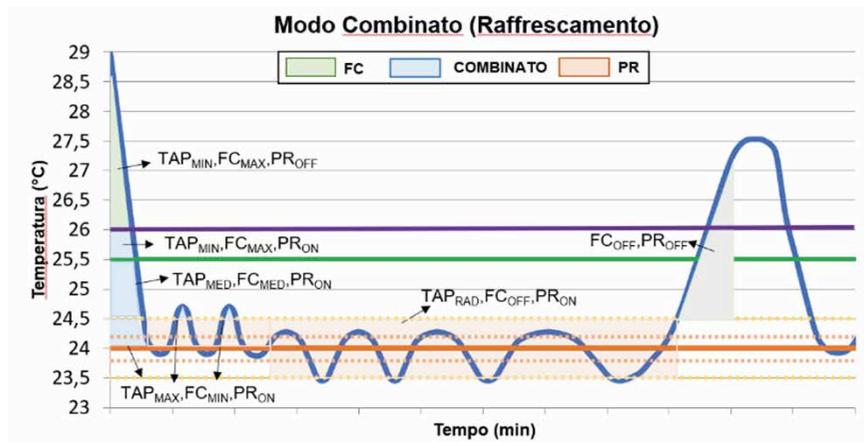


FIGURA 3 Modalità combinata per il raffreddamento

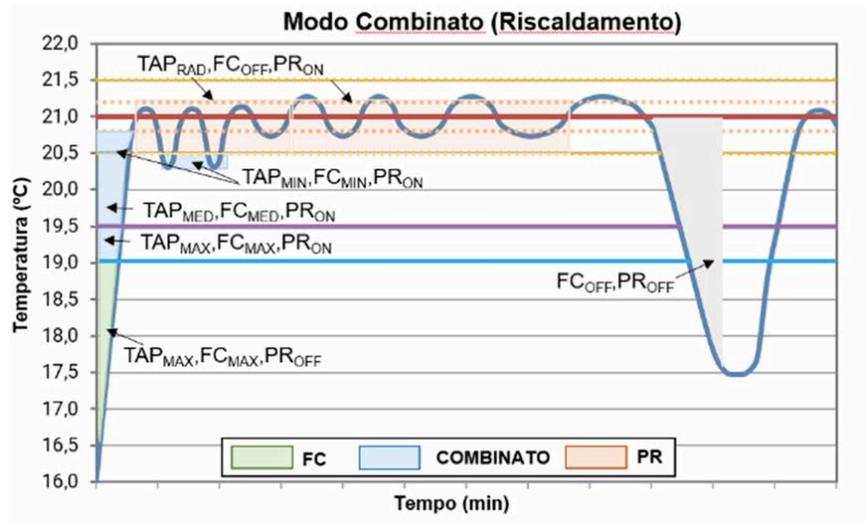


FIGURA 4 Modalità combinata per il riscaldamento

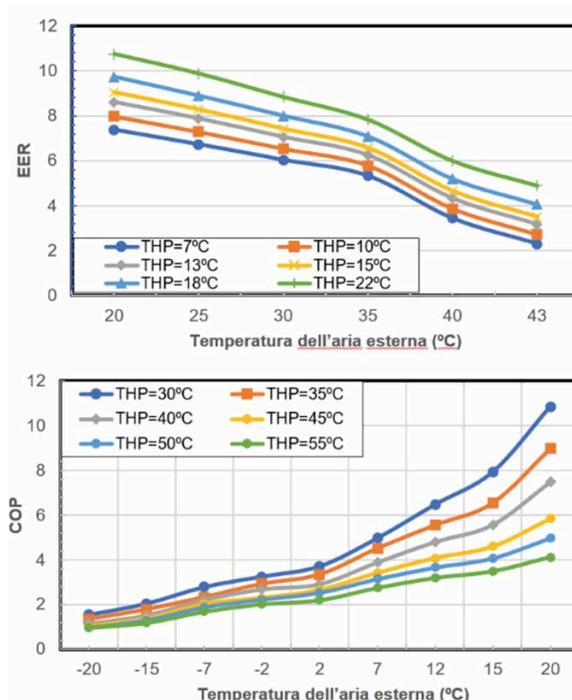


FIGURA 5 Curve di prestazione di riscaldamento e raffreddamento PDC

CASO DI STUDIO

L'abitazione in studio (Figura 6) ha cinque zone riscaldate/raffreddate (soggiorno LR, cucina K, ufficio OF, camera da letto dei genitori PR e camera da letto per bambini CR), con una superficie di 121 m². La simulazione è effettuata in

Trnsys 17 per diverse città italiane: Napoli, Roma e Milano.

I file meteo EnergyPlus sono utilizzati nella simulazione.

Una portata d'aria di 0,6 rinnovi/ora è impostata per la ventilazione di rinnovo in tutte le stanze tranne la cucina, dove è calcolata a 2,9 rinnovi/ora. La Tabella 1 mostra i valori considerati per il coefficiente di scambio termico dell'involucro.

Per determinare il funzionamento del sistema HVAC si considera il seguente profilo di occupazione (Figura 7) tipico negli edifici residenziali.

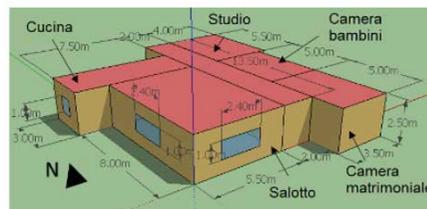


FIGURA 6 Rappresentazione 3D della casa

TABELLA 1 Coefficienti di scambio termico [W/(m² · K)].

Città	Muro	Soffitto	Pavimento	Finestra
Milano	0,34	0,33	0,3	2,2
Roma	0,36	0,32	0,36	2,2
Napoli	0,40	0,38	0,42	2,2

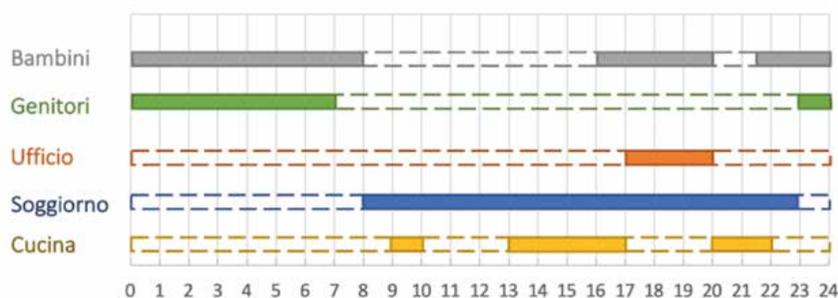


FIGURA 7 Profilo di occupazione

2. Pavimento radiante sempre ATTIVO.

La pompa di calore fornisce sempre acqua riscaldata a ogni circuito con temperatura di mandata della PDC fissata a 35 °C. Tutte le zone sono riscaldate tutto il giorno. Questa strategia è molto favorevole per evitare ritardi nelle zone, ma il consumo di energia può essere compromesso rispetto al pavimento radiante zonificato.

I ventilconvettori singoli vengono utilizzati in freddo. Il controllo di ogni ventilconvettore modifica sia la velocità del ventilatore che la temperatura di mandata della PDC in base alla differenza tra l'aria ambiente e il setpoint.

Modelli numerici

Il modello di pompa di calore aria-acqua è sviluppato sulla base del tipico insieme di curve di un produt-

tore (Daikin, 2021). Queste curve forniscono informazioni sulla capacità di riscaldamento e raffreddamento e sul consumo elettrico in funzione della temperatura dell'aria esterna e della temperatura di mandata della PDC richiesto. La Figura 5 mostra le curve di prestazione COP ed EER di un'unità a pompa di calore utilizzata nel caso di studio.

Il modello fan-coil si basa sul metodo effectiveness-NTU e utilizza un valore costante di efficienza per ogni velocità del ventilatore. L'efficienza può essere calcolata a partire dai dati forniti nel catalogo fan-coil (Daikin 2021).

Il pavimento radiante è stato modellato utilizzando il componente Tipo 705, disponibile nella libreria TRNSYS. Questo componente utilizza il metodo del volume finito per modellare una lastra con tubi incorporati su di essa.

Risultati e discussione

L'obiettivo di questo studio è valutare i benefici della modalità combinata rispetto a un controllo convenzionale.

Influenza del sistema di controllo sul dimensionamento dei sistemi HVAC

Il calcolo dei carichi termici di ogni città viene calcolato in un intervallo di comfort tra 22 °C e 24 °C che rappresenta i set-point maggiormente utilizzati nella realtà dagli utenti. Trattandosi di sistemi zonificati, la Tabella 2 mostra i carichi simultanei per ogni città, nonché la pompa di calore e il ventilconvettore canalizzato selezionati (in base al modello di un produttore (Daikin 2021).

Tuttavia, nel caso di raffreddamento con ventilconvettori singoli, il dimensionamento deve essere eseguito in base al carico di picco di ciascuna zona. La Tabella 3 mostra i singoli ventilconvettori selezionati per ogni città (Daikin 2021) e i carichi di picco di ciascuna delle zone (Q (W)).

Valutazione del comfort termico

In primo luogo, le prestazioni della modalità combinata (Figura 8) rispetto al pavimento radiante a zone (Figura 8) e pavimento radiante sempre ON (Figura 9) vengono analizzate in una tipica giornata invernale a Milano, per il soggiorno (LR) e la stanza dei bambini (CR). La fase temporale di simulazione è di un minuto, adattata al funzionamento del sistema di controllo.

Nella modalità che unisce regolazione combinata e pavimento radiante a zone, si evidenzia l'influenza della zonizzazione termica sul comportamento delle zone.

Tutte le zone sono in comfort termico durante i periodi di occupazione (Figura 7). Le temperature operative sono di circa 21-23 °C e il Voto Medio Previsto (PMV), calcolato secondo lo standard ISO 7730 (ISO 2005), definisce una sensazione di comfort tra leggermente caldo e fresco (PMV tra -0,5 e 0,5).

Analizzando la modalità solo pavimento radiante a zone, si evince che le temperature di comfort non vengono raggiunte a causa dell'inerzia termica del pavimento radiante. Di contro, la modalità combinata sopperisce con il funzionamento del ventilconvettore in ogni zona, consentendo un rapido aumento della temperatura dell'aria. Come si può vedere, la mandata della PDC cambia da 35 °C (pavimento radiante caldo) a 42-45 °C (ventilconvettore) a seconda di quale terminale sia attivato.

Per quanto riguarda la modalità pavimento radiante sempre attivo, va notato che non si applica il profilo di occupazione, quindi le temperature operative e il PMV sono molto stabili intorno alla fascia di comfort. Il sistema di controllo attiva unicamente acqua calda alle zone quando l'inerzia termica del pavimento radiante non sia in grado di mantenere il comfort.

Un'analisi del comfort più dettagliata è stata valutata in ogni zona. La Figura 11 mostra un riepilogo dei risultati del comfort termico utilizzando la percentuale di ore in cui ciascuna delle zone ottiene valori PPD e PMV in base alle categorie di comfort (ISO 2005).

In una prima analisi generale, i risultati della Figura 10 confermano le tesi precedentemente presentate. Il pavimento radiante suddiviso in zone, a causa del suo elevato tempo caratteristico nel periodo iniziale di ciascuna zona, presenta percentuali più elevate di disagio (categoria C e disagio, dal 23-33%). Questi risultati sono ancora più alti nei climi più freddi, dove la temperatura radiante media è inferiore e la pompa di calore funziona in condizioni esterne peggiori. Inoltre, in zone come l'ufficio (OFF), che è occupato solo dalle ore 17:00 alle ore 20:00, il carico di riscaldamento accumulato è molto elevato e il tempo caratteristico è aumentato.

La modalità pavimento radiante sempre acceso risolve il problema dello zonificato a scapito di un maggiore consumo energetico e raggiunge buoni risultati di comfort. Tuttavia, ci sono alcuni periodi di surriscaldamento nelle giornate invernali più calde, con disagi dal 15% al 24%.

La modalità combinata raggiunge i migliori risul-

TABELLA 2 Pompa di calore e dimensionamento FC

	Milano	Roma	Napoli
Qheat (W)	8106	7267	7454
Qsens, fresco (W)	3963	4946	5742
Qtot, fresco (W)	4115	6283	8139
Pompa di calore	EBHQ011	EBLQ07CV	EBLQ07CV
FC canalizzato	FWM010D	FWM08D	FWM08D

TABELLA 3 Pompa di calore e dimensionamento FC

Zona	Milano		Roma		Napoli	
	Q(kW)	FC	Q(kW)	FC	Q(kW)	FC
LR	1,8	FWT02	2,2	FWT02	2,9	FWT04
Okay	2,5	FWT04	3,4	FWT04	3,6	FWT05
DI	1,6	FWT02	0,9	FWT02	1,1	FWT02
CR	1,0	FWT02	1,1	FWT02	1,3	FWT02
PR	1,1	FWT02	1,2	FWT02	1,5	FWT02

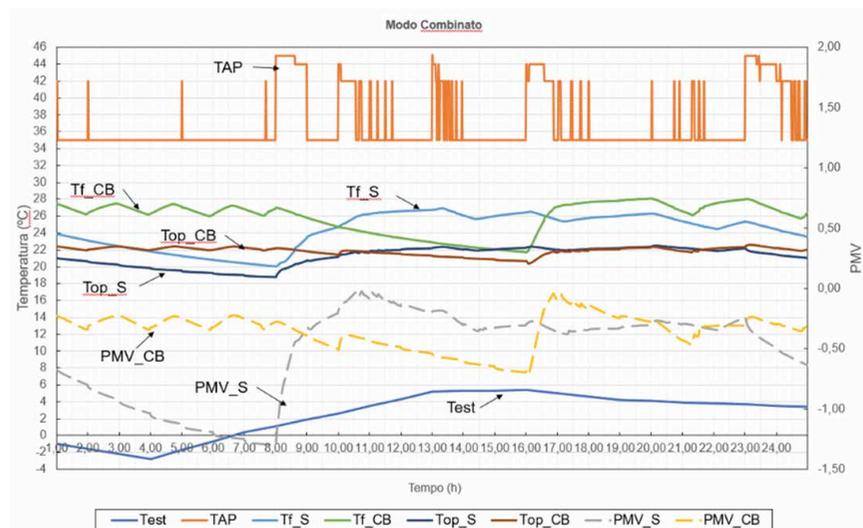


FIGURA 8 Modalità combinata. Milano (riscaldamento)

tati di comfort termico. Il pavimento radiante è prioritario a causa della sua elevata inerzia termica e del suo impatto diretto sulla temperatura di esercizio della zona, e il ventilconvettore viene inizialmente attivato per evitare il ritardo del pavimento radiante e per mantenere, quando necessario, la temperatura dell'aria della zona nella banda di comfort.

Per quanto riguarda la modalità di raffreddamento, le percentuali di comfort termico sono simili tra la modalità combinata e i singoli fancoil.

Consumo di energia

Per completare la valutazione, è importante confrontare i sistemi di controllo analizzando il consumo energetico che include il consumo elet-

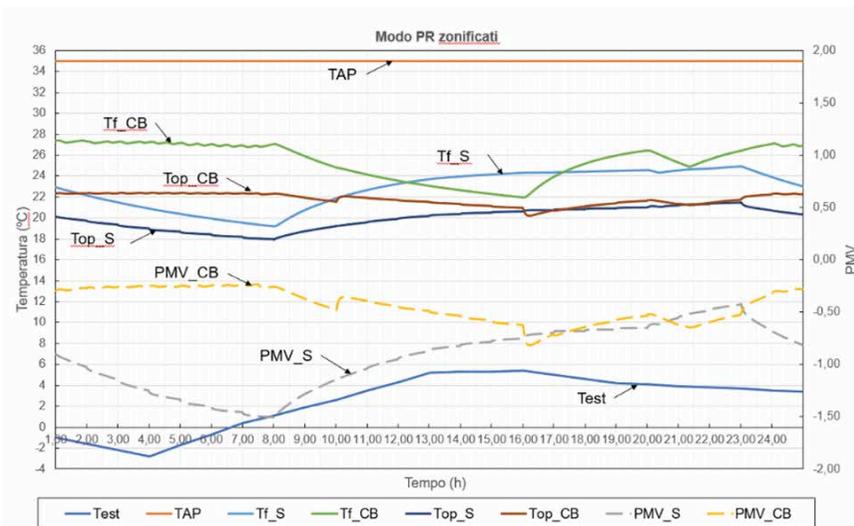


FIGURA 9 Modalità pavimento radiante suddivisa in zone. Milano (riscaldamento)

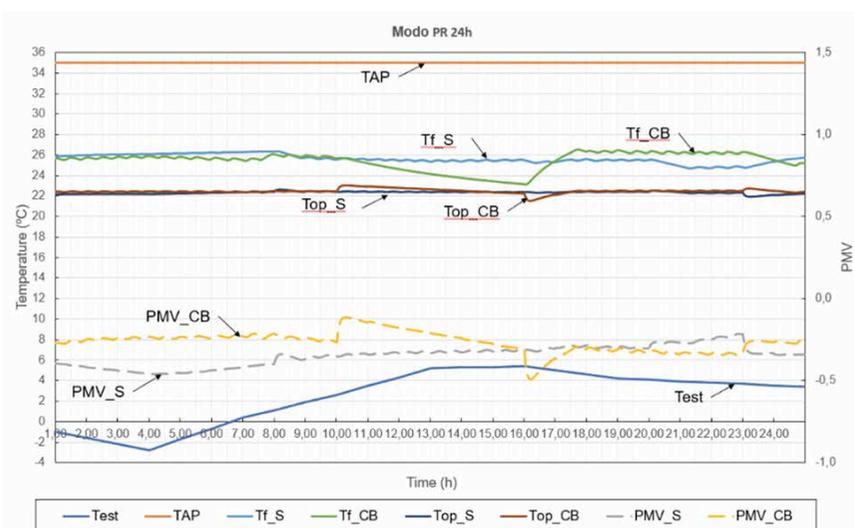


FIGURA 10 Modalità RF suddivisa in zone. Milano (riscaldamento)

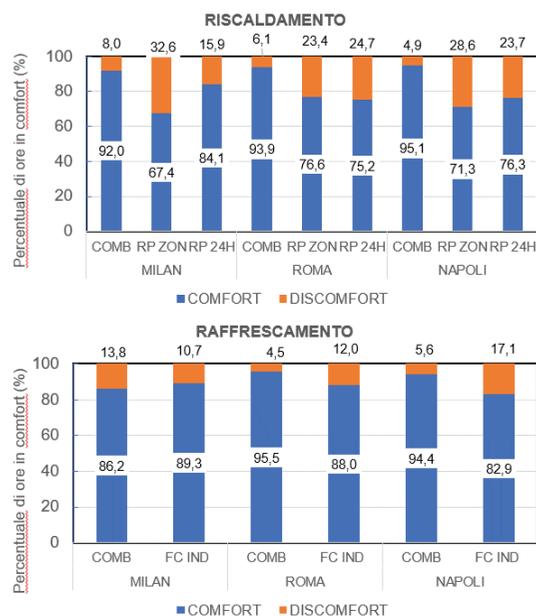


FIGURA 11 Valutazione del comfort termico

trico della pompa di calore e dei ventilatori. La Figura 12 presenta un confronto in termini di consumo energetico totale dell'edificio e di risparmio energetico ottenuto nel sistema combinato (COMB) rispetto ai sistemi pavimento radiante zonificato (PR ZON), pavimento radiante sempre attivo (PR 24H) e singoli ventilconvettori (FC).

Come si può vedere, in modalità riscaldamento, il PR ZON è il più efficiente, ma gli alti valori di disagio termico rendono la modalità PR 24H più conveniente perché consuma meno della modalità combinata, anche se le differenze sono solo del 6% circa. La modalità combinata può essere giustificata a causa del consumo elettrico totale perché il risparmio energetico relativo ai singoli ventilconvettori è di circa il 40-45%. La combinazione di pavimento radiante e ventilconvettori migliora le prestazioni della pompa di calore e il consumo energetico del ventilatore del ventilconvettore canalizzato è inferiore alla somma del singolo caso ventilconvettore. Pertanto, il risparmio energetico totale è del 12-41%, che risulta più favorevole nelle città con inverni meno rigidi.

Analisi economica, ciclo di vita e periodo di ammortamento

La fattibilità economica delle diverse configurazioni HVAC considerate è stata valutata attraverso il calcolo del periodo di ammortamento (PB) del sistema combinato rispetto agli altri, che dipende dal costo iniziale (IC) e dal costo operativo (OC). I costi iniziali della pompa di calore, delle unità terminali (canalizzati e singoli ventilconvettori), delle apparecchiature di diffusione dell'aria (serrande e valvole motorizzate) e del sistema di controllo a zone (centrali di controllo, interfacce di comunicazione) sono stati ottenuti dai cataloghi dei produttori (Daikin 2021, Airzoneltalia 2022). L'OC è calcolato in base ai risultati del consumo di energia (Tabella 4) e al costo dell'elettricità. Si è presunto un valore conservativo di 0,26 €/kWh che è stato recentemente aggiornato.

Sebbene il costo iniziale del sistema combinato sia più elevato in tutti i casi a causa del costo del sistema di controllo, la riduzione del consumo di energia si traduce in un costo operativo inferiore. I periodi di ammortamento in ogni città sono da 2,2 a 7,7 anni rispetto al pavimento radiante a zone. Il periodo di ammortamento è più alto a Milano perché l'inverno è più freddo e il consumo di energia nel riscaldamento è più importante.

Conclusioni

Questo studio ha analizzato le prestazioni di un sistema di controllo applicato a un sistema combinato di ventilconvettore canalizzato e zonificato con pavimento radiante ed è stato confrontato con un sistema basato su un pavimento radiante per il riscaldamento e singoli ventilconvettori per il raffreddamento.

Le principali conclusioni sono:

1. In riscaldamento:

a. La modalità combinata è la migliore in termini di comfort termico. Il ventilconvettore agisce quando una zona viene attivata per aumentare rapidamente la temperatura dell'aria e quando il pavimento radiante non è in grado di gestire il carico di riscaldamento;

b. Il solo pavimento radiante a zone presenta un'importante percentuale di ore di disagio a causa dell'elevato tempo caratteristico del sistema. La modalità pavimento radiante sempre attivo risolve questo problema ma, nei giorni invernali con basso carico di riscaldamento, il surriscaldamento in alcune zone può verificarsi in un clima con un inverno meno rigido.

2. In raffreddamento:

a. Il confronto avviene sostanzialmente tra ventilconvettori, quindi entrambi i sistemi di controllo raggiungono alte percentuali di comfort termico.

3. Per quanto riguarda i consumi energetici, la modalità combinata ottiene un risparmio energetico totale dal 12-41%. Le differenze sono più importanti nel raffreddamento, dove la pompa di calore ha prestazioni migliori con un elevato numero di ore di funzionamento con una temperatura di mandata di 18 °C, rispetto ai 7 °C dei singoli FC.

4. Il periodo di ammortamento calcolato in ogni città con la modalità combinata ottiene un PB di 2,2-7,7 anni rispetto al pavimento radiante a zone e da 2-3,2 anni rispetto al pavimento radiante sempre attivo. ■

* Davide Truffo, Airzone Italia

Francisco Fernández Hernández, Università di Malaga

Juan Bandera Cantalejo, Corporación Empresarial Altra S.L.

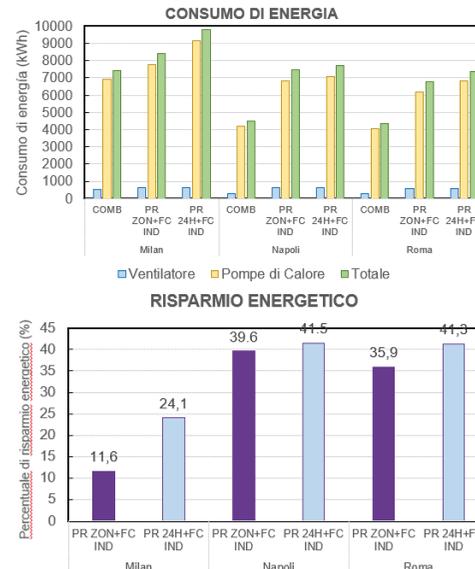


FIGURA 12 Valutazione dei consumi energetici e del risparmio energetico

TABELLA 4 Pompa di calore e dimensionamento FC

Costo	Sistema	Milano	Roma	Napoli
IC (€)	CB	12807	10752	10752
	IndFC+RF	10860	8878	9062
OC (€)	CB	1929	1127	1170
	ZonedRF	2235	1980	1772
	RF Sempre attivo	2542	1921	2001
PB (anni)	CB-ZonedRF	7,7	3	2,2
	CB-RFAlways su	3,2	2,4	2

BIBLIOGRAFIA

- AirzoneItalia www.airzonecontrol.com (consultato il 9.04.2022).
- BRE 2010, BREEAM offices 2008 manuale valutatore, BREEAM. Watford: BRE Global Ltd.
- Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni – REPowerEU: Azione comune europea per un'energia più accessibile, sicura e sostenibile. Strasburgo 8.03.2022.
- Daikin 2022. Prezzi consigliati. Settembre 2021.
- D. Lgs. N.192 del 19 agosto 2005. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.
- Hesaraki A., Huda N. 2022. Una revisione comparativa sull'applicazione del riscaldamento radiante a bassa temperatura e del raffreddamento ad alta temperatura per l'energia, il comfort termico, la qualità e il controllo dell'aria interna. Tecnologie e valutazioni dell'energia sostenibile. Vol 49, 101661.
- Joe J., Karava P. 2019. Un modello di strategia di controllo predittivo per ottimizzare le prestazioni dei sistemi radianti di riscaldamento e raffreddamento a pavimento negli edifici per uffici. 245, pp. 65-77.
- Liu D., Zhou H., Hu A., Zhang Q., Liu N., Wen J. 2022. Studio sulla modalità di funzionamento intermittente caratteristica di un sistema di raffreddamento combinato convezione-radiante negli edifici per uffici. Energia ed edifici 255, 111669.
- Tianyi Z., Jili Z., Dexing S. 2011. Studio sperimentale su un metodo di controllo fuzzy del rapporto di servizio per gruppi fan-coil. 46, pp. 527-534.
- UNI. 2009. UNE-EN 15377. Sistemi di riscaldamento negli edifici – Progettazione di sistemi di riscaldamento e raffreddamento superficiali incorporati basati sull'acqua – Parte 3: Ottimizzazione per l'uso di fonti di energia rinnovabile
- UNI. 2005. Norma europea EN ISO-7730:2005. Ergonomia dell'ambiente termico – Determinazione analitica e interpretazione del comfort termico utilizzando il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di comfort termico locale.
- Zarella A., De Carli M., Peretti C. 2014. Raffreddamento radiante a pavimento abbinato a sistemi di deumidificazione in edifici residenziali: un'analisi basata sulla simulazione. Conversione e gestione dell'energia. Vol 85, pp. 254-263.