

Pompe di Calore, monitoraggio in campo

Nell'ambito del progetto ReLab è stata promossa una campagna di monitoraggio di impianti a PDC, installati principalmente in edifici pubblici, al fine di valutarne le effettive prestazioni in campo. I risultati

*M. Fumagalli, R. Scoccia, A. Sivieri, M. Zanchi, M. Motta, L. Mazzarella**

COME ORMAI BEN NOTO, per rispettare gli impegni presi a livello internazionale sul cambiamento climatico è strategico investire su sistemi impiantistici a basso impatto energetico per la climatizzazione degli edifici e per la produzione di acqua calda sanitaria. All'interno di questo scenario, le pompe di calore, PDC, hanno sicuramente un ruolo chiave, grazie alla capacità di recuperare energia da fonti rinnovabili come l'aria esterna, il terreno e l'acqua di falda, e di raggiungere valori di efficienza elevati.

Purtroppo però le prestazioni delle PDC misurate in laboratorio possono discostarsi molto da quelle riscontrate in campo, a causa di svariati fattori legati a errori nella fase di progettazione, a problematiche nella fase di installazione o a una gestione non ottimale del sistema. Su questo tema, nell'ambito del progetto ReLab finanziato da Regione Lombardia,

è stata promossa una campagna di monitoraggio di impianti a PDC, installati principalmente in edifici pubblici, al fine di valutarne le effettive prestazioni in campo e di analizzare l'impatto sulla loro prestazione delle reali condizioni di funzionamento.

Descrizione del progetto ReLab monitoraggio

Il progetto ReLab monitoraggio ha coinvolto 27 impianti a PDC, installati principalmente in edifici pubblici quali scuole, municipi, palestre e residenze per disabili. La campagna di misura è stata effettuata tra l'inverno 2013-2014 e l'estate 2015.

Gli impianti sono dislocati su un'area abbastanza vasta, mostrata in Figura 1, caratterizzata da condizioni climatiche differenti che vanno dai 2355 gradi giorno di Ostiglia (MN) ai 2919 gradi giorno di Serle (BG); hanno diverse caratteristiche sia in

termini di destinazione d'uso, sia di potenza termica installata (da 7 kW a 400 kW), che di sorgente di calore: aria, acqua di falda, terreno. Infine, le PDC sono principalmente del tipo elettriche a compressione di vapore, a eccezione di 5 impianti con PDC ad assorbimento alimentate a gas naturale. Le caratteristiche eterogenee del campione analizzato hanno permesso di ottenere un quadro abbastanza ampio del funzionamento in campo di questa tecnologia.

Procedura di monitoraggio

Uno dei punti di partenza del progetto è stata la scelta di un insieme



Figura 1 – Distribuzione geografica degli impianti monitorati



FIELD MONITORING OF HEAT PUMPS IN PUBLIC BUILDINGS

As part of the ReLab project funded by the Lombardy Region, a campaign to monitor heat pumps plants, mainly installed in public buildings, has been promoted to evaluate their actual performance in the field and to analyze the impact on their performance of the real conditions of operation. The ReLab monitoring project involved 27 heat pumps plants, mainly installed in public buildings such as schools, town halls, gyms and disabled homes. The measurement campaign was carried out between winter 2013-2014 and summer 2015. From the presented results it emerges that the performances of the heat pumps in the field can be strongly influenced by several factors, related both to the design and to the management of the plant. Therefore, it is clear that the integration of a monitoring system can be extremely useful to become aware of the actual consumption and the real performance in the field of the plant, so as to understand its weaknesses and implement corrective actions, even if only at level of adjustment of schedules and set-points, to significantly reduce energy waste.

Keywords: ReLab project, heat pumps, field monitoring

coerente di indicatori di monitoraggio che consentissero il confronto delle prestazioni stagionali di impianti aventi configurazioni idrauliche molto diverse.

Dato che gli impianti sono alimentati da vettori energetici differenti, energia elettrica per le PDC a compressione e gas per quelle ad assorbimento, per confrontarne le prestazioni è stato adottato come indicatore di performance il Primary Energy Ratio, dato dal rapporto fra l'energia termica prodotta e l'energia in ingresso al sistema, in termini di energia primaria:

$$PER = \frac{Q_{HP}}{Q_{fuel} \cdot f_p + E} \quad (1)$$

con:

Q_{HP} : energia termica prodotta dal sistema, J;

Q_{fuel} : energia termica associata al gas naturale in ingresso, J;

E : energia elettrica in ingresso, J;

f_p : fattori di conversione in energia primaria, uguale a 1 per il gas naturale e a 2,18 per l'energia elettrica, adim.

Per caratterizzare il rendimento delle diverse componenti dell'impianto, questo indicatore può essere calcolato su diversi volumi di controllo del sistema. In particolare ci si è soffermati sui due volumi di controllo descritti nel Box 1 e illustrati in Figura 2, per caratterizzare da una parte le prestazioni della sola PDC, dall'altra l'influenza degli ausiliari sul consumo dell'impianto.

Per caratterizzare in modo più dettagliato le condizioni di funzionamento dell'impianto, da cui dipendono strettamente le sue prestazioni, sono stati inclusi nell'analisi i seguenti ulteriori parametri:

- temperatura esterna, da cui dipende la richiesta

BOX 1

VOLUMI DI CONTROLLO PER IL CALCOLO DEL PER

PER1: è relativo alla sola PDC. Rappresenta l'efficienza della macchina, in quanto analogo al COP per le PDC elettriche, ma calcolato in termini di energia primaria.

PER2: include i consumi della PDC e degli ausiliari sul circuito sorgente, ad esempio i ventilatori per PDC ad aria e le pompe di pozzo per PDC ad acqua di falda, e sul circuito primario di mandata all'edificio.

PER1*: nella maggior parte degli impianti, gli ausiliari considerati nel volume di controllo del PER2 sono interni alla PDC. In questi casi, per calcolare l'indicatore PER1 sarebbe necessario misurare separatamente i consumi del compressore, installando un misuratore di energia elettrica all'interno della macchina.

Dato che le pompe di circolazione spesso hanno periodi di funzionamento molto maggiori rispetto a quelli della PDC, il loro consumo può avere un peso rilevante sul valore del PER2. Qualora si voglia valutare il rendimento della sola PDC, cercando di depurarla il più possibile dal consumo elettrico dei circolatori interni, ma non si misuri in modo separato il consumo dei compressori, come ad esempio nel caso della campagna di monitoraggio qui presentata, dove per questioni di garanzia del prodotto non è stato possibile installare misuratori internamente alle macchine, viene definito un ulteriore indicatore, il PER1*, calcolato sullo stesso volume di controllo del PER2, ma tenendo in considerazione come energia in ingresso la sola energia misurata durante i cicli di funzionamento della PDC, così da escludere il contributo dei circolatori nei periodi in cui la PDC è in standby, come mostrato in Figura 3.

Figura 2 – Volumi di controllo per il calcolo di PER1 e PER2

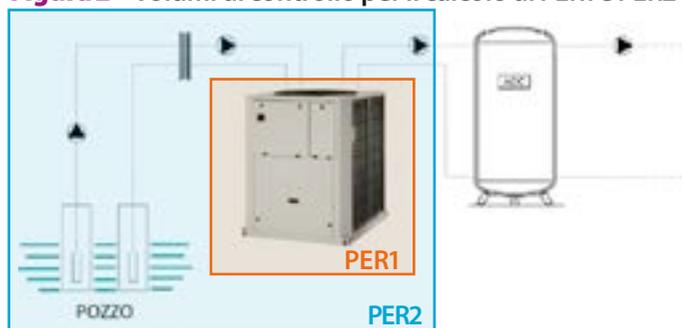
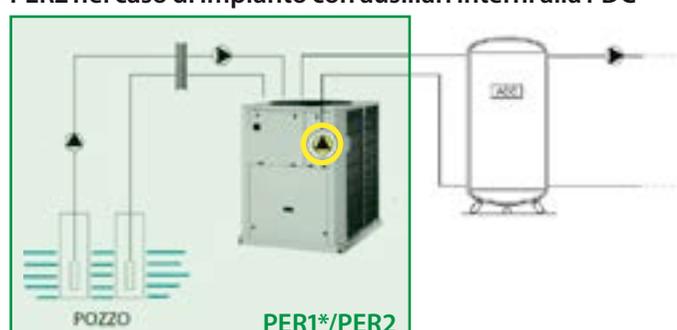


Figura 3 – Volume di controllo per il calcolo di PER1* e PER2 nel caso di impianto con ausiliari interni alla PDC



di energia termica dell'edificio e quindi il fattore di carico della PDC, e che, nel caso di PDC aria/acqua, corrisponde alla temperatura della sorgente termica;

- temperatura della sorgente termica;
- temperature di mandata e ritorno della PDC, da cui è possibile comprendere le strategie di controllo dell'impianto, per esempio se la temperatura di mandata viene regolata in funzione della temperatura esterna o a punto fisso;
- differenza di temperatura fra l'evaporatore e il condensatore della PDC, derivata dalle variabili precedenti, che ha un'influenza diretta sull'efficienza teorica massima del ciclo termodinamico della PDC;
- durata media e numero medio giornaliero dei cicli di accensione, per comprendere se la PDC lavora in condizioni prossime al regime stazionario o se al contrario ha un funzionamento caratterizzato da cicli di breve durata che possono comprometterne l'efficienza;
- durata di accensione dei circolatori rispetto a quella della PDC e rapporto fra l'energia consumata solo durante i cicli di accensione della PDC e l'energia complessiva consumata dall'impianto, per valutare il peso del consumo elettrico dei circolatori rispetto a quello della PDC;
- potenza termica media oraria prodotta dalla PDC, per valutare la regolazione oraria dell'impianto e verificare la coerenza rispetto agli orari di occupazione dell'edificio.

L'architettura del sistema di monitoraggio installato su ogni impianto è descritta in Figura 4: i segnali degli strumenti di misura installati sull'impianto vengono raccolti da un data-logger locale, con tempo di campionamento di 1 minuto e attraverso una connessione internet vengono inviati e archiviati su un server remoto.

Per misurare le grandezze fisiche coinvolte nel calcolo degli indicatori precedentemente descritti, sono stati utilizzati i seguenti strumenti di misura:

- contabilizzatori di energia termica, comprensivi di una coppia di termoresistenze e di un misuratore di portata, per misurare l'energia termica sui circuiti idraulici;
- misuratori di energia elettrica, per misurare il consumo delle PDC elettriche e degli ausiliari;
- misuratori di portata di gas naturale, comprensivi di sonde di temperatura e pressione, per le PDC ad assorbimento alimentate a gas;
- sonde di temperatura e umidità esterne, per caratterizzare le condizioni ambientali esterne.

Su ogni impianto sono stati installati gli stessi tipi di strumenti di misura, per garantire la confrontabilità dei risultati.

Analisi dei risultati

La Figura 5 mostra l'efficienza globale in modalità riscaldamento di ogni impianto, in termini di: PER1*, rappresentativo dell'efficienza calcolata durante i cicli di funzionamento della PDC, e di PER2, che

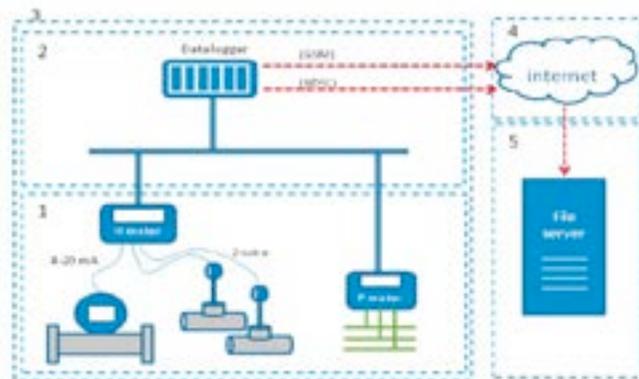


Figura 4 – Architettura del sistema di monitoraggio

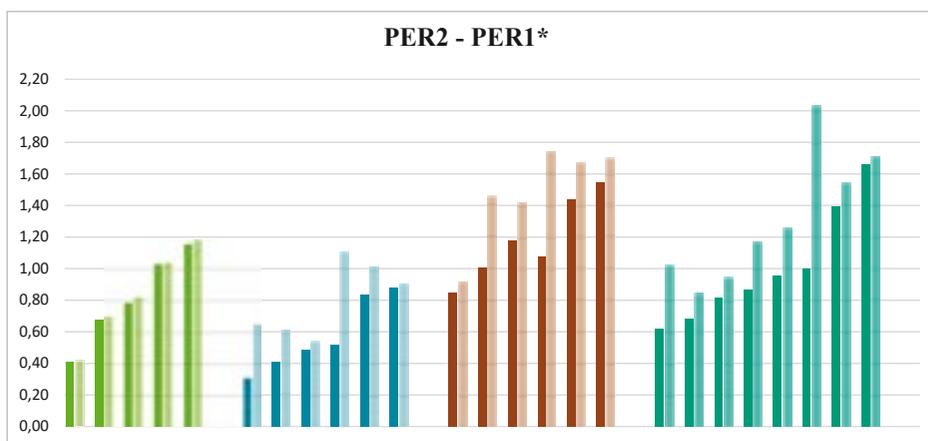


Figura 5 – PER1* e PER2 di ogni impianto, calcolati sull'intero periodo di monitoraggio

- PER1* ■ PER2 PDC ad assorbimento aria/acqua;
- PER1* ■ PER2 PDC a compressione di vapore aria/acqua;
- PER1* ■ PER2 PDC a compressione di vapore terra/acqua;
- PER1* ■ PER2 PDC a compressione di vapore acqua/acqua.

include il consumo elettrico degli ausiliari anche quando la PDC è in stand-by.

Come spiegato precedentemente, il PER1 può essere calcolato solo per quegli impianti in cui gli ausiliari sono esterni alla PDC, mentre in tutti gli altri casi l'efficienza della PDC viene rappresentata dal PER1*. Per questo motivo il confronto fra le prestazioni delle PDC dei diversi impianti è espresso in termini di PER1*. A livello di rendimento della sola PDC, rappresentato dal PER1*, si osservano valori piuttosto bassi rispetto ai livelli di efficienza dichiarati dai costruttori, tenuto conto che per una PDC elettrica COP = 3 corrisponde all'incirca a PER1 = 1,4; questo è dovuto sia al fatto che i dati dichiarati derivano da test in laboratorio in condizioni controllate, molto più stabili rispetto a quelle reali, sia ad altri fattori spiegati qui di seguito. Tendenzialmente i risultati migliori si riscontrano nelle macchine che sfruttano una sorgente termica stabile nel tempo, come il terreno e l'acqua di falda, mentre le PDC ad aria risentono negativamente dell'oscillazione della temperatura dell'aria esterna e della necessità di eseguire cicli di sbrinamento.

Analizzando i dati dei singoli impianti, emerge che spesso le performance delle PDC sono fortemente penalizzate dalle scelte progettuali, per esempio il sovradimensionamento della potenza nominale della macchina rispetto alla reale richiesta

di energia termica da parte dell'edificio, che comporta la necessità di effettuare brevi e frequenti cicli di accensione-spegnimento, al fine di modulare la potenza; in questo caso, l'impossibilità di lavorare in condizioni prossime al regime stazionario impedisce alla macchina di raggiungere le performance indicate dai costruttori a parità di temperature di funzionamento. Questo fenomeno spesso si verifica perché la PDC viene progettata per coprire il carico di picco relativo alle condizioni climatiche più rigide e quindi si trova a lavorare con richieste di potenze molto inferiori alla potenza nominale per la maggior parte del tempo.

Spesso il problema del sovradimensionamento della potenza della PDC è aggravato dall'assenza o dal sottodimensionamento del serbatoio inerziale, che slega il comportamento della PDC dalla richiesta di energia termica contingente, consentendo alla macchina di effettuare cicli più lunghi in condizioni prossime al

regime stazionario. Un esempio di questo fenomeno è evidenziato in Figura 6, relativa a uno degli impianti con PDC aria/acqua con prestazioni inferiori alle attese: è evidente che durante tutto il periodo di monitoraggio la durata media dei cicli è molto bassa e sempre minore di 10 minuti, proprio perché la potenza nominale della PDC è eccessiva e, in mancanza di un serbatoio inerziale, raggiunge troppo rapidamente il set point, anche nei mesi invernali, con cicli di funzionamento più frequenti rispetto alle mezze stagioni, ma sempre molto brevi.

Il rendimento delle PDC è fortemente influenzato anche dalla regolazione della temperatura di mandata. In alcuni impianti, probabilmente a causa di terminali che necessitano di temperature di esercizio alte, si riscontrano temperature di mandata molto elevate, fino a 60 °C, che causano una differenza di temperatura fra evaporatore e condensatore eccessiva, a scapito delle performance della macchina. Inoltre, nella maggior parte dei casi, la temperatura di mandata è regolata a punto fisso e rimane quindi costante per tutto il periodo di funzionamento, indipendentemente dalla variazione del carico termico nell'arco della stagione. Questo fa sì che nei mesi

meno rigidi il carico venga soddisfatto molto rapidamente, causando lo stesso effetto precedentemente spiegato di cicli di accensione brevi, che compromettono la resa della PDC.

In Figura 5 si riscontra spesso un notevole divario fra i valori di PER1* e di PER2, quest'ultimo mediamente più basso del 20%, da cui si comprende quanto sia importante il contributo di tutte le componenti dell'impianto rispetto alla resa della sola PDC.

I motivi per cui il PER2 si discosta fortemente dall'efficienza della sola PDC derivano dal peso del consumo energetico degli ausiliari; infatti, soprattutto negli impianti che sfruttano l'energia termica del terreno e dell'acqua di falda, l'assorbimento elettrico dei circolatori rappresenta una quota rilevante del consumo globale dell'impianto. In moltissimi casi questo aspetto è accentuato dal fatto che il periodo di accensione dei circolatori dei circuiti primari è molto maggiore rispetto a quello della PDC; questo può dipendere dallo specifico funzionamento della macchina o dalla modalità di regolazione che, se basata sulla temperatura dell'acqua in ingresso alla PDC, implica che i circolatori rimangano sempre attivi, a prescindere dalla produzione di energia termica, determinando un incremento del consumo elettrico e maggiori dispersioni termiche. In particolare, durante i mesi meno rigidi in cui la PDC interviene più sporadicamente, il consumo dovuto al funzionamento prolungato dei circolatori rappresenta una quota molto significativa rispetto al consumo della PDC durante i soli cicli di funzionamento. Abbiamo stimato che, se tutte le pompe di circolazione fossero state regolate in modo da attivarsi solamente in

concomitanza dei cicli di accensione della PDC, si sarebbe potuto ridurre del 21% il consumo di energia elettrica complessivo di tutti gli impianti, misurato sull'intero periodo di monitoraggio.

Infine, al di là delle analisi sul rendimento dell'impianto e dei suoi componenti, si osserva che, come ovvio, spesso la gestione poco attenta degli impianti determina sprechi di energia facilmente evitabili; in particolare, abbiamo riscontrato su alcuni impianti l'assenza di una regolazione oraria, che comporta un consumo energetico anche durante i periodi di non occupazione dell'edificio.

Conclusioni

Dai risultati presentati emerge che le prestazioni delle pompe di calore in campo possono essere fortemente influenzate da diversi fattori, legati sia alla progettazione che alla gestione dell'impianto.

Pertanto è evidente che l'integrazione di un sistema di monitoraggio può risultare estremamente utile per prendere coscienza degli effettivi consumi e delle reali prestazioni in campo dell'impianto, in modo tale da comprenderne i punti deboli e mettere in atto azioni correttive, anche solo a livello di regolazione di orari e set-point, per ridurre anche sensibilmente gli sprechi di energia.

* Marica Fumagalli, Alessandro Sivieri e Matteo Zanchi, Politecnico di Milano
Mario Motta e Rossano Scoccia, Politecnico di Milano
Livio Mazzarella, Politecnico di Milano
– Vice Presidente di AiCARR per i Rapporti Internazionali

Figura 6 – Durata media e numero medio giornaliero dei cicli di accensione della PDC di uno degli impianti analizzati

