



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**FREE COOLING RESIDENZIALE:
ANALISI ENERGETICA DI DUE STRATEGIE DI
CLIMATIZZAZIONE**

Free Cooling in residential applications: energy analysis of two control strategies for HVAC systems

Relatore:

Prof. Michele De Carli

Correlatori:

Prof. Marco Mariotti

Ing. Giuseppe Emmi

Laureando:
ANDREA CORRADI
1084292

ANNO ACCADEMICO 2015-2016

INDICE

PREAMBOLO.....	PAG 1
PARTE I	
CENNI STORICI.....	PAG 5
LEGGE 373 DEL 07/06/1976.....	PAG 7
LEGGE 10 DEL 09/01/1991.....	PAG 9
LA DIRETTIVA 2002/91/CE DEL 16/12/2002.....	PAG 13
LO STATO DELL'ARTE ATTUALE.....	PAG 15
DM 26/06/2015	PAG 23
CONFORT TERMOIGROMETRICO.....	PAG 51
IMPIANTI RADIANTI	PAG 61
IMPIANTI AD ARIA.....	PAG 67
PARTE II	
COSTRUZIONE DELLA STANZA.....	PAG 71
ANALISI DEL FABBISOGNO.....	PAG 75
IMPIANTO RADIANTE CON VMC.....	PAG 83
Ventilazione Meccanica Controllata.....	PAG 83
Impianto Radiante.....	PAG 84
Deumidificatore.....	PAG 90
Risultati del Sistema.....	PAG 91
IMPIANTO A TUTTA ARIA.....	PAG 101
Risultati del Sistema.....	PAG 105
CONCLUSIONI	PAG 115
BIBLIOGRAFIA.....	PAG 117

PREAMBOLO

L'aumento della popolazione mondiale e del fabbisogno energetico, l'intenso sfruttamento delle risorse petrolifere e minerarie, l'innalzamento delle temperature e l'insieme delle variazioni climatiche avvenute nel nostro pianeta hanno portato la popolazione mondiale ad una presa di coscienza sulla necessità rivedere le modalità con cui utilizzare l'energia. Insieme ad un utilizzo più responsabile dell'energia nasce l'esigenza di utilizzare fonti di energia alternative ai combustibili fossili, in particolare delle energie rinnovabili. Di primaria importanza, a fianco alla costruzione di nuove centrali elettriche a minore impatto ambientale, sono la riduzione dei consumi energetici pro capite e la riduzione della CO₂ emessa in atmosfera. Secondo l'ISTAT in Italia ci sono più di 28 milioni di abitazioni e più di 14 milioni di edifici, la maggior parte dei quali ha più di 40 anni. Si tratta di un importante patrimonio edilizio costruito in un'epoca dove l'Energia era a buon mercato. I consumi degli stessi edifici, in accordo con le abitudini di allora, erano e sono tuttora molto elevati. Si parla del 40% del consumo energetico nazionale utilizzato nelle abitazioni. Un valore che può essere senza dubbio ridotto eliminando gli sprechi degli stessi edifici intervenendo con opere di riprogettazione e di Riqualificazione Energetica che concorrono allo stesso tempo alla riduzione del consumo di suolo dato dalla costruzione di sempre nuovi edifici. Su scala nazionale questo pensiero ha portato ad intervenire nuovamente all'interno delle città, non solo considerando gli interventi necessari dal punto di vista termotecnico negli edifici, ma plasmando gli spazi urbani per soddisfare una nuova richiesta del mercato immobiliare.

Riqualificazione urbanistica, riqualificazione energetica e consumo responsabile, insieme ad un appropriato quadro normativo e con l'aiuto delle politiche europee e degli incentivi economici derivanti da queste, costituiscono una nuova opportunità per le aziende del settore.

Le ultime normative sul risparmio energetico privilegiano soprattutto l'isolamento. In regime invernale, quindi di riscaldamento, l'aumento dell'isolamento porta notevoli benefici. Non è così per il regime estivo in cui si necessita di raffrescare l'edificio. Nei mesi estivi influiscono molto di più l'irraggiamento e i carichi interni, rispetto agli scambi di calore tra esterno ed interno. Questo avviene perché le differenze di temperature sono molto contenute, dell'ordine di qualche grado centigrado, non della decina come nel caso invernale.

L'isolamento termico elevato nel periodo di raffrescamento influisce sulla data di inizio del condizionamento e sull'energia richiesta annualmente per raffrescare un edificio.

Il primo fenomeno è chiaro osservando la figura A.

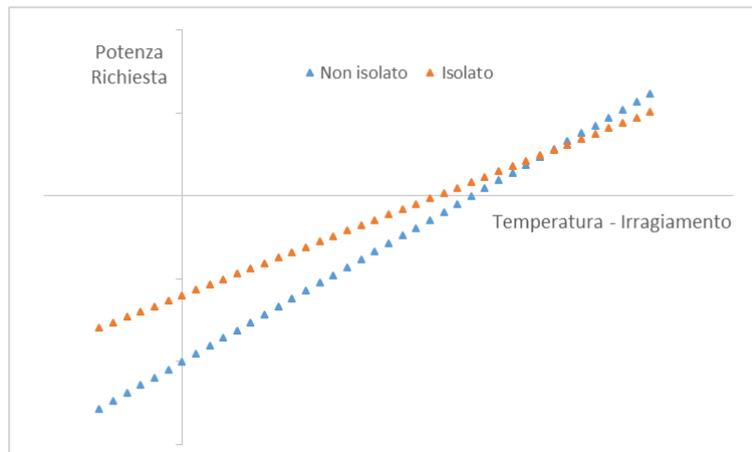


Figura A: Andamento Indicativo della potenza richiesta in funzione della temperatura e irraggiamento per edifici isolati e non isolati.

Riportando in ascissa la combinazione di temperatura e irraggiamento, ed in ordinata la potenza richiesta negativa per il riscaldamento e positiva per il condizionamento (l'edificio disperde calore verso l'ambiente esterno nei mesi freddi e riceve calore dall'ambiente esterno nel periodo estivo), si osserva in modo qualitativo l'andamento della richiesta di potenza al variare dell'isolamento.

In termini di potenza l'isolamento termico influisce molto in riscaldamento, poco in condizionamento. All'aumentare della temperatura o dell'irraggiamento, o entrambi, diminuisce sempre di più la quantità di calore disperso dall'edificio. Il punto d'inversione, ovvero il passaggio dal riscaldamento al condizionamento, avviene molto prima per un edificio isolato, rispetto ad uno non isolato. Ciò significa che un edificio isolato ha bisogno prima di essere raffreddato.

Questo è un fatto assolutamente positivo nel regime invernale perché non esiste mai alcuna forma di "riscaldamento gratuito" legata all'aria esterna. Infatti non si ha mai necessità di riscaldare un edificio quando la temperatura dell'aria esterna è maggiore di quella ambiente.

In figura B si può vedere invece il secondo fenomeno.

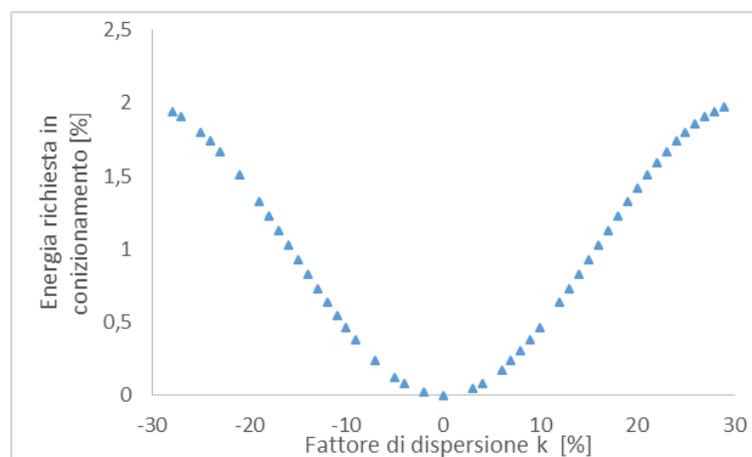


Figura B: Andamento della richiesta di energia in condizionamento in funzione del coefficiente di dispersione termica k.

Nel regime di condizionamento non è sempre positivo aumentare l'isolamento. Vi è, infatti, un valore ottimale di tale isolamento, variabile a seconda del tipo di edificio, delle superfici vetrate, del fattore di *shading* e dei carichi endogeni interni. L'energia richiesta in condizionamento aumenta in proporzioni basse (intorno al 2% massimo) sia all'aumentare che al diminuire del coefficiente di dispersione. Il fenomeno è facilmente spiegabile. Se l'edificio è poco isolato (coefficiente k maggiore) vi è una maggiore richiesta di energia quando la temperatura dell'aria esterna è elevata, a causa delle maggiori rientrate di calore attraverso le strutture. Viceversa, se l'edificio è molto isolato (coefficiente k minore), l'isolamento riduce la cessione all'esterno dei carichi endogeni, nei periodi in cui la temperatura esterna è minore di quella interna. Pertanto risulta sempre utile isolare, a patto di non incorrere nella necessità di raffrescare gli ambienti per periodi di durata eccessiva, altrimenti l'aumento di energia richiesta dal condizionamento rischia di annullare gli effetti positivi dell'isolamento in riscaldamento.

Si comprende allora come negli attuali edifici residenziali diventino sempre più importanti le tematiche del recupero di calore tra aria ambiente espulsa e aria esterna di rinnovo, ed il corretto sfruttamento del free-cooling.

Nelle pagine che seguono si vuole affrontare un excursus sull'evoluzione della normativa, relativamente al settore residenziale, per capire le motivazioni storiche e tecnologiche che hanno portato allo stato dell'arte attuale.

Si vuole infine analizzare una comune situazione impiantistica residenziale per comprendere quale sia il corretto modo di agire in termini di risparmio energetico e confort nel caso di elevati isolamenti dell'involucro.

PARTE I

CENNI STORICI

Alla fine del secondo dopoguerra l'Italia poté riprendere la sua crescita economica con l'aiuto del piano Marshall. La posizione geograficamente strategica e le dinamiche della guerra fredda, nonché l'inizio della guerra in Corea, furono i principali fattori dello sviluppo dell'industria pesante del Belpaese. Inizia il miracolo economico italiano, un periodo di grande crescita tecnologica e di trasformazione dello stile di vita e dei costumi degli italiani. Cresce la presenza degli elettrodomestici nelle abitazioni, aumentano le automobili in circolazione e, soprattutto, cresce il fabbisogno energetico delle famiglie. Anche le abitazioni subiscono una trasformazione dal punto di vista strutturale. Lo sviluppo demografico intorno ai poli industriali Italiani reclama la costruzione di sempre nuove abitazioni che, secondo i canoni dell'epoca, richiedono grandi quantità di energia per garantire le condizioni di confort.

Lo splendore economico trovò il suo apice nel 1960 e durò fino all'Ottobre del 1973 quando iniziò la crisi petrolifera. Gli Stati di Siria ed Egitto attaccarono la penisola Israeliana con il sostegno dei Paesi Arabi che raddoppiarono il prezzo del petrolio diminuendo le esportazioni anche del 25% come ammonimento verso i Paesi Europei sostenitori di Israele.

Per la prima volta in Italia il legislatore inizia a parlare di risparmio energetico. Si pensa ad una immediata serie di provvedimenti atti a diminuire il consumo di petrolio come: il divieto di circolare in auto la domenica, la fine anticipata dei programmi televisivi, la riduzione dell'illuminazione stradale e commerciale. In questa logica di austerità il 7 Giugno 1976 venne pubblicata nella Gazzetta Ufficiale Italiana la legge 373: *“Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici. Accanto alle misure di contenimento dei consumi”*, l'Europa iniziò ad interessarsi seriamente alle fonti di energia alternative al petrolio come il gas naturale e l'energia atomica. Non si tratta ancora di forme di energia “green” ma certamente si tratta di una svolta nella mentalità occidentale. Successivamente in Italia si riuscì a far convergere le diverse linee di pensiero riguardo la normativa edilizia in un'unica legge pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale Italiana del 09 Gennaio 1991 ovvero la legge 10: *“Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia”*. Si tratta della pietra miliare per quella che sarà la politica del risparmio energetico e sarà seguita da un certo numero di Decreti Legge al fine di orchestrare al meglio il settore edilizio e le numerose aziende operanti in esso.

LEGGE 373 DEL 07/06/1976

Lo scopo è il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici e si impone nel regolare le caratteristiche di prestazione dei componenti, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici per riscaldamento degli ambienti e per la produzione di acqua calda sanitaria alimentati da combustibile negli edifici pubblici e privati, ad esclusione di quelli adibiti ad attività industriali o artigianali. Le norme si applicano a tutti gli edifici di nuova costruzione dall'entrata in vigore delle stesse ed in caso di sostituzione o modifica degli impianti appartenenti ad edifici già esistenti. Si prevede che la temperatura dell'aria nell'ambiente non sia superiore a 20°C ad esclusione di casi particolari se opportunamente giustificati da relazioni tecniche. Tutti i componenti degli impianti devono essere omologati secondo quanto già previsto dall'ANCC (Associazione Nazionale per il Controllo della Combustione) al fine di garantire la corrispondenza dei prototipi e delle serie alle condizioni di rendimento più economiche dichiarate. Nel caso di potenze superiori o uguali alle cinquanta mila kcal/h si deve disporre l'impianto di un sistema automatico di regolazione del calore funzionante in relazione alle variazioni della temperatura esterna. Questo sistema di regolazione diventa obbligatorio per gli impianti già esistenti nel caso in cui il combustibile sia liquido o gassoso e la potenza al focolare sia superiore o uguale a cento mila kcal/h. Si prevede che la temperatura dell'acqua calda sanitaria non debba essere superiore a 48°C e che vi sia la presenza di contatori divisionali. Si determinano anche le modalità relative ad una corretta coibentazione degli edifici e degli impianti con particolare riferimento al coefficiente volumico globale di dispersione termica espresso in kcal/(hm³°C). È infatti stabilito un valore massimo ammissibile di tale coefficiente per ciascun comune delle rispettive regioni.

Precedentemente alla realizzazione di un nuovo impianto, deve essere depositato, presso gli uffici competenti del comune, il progetto dell'impianto corredato da un'opportuna relazione tecnica con un calcolo di previsione del consumo energetico. Tutti gli impianti di potenza superiore o uguale a cento mila kcal/h devono essere collaudati entro dieci mesi dal rilascio della licenza di uso ed abitabilità dalla figura tecnica competente.

La non osservanza di tali norme da parte del costruttore o del progettista viene punita mediante sanzioni amministrative pesate anche sulla taglia dell'impianto.

LEGGE 10 DEL 09/01/1991

Questa legge non è solamente una rivisitazione della legge 373 del '76, ma è la concretizzazione del primo importante passo compiuto dal legislatore verso l'introduzione delle fonti di energia rinnovabile negli impianti destinati ad uso civile e pubblico. Vengono considerate fonti rinnovabili di energia: il sole, il vento, l'energia idraulica, le risorse geotermiche, le maree, il moto ondoso e la trasformazione dei rifiuti organici o di prodotti vegetali. Le regioni e le province autonome sono tenute a presentare un piano regionale (o provinciale) relativo all'uso delle fonti rinnovabili di energia. È interessante notare che diventa obbligatorio il ricorso all'uso di fonti rinnovabili in tutti gli edifici pubblici, o ad uso pubblico, salvo impedimenti di natura tecnica o economica.

Parte importante del documento riguarda l'attuazione del teleriscaldamento in tutto il territorio nazionale, ove possibile.

Da questo momento gli impianti di riscaldamento devono essere progettati in modo da consentire l'adozione di sistemi di termoregolazione e di contabilizzazione del calore per ogni singola unità immobiliare; cioè non si agisce più in una logica complessiva di edificio, ma si vuole inseguire il fabbisogno energetico della singola abitazione all'interno dell'edificio.

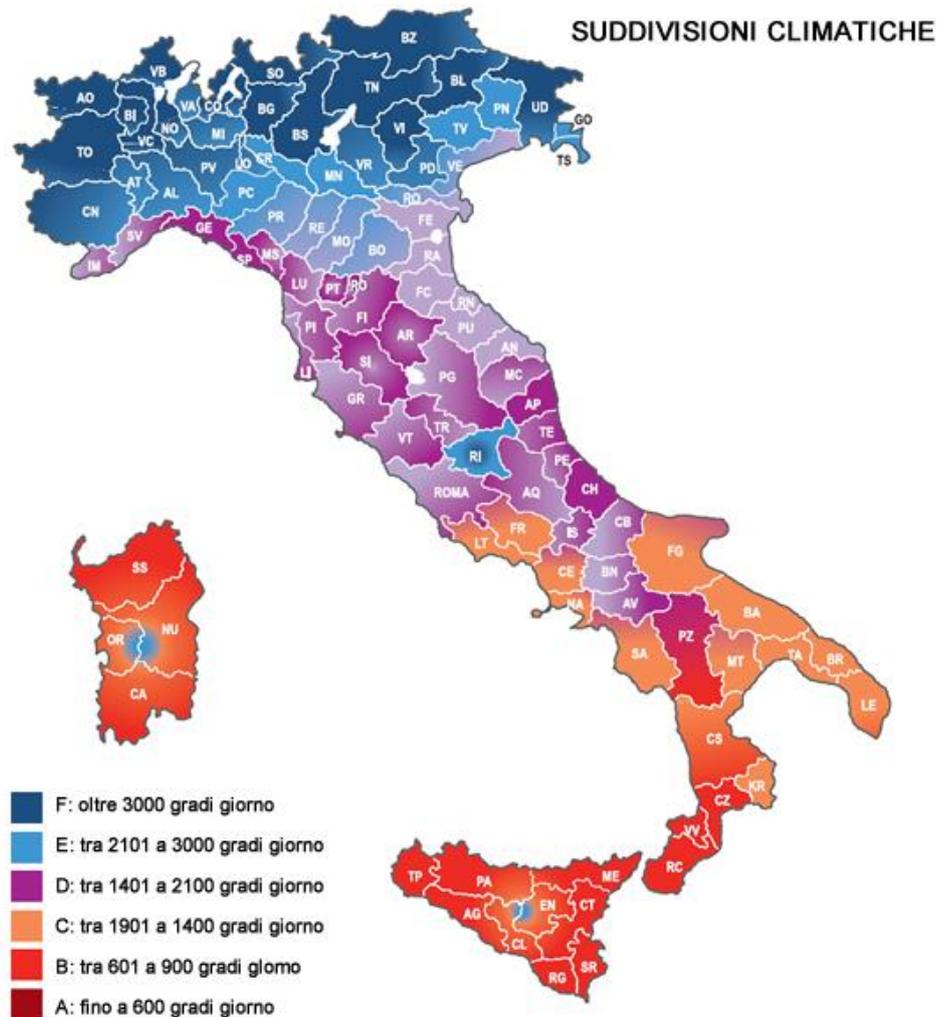
Lo strumento con cui si promuove questa evoluzione tecnologica degli impianti è di natura economica. Si prevedono infatti degli incentivi che vanno da un 20% ad un 40% delle spese di investimento. Le opere che prevedono incentivi sono descritte caso per caso e non toccano solo i casi di climatizzazione e coibentazione, ma toccano anche l'installazione di sistemi di illuminazione ad alto rendimento, anche nelle aree esterne.

La non osservanza della normativa è poi punita mediante sanzioni amministrative la cui entità varia a seconda dei casi specifici.

I contenuti più importanti di questa nuova linea di pensiero si trovano però all'interno del successivo D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412: *“Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10”*.

Si individuano così sei zone climatiche in funzione dei gradi - giorno, indipendentemente dalla ubicazione geografica:

- Zona A: comuni che presentano un numero di gradi - giorno non superiore a 600;
- Zona B: comuni che presentano un numero di gradi - giorno maggiore di 600 e non superiore a 900;
- Zona C: comuni che presentano un numero di gradi giorno maggiore di 900 e non superiore a 1.400;
- Zona D: comuni che presentano un numero di gradi - giorno maggiore di 1.400 e non superiore a 2.100;
- Zona E: comuni che presentano un numero di gradi - giorno maggiore di 2.100 e non superiore a 3.000;
- Zona F: comuni che presentano un numero di gradi - giorno maggiore di 3.000.



Viene fatta una classificazione generale degli edifici a seconda delle categorie di appartenenza (Edifici adibiti a residenza e assimilabili; Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura; Edifici adibiti ad attività scolastiche; ecc.)

Si stabiliscono i valori massimi della temperatura ambiente in inverno. Cioè si chiede che, durante il periodo in cui è in funzione l'impianto di climatizzazione invernale, la media aritmetica delle temperature dell'aria (nei diversi ambienti di ogni singola unità immobiliare), non debba superare i seguenti valori:

- 18°C + 2°C di tolleranza per gli edifici rientranti nella categoria E.8: Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili
- 20°C + 2°C di tolleranza per gli edifici rientranti nelle categorie diverse da E.8.

Nello stabilire i Requisiti degli impianti termici ed i principali criteri di dimensionamento, si definisce il rendimento di produzione medio stagionale come il rapporto tra l'energia termica utile generata ed immessa nella rete di distribuzione e l'energia primaria delle fonti energetiche, compresa l'energia elettrica, calcolato con riferimento al periodo annuale di esercizio. Tale rendimento deve essere maggiore o uguale al seguente valore di riferimento:

$$\eta_p = (77 + 3 \log(P_n))\%$$

dove P_n è la potenza nominale dell'impianto.

Oltre al rendimento medio stagionale si prevedono dei valori di riferimento anche per il rendimento istantaneo. Se l'impianto termico è ad acqua calda per la climatizzazione invernale ed ha potenza nominale superiore a 350 kW, si deve ripartire la stessa potenza almeno su due generatori di calore.

La temperatura dell'acqua, in un impianto di produzione di acqua calda sanitaria, misurata nel punto di immissione della rete di distribuzione, non deve superare i 48°C, + 5°C di tolleranza.

Per quanto concerne la termoregolazione e la contabilizzazione è prescritta l'adozione di un gruppo termoregolatore dotato di programmatore che consenta la regolazione della temperatura ambiente almeno su due livelli, a valori sigillabili nell'arco delle 24 ore, quando la potenza nominale del generatore di calore o quella complessiva dei generatori di calore sia uguale o superiore a 35 kW. La temperatura esterna, e le temperature di mandata e di ritorno del fluido termovettore, devono essere misurate con una incertezza non superiore a $\pm 2^\circ\text{C}$. Termoregolazione e contabilizzazione devono riguardare ogni singola unità abitativa.

I periodi di esercizio degli impianti di riscaldamento vengono stabiliti in funzione delle fasce climatiche come segue:

- Zona A: 6 ore giornaliere dal 1 dicembre al 15 marzo;
- Zona B: 8 ore giornaliere dal 1 dicembre al 31 marzo;
- Zona C: 10 ore giornaliere dal 15 novembre al 31 marzo;
- Zona D: 12 ore giornaliere dal 1 novembre al 15 aprile;
- Zona E: 14 ore giornaliere dal 15 ottobre al 15 aprile;
- Zona F: nessuna limitazione ma compresa tra le ore 5 e le ore 23 di ciascun giorno.

Il D.P.R. 412/93 presenta anche nove allegati ordinati secondo le lettere dalla A alla I che possono essere così descritti:

ALLEGATO A: riporta le tabelle dei gradi giorno dei vari comuni italiani ordinata per regioni e province, insieme all'altitudine della casa comunale ed alla zona climatica di appartenenza.

ALLEGATO B: definisce lo spessore minimo del materiale di coibentazione da apportare alle tubazioni dell'impianto in funzione del diametro della tubazione espresso in mm e della conduttività termica utile del materiale isolante espressa in $\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ alla temperatura di 40°C.

ALLEGATO C: presenta una tabella per la determinazione delle ore di funzionamento annue dell'impianto (M) in funzione della portata totale in m^3/h e dei gradi giorno.

ALLEGATO D: descrive le tecnologie per l'utilizzo delle fonti rinnovabili di energia, o assimilate, per la produzione di energia in specifiche categorie di edifici di proprietà pubblica o adibiti ad uso pubblico

ALLEGATO E: stabilisce il valore minimo del rendimento di combustione dei generatori di calore, in percentuale, in funzione della potenza nominale degli stessi. In particolare:

Per generatori di potenza nominale inferiore o uguale a 400 kW:

$$\eta_c = (82 + 2 \log(P_n))\%$$

Per generatori di potenza nominale superiore a 400 kW si utilizza il valore di rendimento di combustione ottenuto per 400 kW.

ALLEGATO F: riporta il modello del libretto di centrale obbligatorio per gli impianti termici con potenza termica del focolare nominale superiore o uguale a 35 kW.

ALLEGATO G: riporta il modello del libretto di centrale obbligatorio per gli impianti termici con potenza termica del focolare nominale inferiore a 35 kW.

ALLEGATO H: si tratta del rapporto di controllo tecnico dell'impianto che deve essere compilato da un'apposita figura professionale.

ALLEGATO I: prescrive i requisiti minimi degli organismi esterni incaricati delle verifiche, stabilendo in particolare che non possono essere né il progettista, il fabbricante, il fornitore o l'installatore delle caldaie e degli apparecchi che controllano, né il mandatario di una di queste persone.

LA DIRETTIVA 2002/91/CE DEL 16/12/2002

La Direttiva 2002/91/CE Del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia ed il seguente Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, per l'attuazione della Direttiva, introducono il concetto di certificazione energetica dell'edificio.

Deve essere redatto un attestato di certificazione energetica dell'edificio che contenga il valore di rendimento energetico dell'edificio stesso e le principali raccomandazioni per il suo futuro miglioramento. Il metodo di calcolo del rendimento energetico deve comprendere almeno i seguenti aspetti:

- a) caratteristiche termiche dell'edificio (murature esterne e divisioni interne, ecc.). Tali
- b) caratteristiche possono anche includere l'ermeticità;
- c) impianto di riscaldamento e di produzione di acqua calda, comprese le relative caratteristiche di coibentazione;
- d) sistema di condizionamento d'aria;
- e) ventilazione;
- f) impianto di illuminazione incorporato (principalmente per il settore non residenziale);
- g) posizione ed orientamento degli edifici, compreso il clima esterno;
- h) sistemi solari passivi e protezione solare;
- i) ventilazione naturale;
- j) qualità climatica interna, incluso il clima degli ambienti interni progettato.

Il calcolo deve tener conto anche degli eventuali vantaggi dati dalla presenza di:

- a) sistemi solari attivi ed altri impianti di generazione di calore ed elettricità a partire da fonti energetiche rinnovabili;
- b) sistemi di cogenerazione dell'elettricità;
- c) sistemi di riscaldamento e condizionamento a distanza (complesso di edifici/condomini);
- d) illuminazione naturale.

Vengono stabiliti dei valori limite dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale in kWh/m^2 annuo in funzione della fascia climatica di appartenenza e del rapporto di forma dell'edificio. Altri valori limite vengono stabiliti per la trasmittanza termica e per il rendimento globale medio stagionale dell'impianto termico pari a:

$$\eta_g = (75 + 3 \log P_n)\% \text{ per } P_n \leq 1000kW$$

$$\eta_g = 84\% \text{ per } P_n > 1000kW.$$

Tale decreto rende ancora più rigida la redazione delle relazione tecnica da depositare in comune prevista dalla legge 10-91 poiché i calcoli si dovranno fare anche per il periodo estivo.

Con la Legge 27 dicembre 2006 n. 296, e con il successivo Decreto Ministeriale del 19 Febbraio 2007, viene accuratamente descritto lo schema di *procedura semplificata* per la determinazione dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale dell'edificio (all'interno dell'ALLEGATO G).

Vengono inoltre rivisitati i valori degli indici di prestazione energetica degli impianti termici, di trasmittanza $U [W/m^2K]$ e di COP minimi per le pompe di calore.

Le normative relative agli anni successivi hanno avuto, come unico contenuto rilevante, il solo aggiornamento di tali valori e dei relativi contributi economici fino ad arrivare allo stato dell'arte attuale.

LO STATO DELL'ARTE ATTUALE

Il normatore, come ultimo aggiornamento in materia, pubblica il D.P.R. del 16 aprile 2013, n. 74: *“Definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione controllo e manutenzione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici”*. Il provvedimento reca modifiche al D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412, ed al D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59.

Come cita il titolo, questo decreto, definisce i criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici, per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, nonché i requisiti professionali e i criteri di accreditamento per assicurare la qualificazione e l'indipendenza degli esperti e degli organismi cui affidare i compiti di ispezione degli impianti di climatizzazione. I criteri generali si applicano sia all'edilizia pubblica che a quella privata.

Durante il funzionamento dell'impianto di climatizzazione invernale, la media ponderata delle temperature dell'aria, misurate nei singoli ambienti riscaldati di ciascuna unità immobiliare, non deve superare:

- 18°C+2°C di tolleranza per gli edifici adibiti ad attività industriali, artigianali e assimilabili;
- 20°C+2°C di tolleranza per tutti gli altri edifici.

Durante il funzionamento dell'impianto di climatizzazione estiva, la media ponderata delle temperature dell'aria, misurate nei singoli ambienti raffrescati di ciascuna unità immobiliare, non deve essere minore di

- 26°C-2°C di tolleranza per tutti gli edifici.

I limiti relativi al periodo annuale ed alla durata giornaliera di attivazione, nonché le fasce climatiche di appartenenza, non variano rispetto a quanto stabilito dal D.P.R. 412. e riguardano tutti gli edifici tranne:

a) agli edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili ivi compresi quelli adibiti a ricovero o cura di minori o anziani, nonché alle strutture protette per l'assistenza ed il recupero dei tossico-dipendenti e di altri soggetti affidati a servizi sociali pubblici;

b) alle sedi delle rappresentanze diplomatiche e di organizzazioni internazionali, che non siano ubicate in stabili condominiali;

c) agli edifici adibiti a scuole materne e asili nido;

d) agli edifici adibiti a piscine, saune e assimilabili;

e) agli edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili, nei casi in cui ostino esigenze tecnologiche o di produzione.

Inoltre, le suddette disposizioni, limitatamente alla sola durata giornaliera di attivazione, non si applicano nei seguenti casi:

a) edifici adibiti a uffici e assimilabili, nonché edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili, limitatamente alle parti adibite a servizi senza interruzione giornaliera delle attività;

b) impianti termici che utilizzano calore proveniente da centrali di cogenerazione con produzione combinata di elettricità e calore;

c) impianti termici che utilizzano sistemi di riscaldamento di tipo a pannelli radianti incassati nell'opera muraria;

d) impianti termici al servizio di uno o più edifici dotati di circuito primario, volti esclusivamente ad alimentare gli edifici di cui alle deroghe previste al comma 5, per la produzione di acqua calda per usi igienici e sanitari, nonché al fine di mantenere la temperatura dell'acqua nel circuito primario al valore necessario a garantire il funzionamento dei circuiti secondari nei tempi previsti;

e) impianti termici al servizio di più unità immobiliari residenziali e assimilate dotati di gruppo termoregolatore pilotato da una sonda di rilevamento della temperatura esterna con programmatore che consenta la regolazione almeno su due livelli della temperatura ambiente nell'arco delle 24 ore; questi impianti possono essere condotti in esercizio continuo purché il programmatore giornaliero venga tarato e sigillato per il raggiungimento di una temperatura degli ambienti pari a $16^{\circ}\text{C} + 2^{\circ}\text{C}$ di tolleranza nelle ore al di fuori della durata giornaliera di attivazione;

f) impianti termici al servizio di più unità immobiliari residenziali e assimilate nei quali sia installato e funzionante, in ogni singola unità immobiliare, un sistema di contabilizzazione del calore e un sistema di termoregolazione della temperatura ambiente dell'unità immobiliare stessa dotato di un programmatore che consenta la regolazione almeno su due livelli di detta temperatura nell'arco delle 24 ore;

g) impianti termici per singole unità immobiliari residenziali e assimilate dotati di un sistema di termoregolazione della temperatura ambiente con programmatore giornaliero che consenta la regolazione di detta temperatura almeno su due livelli nell'arco delle 24 ore nonché lo spegnimento del generatore di calore sulla base delle necessità dell'utente;

h) impianti termici condotti mediante "contratti di servizio energia" ove i corrispettivi sono correlati al raggiungimento del comfort ambientale nei limiti consentiti dal presente regolamento, purché si provveda, durante le ore al di fuori della durata di attivazione degli impianti consentita, ad attenuare la potenza erogata dall'impianto nei limiti indicati.

Per ogni impianto termico al servizio di più unità immobiliari residenziali e assimilate, il proprietario o l'amministratore devono esporre una tabella contenente:

- a) l'indicazione del periodo annuale di esercizio dell'impianto termico e dell'orario di attivazione giornaliera prescelto;
- b) le generalità e il recapito del responsabile dell'impianto termico;
- c) il codice dell'impianto assegnato dal Catasto territoriale degli impianti termici istituito dalla Regione o Provincia autonoma.

Si riserva ai Sindaci, con propria ordinanza, la possibilità di ampliare o ridurre, a fronte di comprovate esigenze, i periodi annuali di esercizio e la durata giornaliera di attivazione degli impianti termici, nonché stabilire riduzioni di temperatura ambiente massima consentita sia nei centri abitati sia nei singoli immobili.

L'esercizio, la conduzione, il controllo, la manutenzione dell'impianto termico e il rispetto delle disposizioni di legge in materia di efficienza energetica sono affidati al responsabile dell'impianto, che può delegarle ad un terzo. La delega al terzo responsabile non è consentita nel caso di singole unità immobiliari residenziali in cui il generatore o i generatori non siano installati in locale tecnico esclusivamente dedicato. In tutti i casi in cui nello stesso locale tecnico siano presenti generatori di calore oppure macchine frigorifere al servizio di più impianti termici, può essere delegato un unico terzo responsabile che risponde delle predette attività degli impianti.

Il responsabile o, ove delegato, il terzo responsabile rispondono del mancato rispetto delle norme relative all'impianto termico, in particolare in materia di sicurezza e di tutela dell'ambiente.

L'atto di assunzione di responsabilità da parte del terzo, anche come destinatario delle sanzioni amministrative, deve essere redatto in forma scritta contestualmente all'atto di delega.

Il ruolo di terzo responsabile di un impianto è incompatibile con il ruolo di venditore di energia per il medesimo impianto, e con le società a qualsiasi titolo legate al ruolo di venditore, in qualità di partecipate o controllate o associate in Ati o aventi stessa partecipazione proprietaria o aventi in essere un contratto di collaborazione, a meno che la fornitura sia effettuata nell'ambito di un contratto di servizio energia in cui la remunerazione del servizio fornito non sia riconducibile alla quantità di combustibile o di energia fornita, ma misurabile in base a precisi parametri oggettivi preventivamente concordati.

Nel caso di impianti termici con potenza nominale al focolare superiore a 350 kW il terzo responsabile deve essere in possesso di certificazione UNI EN ISO 9001 relativa all'attività di gestione e manutenzione degli impianti termici.

Le operazioni di controllo ed eventuale manutenzione dell'impianto devono essere eseguite da ditte abilitate ai sensi del decreto del Ministro dello sviluppo economico 22 gennaio 2008, n. 37, conformemente alle prescrizioni e con la periodicità contenute nelle istruzioni tecniche per l'uso e la manutenzione rese disponibili dall'impresa installatrice dell'impianto ai sensi della normativa vigente.

Gli installatori e i manutentori degli impianti termici, abilitati ai sensi del decreto del Ministro dello sviluppo economico 22 gennaio 2008, n. 37, nell'ambito delle rispettive responsabilità, devono definire e dichiarare esplicitamente al committente o all'utente, in forma scritta e facendo riferimento alla documentazione tecnica del progettista dell'impianto o del fabbricante degli apparecchi:

a) quali siano le operazioni di controllo e manutenzione di cui necessita l'impianto da loro installato o mantenuto, per garantire la sicurezza delle persone e delle cose;

b) con quale frequenza le operazioni appena descritte vadano effettuate.

Gli impianti termici per la climatizzazione o produzione di acqua calda sanitaria devono essere muniti di un "Libretto di impianto per la climatizzazione". In caso di trasferimento a qualsiasi titolo dell'immobile o dell'unità immobiliare i libretti di impianto devono essere consegnati all'avente causa, debitamente aggiornati, con gli eventuali allegati.

I modelli dei libretti di impianto e dei rapporti di efficienza energetica nelle versioni o configurazioni relative alle diverse tipologie impiantistiche, sono aggiornati, integrati e caratterizzati da una numerazione progressiva che li identifica, con decreto del Ministro dello sviluppo economico, entro il 1° luglio 2013, ferma restando la facoltà delle Regioni e Province autonome di apportare ulteriori integrazioni. I predetti rapporti di efficienza energetica prevedono una sezione, sotto forma di check-list, in cui riportare i possibili interventi atti a migliorare il rendimento energetico dell'impianto in modo economicamente conveniente.

In occasione degli interventi di controllo ed eventuale manutenzione di cui all'articolo 7 su impianti termici di climatizzazione invernale di potenza termica utile nominale maggiore di 10 kW e sugli impianti di climatizzazione estiva di potenza termica utile nominale maggiore di 12 kW, si effettua un controllo di efficienza energetica riguardante:

a) il sottosistema di generazione come definito nell'allegato A del decreto legislativo;

b) la verifica della presenza e della funzionalità dei sistemi di regolazione della temperatura centrale e locale nei locali climatizzati;

c) la verifica della presenza e della funzionalità dei sistemi di trattamento dell'acqua, dove previsti.

I controlli di efficienza energetica devono essere inoltre realizzati:

a) all'atto della prima messa in esercizio dell'impianto, a cura dell'installatore;

b) nel caso di sostituzione degli apparecchi del sottosistema di generazione, come per esempio il generatore di calore;

c) nel caso di interventi che non rientrino tra quelli periodici, ma tali da poter modificare l'efficienza energetica.

Al termine delle operazioni di controllo, l'operatore che effettua il controllo provvede a redigere e sottoscrivere uno specifico Rapporto di controllo di efficienza energetica, come indicato nell'allegato A del decreto. Una copia del Rapporto è rilasciata al responsabile dell'impianto, che lo conserva e lo allega ai libretti; una copia è trasmessa a cura del manutentore o terzo responsabile all'indirizzo indicato dalla Regione o Provincia autonoma competente per

territorio, con la cadenza indicata all'allegato A del decreto. Al fine di garantire il costante aggiornamento del catasto, la trasmissione alle Regioni o Province autonome deve essere eseguita prioritariamente con strumenti informatici.

I generatori di calore per i quali, durante le operazioni di controllo, siano stati rilevati rendimenti di combustione inferiori ai limiti fissati nell'allegato B del presente decreto, non riconducibili a tali valori mediante operazioni di manutenzione, devono essere sostituiti entro 180 giorni solari a partire dalla data del controllo.

Le macchine frigorifere e le pompe di calore per le quali nel corso delle operazioni di controllo sia stato rilevato che i valori dei parametri che caratterizzano l'efficienza energetica siano inferiori del 15% rispetto a quelli misurati in fase di collaudo o primo avviamento riportati sul libretto di impianto, devono essere riportate alla situazione iniziale, con una tolleranza del 5%. Qualora i valori misurati in fase di collaudo o primo avviamento non siano disponibili, si fa riferimento ai valori di targa.

Le unità cogenerative per le quali nel corso delle operazioni di controllo sia stato rilevato che i valori dei parametri che caratterizzano l'efficienza energetica non rientrano nelle tolleranze definite dal fabbricante devono essere riportate alla situazione iniziale, secondo il piano di manutenzione definito dal fabbricante.

Le autorità competenti effettuano le ispezioni su impianti di climatizzazione invernale di potenza termica utile nominale maggiore o uguale a 10 kW e di climatizzazione estiva di potenza termica utile nominale maggiore o uguale a 12 kW. L'ispezione comprende una valutazione di efficienza energetica del generatore, una stima del suo corretto dimensionamento rispetto al fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio, in riferimento al progetto dell'impianto, se disponibile, e una consulenza sui possibili interventi atti a migliorare il rendimento energetico dell'impianto in modo economicamente conveniente.

I risultati delle ispezioni devono essere allegati al libretto di impianto

Per gli impianti di climatizzazione invernale di potenza termica utile nominale compresa tra 10 kW e 100 kW, alimentati a gas, metano o GPL e per gli impianti di climatizzazione estiva di potenza termica utile nominale compresa tra 12 e 100 kW l'accertamento del rapporto di controllo di efficienza energetica inviato dal manutentore o terzo responsabile è ritenuto sostitutivo dell'ispezione.

Ai fini degli obiettivi di miglioramento dell'efficienza energetica, le ispezioni sono programmate in base ai seguenti criteri e priorità:

- a) impianti per cui non sia pervenuto il rapporto di controllo di efficienza energetica o per i quali in fase di accertamento siano emersi elementi di criticità;
- b) impianti dotati di generatori o macchine frigorifere con anzianità superiore a 15 anni;
- c) impianti dotati di generatori a combustibile liquido o solido con potenza termica utile nominale superiore a 100 kW: ispezioni sul 100 per cento degli impianti, ogni due anni;
- d) impianti dotati di macchine frigorifere con potenza termica utile nominale superiore ai 100 kW: ispezioni sul 100 per cento degli impianti, ogni quattro anni;

e) impianti dotati di generatori a gas con potenza termica utile nominale superiore a 100 kW e impianti dotati di generatori a combustibile liquido o solido con potenza termica utile nominale compresa tra 20 e 100 kW: ispezioni sul 100 per cento degli impianti, ogni quattro anni;

f) gli impianti per i quali dai rapporti di controllo dell'efficienza energetica risulti la non riconducibilità a rendimenti superiori a quelli fissati nell'allegato B del presente decreto.

Sono previste ancora sanzioni amministrative per chi non osserva la normativa.

ALLEGATO A:

Periodicità dei controlli di efficienza energetica su impianti climatizzazione invernale di potenza termica utile maggiori di 10 kW e su impianti di climatizzazione estiva di potenza termica utile nominale maggiore di 12 kW:

Tipologia impianto	Alimentazione	Potenza termica (1) [kW]	Cadenza controlli di efficienza energetica (anni)	Rapporto di controllo di efficienza energetica (2)
Impianti con generatore di calore a fiamma	Generatori alimentati a combustibile liquido o solido	$10 < P < 100$	2	Rapporto di tipo 1
		$P \geq 100$	1	
	Generatori alimentati a gas, metano o Gpl	$10 < P < 100$	4	Rapporto di tipo 1
		$P \geq 100$	2	
Impianti con macchine frigorifere/pompe di calore	Macchine frigorifere e/o pompe di calore a compressione di vapore ad azionamento elettrico e macchine frigorifere e/o pompe di calore ad assorbimento a fiamma diretta	$12 < P < 100$	4	Rapporto di tipo 2
		$P \geq 100$	2	
	Pompe di calore a compressione di vapore azionate da motre endotermico	$P \geq 12$	4	Rapporto di tipo 2
	Pompe di calore ad assorbimento alimentate da energia termica	$P \geq 12$	2	Rapporto di tipo 2
Impianti alimentati da teleriscaldamento	Sottostazione di scambio termico da rete ad utenza	$P > 10$	4	Rapporto di tipo 3
Impianti cogenerativi	Microgenerazione	$P_{el} < 50$	4	Rapporto di tipo 4
	Unità cogenerative	$P_{el} \geq 50$	2	Rapporto di tipo 4

P - Potenza termica utile nominale.

P_{el} - Potenza elettrica nominale.

(1) I limiti degli intervalli sono riferiti alla potenza utile nominale complessiva dei generatori e delle macchine frigorifere che servono lo stesso impianto.

(2) I rapporti di controllo di efficienza energetica, nelle versioni o configurazioni relative alle diverse tipologie impiantistiche sono emanati, aggiornati e caratterizzati da una numerazione progressiva che li identifica, con decreto del Ministero dello sviluppo economico entro il 1° gennaio 2013, come previsto dall'articolo 7, comma 6

ALLEGATO B:

Valori minimi consentiti del rendimento di combustione:

Tipologie di generatori di calore	Data di installazione	Valore minimo consentito del rendimento di combustione (%)
Generatore di calore (tutti)	prima del 29 ottobre 1993	82 + 2 Log Pn
Generatore di calore (tutti)	dal 29 ottobre 1993 al 31 dicembre 1997	84 + 2 Log Pn
Generatore di calore standard	dal 1° gennaio 1998 al 7 ottobre 2005	84 + 2 Log Pn
Generatore di calore a bassa temperatura	dal 1° gennaio 1998 al 7 ottobre 2005	87 + 1,5 Log Pn
Generatore di calore a gas a condensazione	dal 1° gennaio 1998 al 7 ottobre 2005	91 + 1 Log Pn
Generatore di calore a gas a condensazione	dall'8 ottobre 2005	89 + 2 Log Pn
Generatore di calore (tutti, salvo generatore di calore a gas a condensazione)	dall'8 ottobre 2005	87 + 2 Log Pn
Generatori ad aria calda	prima del 29 ottobre 1993	77 + 2 Log Pn
Generatori ad aria calda	prima del 29 ottobre 1993	80 + 2 Log Pn

log Pn: logaritmo in base 10 della potenza utile nominale espressa in kW.
Per valori di Pn superiori a 400 kW si applica il limite massimo corrispondente a 400 kW.

ALLEGATO C:

Requisiti minimi, professionali e di indipendenza, degli organismi esterni incaricati delle ispezioni sugli impianti termici

Per "organismo esterno", ai fini del presente decreto, si intende un soggetto individuato dalla Regione o Provincia autonoma, in eventuale coordinamento con gli Enti locali, per la realizzazione del sistema delle ispezioni. L'allegato contiene una serie di indicazioni atte a garantire lo svolgimento dei lavori "a regola d'arte" in modo che si possa tutelare sia il consumatore sia il principale obiettivo che si vuole conseguire con la ristrutturazione.

È doveroso dover citare il D.lgs. 4 luglio 2014 n°102 che recepisce la direttiva 2012/27/UE, pubblicato sulla G.U. n° 165 il 18 luglio 2014.

In tale decreto compare l'obbligo di installazione, su tutto il territorio nazionale entro il 31/12/2016, dei sistemi di contabilizzazione in tutti gli impianti di riscaldamento, acqua calda sanitaria e raffrescamento esistenti.

Tale decreto può essere così riassunto:

- si dovranno installare i sistemi di termoregolazione e contabilizzazione entro il 31/12/2016;
- si dovrà utilizzare la UNI 10200 per la ripartizione dei costi con riferimento ai consumi effettivi (no fattori di correzione);
- la non osservanza del decreto comporta sanzioni amministrative.

Il decreto riguarda anche le diagnosi energetiche obbligatorie, dove si intravede un controllo assai rigido sugli auditor energetici, affidato ad *Accredia* e la regolamentazione della fatturazione di gas, energia elettrica e teleriscaldamento in base a letture effettive.

Tutto ciò ha il fine di un ulteriore incoraggiamento all'avvicinarsi alla cogenerazione e al teleriscaldamento.

DM 26/06/2015

Il decreto, entrato in vigore dal 1 ottobre 2015, definisce le modalità di applicazione della metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, ivi incluso l'utilizzo delle fonti rinnovabili, nonché le prescrizioni e i requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici e unità immobiliari, come riportati nell'apposito Allegato 1. Si applica sia ad edifici pubblici che privati.

La prestazione energetica degli edifici è determinata sulla base della quantità di energia necessaria annualmente per soddisfare le esigenze legate a un utilizzo standard dell'edificio e corrisponde al fabbisogno energetico annuale globale in energia primaria per il riscaldamento, raffrescamento, per la ventilazione, per la produzione di acqua calda sanitaria e, nel settore non residenziale, per l'illuminazione, gli impianti ascensori e scale mobili. In particolare:

Il fabbisogno energetico annuale globale si calcola come energia primaria per singolo servizio energetico, con intervalli di calcolo mensile. Con le stesse modalità si determina l'energia da fonte rinnovabile prodotta all'interno del confine del sistema. Il calcolo su base mensile deve essere eseguito con apposita metodologia.

Si opera la compensazione tra i fabbisogni energetici e l'energia da fonte rinnovabile prodotta e utilizzata all'interno del confine del sistema alle seguenti condizioni:

- solo per contribuire ai fabbisogni del medesimo vettore energetico (elettricità con elettricità, energia termica con energia termica, ecc);
- fino a copertura totale del corrispondente fabbisogno o vettore energetico utilizzato per i servizi considerati nella prestazione energetica. L'eccedenza di energia rispetto al fabbisogno mensile, prodotta in situ e che viene esportata, non concorre alla prestazione energetica dell'edificio. In relazione alla cogenerazione, l'energia utilizzata dal cogeneratore viene allocata all'energia elettrica e termica prodotta dallo stesso secondo quanto segue, considerando un rendimento di riferimento del sistema elettrico nazionale $\eta_{el,ref}$ pari a 0.413 ed un rendimento di riferimento termico $\eta_{th,ref}$ pari a 0.9. Indicando quindi a_w e a_q rispettivamente i fattori di allocazione all'energia elettrica e termica prodotta si ha che:

$$a_w = \frac{\frac{\eta_{el}}{\eta_{el,ref}}}{\frac{\eta_{el}}{\eta_{el,ref}} + \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,ref}}} \quad a_q = \frac{\frac{\eta_{th}}{\eta_{th,ref}}}{\frac{\eta_{el}}{\eta_{el,ref}} + \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,ref}}}$$

- nel calcolo del fabbisogno energetico annuale globale, fatto salvo quanto previsto al punto precedente, l'eventuale energia elettrica prodotta da fonte rinnovabile in eccedenza ed esportata in alcuni mesi, non può essere computata a copertura del fabbisogno nei mesi nei quali la produzione sia invece insufficiente;
- l'energia elettrica prodotta da fonte rinnovabile non può essere conteggiata ai fini del soddisfacimento di consumi elettrici per la produzione di calore con effetto Joule. Nel settore non residenziale, può essere però considerata fino a copertura anche dei consumi per l'illuminazione;

- nel caso di impianti di generazione da fonte rinnovabile centralizzati, ovvero che alimentino una pluralità di utenze, oppure nel caso di impianti di generazione da fonte rinnovabile che contribuiscano per servizi diversi, per ogni intervallo di calcolo si attribuiscono quote di energia rinnovabile per ciascun servizio e per ciascuna unità immobiliare in proporzione ai rispettivi fabbisogni termici all'uscita dei sistemi di generazione ovvero ai rispettivi fabbisogni elettrici.

Ai fini delle verifiche progettuali del rispetto dei requisiti minimi, si effettua il calcolo sia dell'energia primaria totale che dell'energia primaria non rinnovabile, ottenute applicando i pertinenti fattori di conversione in energia primaria totale $f_{P,tot}$ e in energia primaria non rinnovabile $f_{P,nren}$.

Ai fini della classificazione degli edifici, si effettua il calcolo dell'energia primaria non rinnovabile, applicando i pertinenti fattori di conversione in energia primaria non rinnovabile $f_{P,nren}$.

Il fattore di conversione in energia primaria totale $f_{P,tot}$ è pari a:

$$f_{P,tot} = f_{P,nren} + f_{P,ren}$$

Dove $f_{P,ren}$ è fattore di conversione in energia primaria rinnovabile.

I fattori di conversione in energia primaria sono pari a quelli riportati nella seguente Tabella, in funzione del vettore energetico utilizzato.

Vettore energetico	fP,nren	fP,ren	fP,tot
Gas naturale*	1,05	0	1,05
GPL	1,05	0	1,05
Gasolio e Olio combustibile	1,07	0	1,07
Carbone	1,1	0	1,1
Biomasse solide**	0,2	0,8	1
Biomasse liquide e gassose**	0,4	0,6	1
Energia elettrica da rete***	1,95	0,47	2,42
Teleriscaldamento****	1,5	0	1,5
Rifiuti solidi urbani	0,2	0,2	0,4
Teleraffrescamento****	0,5	0	0,5
Energia termica da collettori solari*****	0	1	1
Energia elettrica prodotta da fotovoltaico, mini-eolico e mini-idraulico*****	0	1	1
Energia termica dall'ambiente esterno – free cooling*****	0	1	1
Energia termica dall'ambiente esterno – pompa di calore*****	0	1	1
* I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE.			
** Come definite dall'allegato X del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152.			
*** I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE.			
**** Fattore assunto in assenza di valori dichiarati dal fornitore e asseverati da parte terza.			
***** Valori convenzionali funzionali al sistema di calcolo.			

L'edificio è valutato e classificato in base alla destinazione d'uso prevalente in termini di volume climatizzato. Su di esso viene poi fatta una distinzione in base all'importanza dell'intervento:

- Edificio di nuova costruzione: si intende un edificio il cui titolo abilitativo sia stato richiesto dopo l'entrata in vigore del presente provvedimento. Sono assimilati agli edifici di nuova costruzione:
 - gli edifici sottoposti a demolizione e ricostruzione, qualunque sia il titolo abilitativo necessario;
 - l'ampliamento di edifici esistenti, sempre che la nuova porzione abbia un volume lordo climatizzato superiore al 15% di quello esistente o comunque superiore a $500 m^3$.
- Edificio sottoposto a ristrutturazione importante: quando l'intervento che interessa gli elementi e i componenti integrati costituenti l'involucro edilizio che delimitano un volume a temperatura controllata dall'ambiente esterno e da ambienti non climatizzati, con un incidenza superiore al 25% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio. Gli interventi di "ristrutturazione importante" si distinguono in:
 - Ristrutturazioni importanti di primo livello: quando l'intervento, oltre a interessare l'involucro edilizio con un'incidenza superiore al 50% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio, comprende anche la ristrutturazione dell'impianto termico per il servizio di climatizzazione invernale e/o estiva asservito all'intero edificio. In tali casi i requisiti di prestazione energetica si applicano all'intero edificio e si riferiscono alla sua prestazione energetica relativa al servizio o servizi interessati;
 - Ristrutturazioni importanti di secondo livello: l'intervento interessa l'involucro edilizio con un incidenza superiore al 25% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio e può interessare l'impianto termico per il servizio di climatizzazione invernale e/o estiva. In tali casi, i requisiti di prestazione energetica da verificare riguardano le caratteristiche termo-fisiche delle sole porzioni e delle quote di elementi e componenti dell'involucro dell'edificio interessati dai lavori di riqualificazione energetica e il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione (H'_T) determinato per l'intera parete, comprensiva di tutti i componenti su cui si è intervenuti.
- Edificio sottoposto a riqualificazioni energetiche: Tali interventi coinvolgono una superficie inferiore o uguale al 25% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio e/o consistono nella nuova installazione, nella ristrutturazione di un impianto termico asservito all'edificio o di altri interventi parziali, ivi compresa la sostituzione del generatore. In tali casi i requisiti di prestazione energetica richiesti si applicano ai soli componenti edilizi e impianti oggetto di intervento, e si riferiscono alle loro relative caratteristiche termo-fisiche o di efficienza.

PRESCRIZIONI COMUNI PER GLI EDIFICI DI NUOVA COSTRUZIONE, GLI EDIFICI OGGETTO DI RISTRUTTURAZIONI IMPORTANTI O GLI EDIFICI SOTTOPOSTI A RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA

Gli edifici e gli impianti non di processo devono essere progettati per assicurare, in relazione al progresso della tecnica e tenendo conto del principio di efficacia sotto il profilo dei costi, il massimo contenimento dei consumi di energia non rinnovabile e totale. Nel caso di intervento che riguardi le strutture opache delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, si procede in conformità alla normativa tecnica vigente (UNI EN ISO 13788), alla verifica dell'assenza:

- di rischio di formazione di muffe, con particolare attenzione ai ponti termici negli edifici di nuova costruzione;
- di condensazioni interstiziali.

Le condizioni interne di utilizzazione sono quelle previste nell'appendice alla norma sopra citata, secondo il metodo delle classi di concentrazione. Le medesime verifiche possono essere effettuate con riferimento a condizioni diverse, qualora esista un sistema di controllo dell'umidità interna e se ne tenga conto nella determinazione dei fabbisogni di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento.

Al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti, nonché di limitare il surriscaldamento a scala urbana, per le strutture di copertura degli edifici è obbligatoria la verifica dell'efficacia, in termini di rapporto costi-benefici, dell'utilizzo di:

- a) materiali a elevata riflettanza solare per le coperture (cool roof), assumendo per questi ultimi un valore di riflettanza solare non inferiore a:
 - a. 0.65 nel caso di coperture piane;
 - b. 0.30 nel caso di copertura a falde;
- b) tecnologie di climatizzazione passiva (a titolo esemplificativo e non esaustivo: ventilazione, coperture a verde).

Negli edifici esistenti sottoposti a ristrutturazioni importanti, o a riqualificazioni, nel caso di installazione di impianti termici dotati di pannelli radianti a pavimento o a soffitto e nel caso di intervento di isolamento dall'interno, le altezze minime dei locali di abitazione previste, possono essere derogate, fino a un massimo di 10 centimetri. Resta fermo che nei comuni montani al di sopra dei metri 1000 sul livello del mare può essere consentita, tenuto conto delle condizioni climatiche locali e della locale tipologia edilizia, una riduzione dell'altezza minima dei locali abitabili a metri 2,55. Nelle more dell'emanazione dei Regolamenti della Commissione europea in materia, attuativi delle Direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE, l'installazione di generatori di calore alimentati a biomasse solide combustibili è consentita soltanto nel rispetto di rendimenti termici utili nominali corrispondenti alle classi minime di cui alle pertinenti norme di prodotto riportate in Tabella 2.

Tipologia	Norma di riferimento
Caldaie a biomassa	UNI EN 303-5
Caldaie con potenza <50 kW	UNI EN 12809
Stufe a combustibile solido	UNI EN 13240
Apparecchi per il riscaldamento domestico alimentati a pellet di legno	UNI EN 14785
Termocucine	UNI EN 12815
Inserti a combustibile solido	UNI EN 13229
Apparecchi a lento rilascio	UNI EN 15250
Brucciatori a pellet	UNI EN 15270

Tabella 1

In relazione alla qualità dell'acqua utilizzata negli impianti termici per la climatizzazione invernale, con o senza produzione di acqua calda sanitaria, ferma restando l'applicazione della norma tecnica UNI 8065, è sempre obbligatorio un trattamento di condizionamento chimico. Per impianti di potenza termica del focolare maggiore di 100 kW e in presenza di acqua di alimentazione con durezza totale maggiore di 15 gradi francesi, è obbligatorio un trattamento di addolcimento dell'acqua di impianto. Per quanto riguarda i predetti trattamenti si fa riferimento alla norma tecnica UNI 8065.

Negli impianti termici per la climatizzazione invernale di nuova installazione, aventi potenza termica nominale del generatore maggiore di 35 kW è obbligatoria l'installazione di un contatore del volume di acqua calda sanitaria prodotta e di un contatore del volume di acqua di reintegro per l'impianto di riscaldamento. Le letture dei contatori installati dovranno essere riportate sul libretto di impianto.

Nel caso di installazione di impianti di microgenerazione, il rendimento energetico delle unità di produzione, espresso dall'indice di risparmio di energia primaria PES misurato nelle condizioni di esercizio (ovvero alle temperature medie di ritorno di progetto), deve risultare non inferiore a 0. Il progettista dovrà inserire nella relazione tecnica il calcolo dell'indice PES atteso a preventivo su base annua, per la determinazione del quale:

- a) devono essere considerate ed esplicitate le condizioni di esercizio (ovvero le temperature medie mensili di ritorno) in funzione della tipologia di impianto;
- b) devono essere utilizzate le metodologie di calcolo di cui alla norma UNI TS 11300-4 e relativi allegati;
- c) i dati relativi alle curve prestazionali devono essere rilevati secondo norma UNI ISO 3046;

Una delle più importanti novità della normativa riguarda gli ascensori e le scale mobili; esse infatti devono essere dotati di motori elettrici che rispettino il Regolamento (CE) n. 640/2009 della Commissione europea. Tali impianti devono essere dotati altresì di specifica scheda tecnica redatta dalla ditta installatrice che riporta, per gli ascensori: tipo di tecnologia, portata, corsa, potenza nominale del motore, consumo energetico per ciclo di riferimento, potenza di standby; mentre per le scale mobili (ivi compresi i marciapiedi mobili): tipo di tecnologia; potenza nominale del motore, consumo energetico con funzionamento in continuo. Tali schede dovranno essere conservate dal responsabile dell'impianto.

Nel caso della presenza, a una distanza inferiore a metri 1.000 dall'edificio oggetto del progetto, di reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento, ovvero di progetti di teleriscaldamento approvati nell'ambito di opportuni strumenti pianificatori, in presenza di valutazioni tecnico-economiche favorevoli, è obbligatoria la predisposizione delle opere murarie e impiantistiche, necessarie al collegamento alle predette reti. In ogni caso, la soluzione prescelta deve essere motivata nella relazione tecnica. Ai fini delle predette valutazioni il fornitore del servizio, su semplice richiesta dell'interessato, è tenuto a dichiarare il costo annuale, comprensivo di imposte e quote fisse, della fornitura dell'energia termica richiesta per un uso standard dell'edificio. I gestori degli impianti di teleriscaldamento e teleraffrescamento si dotano di certificazione atta a comprovare i fattori di conversione in energia primaria dell'energia termica fornita al punto di consegna dell'edificio, come previsto in Tabella 1. Tale certificazione è rilasciata da un ente di certificazione accreditato da ACCREDIA, o da altro ente di Accreditamento firmatario degli accordi EA di Mutuo riconoscimento per lo schema specifico. Il certificato ha validità di due anni. Rimane salva la validità temporale degli attestati di prestazione energetica degli edifici già redatti.

Gli impianti di climatizzazione invernale devono essere dotati di sistemi per la regolazione automatica della temperatura ambiente nei singoli locali o nelle singole zone termiche al fine di non determinare sovra riscaldamento per effetto degli apporti solari e degli apporti gratuiti interni. Tali sistemi devono essere assistiti da compensazione climatica; la compensazione climatica può essere omessa ove la tecnologia impiantistica preveda sistemi di controllo equivalenti o di maggiore efficienza o qualora non sia tecnicamente realizzabile. Tali differenti impedimenti devono essere debitamente documentati nella relazione.

Nel caso di nuovi edifici o edifici sottoposti a ristrutturazione importante di primo livello, si provvede all'installazione di sistemi di misurazione intelligente dell'energia consumata, conformemente a quanto previsto nel decreto legislativo 4 luglio 2014, n.102. Nel caso di impianti termici al servizio di più unità immobiliari è obbligatoria l'installazione di un sistema di contabilizzazione del calore, del freddo e dell'acqua calda sanitaria. Al fine di ottimizzare l'uso dell'energia negli edifici, per gli edifici a uso non residenziale è reso obbligatorio un livello minimo di automazione per il controllo, la regolazione e la gestione delle tecnologie dell'edificio e degli impianti termici (BACS), corrispondente alla Classe B, come definita nella Tabella 1 della norma UNI EN 15232 e successive modifiche o norma equivalente.

Il parametro H'_T risulti inferiore al pertinente valore limite riportato nella Tabella 10, dell'Appendice A;

Il parametro $Asol,est/Asup$ utile, deve risultare inferiore al corrispondente valore limite riportato nella Tabella 11 della Appendice A

Gli indici $EP_{H,nd}$, $EP_{C,nd}$, $EP_{gl,tot}$ devono risultare inferiori ai valori dei corrispondenti indici limite calcolati per l'edificio di riferimento ($EP_{H,nd,limite}$, $EP_{C,nd,limite}$, $EP_{gl,tot,limite}$). Si precisa che per i valori limite di questi indici, contrassegnati con l'anno di inizio della loro validità, è prevista una progressiva riduzione articolata in due fasi:

- I fase - contrassegnata dall'indicazione (2015): in vigore dal 1° luglio 2015 con valori limite validi per tutti gli edifici;

- Il fase - contrassegnata dall'indicazione (2019/21): in vigore dal 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici o a uso pubblico, così come definiti alle lettere I-sexies e I-septies, del comma 1, dell'articolo 2, del decreto legislativo, e dal 1° gennaio 2021 anche per tutti gli altri edifici;

Le efficienze η_H , η_W , e η_C , devono risultare superiori ai valori delle corrispondenti efficienze indicate per l'edificio di riferimento ($\eta_{H,limite}$, $\eta_{W,limite}$, $\eta_{C,limite}$), indicati nelle Tabelle 7 e 8 dell'Appendice A.

Il progettista, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti:

- a) valuta puntualmente e documenta l'efficacia dei sistemi schermanti delle superfici vetrate, esterni o interni, tali da ridurre l'apporto di calore per irraggiamento solare;
- b) esegue, a eccezione degli edifici classificati nelle categorie E.6 ed E.8, in tutte le zone climatiche a esclusione della F, per le località nelle quali il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva, $I_{m,s}$, sia maggiore o uguale a $290W/m^2$:
 - i. almeno una delle seguenti verifiche, relativamente a tutte le pareti verticali opache con l'eccezione di quelle comprese nel quadrante nord-ovest / nord / nord-est:
 - che il valore della massa superficiale M_s sia superiore a $230 kg/m^2$;
 - che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica YIE sia inferiore a $0.10 W/m^2K$;
 - la verifica, relativamente a tutte le pareti opache orizzontali e inclinate, che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica YIE sia inferiore a $0.18 W/m^2K$;
- c) qualora ritenga di raggiungere i medesimi effetti positivi che si ottengono con il rispetto dei valori di massa superficiale o trasmittanza termica periodica delle pareti opache di cui alla lettera b), con l'utilizzo di tecniche e materiali, anche innovativi, ovvero coperture a verde, che permettano di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti in funzione dell'andamento dell'irraggiamento solare, produce adeguata documentazione e certificazione delle tecnologie e dei materiali che ne attestino l'equivalenza con le citate disposizioni .

A eccezione della categoria E.8, nel caso di nuova costruzione e ristrutturazione importante di primo livello di edifici esistenti, questo ultimo limitatamente alle demolizioni e ricostruzioni, da realizzarsi in zona climatica C, D, E ed F, nonché in caso di realizzazione di pareti interne per la separazione delle unità immobiliari, il valore della trasmittanza (U) delle strutture edilizie di separazione tra edifici o unità immobiliari confinanti, deve essere inferiore o uguale a $0.8 W/m^2K$, nel caso di pareti divisorie verticali e orizzontali. Il medesimo limite deve essere rispettato per tutte le strutture opache, verticali, orizzontali e inclinate, che delimitano verso l'ambiente esterno gli ambienti non dotati di impianto di climatizzazione adiacenti agli ambienti climatizzati.

Ai fini della determinazione della classe energetica complessiva dell'edificio, necessaria per la redazione dell'attestato di prestazione, si utilizza l'indice di prestazione energetica globale dell'edificio, espresso in energia primaria non rinnovabile, $EP_{gl,nren}$, e calcolato nel rispetto delle disposizioni e dei metodi di calcolo di cui al Capitolo 1, all'articolo 3 del presente decreto. Inoltre, il citato decreto, definisce:

- a) la scala delle classi di efficienza energetica in relazione al valore di $EP_{gl,nren,rif,standard}$, calcolato per l'edificio di riferimento;
- b) le "tecnologie impiantistiche standard" di cui è dotato il medesimo edificio di riferimento.

Gli indici di prestazione e i parametri di cui al presente paragrafo, ove ne sia previsto il calcolo, sono determinati con i medesimi metodi di calcolo sia per l'edificio oggetto della verifica progettuale che per l'edificio di riferimento.

La Normativa prevede anche la Definizione di *Edifici a energia quasi zero* classificandoli come tutti quegli edifici per cui sono contemporaneamente rispettate:

- il parametro $A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$ risulti inferiore al valore limite riportato in tabella 11 dell'Appendice A per tutti gli edifici appartenenti alla categoria E1 fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3) e per tutti gli altri edifici;
- gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili nel rispetto dei principi minimi di cui all'Allegato 3, paragrafo 1, lettera c), del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28.

Si tratta quindi di un immobile con una prestazione energetica molto alta caratterizzato da isolanti e infissi ad alte prestazioni ed impianti ad alto rendimento. Richiedono un'energia molto bassa per raggiungere uno stato di comfort, mentre quella rimanente viene coperta in misura significativa da fonti rinnovabili presenti all'interno del confine dell'immobile. La dicitura "energia zero" deriva da una specifica Direttiva europea, seguita in Italia dal D.Lgs. 192/2005; dal 2021 si potranno costruire solo edifici con queste caratteristiche.

Edifici soggetti a ristrutturazioni importanti di secondo livello

Per gli edifici sottoposti a ristrutturazioni importanti di secondo livello, per la porzione di involucro dell'edificio interessata ai lavori di riqualificazione energetica, il progettista deve verificare:

- a) il rispetto dei requisiti e delle prescrizioni di cui al successivo capitolo "*Edifici sottoposti a riqualificazione energetica*", fatte salve le specifiche eccezioni puntualmente indicate;
- b) che il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente H'_T , determinato per l'intera porzione dell'involucro oggetto dell'intervento (parete verticale, copertura, solaio, serramenti, ecc.), comprensiva di tutti i componenti, su cui si è intervenuti, risulti inferiore al pertinente valore limite riportato alla quarta riga, della Tabella 10, dell'Appendice A, per tutte le categorie di edifici.

Edifici sottoposti a riqualificazione energetica

Per gli interventi sugli edifici esistenti si applicano i requisiti e le prescrizioni seguenti, fatte salve le specifiche eccezioni puntualmente indicate.

a) Il valore della trasmittanza termica (U) per le strutture opache verticali delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno e verso locali non climatizzati, deve essere inferiore o uguale a quello riportato nella Tabella 1 dell'Appendice B.

b) Il valore della trasmittanza termica (U) per le strutture opache orizzontali o inclinate, delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, deve essere inferiore o uguale a quello riportato, in funzione della fascia climatica di riferimento, nelle seguenti tabelle dell'Appendice B:

- nella Tabella 2, con l'eccezione per la categoria E.8, se si tratta di strutture di copertura;
- nella Tabella 3, se si tratta di strutture di pavimento.

c) Con l'eccezione per la categoria E.8, il valore massimo della trasmittanza (U) delle chiusure tecniche trasparenti e opache, apribili e assimilabili, delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, ovvero verso ambienti non dotati di impianto di condizionamento, comprensive degli infissi e non tenendo conto della componente oscurante, deve essere inferiore o uguale a quello riportato nella Tabella 4 dell'Appendice B, in funzione della fascia climatica di riferimento.

d) Con l'eccezione per la categoria E.8, per le chiusure tecniche trasparenti di cui alla lettera c), delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno con orientamento da Est a Ovest, passando per Sud, il valore del fattore di trasmissione solare totale (g_{gl+sh}) della componente finestrata, deve essere inferiore o uguale a quello riportato nella Tabella 5 dell'Appendice B.

Per gli edifici dotati di impianto termico non a servizio di singola unità immobiliare residenziale o assimilata, in caso di riqualificazione energetica dell'involucro edilizio, coibentazioni delle pareti o l'installazione di nuove chiusure tecniche trasparenti, apribili e assimilabili, delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, ovvero verso ambienti non dotati di impianto di climatizzazione, al rispetto dei requisiti di cui alle lettere da a) a d), si aggiunge l'obbligo di installazione di valvole termostatiche, ovvero di altro sistema di termoregolazione per singolo ambiente o singola unità immobiliare, assistita da compensazione climatica del generatore, quest'ultima può essere omessa ove la tecnologia impiantistica preveda sistemi di controllo equivalenti o di maggiore efficienza o qualora non sia tecnicamente realizzabile.

Nel caso di ristrutturazione o di nuova installazione di impianti termici di potenza termica nominale del generatore maggiore o uguale a 100 kW, ivi compreso il distacco dall'impianto centralizzato anche di un solo utente/condomino, deve essere realizzata una diagnosi energetica dell'edificio e dell'impianto che metta a confronto le diverse soluzioni impiantistiche compatibili e la loro efficacia sotto il profilo dei costi complessivi (investimento, esercizio e manutenzione). La soluzione progettuale prescelta deve essere motivata da opportuna relazione tecnica, sulla base dei risultati della diagnosi. La diagnosi energetica deve considerare, in modo vincolante ma non esaustivo, almeno le seguenti opzioni:

- a) impianto centralizzato dotato di caldaia a condensazione con contabilizzazione e termoregolazione del calore per singola unità abitativa;
- b) impianto centralizzato dotato di pompa di calore elettrica o a gas con contabilizzazione e termoregolazione del calore per singola unità abitativa;
- c) le possibili integrazioni dei suddetti impianti con impianti solari termici;
- d) impianto centralizzato di cogenerazione;
- e) stazione di teleriscaldamento collegata a una rete efficiente come definita al decreto legislativo n. 102 del 2014;
- f) per gli edifici non residenziali, l'installazione di un sistema di gestione automatica degli edifici e degli impianti conforme al livello B della norma EN15232.

Per impianti di climatizzazione invernale, fermo restando il rispetto dei requisiti minimi definiti dai regolamenti comunitari emanati ai sensi della direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE, nel caso di nuova installazione di impianti termici di climatizzazione invernale in edifici esistenti, o ristrutturazione dei medesimi impianti o di sostituzione dei generatori di calore, compresi gli impianti a sistemi ibridi, si applica quanto previsto di seguito:

- a) calcolo dell'efficienza media stagionale dell'impianto termico di riscaldamento e verifica che la stessa risulti superiore al valore limite calcolato utilizzando i valori delle efficienze fornite in Appendice A per l'edificio di riferimento;
- b) installazione di sistemi di regolazione per singolo ambiente o per singola unità immobiliare, assistita da compensazione climatica;
- c) nel caso degli impianti a servizio di più unità immobiliari, installazione di un sistema di contabilizzazione diretta o indiretta del calore che permetta la ripartizione dei consumi per singola unità immobiliare;
- d) nel caso di sostituzione di generatori di calore, si intendono rispettate tutte le disposizioni vigenti in tema di uso razionale dell'energia, incluse quelle di cui alla lettera a), qualora coesistano le seguenti condizioni:
 - i. i nuovi generatori di calore a combustibile gassoso o liquido abbiano un rendimento termico utile nominale non inferiore a quello indicato al paragrafo 1.3, comma 1, dell'Appendice B.
 - ii. le nuove pompe di calore elettriche o a gas abbiano un coefficiente di prestazione (COP o GUE) non inferiore ai valori riportati nell'Appendice B;
 - iii. nel caso di installazioni di generatori con potenza nominale del focolare maggiore del valore preesistente di oltre il 10%, l'aumento di potenza sia motivato con la verifica dimensionale dell'impianto di riscaldamento condotto secondo la norma UNI EN 12831;
 - iv. nel caso di installazione di generatori di calore in impianti a servizio di più unità immobiliari, o di edifici adibiti a uso non residenziale siano presenti un sistema di regolazione per singolo ambiente o per singola unità immobiliare, assistita da compensazione climatica, e un sistema di contabilizzazione diretta o indiretta del calore che permetta la ripartizione dei consumi per singola unità immobiliare;

Per impianti di climatizzazione estiva, fermo restando il rispetto dei requisiti minimi definiti dai regolamenti comunitari emanati ai sensi della direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE, nel caso di nuova installazione di impianti termici di climatizzazione estiva in edifici esistenti, o ristrutturazione dei medesimi impianti o di sostituzione delle macchine frigorifere dei generatori, si applica quanto previsto di seguito:

- a) calcolo dell'efficienza globale media stagionale dell'impianto di climatizzazione estiva e verifica che la stessa risulti superiore al valore limite calcolato utilizzando i valori delle efficienze fornite in Allegato A per l'edificio di riferimento;
- b) installazione, ove tecnicamente possibile, di sistemi di regolazione per singolo ambiente e di sistemi di contabilizzazione diretta o indiretta del calore che permetta la ripartizione dei consumi per singola unità immobiliare;
- c) nel caso di sostituzione di macchine frigorifere, si intendono rispettate tutte le disposizioni vigenti in tema di uso razionale dell'energia, incluse quelle di cui alle lettera a), qualora coesistano le seguenti condizioni:
 - i. le nuove macchine frigorifere elettriche o a gas, con potenza utile nominale maggiore di 12 kW, abbiano un indice di efficienza energetica non inferiore a valori riportati nell'Appendice B;
 - ii. nel caso di installazione di macchine frigorifere a servizio di più unità immobiliari, o di edifici adibiti a uso non residenziale siano presenti un sistema di regolazione per singolo ambiente o per singola unità immobiliare, e un sistema di contabilizzazione diretta o indiretta del calore che permetta la ripartizione dei consumi per singola unità immobiliare.

Per impianti tecnologici idrico sanitari, fermo restando il rispetto dei requisiti minimi definiti dai regolamenti comunitari emanati ai sensi della direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE, nel caso di nuova installazione di impianti tecnologici idrico-sanitari destinati alla produzione di acqua calda sanitaria, in edifici esistenti, o ristrutturazione dei medesimi impianti, si procede al calcolo dell'efficienza globale media stagionale dell'impianto tecnologico idrico-sanitario e alla verifica che la stessa risulti superiore al valore limite calcolato utilizzando i valori delle efficienze fornite in Appendice A per l'edificio di riferimento. Fermo restando il rispetto dei requisiti minimi definiti dai regolamenti comunitari suddetti, le precedenti indicazioni non si applicano nel caso di installazione o sostituzione di scaldacqua unifamiliari.

Per Impianti di illuminazione, per tutte la categorie di edifici, con l'esclusione della categoria E.1, fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3), in caso di sostituzione di singoli apparecchi di illuminazione, i nuovi apparecchi devono rispettare i requisiti minimi definiti dai regolamenti comunitari emanati ai sensi della direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE. I nuovi apparecchi devono avere almeno le stesse caratteristiche tecnico funzionali di quelli sostituiti e permettere il rispetto dei requisiti normativi d'impianto previsti dalle norme UNI e CEI vigenti.

In caso di nuova installazione, sostituzione o riqualificazione di impianti di ventilazione, i nuovi apparecchi devono rispettare i requisiti minimi definiti dai regolamenti comunitari emanati ai sensi della direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE. I nuovi apparecchi devono avere almeno le stesse caratteristiche tecnico funzionali di quelli sostituiti e permettere il rispetto dei requisiti normativi d'impianto previsti dalle norme UNI e CEI vigenti.

Appendice A (Allegato 1, Capitolo 3): DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO DI RIFERIMENTO E PARAMETRI DI VERIFICA

Con edificio di riferimento o target si intende un edificio identico in termini di geometria (sagoma, volumi, superficie calpestabile, superfici degli elementi costruttivi e dei componenti), orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d'uso e situazione al contorno e avente caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati conformemente alla presente Appendice all'Allegato 1. Con edificio di riferimento si intende quindi un edificio avente un fabbricato di riferimento e degli impianti tecnici di riferimento. Per i tutti i dati di input e i parametri non definiti nel presente capitolo si utilizzano i valori dell'edificio reale.

Parametri relativi al fabbricato

Nel presente paragrafo si riportano i valori dei parametri caratteristici del fabbricato dell'edificio di riferimento.

Tabella 1- Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015*	2019/2021**
A e B	0,45	0,43
C	0,38	0,34
D	0,34	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

Tabella 2 - Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015*	2019/2021**
A e B	0,38	0,35
C	0,36	0,33
D	0,30	0,26
E	0,25	0,22
F	0,23	0,20

Tabella 3 - Trasmittanza termica U delle opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015*	2019/2021**
A e B	0,4	0,44
C	0,4	0,38
D	0,32	0,29
E	0,3	0,26
F	0,28	0,24

Tabella 4 - Trasmittanza termica U delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015*	2019/2021**
A e B	3,20	3,00
C	2,40	2,20
D	2,00	1,80
E	1,80	1,40
F	1,50	1,10

Tabella 5 - Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali e orizzontali di separazione tra edifici o unità immobiliari confinanti

Zona climatica	g_{gl+sh}	
	2015*	2019/2021**
Tutte le zone	0,35	0,35

Nel caso di strutture delimitanti lo spazio riscaldato verso ambienti non climatizzati, si assume come trasmittanza il valore della pertinente tabella diviso per il fattore di correzione dello scambio termico tra ambiente climatizzato e non climatizzato, come indicato nella norma UNI TS 11300-1 in forma tabellare.

Nel caso di strutture rivolte verso il terreno, i valori delle pertinenti tabelle devono essere confrontati con i valori della trasmittanza termica equivalente calcolati in base alle UNI EN ISO 13370.

I valori di trasmittanza delle precedenti tabelle si considerano comprensive dell'effetto dei ponti termici.

Per le strutture opache verso l'esterno si considera il coefficiente di assorbimento solare dell'edificio reale.

Per i componenti finestrati si assume il fattore di trasmissione globale di energia solare attraverso i componenti finestrati g_{gl+sh} riportato in Tabella 6, in presenza di una schermatura mobile.

Tabella 6 - Valore del fattore di trasmissione solare totale g_{gl+sh} per componenti finestrati con orientamento da Est a Ovest passando per Sud.

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015*	2019/2021**
Tutte le zone	0,35	0,35

* dal 1 luglio 2015 per tutti gli edifici

** dal 1 gennaio 2019 per gli edifici pubblici e a uso pubblico e dal 1 gennaio 2021 per tutti gli altri edifici

Parametri relativi agli impianti tecnici:

Nel paragrafo si riportano i parametri relativi agli impianti tecnici di riferimento e la metodologia per la determinazione dell'energia primaria totale per ciascun servizio energetico considerato. In assenza del servizio energetico nell'edificio reale non si considera il fabbisogno di energia primaria per quel servizio. L'edificio di riferimento si considera dotato degli stessi impianti di produzione di energia dell'edificio reale.

SERVIZI DI CLIMATIZZAZIONE INVERNALE, CLIMATIZZAZIONE ESTIVA, ACQUA CALDA SANITARIA E PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA IN SITU

I fabbisogni di energia primaria E_p e i fabbisogni di energia termica utile $Q_{H,nd}$ e $Q_{C,nd}$ dell'edificio di riferimento sono calcolati secondo la normativa tecnica citata nel presente decreto tenendo conto dei parametri di seguito specificati e dei fattori di conversione in energia primaria definiti nell'Allegato 1.

Per i servizi di climatizzazione invernale (H) e climatizzazione estiva (C) si utilizzano i parametri del fabbricato di riferimento specificati nella prima parte della presente Appendice.

Per il servizio di acqua calda sanitaria (W) il fabbisogno di energia termica utile $Q_{W,nd}$ è pari a quello dell'edificio reale.

Le efficienze medie η_u del complesso dei sottosistemi di utilizzazione (emissione/erogazione, regolazione, distribuzione e dell'eventuale accumulo) sono definite nella seguente tabella 7.

Tabella 7 – Efficienze medie η_u dei sottosistemi di utilizzazione dell'edificio di riferimento per i servizi di H, C,

Efficienza dei sottoinsiemi di utilizzazione η_u:	H	C	W
Distribuzione idronica	0,81	0,81	0,70
Distribuzione aeraulica	0,83	0,83	-
Distribuzione mista	0,82	0,82	-

Le efficienze medie dei sottosistemi di generazione sono definite nella Tabella 8.

Tabella 8 – Efficienze medie η_{gn} dei sottosistemi di generazione dell'edificio di riferimento per la produzione di energia termica per i servizi di H, C, W e per la produzione di energia elettrica in situ.

Sottosistemi di generazione	Produzione di energia primaria			Produzione di energia elettrica in situ
	H	C	W	
Generatore a combustibile liquido	0,82	-	0,80	-
Generatore a combustibile gassoso	0,95	-	0,85	-
Generatore a combustibile solido	0,72	-	0,70	-
Generatore a biomassa solida	0,72	-	0,65	-
Generatore a biomassa liquida	0,82	-	0,75	-
Pompa di calore a compressione di vapore con motore elettrico	3,00	(*)	2,50	-
Macchina frigorifera a compressione di vapore con motore elettrico	-	2,50	-	-
Pompa di calore ad assorbimento	1,20	(*)	1,10	-
Macchina frigorifera a fiamma indiretta	-	0,60 x η_{gn} (**)	-	-
Macchina frigorifera a fiamma diretta	-	0,60	-	-
Pompa di calore a compressione di vapore a motore endotermico	1,15	1,00	1,05	-
Cogeneratore	0,55	-	0,55	0,25
Riscaldamento con resistenza elettrica	1,00	-	-	-
Teleriscaldamento	0,97	-	-	-
Teleraffrescamento	-	0,97	-	-
Solare termico	0,30	-	0,30	-
Solare fotovoltaico	-	-	-	0,10
Mini eolico e mini idroelettrico	-	-	-	(**)

NOTA: Per i combustibili tutti i dati fanno riferimento al potere calorifico inferiore
 (*) Per pompe di calore che prevedono la funzione di raffrescamento di considera lo stesso valore delle macchine frigorifere della stessa tipologia
 (**) si assume l'efficienza media del sistema installato nell'edificio reale

Le efficienze indicate nelle tabelle 7 ed 8 sono comprensive dell'effetto dei consumi di energia elettrica ausiliaria.

Fabbisogni energetici di illuminazione

Il calcolo del fabbisogno di energia elettrica per illuminazione è effettuato secondo la normativa tecnica (UNI EN 15193) e sulla base delle indicazioni contenute nella UNI/TS 11300-2. Per l'edificio di riferimento si considerano gli stessi parametri (occupazione, sfruttamento della luce naturale) dell'edificio reale e sistemi automatici di regolazione di classe B (UNI EN 15232).

Fabbisogni energetici di ventilazione

In presenza di impianti di ventilazione meccanica, nell'edificio di riferimento si considerano le medesime portata di aria dell'edificio reale. Nell'edificio di riferimento si assumono i fabbisogni specifici di energia elettrica per la ventilazione riportati nella Tabella 9.

Tabella 9 – Fabbisogno di energia elettrica specifico per m³ di aria movimentata

Tipologi di impianto	E_{ve} [Wh/m³]
Ventilazione meccanica a semplice flusso per estrazione	0,25
Ventilazione meccanica a semplice flusso per immissione con filtrazione	0,30
Ventilazione meccanica a doppio flusso senza recupero	0,35
Ventilazione meccanica a doppio flusso con recupero	0,50
UTA: rispetto dei regolamenti di settore emanati dalla Commissione Europea in attuazione delle direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, assumendo la portata e la prevalenza dell'edificio reale	

ALTRI PARAMETRI PER LE VERIFICHE DI LEGGE CONTENUTI NELL'ALLEGATO

Nelle tabelle del presente capitolo sono indicati altri parametri di verifica

Coefficiente medio globale di scambio termico

Per la verifica di cui al presente allegato, si calcola il coefficiente medio globale di scambio termico H'_T come:

$$H'_T = H_{tr,adj} / \sum_K A_k \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Dove $H_{tr,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione dell'involucro calcolato con la UNI/TS 11300-1 (W/K); A_k è la superficie del k-esimo componente (opaco o trasparente) costituente l'involucro (m^2).

Il valore di H'_T deve essere inferiore al valore massimo ammissibile riportato in Tabella 10 in funzione della zona climatica e del rapporto S/V.

Tabella 10 - Valore massimo ammissibile del coefficiente globale di scambio termico H'_T (W/m²K)

Numero Riga	Rapporto di forma (S/V)	Zona Climatica				
		A e B	C	D	E	F
1	$S/V \geq 0,7$	0,58	0,55	0,53	0,50	0,48
2	$0,7 \geq S/V \geq 0,4$	0,63	0,60	0,58	0,55	0,53
3	$0,4 > S/V$	0,80	0,80	0,80	0,75	0,70
Numero Riga	Tipologia di intervento	Zona Climatica				
		A e B	C	D	E	F
4	Ampliamenti e ristrutturazioni importanti di secondo livello per tutte le tipologie edilizie	0,73	0,70	0,68	0,65	0,62

Area solare equivalente estiva

Si calcola l'area equivalente estiva $A_{sol,est}$ dell'edificio come sommatoria delle aree equivalenti estive di ogni componente vetrato k:

$$A_{sol,est} = \sum_K F_{sh,ob} \times g_{gl+sh} \times (1 - F_F) \times A_{w,p} \times F_{sol,est} \text{ [m}^2\text{]}$$

Dove $F_{sh,ob}$ è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie vetrata k-esima, riferito al mese di luglio; g_{gl+sh} è la trasmittanza di energia solare totale della finestra calcolata nel mese di luglio, quando la schermatura solare è utilizzata; F_F è la frazione di area relativa al telaio, rapporto tra l'area proiettata del telaio e l'area proiettata totale del componente finestrato; $A_{w,p}$ è l'area proiettata totale del componente vetrato (area del vano finestra); $F_{sol,est}$ è il fattore di correzione per l'irraggiamento incidente, ricavato come rapporto tra l'irradianza media nel mese di luglio, nella località e sull'esposizione considerata, e l'irradianza media annuale di Roma, sul piano orizzontale.

Il valore di $A_{sol,est}$ rapportato all'area della superficie utile deve essere inferiore al valore massimo ammissibile riportato in Tabella 11

Tabella 11 - Valore massimo ammissibile del rapporto tra area solare equivalente estiva dei componenti finestrati e l'area della superficie utile $A_{sol,est}/A_{sup\ utile}(-)$

#	Categoria di edificio	Tutte le zone climatiche
1	Categoria E.1 fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme, nonché per la categoria E.1(3)	$\leq 0,03$
2	Tutti gli altri edifici	$\leq 0,04$

Appendice B (Allegato 1, Capitolo 4): REQUISITI SPECIFICI PER GLI EDIFICI ESISTENTI SOGGETTI A RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA

Elementi edilizi

Nel presente paragrafo si riportano i valori limite dei parametri caratteristici degli elementi edilizi negli edifici esistenti sottoposti a riqualificazione energetica.

Tabella 1- Trasmittanza termica U massima delle strutture opache verticali, verso l'esterno soggette a riqualificazione

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015*	2021**
A e B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

Tabella 2 - Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno soggette a riqualificazione

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015*	2021**
A e B	0,34	0,32
C	0,34	0,32
D	0,28	0,26
E	0,26	0,24
F	0,24	0,22

Tabella 3 - Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno soggette a riqualificazione

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015*	2021**
A e B	0,48	0,42
C	0,42	0,38
D	0,36	0,32
E	0,31	0,29
F	0,30	0,28

Tabella 4 - Trasmittanza termica U massima delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati soggette a riqualificazione

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015*	2021**
A e B	3,20	3,00
C	2,40	2,00
D	2,10	1,80
E	1,90	1,40
F	1,70	1,00

Nel caso in cui fossero previste aree limitate di spessore ridotto, quali sottofinestre e altri componenti, i limiti devono essere rispettati con riferimento alla trasmittanza media della rispettiva facciata

Nel caso di strutture delimitanti lo spazio climatizzato verso ambienti non climatizzati, i valori limite di trasmittanza devono essere rispettati dalla trasmittanza della struttura diviso per il fattore di correzione dello scambio termico tra ambiente climatizzato e non climatizzato, come indicato nella norma UNI TS 11300-1 in forma tabellare.

Nel caso di strutture rivolte verso il terreno, i valori limite di trasmittanza devono essere rispettati dalla trasmittanza equivalente della struttura tenendo conto dell'effetto del terreno calcolata secondo UNI EN ISO 13370.

I valori di trasmittanza delle precedenti tabelle 1, 2 e 3, si considerano comprensive dei ponti termici all'interno delle strutture oggetto di riqualificazione (a esempio ponte termico tra finestra e muro) e di metà del ponte termico al perimetro della superficie oggetto di riqualificazione.

Tabella 5- Valore del fattore di trasmissione solare totale g_{gl+sh} per componenti finestrati con orientamento da Est a Ovest passando per Sud, in presenza di una schermatura mobile.

Zona climatica	g_{gl+sh}	
	2015*	2021**
Tutte le zone	0,35	0,35

*dal 1 luglio 2015 per tutti gli edifici

**dal 1 gennaio 2021 per tutti gli edifici

Impianti tecnici

Negli edifici esistenti sottoposti a riqualificazione energetica, l'efficienza media stagionale minima dell'impianto termico di climatizzazione si determina attraverso i valori dei parametri caratteristici corrispondenti riportati nell'Appendice A.

Requisiti per generatore di calore a combustibile liquido e gassoso

Il rendimento di generazione utile minimo, riferito al potere calorifico inferiore, per caldaie a combustibile liquido e gassoso è pari a $90 + 2\log(P_n)$, dove $\log P_n$ è il logaritmo in base 10 della potenza utile nominale del generatore, espressa in kW. Per valori di P_n maggiori di 400 kW si

applica il limite massimo corrispondente a 400 kW. Qualora, nella mera sostituzione del generatore, per garantire la sicurezza, non fosse possibile rispettare le condizioni suddette, in particolare nel caso in cui il sistema fumario per l'evacuazione dei prodotti della combustione sia al servizio di più utenze e sia di tipo collettivo ramificato, si applicano le seguenti prescrizioni:

- a) installazione di caldaie che abbiano rendimento termico utile a carico parziale pari al 30 per cento della potenza termica utile nominale maggiore o uguale a $85 + 3\log(P_n)$; dove $\log P_n$ è il logaritmo in base 10 della potenza utile nominale del generatore o dei generatori di calore al servizio del singolo impianto termico, espressa in kW. Per valori di P_n maggiori di 400 kW si applica il limite massimo corrispondente a 400 kW;
- b) in alternativa alla lettera a), installazione di apparecchio avente efficienza energetica stagionale di riscaldamento ambiente (μ_s) conforme a quanto previsto dal Regolamento UE n. 813/2013;
- c) predisposizione di una dettagliata relazione che attesti i motivi della deroga dalle disposizioni suddette, da allegare al libretto di impianto di cui al decreto del Ministro dello sviluppo economico 10 febbraio 2014 e successive modificazioni.

Requisiti per pompe di calore e macchine frigorifere

Tabella 6 – Requisiti e condizioni di prova per pompe di calore elettriche servizio riscaldamento (macchine reversibili e non)

Tipo di pompa di calore Ambiente esterno/interno	Ambiente esterno [°C]	Ambiente interno [°C]	COP
aria/aria	Bulbo secco all'entrata: 7 Bulbo umido all'entrata: 6	Bulbo secco all'entrata: 20 Bulbo umido all'entrata: 15	3,5
aria/acqua <small>potenza termica utile riscaldamento ≤ 35 kW</small>	Bulbo secco all'entrata: 7 Bulbo umido all'entrata: 6	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	3,8
aria/acqua <small>potenza termica utile riscaldamento ≥ 35 kW</small>	Bulbo secco all'entrata: 7 Bulbo umido all'entrata: 6	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	3,5
salamoia/aria	Temperatura entrata: 0	Bulbo secco all'entrata: 20 Bulbo umido all'entrata: 15	4,0
salamoia/acqua	Temperatura entrata: 0	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	4,0
acqua/aria	Temperatura entrata: 15 Temperatura uscita: 12	Bulbo secco all'entrata: 20 Bulbo umido all'entrata: 15	4,2
acqua/acqua	Temperatura entrata: 10	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	4,2

Tabella 7 – Requisiti e condizioni di prova per pompe di calore elettriche servizio raffrescamento (macchine reversibili e non)

Tipo di pompa di calore Ambiente esterno/interno	Ambiente esterno [°C]	Ambiente interno [°C]	EER
aria/aria	Bulbo secco all'entrata: 35 Bulbo umido all'entrata: 24	Bulbo secco all'entrata: 27 Bulbo umido all'entrata: 19	3,0
aria/acqua <small>potenza termica utile riscaldamento ≤35kW</small>	Bulbo secco all'entrata: 35 Bulbo umido all'entrata: 24	Temperatura entrata: 23 Temperatura uscita: 18	3,5
aria/acqua <small>potenza termica utile riscaldamento ≥35kW</small>	Bulbo secco all'entrata: 35 Bulbo umido all'entrata: 24	Temperatura entrata: 23 Temperatura uscita: 18	3,0
salamoia/aria	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	Bulbo secco all'entrata: 27 Bulbo umido all'entrata: 19	4,0
salamoia/acqua	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	Temperatura entrata: 23 Temperatura uscita: 18	4,0
acqua/aria	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	Bulbo secco all'entrata: 27 Bulbo umido all'entrata: 19	4,0
acqua/acqua	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	Temperatura entrata: 23 Temperatura uscita: 18	4,2

Tabella 8 – Requisiti e condizioni di prova per pompe di calore ad assorbimento ed endotermiche servizio riscaldamento (macchine reversibili e non)

Tipo di pompa di calore Ambiente esterno/interno	Ambiente esterno [°C]	Ambiente interno [°C] (*)	GUE
aria/aria	Bulbo secco all'entrata: 7 Bulbo umido all'entrata: 6	Bulbo secco all'entrata: 20	1,38
aria/acqua	Bulbo secco all'entrata: 7 Bulbo umido all'entrata: 6	Temperatura entrata: 30 (*)	1,30
salamoia/aria	Temperatura entrata: 0	Bulbo secco all'entrata: 20	1,45
salamoia/acqua	Temperatura entrata: 0	Temperatura entrata: 30 (*)	1,40
acqua/aria	Temperatura entrata: 10	Bulbo secco all'entrata: 20	1,50
acqua/acqua	Temperatura entrata: 10	Temperatura entrata: 30 (*)	1,45

(*) Δt : pompe di calore ad assorbimento 30-40°C - pompe di calore a motore endotermico 30-35°C

Tabella 9 – Requisiti di efficienza energetica per pompe di calore ad assorbimento ed endotermiche per il servizio di raffrescamento, per tutte le tipologie.

Tipo di pompa di calore	EER
Assorbimento ed endotermiche	0,6

I valori di cui alle Tabelle 7, 8 e 9, possono essere ridotti del 5% per macchine elettriche con azionamento a velocità variabile.

La prestazione delle macchine deve essere misurata in conformità alle relative norme: UNI EN 14511, UNI EN 12309-2, e UNI EN 14511.

ALLEGATO 2 (Articolo 3): NORME TECNICHE DI RIFERIMENTO PER IL CALCOLO DELLA PRESTAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI

Gli aggiornamenti delle norme tecniche riportate nel presente allegato o le eventuali norme sostitutive o integrative, subentrano o si aggiungono direttamente alle corrispondenti norme dell'elenco che segue.

Norme quadro di riferimento nazionale

UNI/TS 11300-1 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

UNI/TS 11300-2 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione.

UNI/TS 11300-3 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva.

UNI/TS 11300-4 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

Raccomandazione CTI 14 Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione della prestazione energetica per la classificazione dell'edificio.

Norme tecniche a supporto

UNI EN ISO 6946 Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodo di calcolo.

UNI 10339 Impianti aeraulici ai fini del benessere. Generalità classificazione e requisiti. Regole per la richiesta di offerta.

UNI 10349 Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici.

UNI/TR 11328-1 Energia solare - Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia - Parte 1: Valutazione dell'energia raggiante ricevuta.

UNI EN 13789 Prestazione termica degli edifici – Coefficiente di perdita di calore per trasmissione – Metodo di calcolo.

UNI EN ISO 13786 Prestazione termica dei componenti per edilizia – Caratteristiche termiche dinamiche – Metodi di calcolo.

UNI EN ISO 13790 Prestazione termica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento.

UNI EN ISO 10077-1 Prestazione termica di finestre, porte e chiusure – Calcolo della trasmittanza termica – Metodo semplificato.

UNI EN ISO 12631 Prestazione termica delle facciate continue – Calcolo della trasmittanza termica.

UNI EN ISO 13370 Prestazione termica degli edifici – Trasferimento di calore attraverso il terreno – Metodi di calcolo.

UNI EN 12831 Impianti di riscaldamento negli edifici – Metodo di calcolo del carico termico di progetto.

UNI EN 15193 Prestazione energetica degli edifici – Requisiti energetici per illuminazione.

UNI EN ISO 10211 Ponti termici in edilizia – Flussi termici e temperature superficiali – Calcoli dettagliati.

UNI EN ISO 14683 Ponti termici nelle costruzioni edili – Trasmittanza termica lineare – Metodi semplificati e valori di progetto.

UNI EN ISO 13788 Prestazione igrometrica dei componenti e degli elementi per l'edilizia. Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensa interstiziale – Metodo di calcolo.

UNI EN 13363-1 Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate – Calcolo della trasmittanza totale e luminosa - Parte 1: Metodo semplificato.

UNI EN 13363-2 Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate – Calcolo della trasmittanza totale e luminosa – Parte 2: Metodo di calcolo dettagliato.

Banche dati

UNI 10351 Materiali da costruzione – Conduttività termica e permeabilità al vapore.

UNI EN ISO 10456 Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto.

UNI 10355 Murature e solai – Valori di resistenza termica e metodo di calcolo.

UNI EN 1745 Muratura e prodotti per muratura – Metodi per determinare i valori termici di progetto.

UNI/TR 11552 Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici. Parametri termofisici.

UNI EN 410 Vetro per edilizia – Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate.

UNI EN 673 Vetro per edilizia – Determinazione della trasmittanza termica (valore U) – Metodo di calcolo.

IL CONFORT TERMOIGROMETRICO

Possiamo definire *Benessere* una condizione di soddisfazione nella quale un individuo o più individui si trovano e dalle quale non vi è desiderio di allontanarsi.

La norma UNI EN ISO 7730 "*Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*" dà la seguente definizione: Condizione mentale di soddisfazione relativa all'ambiente termico.

Trattandosi di uno stato psico-fisiologico che coinvolge tutti i sensi, si è fatta forte la necessità di studiare l'effetto degli stimoli ambientali (termici, acustici, visivi) sulla psiche e sull'organismo definendo così uno specifico benessere termico, acustico e visivo.

Per una corretta definizione di benessere occorre delimitare e definire il settore al quale il benessere si riferisce. La contemporanea presenza di vari tipi di benessere, aumenta la complessità del problema per via del maggiore numero di stimoli e variabili da tenere in considerazione. Per apprezzare poi una qualsiasi forma di benessere, deve essere verificato il soddisfacimento di tutte le altre forme di benessere.

Lo studio delle condizioni di benessere termoigrometrico parte dall'analisi del metabolismo del corpo umano e dal bilancio energetico del sistema Corpo Umano-Ambiente. Da un punto di vista energetico il corpo umano può essere considerato come una macchina che trasforma l'energia potenziale chimica degli alimenti in altre forme di energia e soprattutto in energia termica.

È possibile esprimere il bilancio energetico del corpo umano secondo l'espressione (1):

$$S = M - (W + E_{res} + C_{res} + C + R + E + K) \quad (1)$$

dove S è l'energia accumulata nel corpo; M è il metabolismo energetico o la potenza metabolica, cioè l'energia chimica trasformata in energia termica e lavoro nell'unità di tempo espressa in Watt; W è la potenza meccanica ceduta all'ambiente; E_{res} è la potenza termica ceduta nella respirazione come calore latente; C_{res} è la potenza termica ceduta nella respirazione come calore sensibile; C è la potenza termica ceduta per convezione; R è la potenza termica ceduta per irraggiamento; E è la potenza termica ceduta per evaporazione dalla pelle e K è la potenza termica ceduta per conduzione.

La potenza metabolica M è funzione dell'attività svolta ed è riferita all'unità di superficie corporea (W/m^2) oppure misurata in *met* come si può vedere nella seguente tabella in cui $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$:

Attività	met	W/m ²
Sonno	0,7	40
Riposo	0,8	45
Seduti	1	60
In piedi	1,2	70
Attività sedentaria (Ufficio-Casa)	1,0-1,4	60-80
Attività leggera (lavoro manuale leggero)	1,4-1,7	80-100
Attività media (lavori domestici-lavoro medio)	1,7-2,0	100-117
Attività intensa (lavoro pesante)	2,0-3,0	117-175
Sport, danza	2,4-4,0	140-235

Tabella 1: Potenza generata dall'attività metabolica per unità di superficie o met.

Nel particolare caso di un soggetto intento in attività sedentarie all'interno di un locale climatizzato, nel periodo invernale, si hanno le seguenti dispersioni di calore:

- Irraggiamento: 40%
- Convezione: 25-30%
- Evaporazione: 20-25%
- Conduzione: trascurabile

Il sistema è bilanciato quando l'energia prodotta dal metabolismo è uguale all'energia scambiata con l'ambiente più l'energia accumulata S . L'organismo di per se reagisce con un sistema di termoregolazione interno capace di mantenere costante la temperatura corporea ($S=0$). Tale condizione di Omotermia assicura l'equilibrio termico necessario per la salute dell'organismo ma non assicura la condizione di benessere. Può infatti accadere che:

- $S < 0$: La temperatura corporea tende a scendere
- $S > 0$: La temperatura corporea tende a crescere

Le grandezze fisiologiche che rappresentano meglio il livello di sensazione termica nel soggetto sono la temperatura della pelle T_{sk} e la quantità di calore scambiata per sudorazione E . Per avere la sensazione di benessere, la temperatura della pelle e la sudorazione devono assumere valori tali da portare il soggetto alla neutralità termica.

Fanger, attraverso indagini statistiche sperimentali, definisce i valori ottimali di T_{sk} ed E in funzione del metabolismo, che inseriti nell'equazione del bilancio energetico del sistema uomo-ambiente danno l'equazione del benessere.

$$T_{sk,0} = 35.7 - 0.0275 * M \quad [C^\circ] \quad (2)$$

$$E_0 = 0.42(M - 58) \quad [W/m^2] \quad (3)$$

Dall'equazione del bilancio energetico e dall'equazione del benessere, risultano quattro parametri ambientali che regolano gli scambi termici con l'ambiente:

1. La temperatura dell'aria dell'ambiente T_a , che regola gli scambi per convezione;
2. La temperatura media radiante T_{mr} , che regola gli scambi termici per irraggiamento;
3. La velocità relativa dell'aria rispetto al soggetto V_a , che regola lo scambio di calore per convezione;
4. L'umidità relativa dell'aria ϕ_a , che influenza l'evaporazione dell'acqua dal corpo per traspirazione e sudorazione.

Alcune sensazioni percepite in funzione della temperatura e dell'umidità relativa (Simonetti Et al, 1993) possono essere riassunte nella seguente tabella:

Temperatura	Umidità Relativa	Sensazioni provate
24 °C	40%	benessere massimo
	85%	benessere a riposo
	91%	affaticamento, depressione
32 °C	25%	nessun malessere
	50%	impossibile il lavoro continuo
	65%	impossibile il lavoro pesante
	81%	aumento della temperatura corporea
36 °C	90%	forte malessere
	10%	nessun malessere
	20%	impossibile il lavoro pesante
	65%	necessità di riposo
	80%	malessere

Tabella 2: Sensazioni mediamente percepite per una persona intenta in attività sedentarie (1 met, 1 clo).

Oltre al livello dell'attività metabolica M occorre tener conto dell'abbigliamento che costituisce una resistenza termica posta sopra la pelle. Si introduce allora la resistenza termica specifica dell'abbigliamento r [m^2K/W]. La resistenza r , oltre che nelle consuete unità SI viene anche espressa attraverso un'altra unità non coerente detta "clo". Sussiste la relazione: $1\ clo = 0.155\ m^2K/W$. Possiamo vedere nella tabella 3 la resistenza termica qualitativa di alcuni abbigliamento tipici.

Abbigliamento	Resistenza termica	
	$m^2\ K/W$	Clo
nudi	0,00	0,00
pantaloncini	0,02	0,10
tenuta estiva leggera	0,08	0,50
tenuta da lavoro leggera	0,11	0,70
tenuta invernale tipica da interno	0,16	1,00
tenuta da affari tipica europea	0,23	1,50

Tabella 3: Resistenza termica data dal vestiario per alcuni abbigliamento tipici.

Si verifica una condizione di benessere termigrometrico in un ambiente chiuso quando, data una certa attività M e una certa resistenza termica del vestiario r , le quattro variabili $(T_a, T_{mr}, V_a, \varphi_a)$ soddisfano la seguente equazione del benessere di Fanger.

$$M(1 - \eta) - E - C_{res} = R + C = A_b \frac{(T_{sk} - T_{cl})}{r} \quad (4)$$

Dove T_{cl} è la temperatura esterna dei vestiti A_b è l'area del corpo.

Ad esempio, fissati M , A_b , η , r , è possibile determinare quali combinazioni delle grandezze $T_a, T_{mr}, V_a, \varphi_a$ assicurino condizioni di benessere, che, ovviamente sono infinite. In genere (almeno per umidità comprese tra il 30 ed il 70%) l'influenza dell'umidità relativa dell'aria sul benessere è ridotta. La soluzione algebrica dell'equazione si presenta laboriosa, per cui in genere si ricorre ad opportuni diagrammi.

A titolo di esempio si riportano alcuni diagrammi ove, trascurando l'effetto della φ_a , sono riportate le linee di benessere, cioè linee che soddisfano la relazione di Fanger. Su ciascun diagramma le linee sono tracciate per cinque differenti velocità dell'aria.

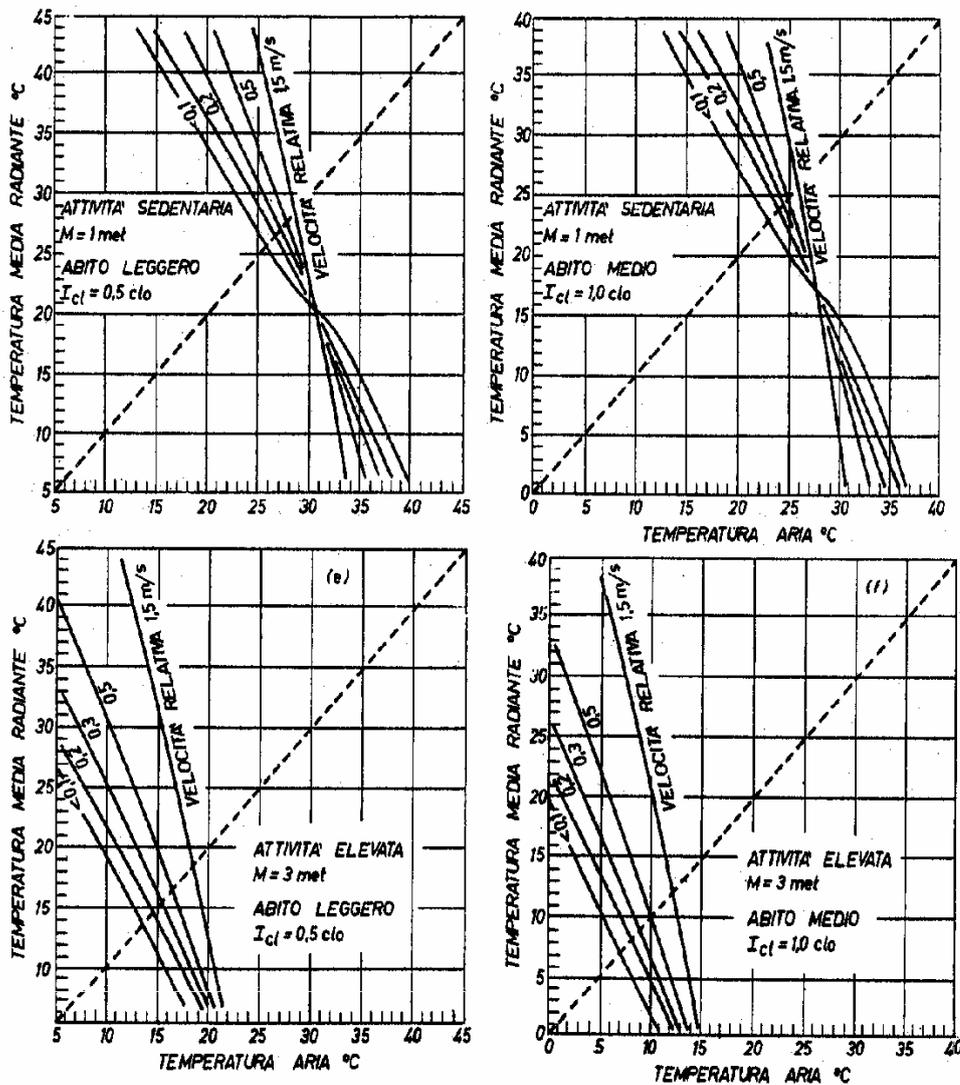


Figura 1: Diagramma delle situazioni di confort pe attività sedentaria invernale ed estiva (in alto), e per attività elevata invernale ed estiva (i basso).

I diagrammi mettono in evidenza come la temperatura media radiante, nel caso di basse velocità dell'aria, assume quasi la stessa importanza della temperatura dell'aria ambiente. Pertanto, con riferimento alle condizioni invernali, tanto minore sarà la temperatura media delle pareti, tanto maggiore, a parità d'abbigliamento, dovrà essere la temperatura dell'aria.

Indici per la valutazione delle condizioni benessere

La valutazione delle condizioni di benessere in relazione ad una situazione ambientale, e cioè il gradimento di un ambiente da parte degli individui, può essere espressa mediante un opportuno indice razionale PMV (Predicted Mean Vote). Al fine di introdurre questo indice si fa riferimento al concetto di carico termico L :

$$L = M(1 - \eta) - M^*(1 - \eta) \tag{5}$$

e cioè alla differenza tra la potenza termica dispersa dal corpo umano nella situazione in esame e la potenza che questo dovrebbe disperdere per trovarsi in condizioni di dichiarato benessere (grandezze con asterisco). Quando risulti $L = 0$, il soggetto si trova in condizioni di "neutralità termica" e cioè di benessere, scostamenti crescenti di segno positivo sono indice di una sensazione di caldo via via più marcata, mentre scostamenti di segno opposto sono indice di una sensazione via via più marcata di freddo. Per quantificare una scala numerica di sensazione termica soggettiva si può fare riferimento all'espressione di un voto secondo la tabella 4 (scala ASHRAE):

VOTO	Sensazione termica soggettiva
3	Molto caldo
2	Caldo
1	Leggermente caldo
0	Confortevole – neutralità
-1	Leggermente freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Tabella 4: Scala ASHRAE per il Predicted Mean Vote.

L'indice PMV rappresenta il valore medio del voto relativo alla situazione ambientale considerata espresso da un campione di persone, in definite condizioni d'attività e vestiario. Si parla di voto medio poiché le singole votazioni presentano ovviamente un certo grado di dispersione. Secondo Fanger il voto medio previsto, PMV, può essere espresso in funzione del carico termico L nel seguente modo:

$$PMV = L [0.303e^{-0.036 \frac{M}{A}} + 0.028] \tag{6}$$

Le informazioni fornite dall'indice PMV sono state integrate dalla percentuale delle persone insoddisfatte (PPD o Predicted Percentage of Dissatisfied), ritenendo tali coloro che votavano valori di "sensazione" al di fuori dei valori -0.5 e $+0.5$. L'indice PPD può, secondo *Ranger*, essere calcolato in funzione dell'indice PMV con la seguente relazione:

$$PPD = 100 - 0.95e^{(-0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)} \tag{7}$$

In tal modo è stato ottenuto il diagramma riportato in figura il quale mostra come, anche per $PMV = 0$, risulti $PPD = 5\%$, non esistono condizioni ambientali che possano soddisfare il 100% delle persone. Il massimo ottenibile su base statistica è, quindi, il soddisfacimento del 95% delle persone.

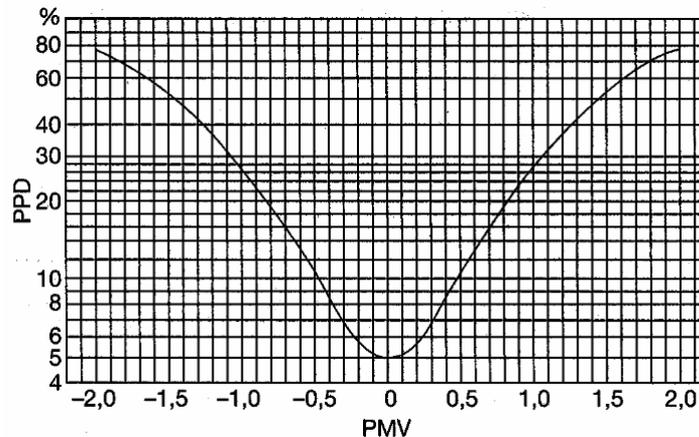


Figura 2: Andamento della Predicted Percentage of Dissatisfied in funzione del Predicted Mean Vote.

Molte norme tecniche considerano condizioni ambientali accettabili per il benessere quelle che siano ritenute tali da almeno l'80% degli individui. In conseguenza, risulta: $0.5 \leq PMV \leq +0.5$.

Si tenga presente che le ricerche sono state eseguite su studenti universitari pertanto è da ritenere che nei normali ambienti, ove l'età degli occupanti, le condizioni psicofisiche, l'abbigliamento, ecc. degli individui sono sicuramente più vari di quanto non siano stati nelle esperienze condotte da Fanger, la percentuale di insoddisfatti possa anche essere più ampia. Le precedenti considerazioni evidenziano come sia impensabile realizzare un microclima ambientale giudicato confortevole da tutti.

Disagio Termico Locale

L'indice PMV ed altri indicano l'impatto dell'ambiente termico sul corpo umano nel suo complesso, ma anche se il PMV prevede una neutralità termica in un ambiente, si può verificare una situazione di "discomfort" dovuta ad un indesiderato riscaldamento o raffreddamento localizzato in qualche parte del corpo (disagio locale).

Il disagio può essere causato da un'eccessiva differenza di temperatura dell'aria tra la testa e i piedi, da un pavimento troppo caldo/freddo, da una velocità dell'aria eccessiva (corrente) o da eccessiva asimmetria della temperatura radiante. La neutralità termica espressa, pertanto, dai limiti PMV non è sufficiente ad accertare il benessere termico di un ambiente confinato. Occorre, infatti, soddisfare altri requisiti relativi al disagio locale che, è opportuno precisare, risulta più avvertito da persone impiegate in lavori sedentari. Alcuni dei fattori più importanti sono elencati qui di seguito.

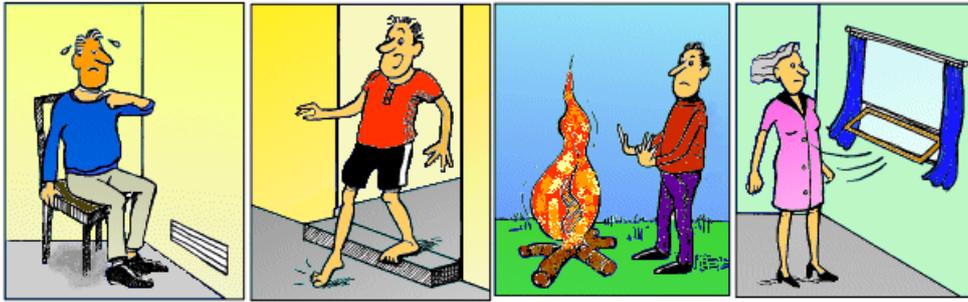


Figura 3: Rappresentazione di quattro situazioni di disagio locale. Da sinistra verso destra: Differenza verticale della temperatura dell'aria, Pavimenti caldi e freddi, Radiazione asimmetrica, Corrente d'aria.

Differenza verticale della temperatura dell'aria

Se in un ambiente la temperatura dell'aria all'altezza del capo differisce sensibilmente dalla temperatura dell'aria prossima agli arti inferiori gli occupanti l'ambiente possono provare una sensazione di disagio. Se si accetta un 5% di persone insoddisfatte, la differenza di temperatura tra capo e arti inferiori deve essere inferiore a 3°C. Normalmente risulta abbastanza facile soddisfare questo limite nei comuni ambienti di un edificio, mentre si possono avere difficoltà in spazi ristretti, ad esempio nelle automobili.

Pavimenti caldi e freddi

Se la temperatura superficiale del pavimento è troppo bassa o troppo elevata, gli arti inferiori degli occupanti possono provare una sensazione di fastidio. Per persone con normali calzature leggere da interni, il materiale di cui è costituito il pavimento ha un'importanza soltanto marginale; mentre il parametro più importante è rappresentato dalla sua temperatura superficiale. L'intervallo di temperatura che lascia solo il 10 % di insoddisfatti corrisponde a 19-29°C. Si può ancora ricordare che in ambienti ove le persone possono essere scalze (camere da letto, piscine, stanze da bagno, etc.) la sensazione di benessere può dipendere anche dalla natura del materiale. Nella tabella 5, per diversi materiali, sono indicati, a titolo di esempio, gli intervalli di temperatura confortevoli per una persona a piedi nudi.

Materiale	Intervallo di temperatura
Pietra, marmo, cemento	27 , 30°C
Linoleum, PVC	25 , 29°C
Legno	23 , 28°C
Tessuto (tappeti)	21 , 28°C

Tabella 5: Intervallo di temperatura superficiale per cui non sussiste disagio per una persona a piedi nudi, a seconda del rivestimento del pavimento, accettando un 10% di insoddisfatti.

Radiazione asimmetrica

Una persona esposta a radiazione asimmetrica può provare sensazione di disagio. La combinazione di soffitto riscaldato e parete fredda è quella che presenta la sensazione di maggiore disagio. Nella norma UNI EN ISO 7730 è indicato un limite di 5°C di asimmetria della temperatura radiante sotto un soffitto riscaldato e di 10°C presso una parete fredda (in genere finestra). Ambedue questi limiti corrispondono a circa il 5% di persone insoddisfatte.

Corrente d'aria

La corrente d'aria è definita come: *“indesiderato raffreddamento di una parte del corpo causato dal movimento dell'aria”*. Le fluttuazioni della velocità dell'aria nel tempo provocano un gradiente temporale ripido della temperatura della pelle; probabilmente sono i segnali inviati al cervello da questi gradienti a provocare la sensazione di disagio. Questo aumenta con il diminuire della temperatura dell'aria. Dalle ricerche svolte è emerso che le persone sono più sensibili al movimento dell'aria di quanto non si fosse previsto in passato.

Esigenze di benessere durante lavori sedentari (uffici)

Come descritto in precedenza, l'equazione di Fanger consente di valutare con precisione le condizioni di benessere ambientale. In molti casi d'interesse pratico (umidità relative dell'aria comprese tra 30 e 70 %) si può ricorrere a fini progettuali a valutazioni più approssimate. A questo scopo si usa fare riferimento alla temperatura operativa t_o , che congloba in una sola grandezza l'influenza dei parametri ambientali t_{mr} e t_a attraverso l'espressione:

$$t_o = \frac{t_{mr}\alpha_{irr} + t_a\alpha_c}{\alpha_{irr} + \alpha_c} \quad (8)$$

Dove α_{irr} e α_c sono rispettivamente i coefficienti di irraggiamento e convezione, che molto spesso coincidono portando all'espressione semplificata:

$$t_o = \frac{t_{mr} + t_a}{2} \quad (9)$$

In quest'ottica le esigenze di benessere invernali ed estive per persone che svolgono un lavoro leggero, per la maggior parte sedentario, sono elencate nella seguente tabella. Si presume un abbigliamento pari a 1 clo durante l'inverno e 0.5 clo per l'estate. Tali valori comprendono molti casi pratici in uffici, abitazioni, industria leggera con bassa attività fisica (1.2 met).

ESIGENZE DI BENESSERE PER PERSONE IN ATTIVITÀ LEGGERA
<p style="text-align: center;">INVERNO (1 clo)</p> <ul style="list-style-type: none">a) Temperatura operativa t_o compresa tra 20 e 24°C.b) Differenza verticale della temperatura dell'aria tra 0.1 m e 1.1 m dal pavimento inferiore a 3°C.c) Temperatura del pavimento compresa tra 19°C e 29°C.d) Velocità media dell'aria inferiore a 0.15 m/s.e) Asimmetria della temperatura radiante vicino alle finestre o altre superfici verticali fredde inferiore a 10°C.f) Asimmetria della temperatura radiante causata da un soffitto riscaldato inferiore a 5°C.
<p style="text-align: center;">ESTATE (0.5 clo)</p> <ul style="list-style-type: none">a) Temperatura operativa compresa tra 23 e 26°C.b) Differenza verticale della temperatura dell'aria tra 0.1 m e 1.1 m dal pavimento inferiore a 3°C.c) Velocità media dell'aria inferiore a 0.25 m/s.

Tabella 6: Parametri medi di confort ambientale per situazioni domestiche, uffici, ed industrie con attività metabolica inferiore a 1.2 met, in inverno ed in estate.

Cenni sulla qualità dell'aria degli ambienti

Per qualità accettabile dell'aria s'intende aria nella quale non sono presenti sostanze inquinanti in concentrazioni tali da poter dar luogo a effetti nocivi sulla salute (e cioè a problematiche di carattere sanitario), oppure in concentrazioni tali da far sì che una notevole percentuale di persone (ad esempio 80%) non abbia da esprimere insoddisfazione nei riguardi della sua qualità (problema di benessere). Si può osservare che una maggiore attenzione dei tecnici, al riguardo della qualità dell'aria, è in parte conseguenza diretta delle misure che sono state via via introdotte per realizzare forme di risparmio energetico. Ad esempio, diminuzione dei tassi di ventilazione con aria esterna pura, utilizzo di nuovi materiali sintetici, di vernici ecc, che possono emettere sostanze gassose inquinanti.

I diversi agenti che contaminano l'aria ambiente possono essere suddivisi in due tipi:

- Particelle (solide o gocce)
- Gas e vapori

In entrambi i casi alcuni sono semplicemente fastidiosi, altri invece sono, o si ritiene che siano, nocivi alla salute. I contaminanti che provocano fastidio possono pregiudicare il benessere delle persone pur non presentando un pericolo per la salute. Tra le particelle si possono comprendere fumo da tabacco, polline o spore, batteri e virus, e particelle inalabili in genere; gas e vapori di particolare interesse per questo problema sono: ossido di carbonio, anidride carbonica, aldeidi, composti organici volatili, ossidi d'azoto. Alcuni agenti inquinanti entrano negli ambienti con l'aria immessa a scopo di ventilazione oppure a causa di infiltrazioni incontrollate. Molte sostanze inquinanti vengono emesse da fonti presenti negli ambienti: le persone stesse sono fonte di CO_2 , di vapor d'acqua e di sostanze biologiche definiti complessivamente "odori corporei". Cause d'inquinamento sono anche riferibili alle attività svolte dalle persone negli ambienti, come: fumo, pulizie domestiche, attività che prevedono incollature, verniciature, o anche le operazioni di cucina. Gli stessi materiali da costruzione e di rifinitura impiegati in edilizia possono emanare sostanze gassose inquinanti; altre fonti possono essere i mobili, le macchine e le attrezzature per ufficio, gli apparecchi per il riscaldamento e le cucine a gas prive o quasi di scarico verso l'esterno. Infine, anche l'ambiente esterno può essere origine di inquinamento attraverso l'aria di ventilazione poco pulita, o si possono verificare immissioni di inquinanti all'interno degli ambienti per altre cause (perdite, scarichi, etc.). Gli stessi impianti di riscaldamento e ventilazione, gli impianti idraulici, in edifici in cui la manutenzione non è sufficiente, possono dar luogo alla formazione di "nicchie ambientali" dove gli organismi patogeni o allergizzanti (ad esempio acari, etc.) si raccolgono e proliferano immettendosi poi nuovamente nell'aria.

Il controllo della qualità dell'aria negli ambienti viene affrontato:

- introducendo negli ambienti stessi un'opportuna portata di "aria esterna pura" per diluire i prodotti inquinanti prodotti all'interno degli ambienti (provvedimento opinabile quando l'aria esterna risulti più o meno inquinata);
- cercando di rimuovere la sostanza inquinante laddove si genera (ad esempio cappe aspiranti delle cucine, mantenimento in depressione del locale bagno);
- riducendo l'entità delle fonti inquinanti interne.

Gli effetti sul benessere e sulla salute conseguenti a quanto citato non sono ancora stati definiti in modo preciso dal normatore.

IMPIANTI RADIANTI

L'idea del pavimento caldo non è di certo recente, ma si può dire che risalgia a più di duemila anni fa. Infatti i primi impianti di questo tipo si trovano in edifici dell'antica Cina ed Egitto. Non si può parlare però di impianto in questo caso, perché si trattava di un focolare acceso al di sotto di una determinata stanza che veniva riscaldata dagli stessi fumi che la avvolgevano. Il metodo utilizzato dai Romani, invece, prevedeva sempre l'utilizzo dei fumi di combustione, ma gli stessi fumi venivano convogliati sotto più stanze, ed in alcuni casi addirittura sotto a più edifici. Si può quindi dire in qualche modo che già i Romani avevano realizzato i primi impianti centralizzati.

Il pavimento radiante nella sua configurazione attuale compare a Londra, nel 1909, grazie al professor Baker. Esso realizza un brevetto dal titolo "*sistema per riscaldare i locali con acqua calda convogliata in tubi sotto pavimento*". La *Crittall Co* ne acquista i diritti e realizza con questo sistema il riscaldamento del palazzo Royal River. Per assistere però ad una vera e propria diffusione di questo sistema bisogna aspettare il secondo dopoguerra, per via delle possibilità date dalla necessità di una grande ricostruzione del paese.

Nei primi anni del secondo dopoguerra, i principali motivi che portano al diffondersi del riscaldamento a pannelli, sono due: la costante carenza di corpi scaldanti e la facilità d'inserimento dei pannelli nelle solette prefabbricate. La tecnica adottata è quella di annegare nei pavimenti, senza strati sottostanti di materiale isolante, tubi in acciaio da 1/2" o da 3/4".

In Europa con tale tecnica, negli anni che vanno dal 1945 al 1950, si riscaldano più di 100.000 unità del residenziale. Ben presto però si deve constatare che gli impianti realizzati causano numerosi disturbi fisiologici, quali ad esempio cattiva circolazione, innalzamento della pressione arteriosa, mal di testa, eccessiva sudorazione. Simili disturbi sono così gravi e documentati che alcuni paesi europei istituiscono apposite Commissioni per individuarne le cause.

I risultati delle varie Commissioni d'inchiesta concordano nel sostenere che, negli impianti realizzati, le condizioni di malessere fisiologico sono da addebitarsi ai valori troppo elevati di due grandezze:

1. la temperatura superficiale del pavimento;
2. l'inerzia termica delle solette.

In particolare si dimostra che, per evitare sensazioni di malessere, la temperatura superficiale del pavimento non deve superare i 28÷29°C. Al contrario, negli impianti esaminati, si raggiungevano temperature molto più elevate, spesso superiori anche a 40°C. Si dimostra, inoltre, che il troppo calore accumulato nelle solette degli impianti realizzati comportava un surriscaldamento dei locali oltre livelli fisiologicamente accettabili. Le stesse Commissioni non emettono però alcun giudizio negativo nei confronti degli impianti a pannelli. Anzi dimostrano che questi impianti, se costruiti a bassa temperatura superficiale e ad inerzia termica non troppo elevata, possono offrire un comfort termico sensibilmente superiore a quello ottenibile con gli impianti a radiatori o a convettori.

Pur non suonando a condanna, i risultati delle Commissioni costituiscono di fatto un forte disincentivo alla realizzazione degli impianti a pannelli. E si devono aspettare diversi anni prima di assistere ad un loro significativo ritorno.

L'evento che di nuovo richiama l'attenzione su questi impianti è la crisi energetica degli anni Settanta. Sotto la spinta di tale crisi quasi tutti i paesi europei emanano leggi che impongono un buon isolamento termico degli edifici. È così possibile riscaldare i locali con minor calore e quindi (nel caso dei pannelli) con temperature a pavimento più basse. Inoltre, nella maggior parte dei casi, il livello di isolamento imposto consente di riscaldare i locali con temperature del pavimento inferiori a quelle fisiologicamente ammissibili. Temperature più basse a pavimento consentono anche di ridurre l'inerzia termica dell'impianto. Un'ulteriore riduzione dell'inerzia termica è inoltre ottenuta realizzando pavimenti "galleggianti" con isolamento termico sia sotto i pannelli, sia verso le pareti. E sono proprio queste novità, di ordine legislativo e tecnico, che consentono infine di poter realizzare impianti a pannelli sicuramente affidabili e con elevate prestazioni termiche.

Attualmente in Europa i "nuovi" impianti a pannelli sono realizzati soprattutto nei paesi nordici, dove conoscono un meritato successo certamente dovuto ai vantaggi che essi possono offrire.

Vantaggi offerti dagli impianti a pannelli radianti

I principali vantaggi che gli impianti a pannelli possono offrire riguardano:

- il benessere termico,
- la qualità dell'aria,
- le condizioni igieniche,
- l'impatto ambientale,
- il calore utilizzabile a bassa temperatura,
- il risparmio energetico.

Per poter assicurare in un locale condizioni di benessere termico si devono mantenere zone leggermente più calde a pavimento e più fredde a soffitto. Gli impianti che meglio si prestano a offrire tali condizioni sono quelli a pavimento radiante per i seguenti motivi:

- a) la specifica posizione (cioè a pavimento) dei pannelli;
- b) la cessione di calore soprattutto per irraggiamento, evitando così il formarsi di correnti convettive d'aria calda a soffitto e fredda a pavimento.

Il riscaldamento a pannelli è in grado di evitare due inconvenienti tipici degli impianti a corpi scaldanti quali:

- a) la combustione del pulviscolo atmosferico, che può causare senso di arsure e irritazione alla gola;
- b) l'elevata circolazione di polvere, che (specie nei locali poco puliti) può essere causa di allergie e difficoltà respiratorie.

Gli impianti a pannelli esercitano un'azione positiva nel mantenimento di buone condizioni igieniche ambientali, in quanto evitano:

- a) il formarsi di zone umide a pavimento, sottraendo pertanto il loro ambiente ideale ad acari e batteri;
- b) l'insorgere di muffe (e della relativa fauna batterica) sulle pareti che confinano coi pavimenti caldi.

Nelle costruzioni nuove e negli interventi di recupero con rifacimento dei pavimenti, gli impianti a pannelli sono gli impianti a minor impatto ambientale perché:

- a) Non pongono vincoli di natura estetica. La non visibilità dei pannelli risulta molto importante soprattutto quando si devono climatizzare edifici di rilievo storico o architettonico, dove la presenza di corpi scaldanti può compromettere l'equilibrio delle forme originali;
- b) Non limitano la libertà d'arredo, consentendo così il più razionale utilizzo dello spazio disponibile;
- c) Non contribuiscono al degrado di intonaci, pavimenti in legno e serramenti, in quanto:
 - Non sporcano le pareti di nerofumo,
 - Non consentono il formarsi di umidità a pavimento,
 - Limitano sensibilmente i casi di condensa interna in quanto aumentano la temperatura delle pareti vicine alle solette con pannelli.

Per merito della loro elevata superficie disperdente, gli impianti a pannelli possono riscaldare con basse temperature del fluido termovettore. Questa caratteristica rende conveniente il loro uso con sorgenti di calore la cui resa (termodinamica o economica) aumenta al diminuire della temperatura richiesta, come nel caso di pompe di calore, caldaie a condensazione, pannelli solari, sistemi di recupero del calore, sistemi di teleriscaldamento, con costo del calore legato (direttamente o indirettamente) alla temperatura di ritorno del fluido primario.

Rispetto ai sistemi di riscaldamento tradizionali, gli impianti a pannelli consentono apprezzabili risparmi energetici essenzialmente sia per la maggior temperatura operante che consente (a parità di temperatura ambiente) risparmi medi variabili dal 5 al 10%; sia per il minor gradiente termico tra pavimento e soffitto che comporta risparmi energetici tanto più elevati quanto maggiore è l'altezza dei locali.

Motivi (seppur meno importanti) di risparmio energetico possono considerarsi anche l'uso di basse temperature che riduce le dispersioni lungo le tubazioni, il non surriscaldamento delle pareti poste dietro i radiatori, e la mancanza di moti convettivi d'aria calda sulle superfici vetrate.

Mediamente gli impianti a pannelli (sempre in relazione agli impianti di tipo tradizionale) consentono un risparmio energetico variabile dal 10 al 15%.

Limiti e svantaggi degli impianti a pannelli radianti

I limiti riguardano essenzialmente aspetti connessi alla temperatura superficiale del pavimento, all'inerzia termica dell'impianto e a difficoltà d'ordine progettuale. Infatti per evitare condizioni di malessere fisiologico la temperatura superficiale del pavimento deve essere inferiore ai valori citati in precedenza (28÷29°C). In caso contrario, cioè nel caso in cui non si abbiano trasmittanze sufficientemente basse da garantire tali parametri, non è più da ritenersi conveniente l'adozione di sistemi radianti poiché avrebbero bisogno di essere integrati nelle zone perimetrali, solitamente occupate dalla mobilia, o mediante sistemi a parete o addirittura di diversa natura.

Gli impianti a pannelli sono caratterizzati dall'aver un'elevata inerzia termica in quanto, per cedere calore, utilizzano le strutture in cui sono annegati i pannelli stessi.

In ambienti riscaldati con una certa continuità (e con buon isolamento sotto i pannelli) l'inerzia termica di questi impianti non pone alcun problema e consente:

- un buon adeguamento dell'impianto alle condizioni climatiche esterne;
- interruzioni o rallentamenti di funzionamento, con tempi di attivazione e disattivazione dell'impianto che vanno normalmente anticipati di due ore.

Per contro in ambienti riscaldati solo per brevi periodi (come nel caso di abitazioni di fine settimana o abitazioni occupate da famiglie che trascorrono la giornata solo parzialmente al loro interno) l'inerzia termica degli impianti a pannelli comporta sensibili sfasamenti tra i tempi di avviamento e quelli di effettivo utilizzo. Pertanto in questi casi conviene ricorrere ad altri sistemi di riscaldamento.

A differenza di quelli tradizionali a corpi scaldanti, gli impianti a pannelli richiedono:

- Maggior impegno per la determinazione dei parametri di progetto. Infatti oltre ai parametri necessari per determinare le dispersioni termiche dei locali, la progettazione degli impianti a pannelli richiede anche la conoscenza dettagliata di tutti gli elementi costruttivi che riguardano i pavimenti e le solette. Si parla di calcoli più complessi e laboriosi, anche se il maggior impegno può essere sensibilmente ridotto con l'uso del calcolo automatico.
- Minor adattamento a varianti in corso d'opera o ad impianto ultimato, in quanto non è possibile togliere o aggiungere porzioni di pannello come invece è possibile con i radiatori.

Raffrescamento dei locali

Gli impianti a pannelli consentono anche il raffrescamento dei locali. Si deve tuttavia considerare che essi presentano in merito due limiti ben precisi:

In primo luogo presentano una limitata resa frigorifera; ciò dipende dal fatto che negli impianti a pannelli non è possibile abbassare troppo la temperatura del pavimento senza provocare fenomeni di condensa superficiale. Per questo motivo risulta difficile ottenere potenze frigorifere superiori a $40\div 50 \text{ W/m}^2$.

L'incapacità di deumidificare dipende invece dalla natura stessa degli impianti a pannelli i cui terminali (cioè i pavimenti) non possono far condensare ed evacuare parte dell'acqua contenuta nell'aria.

Condizioni igrometriche di benessere si possono pertanto ottenere solo con l'aiuto di deumidificatori: vale a dire con integrazioni dell'impianto a pannelli che comportano costi ed ingombri non sempre accettabili.

Costi di Realizzazione e Gestione

È praticamente impossibile stabilire dati medi significativi in merito ai costi richiesti per realizzare gli impianti a pannelli. Troppe infatti sono le variabili da prendere in esame, quali ad esempio:

- il tipo di impianto (autonomo o centralizzato);
- il sistema di regolazione;
- la resistenza termica dei pavimenti in relazione al tipo di finitura superficiale adottata;
- il costo dei materiali isolanti da porre sotto i pannelli;
- il costo e la qualità del tubo costituente i pannelli;

Si può comunque ritenere che gli impianti a pannelli costino mediamente dal 10% al 30% in più degli impianti a radiatori con regolazione climatica. Per quanto riguarda invece i costi di gestione, gli impianti a pannelli consentono risparmi mediamente variabile dal 10% al 15% rispetto agli impianti tradizionali. E consentono pertanto di ammortizzare in tempi relativamente brevi il maggior costo sostenuto per la loro realizzazione.

Gli impianti a pannelli possono essere utilizzati da soli, o integrati con impianti per il trattamento dell'aria, per riscaldare case singole e a schiera, alloggi in edifici a più piani, asili, scuole, palestre, piscine, musei, biblioteche, ospedali, alberghi, magazzini e capannoni. Possono essere utilizzati anche per tener sgombri da neve e ghiaccio parcheggi, rampe di garage, scalinate, piste di aeroporti e campi sportivi. Queste ultime però sono applicazioni che non richiedono ovviamente situazioni di confort e che possono essere utilizzate con la più ampia fantasia per quanto concerne la progettazione.

IMPIANTI AD ARIA

A differenza degli impianti radianti, per gli impianti ad aria non è possibile parlare di una vera e propria evoluzione tecnologica. L'aria è infatti il più antico fluido termovettore. Non a caso i primi impianti a pavimento di cui si è accennato utilizzavano in un primo momento l'aria, e la camera di combustione costituiva una primitiva centrale di trattamento aria. Se ci si vuole però riferire ad un impianto ad aria come ad un impianto in grado di trasferire masse d'aria sia calde che fredde all'interno di un locale per mezzo di opportune canalizzazioni al fine di controllarne la temperatura, allora è necessario aspettare gli anni tra il 1840 ed il 1850, quando nella sede del parlamento Britannico venne realizzato il primo rudimentale sistema HVAC con ventilazione a dislocamento.

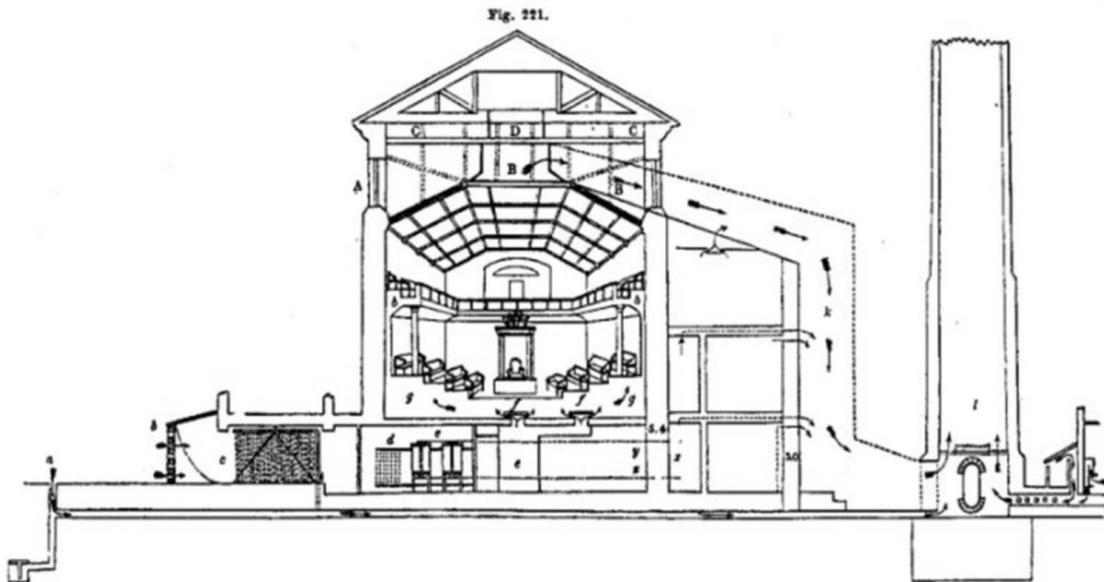


Figura 4: Rappresentazione del sistema di raffreddamento estivo del Parlamento Inglese. L'aria veniva insufflata dal basso dopo aver attraversato un sistema di raffreddamento. L'aria a maggior temperatura invece veniva estratta dal soffitto.

Le unità di trattamento aria (UTA) e le centrali di trattamento aria (CTA) si sono poi notevolmente evolute compattando all'interno della stessa macchina sia la produzione del riscaldamento che la produzione del raffreddamento.

In età recente si è poi assistito alla notevole diffusione di macchine tipo split per il raffreddamento degli ambienti che nulla hanno a che vedere con la ventilazione meccanica controllata. La rapida diffusione è stata garantita grazie all'ingombro notevolmente ridotto ed ai costi contenuti sia della macchina che dell'installazione poiché il sistema non era per niente esteso ed invasivo.

Contemporaneamente si è però assistito al verificarsi di situazioni di condensa all'interno delle abitazioni. Si trattava di:

- Condensa superficiale: cioè condensazione su una qualunque superficie a temperatura inferiore alla temperatura di rugiada dell'aria;
- Condensa interstiziale: quando il vapore condensa all'interno della muratura.

I problemi di condensa superficiale han portato alla formazione di acqua all'interno dei locali, proliferazioni di muffe, deterioramento dei componenti, elevata umidità all'interno e conseguenti problemi di Indoor Air Quality, IAQ. La condensa interstiziale si è invece resa colpevole, insieme ai problemi di smaltimento dell'acqua all'interno della muratura, della perdita delle prestazioni termiche e strutturali dei materiali con formazione di muffe nei materiali permeabili tradizionali (muratura).

Le cause sono da attribuirsi alla parallela evoluzione dei serramenti in commercio che hanno portato alla produzione di porte e finestre verso l'esterno del tutto impermeabili al giorno d'oggi, e perciò non più in grado di garantire un adeguato ricambio d'aria nell'ambiente in cui sono installati.

Oggi, per evitare questo fenomeno, si torna a prestare attenzione agli impianti ad aria.

L'impianto ad aria canalizzata è quindi un impianto che usa come fluido vettore l'aria. Essenzialmente è costituito da un termoventilatore di adeguata dimensione in cui l'aria ambiente viene trattata all'interno della apparecchiatura e adeguatamente parametrizzata per temperatura e umidità viene immessa (ed anche prelevata) nel locale da climatizzare a mezzo di adeguate canalizzazioni.

Vantaggi offerti dagli impianti ad aria

Gli impianti ad aria sono in grado di garantire:

- portate d'aria di immissione/estrazione in quantità prestabilite, anche locale per locale;
- possibilità di variare tali portate dell'aria in funzione delle condizioni ambiente (aumento o diminuzione dell'umidità ambiente, presenza o meno delle persone, ecc.);
- possibilità di filtrazione dell'aria, particolarmente importante per controllarne la qualità;
- possibilità di recupero del calore sull'aria espulsa nei sistemi a doppio flusso mediante l'utilizzo di opportuni scambiatori sensibili e latenti.

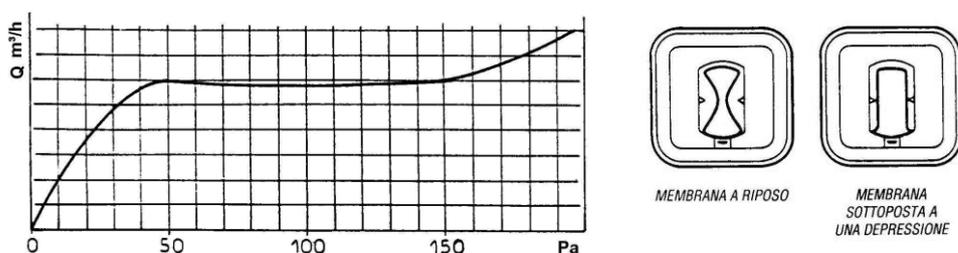
Questa tipologia di impianto, risulta particolarmente adatta quando si deve operare su ambienti di grande dimensione in cui necessita una omogeneità climatica sia estiva che invernale e magari un adeguato rinnovo di aria ambiente con prelievo di aria esterna fresca e pulita ed espulsione di aria ambiente viziata.

Il sistema presenta tipicamente una messa a regime molto rapida, ed una capacità di adeguamento in tempi altrettanto rapidi al variare delle condizioni climatiche interne, soprattutto per questi ultimi due motivi è un impianto particolarmente adatto ai grandi spazi.

Trova però notevole interesse anche nel residenziale potendo pensare ad un aspirazione dell'aria nei locali più inquinati come cucina e bagno. Le tecniche di applicazioni in questo campo si differenziano in:

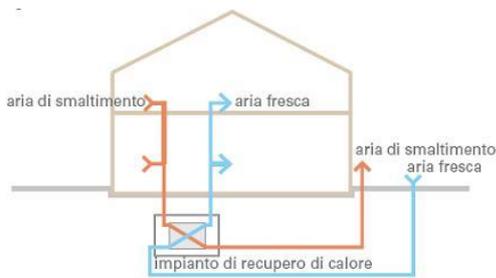
- Ventilazione unifamiliare a flusso autoregolabile;
- Ventilazione unifamiliare a semplice flusso igroregolabile;
- Ventilazione unifamiliare a doppio flusso con recupero di calore;
- Ventilazione condominiale a semplice flusso;
- Ventilazione condominiale a doppio flusso con recupero di calore.

La ventilazione unifamiliare a flusso autoregolabile consiste nell'utilizzare un piccolo elettroventilatore, collegato mediante condotti rigidi e/o flessibili a griglie di estrazione nei locali di servizio (cucina e bagni), per estrarre l'aria da tali locali per mezzo di una depressione. L'afflusso di aria esterna avviene attraverso bocchette disposte sulle pareti esterne o sui serramenti delle stanze "principali" quali soggiorno e camere. Le bocchette sono munite di dispositivi di autoregolazione della portata (membrane in PVC deformabili che modificano per depressione la sezione di passaggio).



Il principio di funzionamento di una bocchetta autoregolabile è tale per cui la portata risulta essere costante.

Di grandissima somiglianza è il sistema di ventilazione unifamiliare a semplice flusso igroregolabile. La differenza risiede solo nella tipologia delle bocchette che sono munite di dispositivo sensibile all'umidità relativa dell'ambiente: se l'umidità tende a scendere il dispositivo limita la portata d'aria, mantenendone comunque un valore minimo; in questo modo si economizza la spesa energetica per la ventilazione, pur salvaguardando la qualità dell'aria, poiché l'umidità relativa ambientale può essere considerata come un indicatore indiretto della presenza delle persone: l'ingresso delle persone negli ambienti comporta in maniera sufficientemente rapida il ripristino della portata "nominale" della bocchetta. L'estrazione dell'aria avviene anch'essa attraverso bocchette igroregolabili. Tale soluzione rappresenta l'evoluzione dei sistemi a semplice flusso in termini di qualità dell'aria, di risparmio energetico, di benessere. L'aria prelevata all'esterno è preventivamente filtrata prima di essere immessa in ambiente, ed il recuperatore di calore a flusso incrociato di tipo statico assicura il preriscaldamento dell'aria di rinnovo in regime invernale. La soluzione a doppio flusso consente anche il controllo delle portate d'aria per singole zone, installando bocchette di estrazione del tipo autoregolante. In questo caso l'afflusso d'aria avviene tramite un ventilatore e una limitata rete di canali di piccolo diametro con relative bocchette di immissione; l'estrazione dell'aria avviene come nei casi precedenti.



La ventilazione unifamiliare a doppio flusso con recupero di calore offre la possibilità di trasferire l'entalpia dell'aria di smaltimento all'aria in ingresso alla UTA per mezzo di uno scambiatore posto a monte della stessa UTA. Il sistema è particolarmente vantaggioso perché è efficace sia in riscaldamento che in raffreddamento diminuendo il salto entalpico

necessario all'interno della UTA e diminuendo quindi i consumi energetici. L'aria in ingresso ha poi la possibilità di fare il free cooling, cioè di bypassare lo scambiatore qualora non vi sia la necessità di utilizzarlo perché le condizioni esterne sono di per se favorevoli.

La ventilazione condominiale a semplice flusso, ed a doppio flusso con recupero di calore, funzionano esattamente come nel caso residenziale per singola unità abitativa. Lo step evolutivo consiste però nel fatto di condividere una macchina tra più unità abitative all'interno dello stesso condominio. Si tratterà pertanto di una UTA di maggiore potenza di scambio alle batterie e maggiore potenza dei ventilatori, ma con rendimenti superiori a quelli ottenibili per la singola unità abitativa. Ci si avvale cioè dell'efficacia che l'effetto scala produce nei rendimenti legati alla produzione e distribuzione dell'energia termica ed elettrica.

Limiti e svantaggi degli impianti ad aria

Gli impianti ad aria soffrono di alcune necessarie accortezze che negli anni si sono dimostrate complici della loro limitata diffusione.

- Difficile regolazione
- Notevole ingombro
- Rumorosità
- Costi di gestione

In realtà tutti gli impianti necessitano di una regolare manutenzione, gli impianti ad aria però presentano la particolare necessità della regolare pulizia dei filtri dell'aria poiché la qualità dell'aria diventa nel tempo un parametro sempre più importante. A seconda dell'estensione dell'impianto, della particolare tipologia, o dei parametri di inquinamento che aggrediscono l'edificio, la pulizia può diventare una spesa ricorsiva e non trascurabile in alcuni casi.

Le tecnologie ad inverter sono state applicate solo recentemente agli ausiliari dell'impianto ed in particolare ai ventilatori. Queste sono macchine che avevano limitata capacità di intervenire direttamente sulla portata dell'impianto utilizzando più ventilatori in parallelo ed eseguendo quindi una regolazione in più gradini. Si tratta però di una soluzione raramente utilizzata perché di difficile progettazione e di notevole ingombro. Si preferiva intervenire sulla portata introducendo perdite di carico per mezzo di serrande che portavano alla formazione di rumori che andavano a propagarsi lungo il condotto.

Elevata rumorosità può essere ottenuta anche attraverso elevate velocità dell'aria, motivo per il quale più grande è il volume da riscaldare/raffrescare e più elevate sono le dimensioni dei condotti, specie in prossimità della CTA. Ciò si traduce direttamente nella necessità di spazi adeguati per l'installazione della macchina e dei principali condotti di aerazione.

Oggi gli impianti ad aria trovano tipicamente installazione in supermercati, ristoranti, uffici tipo open-space, aree espositive, musei e palazzi pubblici e soprattutto ospedali dove va posta particolare attenzione alla qualità dell'aria per ottenere una più elevata produttività o dove l'importanza delle condizioni igieniche dell'aria prevale sui costi energetici.

PARTE II

COSTRUZIONE DELLA STANZA

L'oggetto di questo studio è un edificio residenziale atto ad essere occupato da una famiglia di 4 persone sito nella fascia geografica del Nord-Est Italia. Nella fattispecie, l'edificio in questione, è stato collocato nella provincia di Venezia, in fascia climatica E, classificata cioè con 2345 GG. Ci si limiterà a trattarne solo l'ambiente soggiorno-cucina rappresentato in figura 1, costituito da un unico openspace posizionato al piano terra direttamente sul terreno, e con due sole facciate esposte all'esterno nelle direzioni Est e Sud. La facciata Est non presenta aperture finestrate ed è impegnata dai mobili della cucina, mentre nella facciata sud sono posizionate due portefinestre che garantiscono l'illuminazione a tutto l'ambiente.



Figura 1: Foto di un tipico ambiente soggiorno-cucina open space di superficie 45 m².

Per le murature verso l'esterno può essere presa a riferimento una muratura adottata dai principali costruttori edili che vede la sovrapposizione di un isolante termico da 12 cm, comunemente definito cappotto, ad un doppio blocco di laterizio forato da 25 cm e da 8 cm con uno strato di isolante frapposto tra le due murature. Le pareti interne ed esterne sono intonacate di colore bianco con comuni materiali in commercio. La dettagliata stratigrafia dei componenti è illustrata in tabella 1:

Murature Esterne			
Componente	s [mm]	λ [W/mK]	γ [kg/m ³]
Intonaco Interno	20	0,70	1400
Laterizio	250	0,30	800
Isolante	40	0,10	100
Laterizio	80	0,30	800
Isolante	120	0,04	40
Intonaco esterno	10	0,90	1800
spessore totale [mm]	520		
U_{TOT} [W/m ² K]	0,21		

Tabella 1: Composizione delle murature verso l'esterno della stanza.

Le murature interne, di divisione tra locali riscaldati, sono invece semplicemente costituite da mattoni forati da 22 cm intonacati su entrambi i lati come illustrato in tabella 2:

Murature Interne			
Componente	s [mm]	λ [W/mK]	γ [kg/m ³]
Intonaco Interno	10	0,70	1400
Laterizio	200	0,30	800
Intonaco esterno	10	0,70	1400
spessore totale [mm]	220		
U_{TOT} [W/m ² K]	1,29		

Tabella 2: Composizione delle murature verso vani interni riscaldati.

Si può ipotizzare che il solaio sia costruito con moderne tecniche di isolamento che vedono l'adozione di un vespaio aerato costituito da igloo in materiale plastico, sul quale viene poi realizzata la soletta in calcestruzzo armato dove posare il sistema radiante. Gli igloo presi in esame sono dei Cupolex dello spessore di 26 cm in polipropilene (PP) rigenerato prodotti dall'azienda Pontarolo Engineerig di Pordenone. Per tale prodotto, in caso di impiego in abitazioni, viene consigliata la posa su un magrone da 10 cm disposto direttamente sul terreno, al fine di realizzare la stratigrafia di tabella 3:

Solaio su Terreno			
Componente	s [mm]	λ [W/mK]	γ [kg/m ³]
Calcestruzzo armato	40	2,30	850
Igloo Cupolex	260	0,22	155
Magrone	100	1,50	750
spessore totale [mm]	400		
U_{TOT} [W/m ² K]	0,74		

Tabella 3: Composizione del solaio verso il terreno (al grezzo).

Per il solaio contro terra non si tiene ancora conto della finitura superficiale e dell'ulteriore isolamento perché dovrà essere scelto in base al tipo di impianto di riscaldamento utilizzato.

Per quanto riguarda invece il solaio verso il primo piano, riscaldato, si può ipotizzare la composizione di tabella 4:

Solaio verso Piano Superiore			
Componente	s [mm]	λ [W/mK]	γ [kg/m ³]
Intonaco	20	0,70	1400
Pignatta	200	0,30	800
Polistirolo	60	0,04	40
Massetto	50	1,50	700
Collante	2	0,20	1300
Parquette	8	0,20	400
spessore totale [mm]	340		
U_{TOT} [W/m ² K]	0,42		

Tabella 4: Composizione del soffitto confinante con il primo piano riscaldato.



Figura 2: Rappresentazione della sezione della portafinestra. I vani cavi del telaio sono riempiti di materiale isolante.

I serramenti presi in esame sono due moderne portefinestre basso emissive a triplo vetro da 3.36 m^2 ciascuna, contenenti gas Argon, con telaio in PVC come rappresentato in figura 2. $U_g = 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. I serramenti rappresentati non dispongono ancora della schiuma isolante che viene immessa nelle sezioni cave centrali del telaio al fine di aumentarne la resistenza termica. I serramenti dell'ambiente in questione sono entrambi esposti a Sud e, al pari di ogni altro serramento di elevate performance, garantiscono l'ermeticità della superficie vetrata impedendo infiltrazioni di aria esterna in ambiente.

ANALISI DEL FABBISOGNO

Prendendo come riferimento le ultime unità abitative presenti nel mercato è possibile notare che gran parte dei costruttori offrono soluzioni open space per soggiorno e cucina di dimensioni intorno ai 45 m². Considerando un comune nucleo familiare di quattro persone si possono fare tre ipotesi di occupazione della stanza, creando così tre diversi profili di carico da poter simulare in TRNsys.

Il primo profilo P1 vede occupare la stanza solo nelle ore di punta come colazione, pranzo e cena. Si immagina cioè che entrambi i genitori lavorino e che i figli siano impegnati in un tempo pieno scolastico o vengano accuditi dai nonni nelle ore pomeridiane. Possiamo quindi immaginare che anche la preparazione dei pasti, prima attività per produzione di vapore, avvenga in questi momenti principali.

Nel secondo profilo P2 si ipotizza che la stanza sia occupata nel pomeriggio da due persone intente in attività principalmente sedentarie quali studio, computer o TV. Durante la mattina invece la stanza è sgombra successivamente al momento della colazione.

Nel terzo profilo P3 si valuta la presenza di una persona costantemente impiegata in attività domestiche che va a sommarsi totalmente al precedente profilo P2.

Nell'immagine seguente (figura 3) è presente un riassunto per quanto riguarda l'occupazione giornaliera nei tre diversi profili.

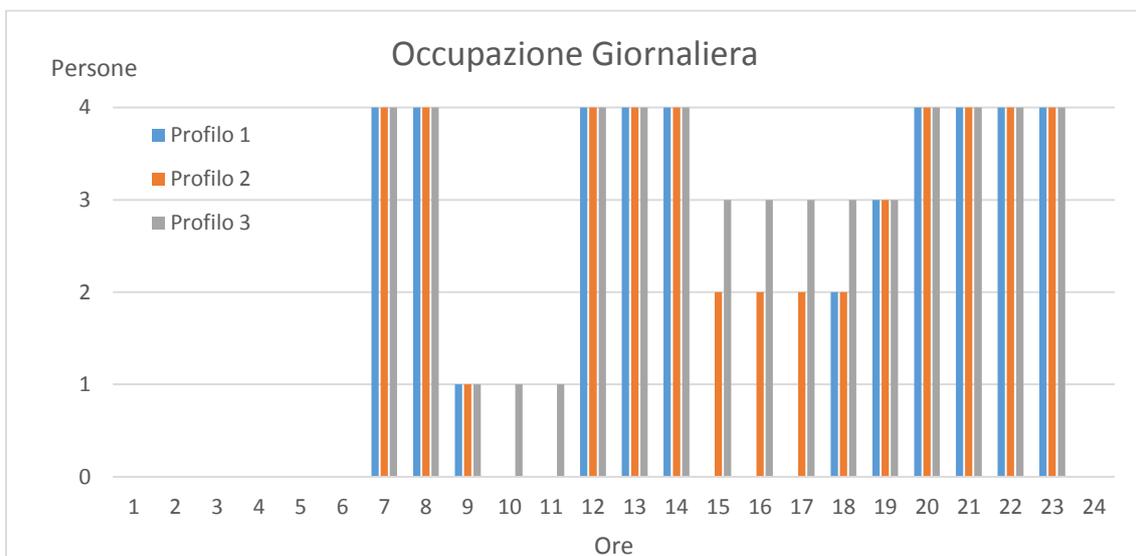


Figura 3: Occupazione giornaliera secondo tre diversi profili ricalcanti le abitudini di una famiglia.

La presenza di persone all'interno della stanza implica uno scambio di calore e di vapore acqueo in relazione all'attività compiuta. Come descritto nei precedenti capitoli è possibile considerare una produzione di 65 W per persona in caso di attività sedentaria con un met pari a 1.0-1.4, e 100 W per persona in caso di lavori domestici con un met pari a 1.7-2.0.

Per valutare gli apporti di calore interni alla stanza, identificabili come carichi interni, è necessario fare l'ipotesi della presenza dei principali apparecchi di uso domestico quali:

- Frigorifero
- Lavastoviglie
- Piano cottura
- Televisore
- Forno

Prendendo per il Frigorifero una classe A++, per un volume di 344 litri divisi tra frigo e congelatore, si può stimare un consumo pari a 252 kWh/anno. Distribuendo il carico costantemente nelle 8760 ore si ottiene una potenza pari a 28.8 W scambiata interamente per convezione con la stanza.

Una lavastoviglie di classe A+ o superiore è un oggetto presente ormai nella quasi totalità delle abitazioni. Nonostante si tratti di un dispositivo energivoro e che utilizza temperature dell'acqua ben superiori alle temperature che si vuole mantenere nella stanza, bisogna tenere presente che esse presentano isolamenti elevati verso la stanza. Pertanto è possibile trascurare in questa sede l'apporto di calore derivante da un normale utilizzo giornaliero, perché il carico termico dato all'acqua viene scaricato con essa a fine lavaggio.

Il piano cottura rappresenta l'elemento più critico tra gli oggetti presi in considerazione. È infatti responsabile dei più elevati apporti endogeni che hanno caratteristiche quasi impulsive per il caso in esame. Un piano cottura classico, a gas, ha una potenza mediamente pari a 4000W. Di tale potenza termica, totalmente ceduta all'ambiente in cui è installato il piano, l'80% viene scambiato per convezione ed il 20% per radiazione. Per l'orario tra le 7:00 e le 8:00, in cui si è posizionata la colazione, si considera solamente un quarto di questa potenza, in accordo con le principali abitudini della popolazione. L'attività di cottura dei pasti provoca una produzione di vapore che normalmente si aggira intorno ad 1.5 kg/h a pieno regime, mentre può considerarsi limitata a 0.5 kg/h durante il periodo di colazione. Essendo il carico normalmente concentrato in intervalli orari di 20 minuti, è possibile considerare una potenza equivalente distribuita nel più ampio intervallo di 60 minuti.

Un comune televisore da 36 o 40 pollici di classe A+ presenta un consumo intorno ai 70kWh/anno. Considerando un utilizzo giornaliero di 10 ore si ottiene una potenza di circa 70W di cui 60W scambiati per radiazione e 10W scambiati per convezione.

In un ambiente cucina è doveroso fare una menzione riguardo il forno, che sia esso elettrico o a gas. Si tratta indubbiamente di un notevole carico interno in funzione per 30-45 minuti a temperature di circa 200°C che di per sé coprirebbe il fabbisogno istantaneo ideale in condizioni invernali. Di conseguenza questo elettrodomestico, quando in funzione, richiederebbe per la maggior parte dell'anno un carico in raffreddamento molto elevato, anche in periodi dove si ritiene in funzione ancora la climatizzazione invernale. Ci si troverebbe così a passare da condizioni di riscaldamento a condizioni di raffreddamento nel corso della stessa giornata ogniqualevolta che esso entri in funzione. L'utilizzo medio settimanale di tale elettrodomestico risulta essere un'incognita poiché varia molto secondo le abitudini della popolazione; inoltre nel periodo estivo l'utilizzo del dispositivo cala notevolmente. Pertanto, in mancanza di dati ragionevoli ed al fine di considerare i carichi termici in maniera quanto più affine alla normativa

vigente in materia di risparmio energetico, si ritiene necessario trascurare l'utilizzo del forno nella programmazione dei carichi interni.

L'utilizzo contemporaneo dei suddetti elettrodomestici, in funzione dell'occupazione giornaliera della stanza, porta alla definizione di una tabulazione di carichi interni che si diversifica per ogni profilo di carico considerato. Nei seguenti diagrammi è possibile confrontare per i tre profili di carico l'andamento orario del calore sensibile prodotto per convezione (figura 4), del calore sensibile prodotto per radiazione (figura 5), e del vapore acqueo immesso nell'ambiente dagli occupanti e dal piano cottura (figura 6).

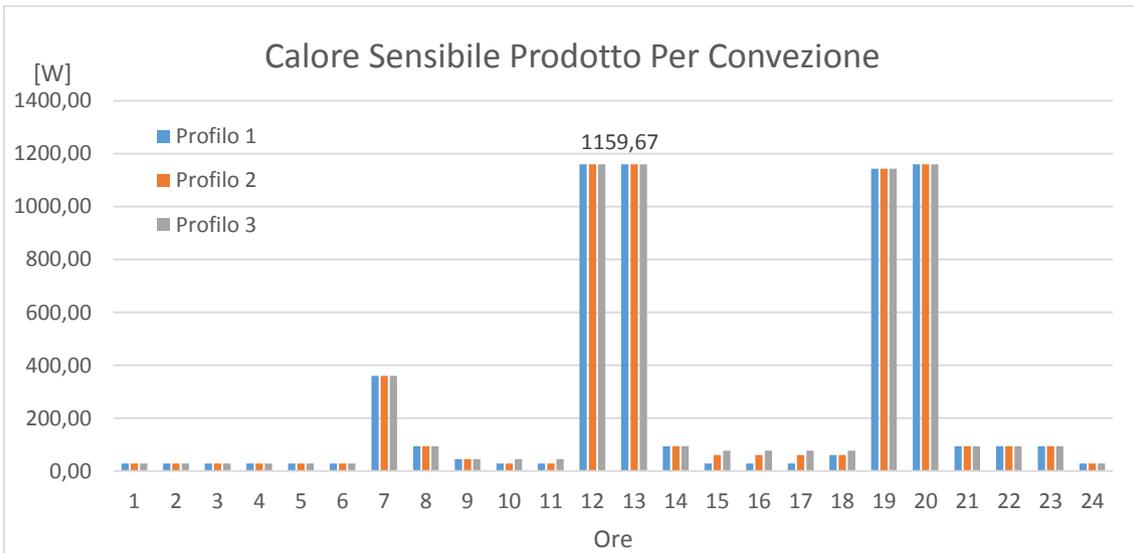


Figura 4: Calore sensibile prodotto per convezione durante la giornata nei tre profili di carico. Il valore massimo raggiunto, pari a 1159.67 W, è comune a tutti i profili.

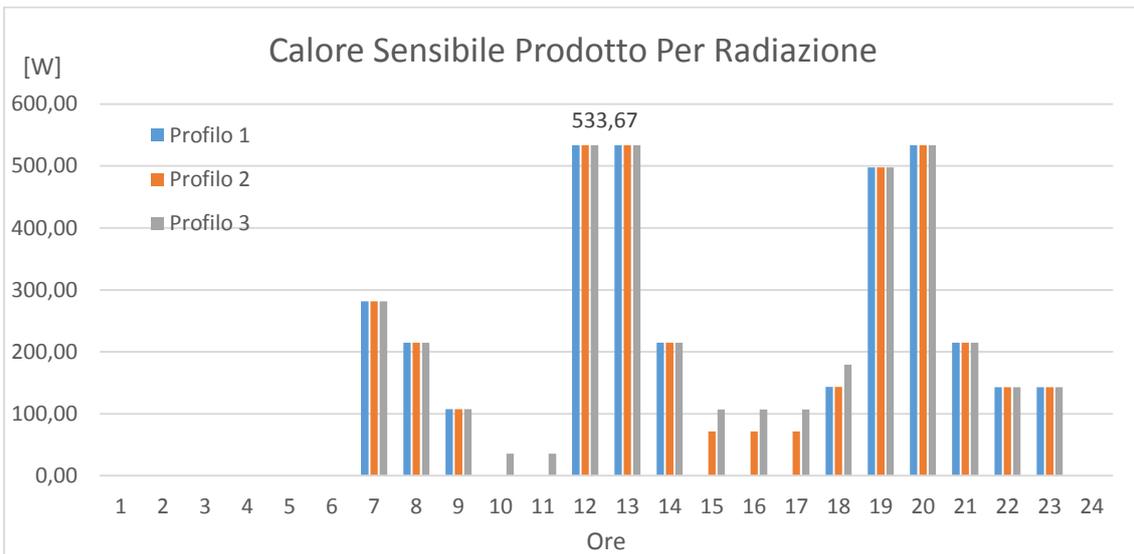


Figura 5: Calore sensibile prodotto per radiazione durante la giornata nei tre profili di carico. Il valore massimo raggiunto, pari a 533.67 W, è comune a tutti i profili.

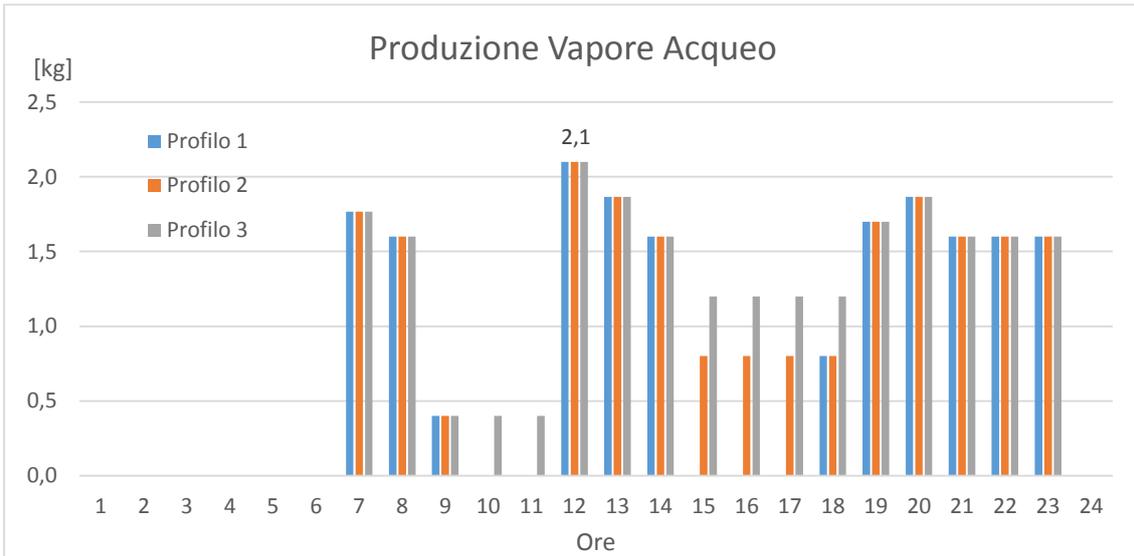


Figura 6: Produzione di vapore acqueo durante la giornata secondo tre profili di carico. Il valore massimo raggiunto, pari a 2.1 kg/h ,è comune a tutti i profili.

Ricostruendo il modello della stanza sopradescritta in TRNsys, ed applicandovi i carichi descritti per la località scelta, si ottiene il fabbisogno termico sensibile e latente necessario al mantenimento delle condizioni di confort nella stanza ora per ora. Nelle figure da 7 a 10 si riportano le temperature raggiunte dalla stanza ed il calore sensibile idealmente richiesto per ognuno dei profili di carico previsti.

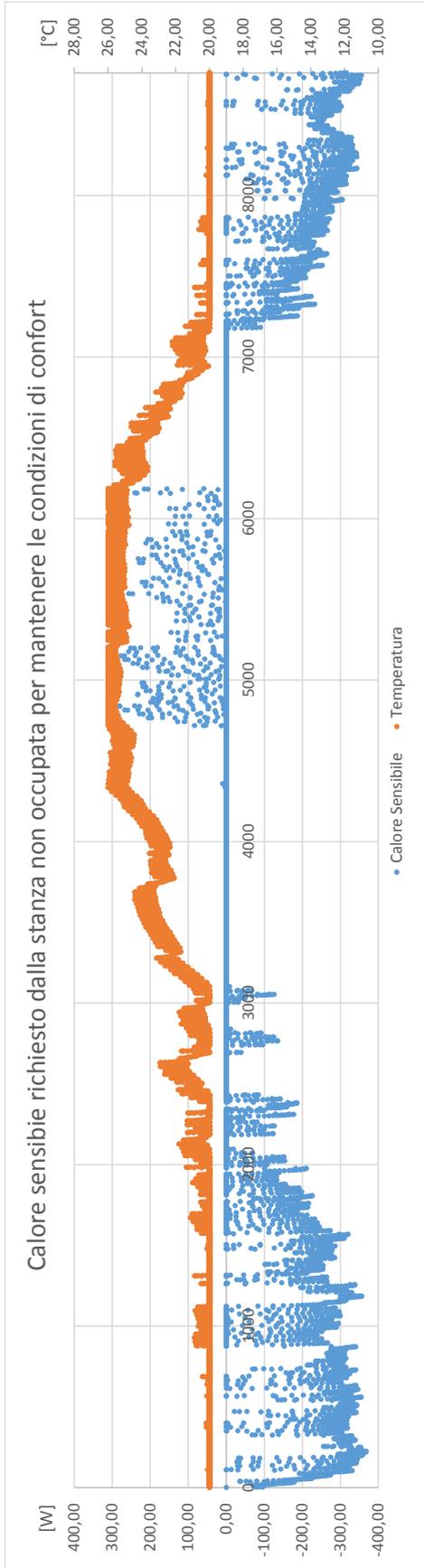


Figura 7: Temperatura ambiente (arancione) e calore sensibile (blu) durante l'anno tipo per stanza non occupata.

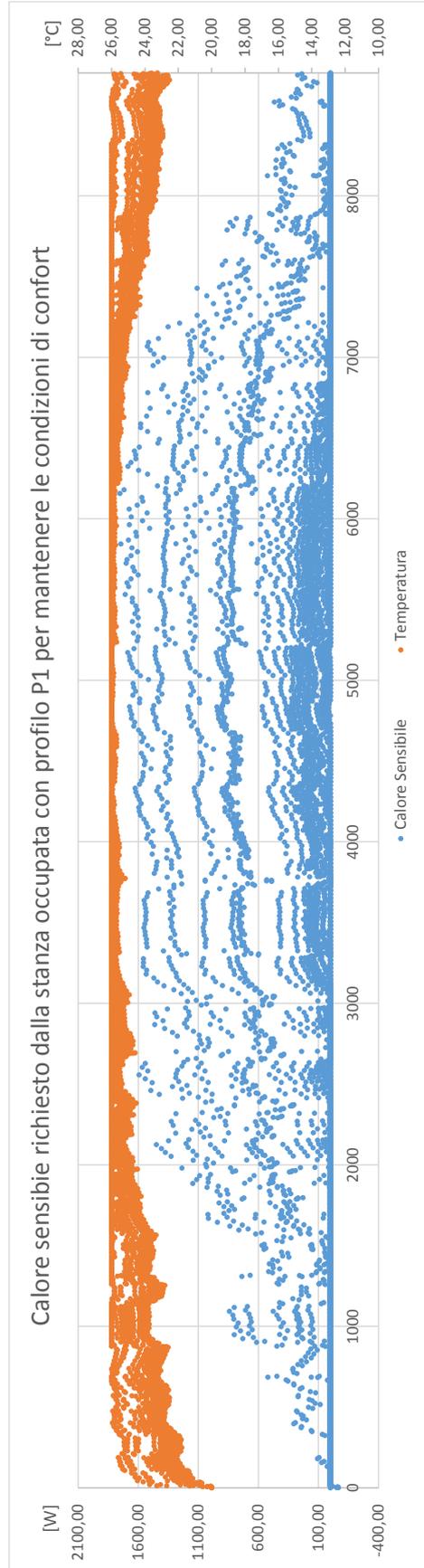


Figura 8: Temperatura ambiente (arancione) e calore sensibile (blu) durante l'anno tipo per il Profilo 1.

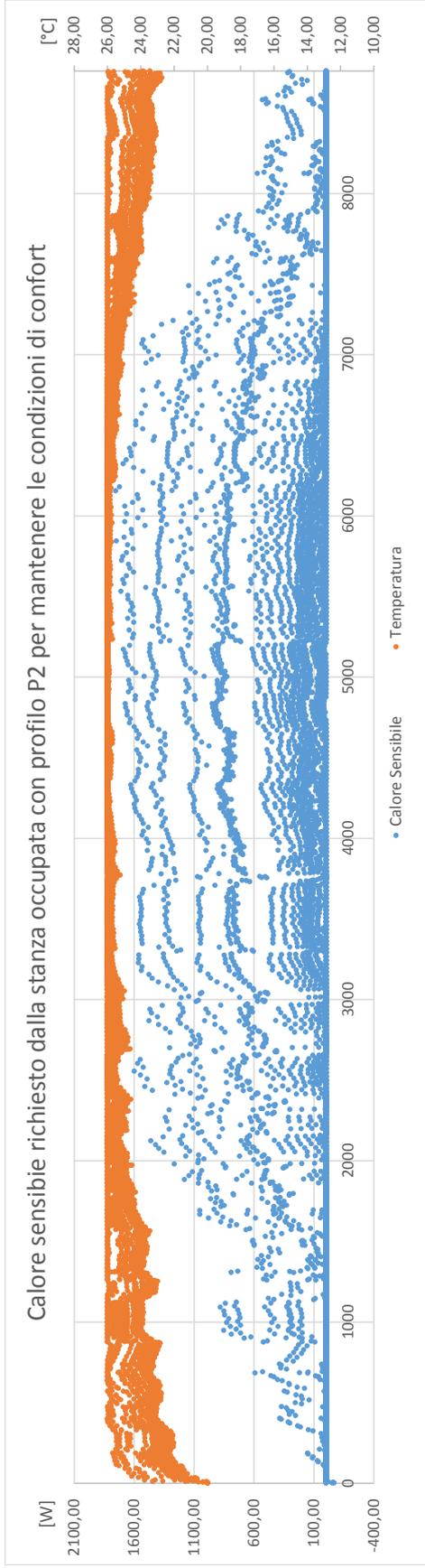


Figura 9: Temperatura ambiente (arancione) e calore sensibile (blu) durante l'anno tipo per il Profilo 2.

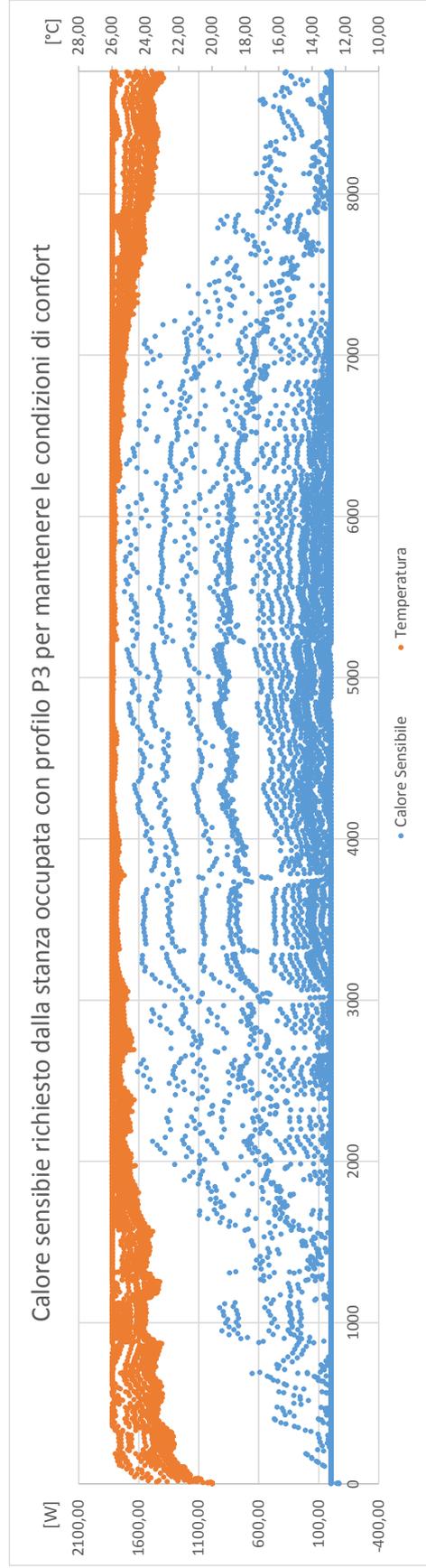


Figura 10: Temperatura ambiente (arancione) e calore sensibile (blu) durante l'anno tipo per il Profilo 3.

I valori di potenza inferiori allo zero rappresentano l'esigenza di riscaldare l'ambiente. Analogamente, i valori positivi di potenza rappresentano la potenza richiesta in raffrescamento. Dai profili di energetici ottenuti è possibile ricavare alcune importanti considerazioni:

- La massima potenza sensibile richiesta nel periodo invernale è pari a 368 W. Tale valore viene ottenuto in riferimento ad una stanza non occupata, in corrispondenza di una temperatura esterna di -5°C. La potenza indicata si riferisce alla somma dei fenomeni di dispersione per trasmissione e ventilazione.
- La massima potenza sensibile per il raffrescamento estivo è pari a 1765 W. Tale valore è stato ottenuto in corrispondenza dell'ora 5173, con una temperatura esterna pari a 29.7°C, al pieno manifestarsi dell'occupazione interna. Tiene conto di ancora di trasmissione e ventilazione.
- La massima potenza latente richiesta nel periodo estivo è pari a 1839 W.

Riportando questi valori in un grafico in funzione della temperatura esterna, e rappresentando l'andamento dei dati con approssimazione lineare come in figura 11, si nota come i carichi endogeni abbiano enorme importanza nella determinazione del punto di inversione della stanza (M.Vio,2003).

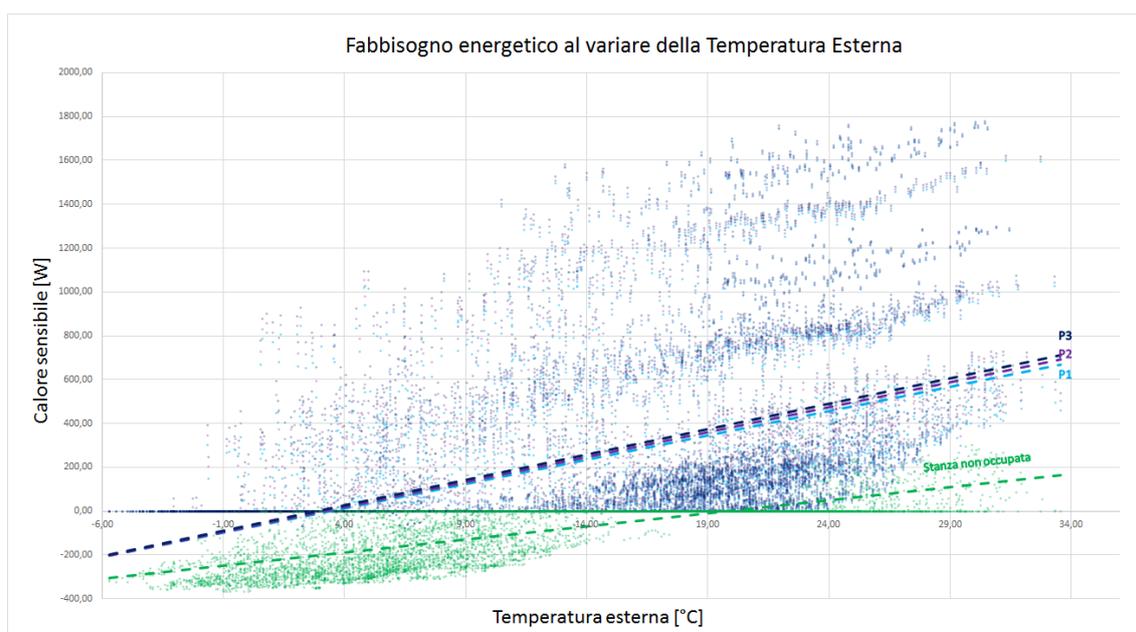


Figura 11: Rappresentazione del punto di inversione della stanza non occupata (verde), occupata con Profilo 1 (azzurro), occupata con profilo 2 (viola), occupata con Profilo 3 (blu).

Le rette descritte vanno osservate in modo qualitativo. Una stanza con questo livello di coibentazione rappresenta di per sé un caso già critico rispetto a quanto descritto da Vio a 15 anni di stanza. Da un punto di vista teorico una ridotta trasmittanza rappresenta un vantaggio sia in riscaldamento che in raffrescamento, permettendo di ridurre la potenza di progetto dell'impianto di climatizzazione in entrambi i casi. Nel periodo invernale si ha riscontro di questo fenomeno anche, e soprattutto, introducendo i carichi endogeni. Nei diagrammi precedenti si nota infatti la quasi totale assenza di richiesta di riscaldamento a stanza occupata, facendo abbassare il punto di inversione di circa 16°C e riducendo di un terzo la potenza richiesta in climatizzazione invernale. Tuttavia, introducendo i carichi interni, l'elevata resistenza termica rappresenta un freno alla dispersione del calore in eccesso in tutti gli istanti in cui la temperatura

esterna sia inferiore alla temperatura ambiente, anticipando notevolmente durante l'anno la necessità di intervenire con sistemi di climatizzazione adeguati e triplicando la potenza di raffrescamento.

IMPIANTO RADIANTE CON VMC

Ventilazione Meccanica Controllata

Per provvedere a garantire il minimo ricambio d'aria necessario all'edificio, la realtà costruttiva edilizia vede l'adozione di una ventilazione meccanica controllata VMC con una portata d'aria costante di 0.6 volumi/ora. Questa portata d'aria viene filtrata mediante un filtro G3/G4 ed un filtro a tasche per aumentarne la qualità, e attraversa un recuperatore sensibile a flussi incrociati con efficienza pari 0.9. Dall'equazione 1 si evince che l'utilizzo di questo dispositivo, dal punto di vista teorico, offre vantaggi soprattutto nel periodo invernale, dove in presenza della massima differenza di temperatura tra ambiente ed aria esterna si riesce ad ottenere anche la massima potenza scambiata.

$$\varepsilon = \frac{T_{amb} - T_{in}}{T_{amb} - T_{est}} = 0,9 \quad (1)$$

Dove T_{amb} è la temperatura ambiente, T_{in} è la temperatura di immissione dell'aria in ambiente, e T_{est} è la temperatura esterna.

Il recuperatore di calore offre vantaggi anche nel caso estivo, operando un raffreddamento sull'aria esterna ed abbattendo parte del calore sensibile da asportare. La tipica modalità di impiego di questo dispositivo in ambito residenziale è evidenziata in figura 12. La portata d'aria viene garantita da due ventilatori, uno sulla condotta di immissione, solitamente situato a valle del recuperatore; ed uno sulla condotta di estrazione, solitamente maggiorato per garantire l'estrazione dell'aria a più bassa qualità dai locali bagno.

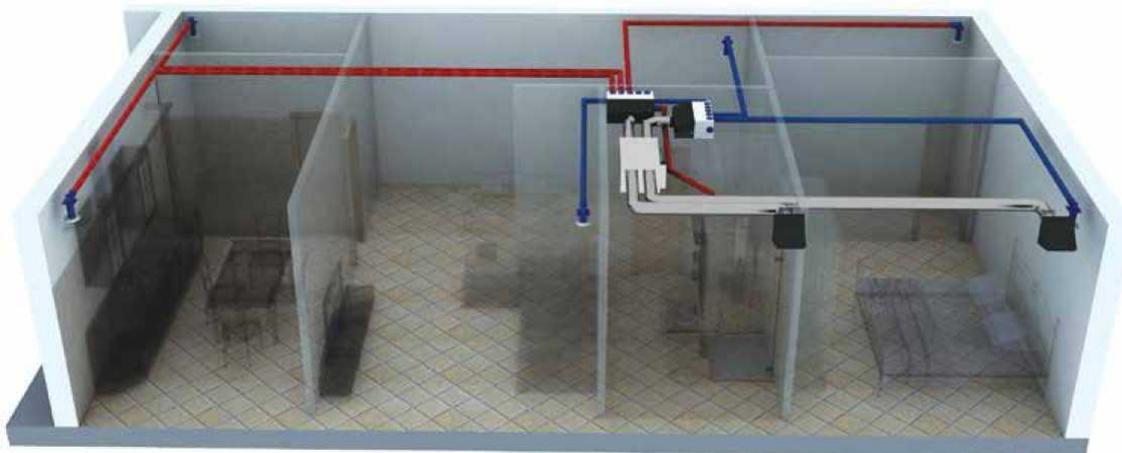


Figura 12: Esempio di normale impiego di un recuperatore sensibile nella VMC residenziale per garantire il ricambio dell'aria.

Impianto radiante

Prendendo a riferimento un comune produttore di elementi per impianti radianti di comprovata affidabilità quale WAVIN (<http://it.wavin.com>), è sufficiente indagare tra i dati disponibili online per avere un'adeguata idea sul tipo di prodotti da doversi scegliere per l'ambiente residenziale in questione.

Nella progettazione e nell'esecuzione dei sistemi WAVIN per riscaldamento/raffrescamento a pavimento, il produttore suggerisce delle linee guida in piena conformità delle seguenti norme e direttive:

- UNI 10462, Elementi edilizi - Tolleranze dimensionali
- UNI 10463, Elementi edilizi - Tolleranze dimensionali
- UNI EN 13163, Isolanti termici per l'edilizia – Prodotti di polistirene espanso
- UNI EN 13164, Isolanti termici per l'edilizia – Prodotti di polistirene espanso estruso
- UNI EN 13171, Isolanti termici per l'edilizia – Prodotti di fibre di legno
- DIN 4108, Isolamento termico nell'edilizia
- UNI EN ISO 140, Acustica - Misura dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edifici
- UNI EN ISO 717, Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edifici
- UNI EN 12354, Acustica in edilizia
- DIN 18560, Pavimenti nell'edilizia
- UNI EN 13813, Massetti e materiali per massetti - Materiali per massetti - Proprietà e requisiti
- UNI EN 1264, Riscaldamento/raffrescamento radiante
- UNI EN 15377, Impianti di riscaldamento - Progettazione degli impianti radianti di riscaldamento e raffrescamento, alimentati ad acqua, integrati in pavimenti, pareti e soffitti
- Normativa italiana vigente sul risparmio energetico
- DIN 18195, Impermeabilizzazione degli edifici
- DIN 1055-3, Effetti sulle strutture portanti
- UNI EN 13501, Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione
- DIN 4102, Comportamento al fuoco di componenti e materiali da costruzione

La norma UNI EN 1264-4 prevede che gli strati di isolamento debbano avere le resistenze termiche minime indicate nella seguente tabella 5, in funzione della temperatura sottostante la struttura dell'impianto a pavimento o in funzione della temperatura dell'aria esterna se si tratta di impianti a contatto diretto col terreno.

Esempio di impiego	Valore minimo resistenza termica [m ² K/W]	Isolamento supplementare eventualmente necessario
D1: Locale sottostante riscaldato	$R \geq 0,75$	Risolamento supplementare = $0,75 - R_{\text{pannello}}$ del sistema
D2: Locale riscaldato o parzialmente riscaldato, oppure a diretto contatto con il terreno	$R \geq 1,25$	Risolamento supplementare = $1,25 - R_{\text{pannello}}$ del sistema
D3: Per solaio su esterno con temperatura dell'aria esterna T_d compresa tra	$R \geq 2,00$ - ($-5^{\circ}\text{C} > T_d \geq -15^{\circ}\text{C}$)	Risolamento supplementare = $2,00 - R_{\text{pannello}}$ del sistema
	$R \geq 1,25$ - ($T_d \geq 0^{\circ}\text{C}$)	Risolamento supplementare = $1,25 - R_{\text{pannello}}$ del sistema
	$R \geq 1,50$ - ($0^{\circ}\text{C} > T_d \geq -5^{\circ}\text{C}$)	Risolamento supplementare = $1,50 - R_{\text{pannello}}$ del sistema

Tabella 5: Resistenza termica minima da adottare nell'isolamento del solaio secondo UNI EN 1264-4.

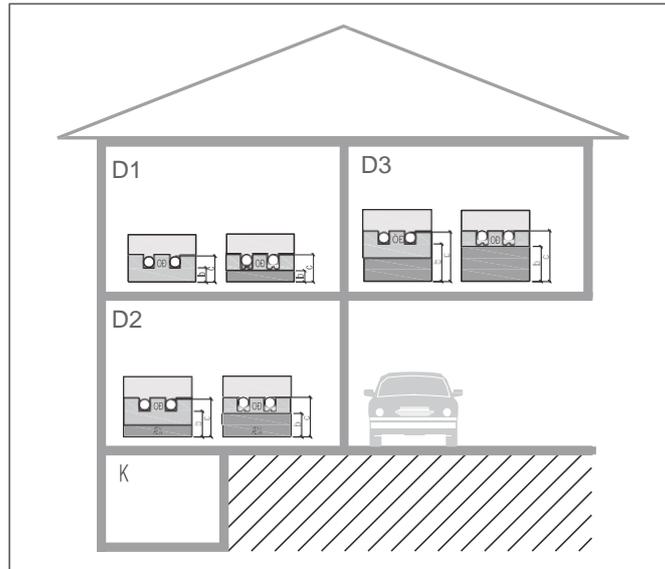


Figura 13: Riferimento grafico della Tabella1 per il calcolo della resistenza termica minima da adottare nell'isolamento del solaio secondo UNI EN 1264-4.



Figura 14: Composizione di un pavimento radiante a bugne.

La classica struttura esemplificativa del sistema di riscaldamento/raffrescamento a pavimento, consigliata dal produttore in questione ma comune alla quasi totalità degli analoghi sistemi radianti è rappresentata nella figura 14 qui a fianco. Sebbene si abbiano le migliori rese di questi sistemi con i pannelli lisci sui quali fissare il tubo mediante apposite clip, la realtà costruttiva vede in grande maggioranza l'applicazione dei

pannelli a bugne. Questi ultimi permettono una rapida posa in cantiere poiché il tubo può essere incastrato nell'alloggiamento mediante la sola pressione del piede, senza l'ausilio di alcuna clip, garantendo allo stesso tempo un buona protezione del tubo dal calpestio durante l'attività di cantiere immediatamente successiva alla posa. Tale immagine lascia intuire quale deve essere la procedura, ed i dovuti accorgimenti per la posa in opera di un simile sistema ad umido. Si richiede che le murature della stanza siano già intonacate internamente, e che la soletta sia allo stato grezzo. In tale condizione andrà posato un rivestimento atto a garantire uno sbarramento contro l'umidità su tutta la superficie e sul muro perimetrale per la sola altezza occupata dal sistema. Sul perimetro del sistema è necessario aggiungere un ulteriore e particolare isolante che sia interposto tra la muratura ed il sistema radiante. Solo dopo tali accorgimenti è possibile stendere sulla superficie il pannello a bugne (sulla cui superficie è già presente lo strato anticalpestio) sul quale potranno essere disposte le tubazioni. I tubi vengono poi coperti da una

gettata di calcestruzzo alleggerito sulla quale viene disposta la pavimentazione mediante un letto di malta.

Il fabbisogno termico di un ambiente può essere coperto indipendentemente dalla tipologia di posa. Il tipo di posa influisce soltanto sulla distribuzione della temperatura desiderata sulla superficie del pavimento e nell'ambiente. Poiché il fabbisogno termico di un ambiente diminuisce procedendo dalla zona dei muri esterni verso il centro della stanza, nella zona di maggiore fabbisogno (zona perimetrale), i tubi di riscaldamento sono in genere posati più vicini l'uno all'altro rispetto a quelli della zona soggiornale. Tuttavia la necessità di progettare una zona perimetrale dipende dalla tipologia di muro esterno (valore trasmittanza del muro, quantità e qualità della superficie delle finestre) ed uso del vano. Grazie a un interasse di posa minore nelle zone perimetrali e un interasse maggiore nelle zone soggiornali (possibilmente con tipologia di posa a forma di spirale e serpentina doppia) si ottiene:

- un'elevata sensazione di benessere in tutto l'ambiente;
- temperature confortevoli del pavimento nonostante la notevole potenza termica emessa;
- riduzione della temperatura di mandata necessaria e perciò minore consumo di energia.

Nella procedura di calcolo di un sistema di riscaldamento/raffrescamento radiante, ovvero nella determinazione della temperatura di mandata e dell'interasse di posa dei tubi, bisogna tener conto della resistenza termica del rivestimento. È necessario che la resistenza termica del rivestimento del pavimento sia correttamente calcolata e non superi il valore di $R_{\lambda,B} = 0,15 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Qualora il valore debba essere approssimato, si può fare ricorso alla seguente tabella:

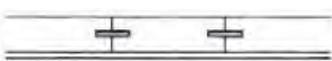
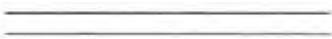
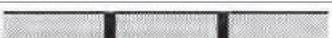
Rivestimento		Spessore d [mm]	Conducibilità termica λ [W/mK]	Resistenza termica $R_{\lambda,B}$ [m ² K/W]
Tessile		10	0,07	max 0,15
Pavimento in legno		8 2	0,2 0,2	0,04 0,01
Collante		Tot. 10		Tot. 0,05
Rivestimento sintetico (es. PVC)		5	0,23	0,022
Piastrella in ceramica		10 2	1,0 1,4	0,01 0,001
Letto di malta sottile		Tot. 12		Tot. 0,011
Piastrella in ceramica		10 10	1,0 1,4	0,01 0,007
Letto di malta		Tot. 20		Tot. 0,017
Piastrella in pietra naturale o artificiale; qui marmo e letto di malta.		15 10	3,5 1,4	0,004 0,007
		Tot.25		Tot. 0,011

Tabella 6: Resistenza termica di alcuni rivestimenti del pavimento.



Figura 15: Pannello COMPACT ULTRA Wavin.

Nella fattispecie, per l'ambiente in esame, si sceglie il sistema ad umido *COMPACT ULTRA* illustrato in figura 15 con un tubo multistrato Polystop prodotto in polietilene PE-RT. Tale tubazione è caratterizzata da elevata plasticità e resistenza alle alte temperature. Il tubo intermedio in alluminio costituisce una barriera assoluta all'assorbimento di ossigeno e il tubo esterno in polietilene ad alta densità PE-HD è particolarmente resistente all'abrasione e ai raggi UV.

Pannello COMPACT ULTRA		
Materiale Isolamento		EPS 040 DES sg
Materiale Foglio di Rivestimento		Foglio PS
Dimensioni	lunghezza [mm]	1450
	larghezza [mm]	850
	altezza complessiva [mm]	60
	spessore strato isolante sotto il tubo [mm]	11
Misure di posa	lunghezza [mm]	1400
	larghezza [mm]	800
	superficie [m ²]	1,12
Interasse		100 mm
Tipologia costruttiva, secondo DIN 18560 e UNI EN 13813		A
Conducibilità termica [W/mK]		0,03
Resistenza termica [m ² K/W]		2,00
Classe del materiale da costruzione, secondo DIN 4102		B2
Comportamento all'incendio, secondo UNI EN 13501		E
Carico distribuito massimo [kN/m ²]		8

Figura 16: Caratteristiche tecniche del pannello COMPACT ULTRA Wavin.

Si arriva così a definire il nuovo pacchetto di materiali che costituisce il solaio, la cui stratigrafia è riassunta nella seguente tabella 7.

Materiale	s [mm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	γ [kg/m ³]
Legno	8	0,2	0,04	400
Collante	2	0,2	0,01	1300
Massetto	45	1,5	0,03	700
Pannello COMPACT ULTRA	60	0,03	2,00	20
Barriera umidità	2	0,23	0,01	1140
Massetto	150	1,5	0,10	700
Calcestruzzo Armato	40	2,3	0,02	850
Cuplex Igloo	32	0,22	0,15	155
Magrone	300	1,5	0,20	750
Spessore Totale [mm]	639			
U _{tot} [W/M ² K]	0,38			

Tabella 7: Composizione del solaio della stanza di riferimento con pavimento radiante.

L'impianto deve essere dimensionato per far fronte ad un carico sensibile, di trasmissione e ventilazione, pari a 368 W in regime invernale e 1765 W in regime di raffreddamento estivo. Avendo a disposizione una superficie disperdente pari a 38.81 m² ed una resistenza superficiale pari 0.05 m²K/W si ottiene la differenza media di temperatura tra la stanza e la temperatura media del fluido pari a 11 K nelle massime condizioni di carico.

Per questo sistema si considera uno scambio termico con comportamento lineare al variare del $\Delta\theta_{m,ln}$ tra stanza e temperatura media del fluido; ovvero si considera un fattore costante fornito dal produttore pari a $K_H = 4.392 \text{ W/m}^2\text{K}$ per il raffreddamento, e $q/\Delta\theta_H = 6.26 \text{ W/m}^2\text{K}$ per il riscaldamento.

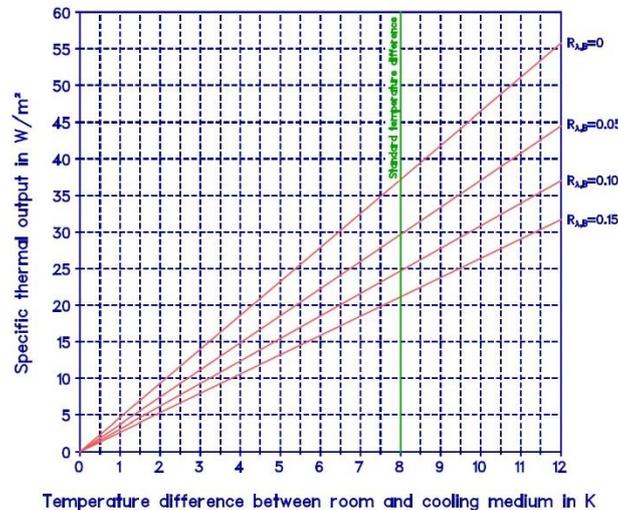


Figura 17: Curva caratteristica del pannello COMPACT ULTRA in impiego di raffreddamento.

Data l'espressione 2:

$$Q_{sens} = K_H S \Delta\theta_{m,ln} [W] \quad (2)$$

è possibile ottenere il valore di $\Delta\theta_{m,ln}$ per ogni condizione di carico invernale ed estiva.

In questo tipo di sistema, secondo la UNI EN 1264, si utilizza l'espressione semplificata 3:

$$\Delta\theta_{m,ln} = |T_{amb} - T_{m,f}| \quad (3)$$

dove T_{amb} è la temperatura ambiente e $T_{m,f}$ è la temperatura media del fluido, cioè

$$T_{m,f} = \frac{\theta_v + \theta_r}{2} \text{ in cui } \theta_v \text{ e } \theta_r \text{ sono rispettivamente le temperature di mandata e di ritorno.}$$

Il fabbisogno termico invernale viene soddisfatto mediante l'utilizzo di una valvola miscelatrice a tre vie nella cassetta di distribuzione del sistema radiante, che regola la temperatura di mandata in funzione del calore sensibile istantaneamente richiesto dal sistema. L'andamento delle temperature all'interno del pannello in funzione del carico termico richiesto è di tipo lineare come riportato in figura 18. In presenza del massimo carico richiesto si ha anche la massima differenza di temperatura tra mandata e ritorno del sistema pari a 3°C; il ΔT diminuisce al diminuire del calore sensibile richiesto fino ad annullarsi al raggiungersi delle condizioni di comfort invernali.

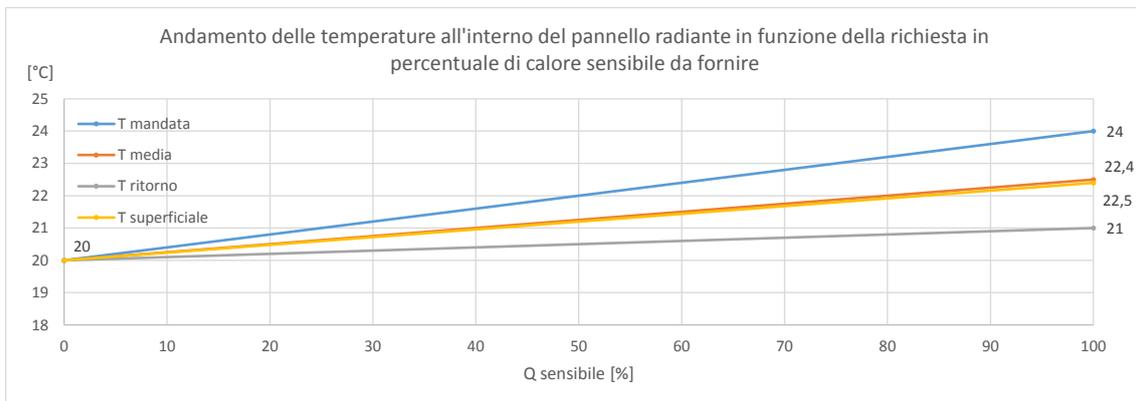


Figura 18: Profilo di temperatura dell'acqua all'interno del pannello radiante in funzione del carico termico invernale.

La portata di acqua \dot{m} circolante all'interno del sistema nel periodo invernale viene calcolata con l'espressione 4:

$$\dot{m} = \frac{Q_{max,sensibile,invernale}}{c_p * (\theta_{v,max} - \theta_{r,max})} = \frac{368}{4186 * 3} \cong 110 \frac{kg}{h} \quad (4)$$

Analogamente si soddisfa il fabbisogno termico estivo con un ΔT massimo di 4°C in presenza della massima richiesta sensibile con una temperatura minima di mandata pari a 13.56°C. Il ΔT all'interno del pannello diminuisce al diminuire del calore sensibile da asportare nella stanza (figura 19).

La portata di acqua \dot{m} circolante all'interno del sistema nel periodo invernale viene calcolata con l'espressione 5:

$$\dot{m} = \frac{Q_{max,sensibile,estiva}}{c_p * (\theta_{v,min} - \theta_{r,min})} = \frac{1765}{4186 * 4} \cong 400 \frac{kg}{h} \quad (5)$$

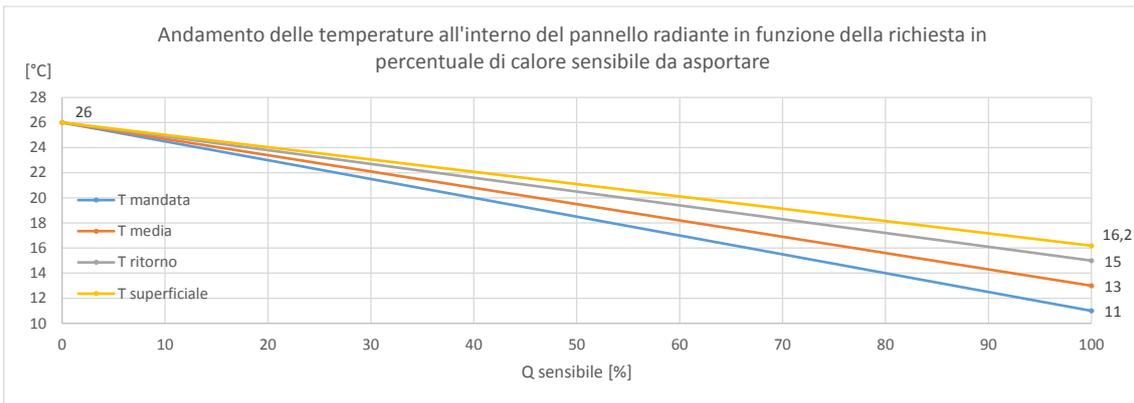


Figura 19: Profilo di temperatura dell'acqua all'interno del pannello radiante in funzione del carico termico estivo.

Con tale ragionamento si costruisce *idealmente* una curva climatica, descritta in figura 20 che operi nell'intervallo tra il 15 Ottobre ed il 15 Aprile come riscaldamento e nel restante periodo come raffrescamento. Tale curva non rappresenta l'effettiva temperatura dell'acqua nel pannello durante l'anno, ma solo una previsione di quella che sarebbe la temperatura di mandata se vi fosse continuamente circolazione all'interno del pannello e senza tenere conto dell'inerzia termica del sistema, ovvero come se il sistema avesse una risposta istantanea.

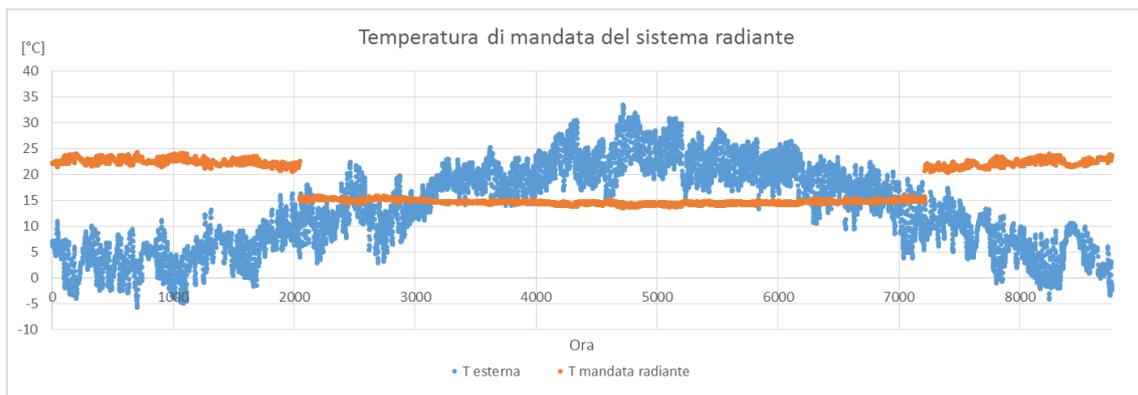


Figura 20: Andamento ideale della temperatura di mandata del pannello radiante, e della temperatura esterna, nell'anno tipo.

Deumidificatore

Analogamente a quanto avviene nella realtà costruttiva, il sistema di deumidificazione viene utilizzato solamente laddove sussiste la reale necessità di ridurre il valore di umidità relativa per raggiungere le condizioni di confort. Esaminando i profili di carico, la potenza massima latente su cui dimensionare l'impianto è pari a 1839W. Si tratta di una potenza notevole per il residenziale, e non ricacila esattamente la situazione prevalentemente installata. Ciò dipende infatti dall'aver considerato il piano cottura interno all'ambiente che produce una elevata quantità di vapore, arrivando ad avere 3.1 kg/h di vapore acqueo prodotto nelle ore centrali della giornata. Possiamo più comunemente riferirci alla quantità media di vapore asportato calcolata sulle ore di funzionamento annue dell'impianto e pari a 576W.

Riferendoci sempre al produttore Wavin, si trova a catalogo un deumidificatore denominato Deuklima P300/2 avente le seguenti caratteristiche:

Caratteristiche	Unità di misura	Deuklima P300/2
Umidità condensata (26°-65%)	l/giorno	24
Potenza latente assorbita	W	710
Potenza assorbita al refrigeratore	W	650
Portata acqua (15°C)	l/h	150
Perdita di carico	kPa	4
Portata aria	m^3/h	250
Alimentazione	V/Ph/Hz	230/1/50
Potenza massima assorbita	W	350
Potenza assorbita	W	300
Refrigerante (R134a)	gr	190
Livello potenza sonora	dB(A)	41
Livello pressione sonora	dB(A)	33

Tabella 8: Caratteristiche tecniche del deumidificatore Deuklima P300/2.

È normale che in una simile condizione vi sia uno scostamento dell'umidità interna dalle condizioni di confort per alcuni momenti della giornata, utilizzando suddetta macchina, poiché non è in grado di soddisfare il picco di richiesta latente.

Risultati del sistema

Si costruisce in TRNsys un sistema come sopra descritto composto da impianto radiante, VMC con recuperatore ad elevata efficienza e deumidificatore incassato a soffitto.

Il controllo sull'attivazione del pannello viene eseguito per mezzo di un termostato con banda morta pari a 0.2°C che si attiva allo scostamento dalle condizioni di confort, ovvero per:

- $T_{amb} < 20^{\circ}C$ nel periodo invernale
- $T_{amb} > 26^{\circ}C$ nel periodo estivo

La ventilazione meccanica controllata funziona 24 ore al giorno utilizzando costantemente il recuperatore sensibile.

Prendendo a riferimento il secondo profilo di carico, P2, si osserva l'andamento annuale di figura 21:

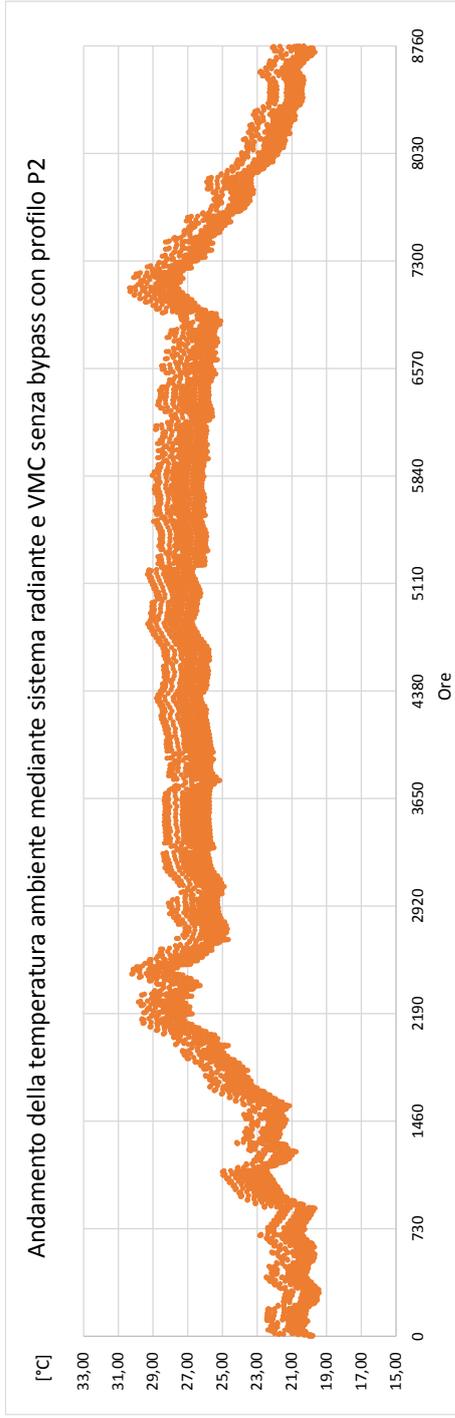


Figura 21: Andamento della temperatura della stanza con l'impiego di un impianto radiante ed un recuperatore sensibile con efficienza 0,9 senza possibilità di bypass.

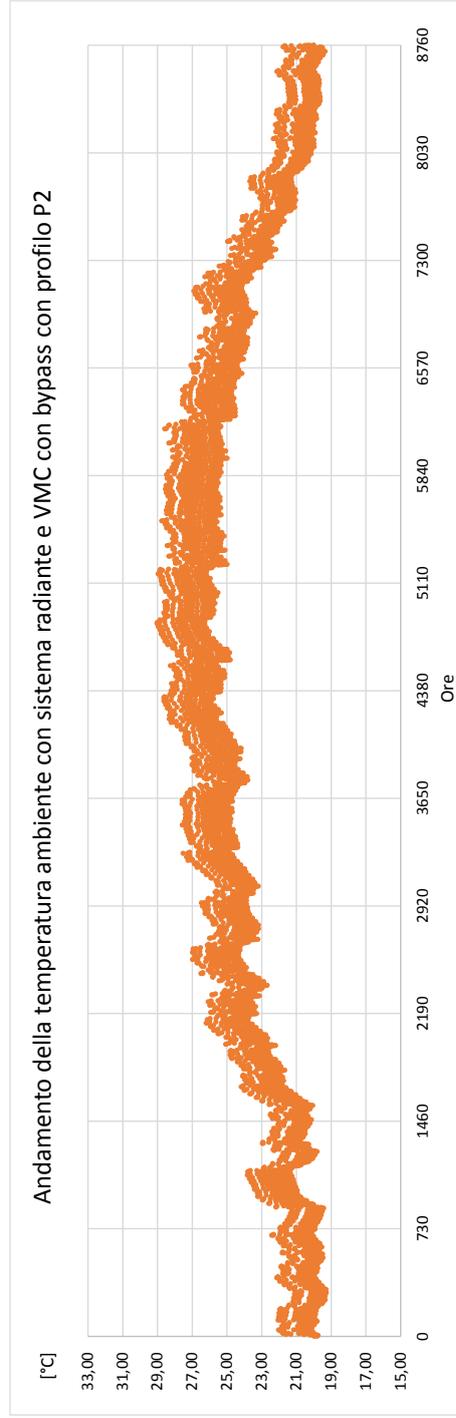


Figura 22: Andamento della temperatura della stanza con l'impiego di un impianto radiante ed un recuperatore sensibile con efficienza 0,9 con bypass e batteria calda.

L'andamento della temperatura descritto dal secondo profilo di carico mette particolarmente in luce due fenomeni nel periodo di riscaldamento:

L'impianto radiante di riscaldamento entra in funzione molto raramente poiché la temperatura della stanza, in presenza di carichi interni dovuti al normale utilizzo, è superiore a 20°C per la quasi totalità delle ore;

A causa dell'elevata efficienza dello scambiatore si hanno temperature in ingresso dell'aria poco inferiori alla temperatura ambiente. Se i carichi interni fanno aumentare la temperatura ambiente, conseguentemente anche la temperatura dell'aria di rinnovo, in uscita dal recuperatore, aumenta. Si genera in questo modo un effetto a catena che non solo allontana la stanza dalle condizioni di comfort, ma spinge addirittura le temperature fino a 30°C, complice anche l'aumento della temperatura esterna proseguendo verso i mesi estivi. Dalla fine del periodo di raffrescamento si può notare lo stesso fenomeno ma con trend inverso, poiché si sta andando verso mesi più freddi.

Questo effetto a catena viene normalmente evitato mediante l'utilizzo di un bypass del recuperatore. Se la temperatura esterna è inferiore alla temperatura ambiente, per non più di 10°C di differenza, si può immaginare di introdurre aria esterna facendole bypassare il recuperatore ($T_{amb} - T_{est} < 10^{\circ}C$). Tuttavia, se la l'aria esterna si trova a temperature inferiori, la pratica costruttiva vede l'adozione di una batteria di riscaldamento per l'immissione di aria di rinnovo in condizioni neutre a 18°C ($T_{est} < T_{amb} - 10^{\circ}C$).

Il sistema di bypass descritto è ciò che la maggior parte delle aziende vende con il nome di *free cooling*.

La figura 22 evidenzia l'effetto dell'utilizzo del sistema classico di bypass in un normale impianto radiante. In prima battuta si possono osservare dei benefici sull'andamento della temperatura interna. I picchi di temperatura all'interno della stanza si sono ridotti a 26.5°C durante il periodo di riscaldamento, e diminuiscono anche durante il periodo di raffrescamento arrivando ad un massimo di 29°C.

Sebbene questo bypass comporti dei benefici all'impianto dal punto di vista qualitativo, è necessario osservare che:

- Le temperature durante il periodo di riscaldamento sono ancora molto elevate. Avere ridotto i picchi di temperatura a 26.5°C in questo periodo non significa di certo riuscire a mantenere delle temperature di comfort. Non solo siamo distanti dai 20°C in ambiente, ma se pensiamo che si verifichi una temperatura interna di 26°C quando l'aria esterna si trova a -5°C possiamo immaginare anche le ripercussioni sulla salute della persona.
- Introdurre aria a 18°C mediante l'utilizzo di una batteria calda significa introdurre una spesa energetica per la produzione del fluido caldo di alimentazione, e per il funzionamento degli organi ausiliari di pompaggio.
- L'unica soluzione all'elevata temperatura risiede nell'apertura dei serramenti.

Volendo operare nel modo corretto con un sistema così composto, sarebbe sufficiente utilizzare una miscelazione a valle del recuperatore sensibile tra aria in uscita dallo stesso ed aria esterna, operando in modo tale da ottenere una temperatura di immissione in ambiente adeguata a

mantenere le condizioni di comfort senza l'ausilio di alcuna batteria calda. Tale sistema di bypass parziale del recuperatore non si trova normalmente in commercio, costringendo gli operatori del settore a ripiegare sul classico sistema di bypass totale del recuperatore.

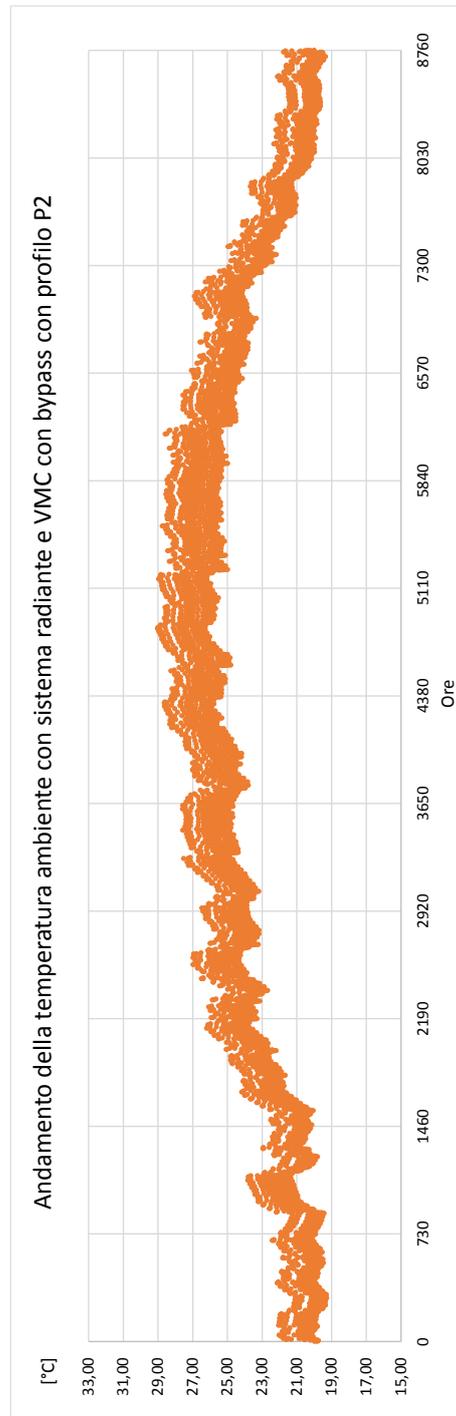


Figura 23: Andamento della temperatura della stanza con l'impiego di un impianto radiante ed un recuperatore sensibile con efficienza 0,9. Benefici ottenibili mediante il corretto utilizzo del Free Cooling.

Dalle simulazioni in TRNsys si evince che, come evidenziato in figura 24, nei tradizionali sistemi radianti con VMC per circa il 54% delle ore annuali entra in funzione la batteria. Ciò è sicuramente dovuto al fatto che le temperature all'interno della stanza rientrano nel range tra 20°C e 24°C per tutto il periodo di riscaldamento invernale, superiori quindi di almeno 10°C rispetto alla temperatura esterna. L'utilizzo del Free Cooling vero e proprio si riduce in questo modo solo ad un 5÷6% delle ore annuali. Nel periodo estivo invece, con le temperature esterne superiori alla temperatura ambiente ($T_{amb} < T_{est}$), risulta sempre conveniente utilizzare il recuperatore sensibile per ridurre almeno in parte il carico termico da dover asportare.

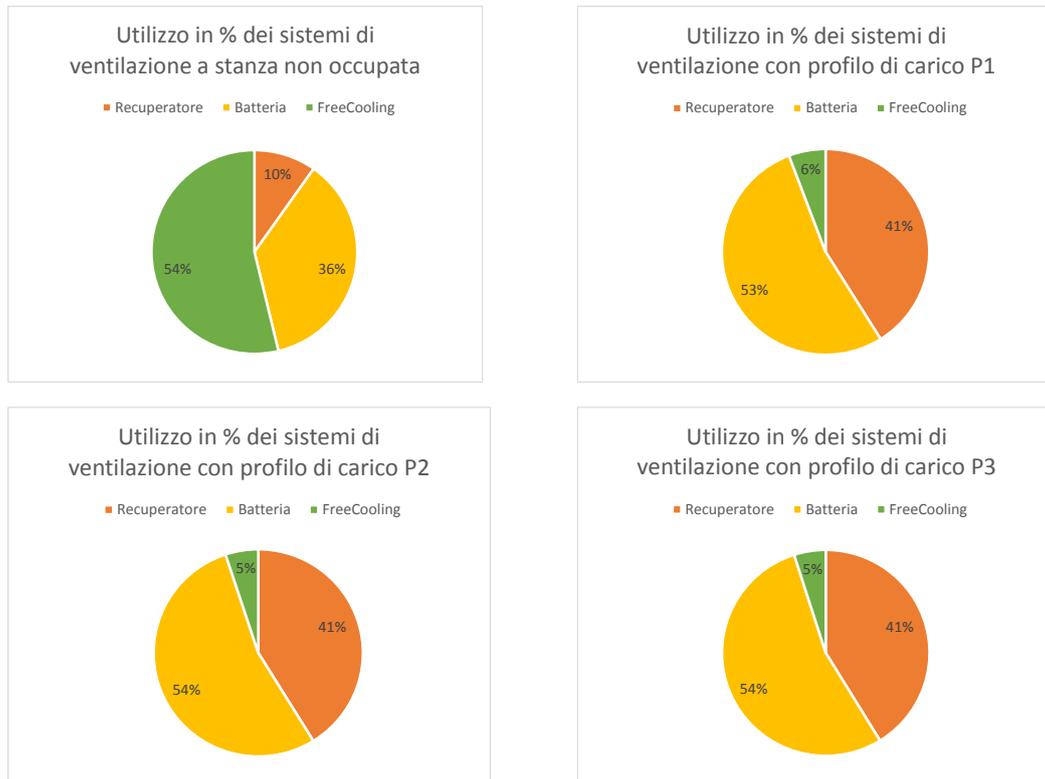


Figura 24: Dall'alto a sinistra, al basso a destra. Riepilogo delle ore di funzionamento in percentuale per le varie modalità di funzionamento con i profili di carico P1, P2, e P3.

L'aria esterna attraversa la batteria per essere portata dalla temperatura esterna alla temperatura di 18°C per l'immissione nella stanza. L'energia fornita dalla batteria calda E_{heat} può essere calcolata con l'espressione 6:

$$E_{heat} = \dot{m}_{aria} * c_p * \sum_i (18 - T_{est,i}) \cong 1310 \text{ kWh} \quad (6)$$

Si tratta di un'energia che potrebbe essere totalmente risparmiata con l'ausilio di un sistema di bypass parziale.

Nelle figure da 25 a 30 si può infine osservare l'andamento delle temperatura all'interno della stanza in due giornate tipiche dell'anno, rispettivamente il 15 Febbraio ed il 15 Luglio.

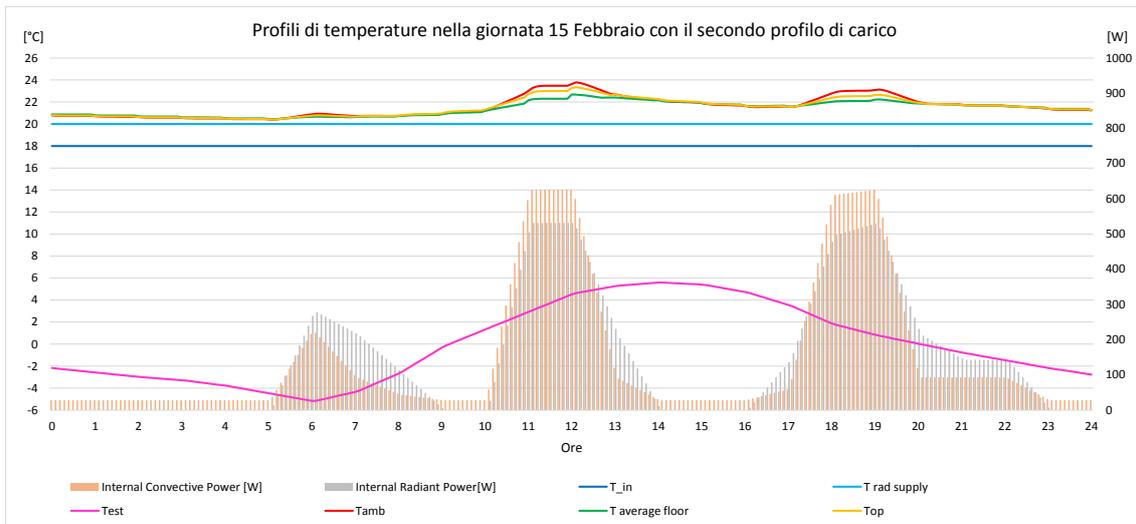


Figura 25: Andamento della T ambiente (rosso), T in ingresso del pannello radiante (azzurro), T operante (arancione), T dell'aria di rinnovo (blu), T media del pavimento radiante (verde), T esterna (rosa) e dei carichi interni, per la giornata del 15 Febbraio.

In questa giornata, come per la quasi totalità del periodo di riscaldamento, l'impianto radiante non entra in funzione. Ciò dipende ancora dall'entità dei carichi interni che mantengono la temperatura della stanza tra 20.5°C e 24°C durante tutta la giornata. Nelle prime ore della giornata si vede l'inerzia del sistema. In questo periodo, con occupazione pressoché nulla, la stanza risponde con tempi molto lunghi alla variazione di temperatura esterna. Tuttavia, al verificarsi dei primi carichi interni, questa sale molto rapidamente e rimane stabile fino alle ore 10:00 in cui si verifica un secondo aumento di temperatura dato ancora dai carichi endogeni. Al termine del fenomeno, dalle ore 13:00, l'aria immessa dal recuperatore ha effetto mitigante nella stanza e contribuisce a riportare la temperatura dell'aria da 24°C a 21.5°C alle ore 17:00. Da qui si ripresenta un secondo picco di carichi interni, creando un analogo fenomeno che trova termine nelle ore notturne, al completo svuotamento della stanza, con una temperatura dell'aria che non scende sotto ai 21°C .

Se si utilizzasse il recuperatore sensibile prima delle ore 9:00, la temperatura dell'aria in ingresso sarebbe sicuramente inferiore a 18°C a causa della volontaria riduzione di efficienza del dispositivo in presenza di un rischio di formazione di ghiaccio. Utilizzare la batteria con una maggiore temperatura di uscita dell'aria significa invece incorrere in una maggiore spesa energetica, tra l'altro nemmeno necessaria in questo frangente di tempo.

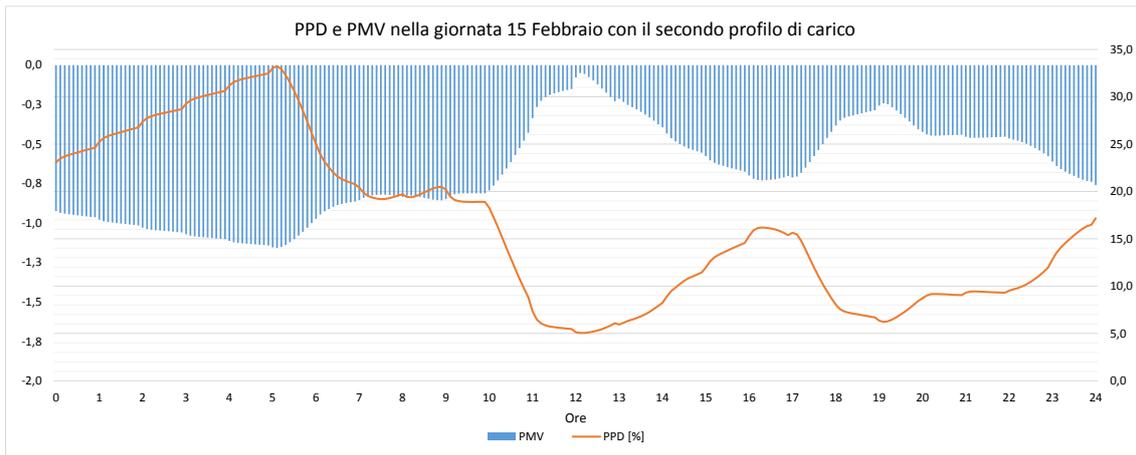


Figura 26: Andamento della T ambiente (rosso), T operante (arancione), T dell'aria di rinnovo (blu), dell'Umidità relativa (azzurro) e della PPD (viola) per la giornata del 15 Febbraio.

La figura 26 descrive i principali indici di confort durante la giornata tipo. Durante il periodo notturno si sta immettendo aria ad una temperatura inferiore alla temperatura di confort ma superiore alla temperatura esterna. Attraversando la batteria calda, l'umidità relativa dell'aria diminuisce, e si ottiene un ambiente tendenzialmente secco. La secchezza dell'aria, unita all'effetto "raffrescante" della portata d'aria determina un PMV inferiore a -1 con conseguente aumento della percentuale di disagio. Il medesimo effetto continua per tutta la giornata e si supera un PMV di -0.5 solo nei periodi di picco dei carichi endogeni, senza tuttavia annullarsi mai.

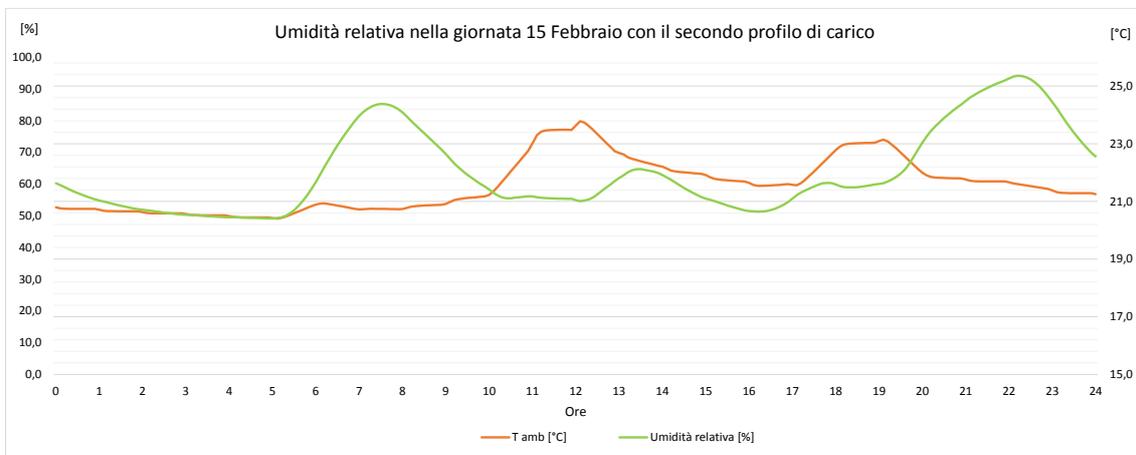


Figura 27: Andamento dell'Umidità relativa (verde) e della Temperatura ambiente (arancione) per la giornata del 15 Febbraio, ottenuto con il secondo profilo di carico.

L'andamento giornaliero dell'umidità relativa mostrato in figura 27 evidenzia alcuni interessanti aspetti:

- I livelli più elevati di U.R. si ottengono con uno sfasamento poco superiore ad un'ora dal manifestarsi dei carichi endogeni;
- La portata d'aria di rinnovo, se pur a livelli di U.R. non è sufficiente al mantenimento delle condizioni comfort nei soli confronti dell'umidità;
- L'attivazione del deumidificatore avviene a seguito del raggiungimento delle condizioni limite prescelte, cioè con U.R. in crescita;

Si evince dunque una difficoltà del deumidificatore nel mantenere le condizioni di confort come inizialmente previsto. Va comunque detto che i picchi di U.R. non sono contemporanei ai peggiori valori di PMV e PPD, come a dimostrazione della bassa influenza dell'umidità relativa nelle prestazioni del sistema descritto ai fini del confort nel periodo invernale.

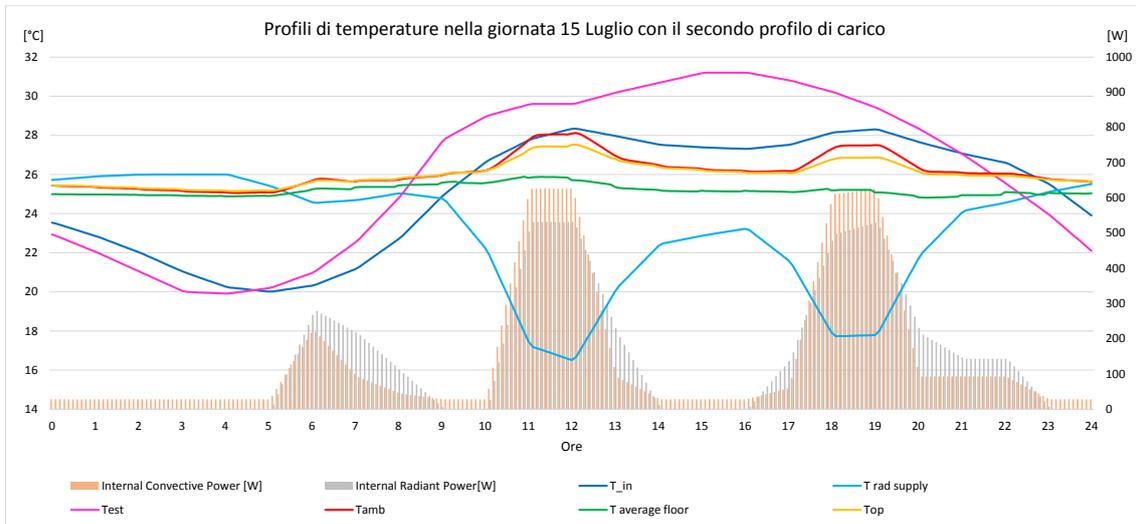


Figura 28: Andamento della T ambiente (rosso), T in ingresso del pannello radiante (azzurro), T operante (arancione), T dell'aria di rinnovo (blu), T media del pavimento radiante (verde), T esterna (rosa) e dei carichi interni, per la giornata del 15 Luglio.

Anche nel periodo di funzionamento estivo è possibile apprezzare l'elevata inerzia termica del sistema (figura 28). Tra le 0:00 e le 8:00 la temperatura ambiente è maggiore della temperatura esterna e si aggira tra i 24.5°C ed i 25°C. Il pannello radiante non è in funzione in queste ore ma il pavimento si trova ad una temperatura inferiore di circa 1°C rispetto all'aria e nonostante non vi siano carichi interni. Tra le 5:00 e le 7:00 si registra un innalzamento della temperatura al palesarsi dei primi soggetti nell'ambiente. La temperatura ambiente non si spinge comunque sopra 25.7°C. La temperatura di immissione rappresentata in azzurro ($T_{rad\ supply}$) rappresenta la reale temperatura di mandata solo all'apertura delle valvole della cassetta di distribuzione del pavimento radiante. Nei periodi di inattività del pavimento viene comunque rappresentata come risultato di una funzione matematica.

A partire dalle ore 09:00 è necessaria l'attivazione del pavimento radiante. Tuttavia, nonostante la temperatura di mandata si porti a 17°C, il sistema non riesce a mitigare rapidamente la stanza e si arriva ad una temperatura ambiente poco superiore ai 28°C. Solo quando cessano i carichi interni la temperatura ambiente ritorna a scendere per poi trovare un secondo picco di minore intensità nelle ore serali.

A partire dalle ore 21:00 la temperatura esterna diventa inferiore alla temperatura ambiente. Questa situazione mette particolarmente in luce il beneficio che si potrebbe trarre dall'adozione di una maggiore portata di aria esterna attraverso la ventilazione meccanica per attenuare la temperatura ambiente evitando l'apertura dei serramenti da parte delle persone. Il beneficio sarebbe maggiore soprattutto nei mesi di transizione tra il periodo di riscaldamento ed i mesi

estivi, dove la temperatura esterna risulta minore alla temperatura ambiente per un maggior numero di ore.

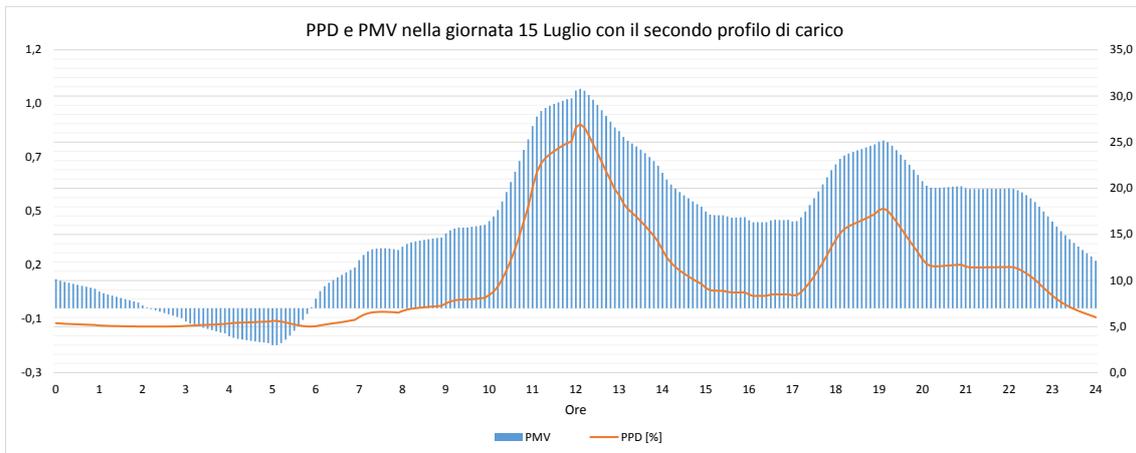


Figura 29: Andamento della T ambiente (rosso), T operante (arancione), T dell'aria di rinnovo (blu), dell'Umidità relativa (azzurro) e della PPD (viola) per la giornata del 15 Luglio.

Gli indici PMV e PPD del periodo estivo sono molto più soddisfacenti del caso invernale. Il PMV supera il valore di 0.5 solo per 5 ore giornaliere, senza superare mai l'unità. In contrapposizione al caso invernale, i principali momenti di disagio si hanno proprio in concomitanza dei carichi endogeni. L'umidità relativa in questo periodo supera il 90% aumentando notevolmente il rischio di condensa sulle superfici fredde, soprattutto nelle ore serali.

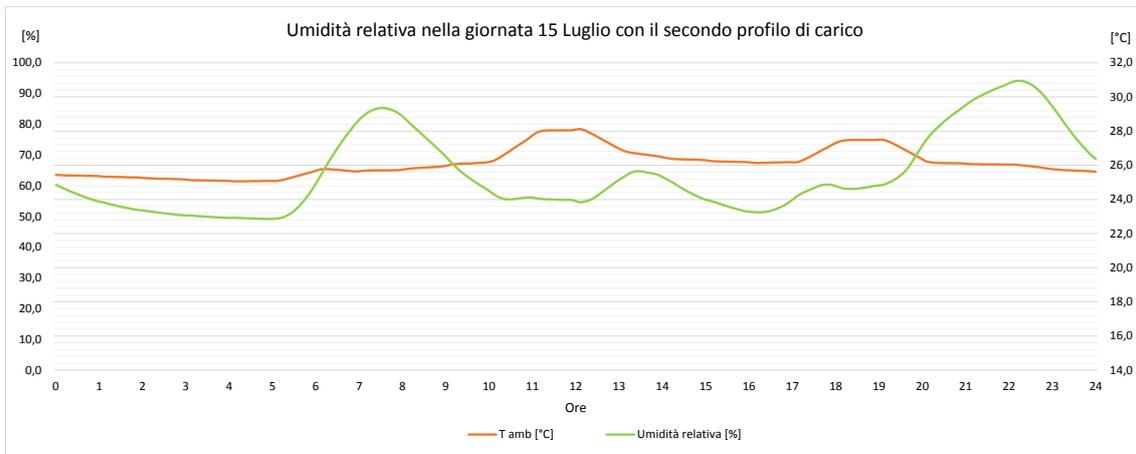


Figura 30: Andamento dell'Umidità relativa (verde) e della Temperatura ambiente (arancione) per la giornata del 15 Luglio, ottenuto con il secondo profilo di carico.

Nelle prime ore della giornata l'U.R. vede lo stesso andamento del periodo invernale; nelle ore notturne si ha quindi un completo e ripetuto lavaggio dell'ambiente che permette di riportare la stanza alle condizioni di comfort. A partire dalle ore 7:00 deve però entrare in funzione il deumidificatore. Questo dispositivo lavora per la quasi totalità della giornata.

Il sistema radiante con recuperatore sensibile ad elevata efficienza trova oggi giorno grande applicazione nell'edilizia residenziale. Nelle righe precedenti ci si è soffermati su inconvenienti quali:

- elevata entità dei carichi interni;
- elevate tempistiche di attivazione della massa del pavimento radiante;
- presenza di una batteria calda da alimentare nel periodo invernale;
- necessità di una maggiore portata d'aria per attenuare la temperatura nella mezza stagione ma soprattutto per attenuare il carico latente nel restante periodo dell'anno;

Tutti questi elementi fanno pensare alla potenzialità dell'utilizzo di una unità di trattamento aria di tipo domestico rispetto al sistema descritto.

IMPIANTO A TUTTA ARIA

Si può immaginare di soddisfare il fabbisogno energetico di un'abitazione attraverso una Centrale di Trattamento Aria (CTA) composta da un insieme di ventilatori, serrande e batterie di riscaldamento/raffreddamento che lavorano all'unisono per permettere l'immissione di un determinata portata d'aria ad una precalcolata temperatura. Parliamo di CTA poiché non solo non è detto che l'UTA sia sufficiente a vincere le perdite di carico di una rete aeraulica moderna, ma il solo abbinamento dell'unità di trattamento aria con un recuperatore sensibile ad elevata efficienza comporta di per se la costruzione di un sistema più complesso.

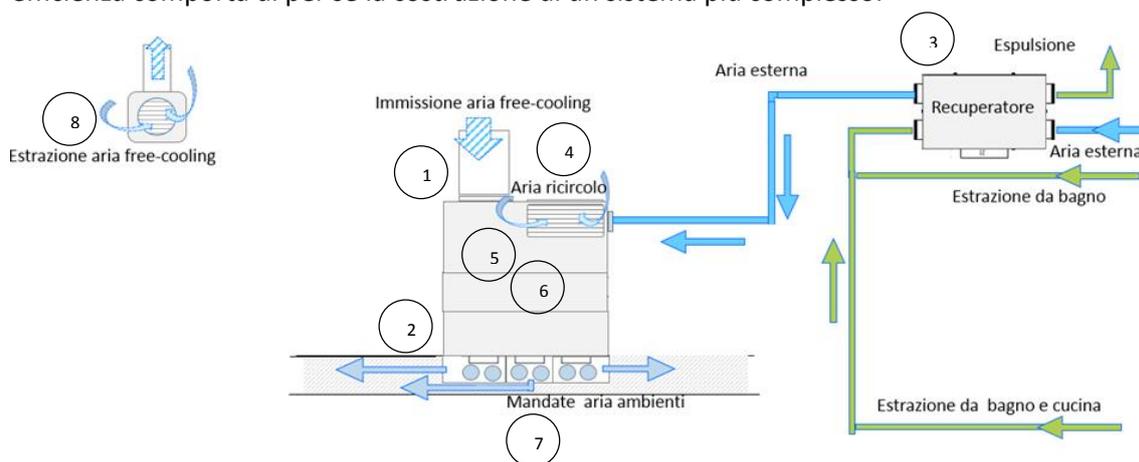


Figura 31: Schematizzazione di una centrale di trattamento aria per free cooling totale. Vista frontale.

La CTA in presa in esame è illustrata in figura 31 ed è composta da:

- una serranda di presa dell'aria esterna (1);
- una serranda di mandata dell'aria in ambiente (2);
- un recuperatore sensibile ad elevata efficienza >90% (3);
- un sistema di ricircolazione dell'aria ambiente con apposita serranda (4);
- un filtro aria G3/G4 ed un filtro a tasche F7 a monte delle batterie di scambio termico(5);
- una batteria di raffreddamento e deumidificazione, o di riscaldamento (6);
- uno o più ventilatori principali di mandata a velocità variabile (7);
- un ventilatore a velocità variabile per l'estrazione dell'aria dall'ambiente durante l'utilizzo in free cooling (8).

Il recuperatore sensibile ad elevata efficienza elabora la medesima portata d'aria del sistema radiante (0.6 vol/h). Questa portata di aria esterna arriva nella camera di miscelazione posta sulla parte superiore della macchina, dove può essere miscelata con una portata d'aria di ricircolo, con una portata d'aria esterna, o può proseguire indisturbata. Da qui l'aria attraversa il sistema di filtraggio tipicamente composto da un primo filtro G3 per polvere grossa con efficienza 80%-90%, e da un filtro a tasche F7 per particelle superiori a 0.4 micron con efficienza 80%-90%; anche se recentemente si assiste alla sostituzione di questi filtri con tipologie G4 e F8 di efficienza superiore al 90% ed all'integrazione di filtri elettrostatici. A valle del sistema di filtraggio è presente la batteria di trattamento dell'aria. Solitamente si tratta di un'unica batteria a due tubi in grado di realizzare solo riscaldamento o solo raffreddamento con deumidificazione in funzione della stagione. L'immissione dell'aria in ambiente avviene mediante l'adozione di uno o più ventilatori a velocità variabile posti nella parte inferiore della macchina, dove partono le condotte di mandata dell'aria. Le bocchette di immissione, che costituiscono i terminali

d'impianto di questo sistema, sono disposte tipicamente a pavimento e progettate per un flusso dislocante in ambiente.

Nel normale utilizzo della CTA l'aria esterna di rinnovo attraversa il recuperatore e viene miscelata con l'aria di ricircolo prelevata dall'ambiente per mezzo di una apposita serranda. Viene poi abbattuta o incrementata in temperatura a seconda della necessita attraverso la batteria. Il dimensionamento della massima portata d'aria dell'UTA viene fatto sulla massima potenza richiesta dal sistema, ottenuta dall'analisi del fabbisogno energetico dell'edificio vista nei capitoli precedenti. Ci si riferisce pertanto, per il caso in esame, alla potenza sensibile di raffrescamento pari a 1765W.

$$\dot{m} = \frac{Q_{max,sensibile,estiva}}{c_p * (\theta_{setpoint} - \theta_{aria,in})} = \frac{1765}{1010 * (26 - 16)} \cong 628 \frac{kg}{h} \cong 5.2 \frac{vol}{h} \quad (7)$$

La portata minima del ventilatore deve garantire il ricambio d'aria della stanza, al pari di quanto ipotizzato per l'impianto radiante, e non scende al di sotto degli 87.5 kg/h. Le portate del ricircolo sono quindi comprese tra 0 e 4.6 vol/h, ed ottenute per depressione della condotta da parte del ventilatore.

La novità di questo tipo di sistema è la possibilità di eseguire un free cooling totale dell'ambiente qualora ve ne siano le condizioni. Significa che il recuperatore di questa macchina può essere il più semplice sistema in commercio senza capacità di bypass, poiché la macchina è in grado di chiudere la serranda di ricircolo ed aspirare una portata d'aria esterna che può coincidere anche con la massima portata del ventilatore principale. Tuttavia in queste condizioni il ventilatore del recuperatore non è più sufficiente ad estrarre tutta l'aria e l'ambiente si troverebbe in sovrappressione. Il ventilatore di estrazione a velocità variabile (8) viene installato per sopperire a questo problema. Qualora sussistano le condizioni di free cooling totale, la portata elaborata dal ventilatore (8) sarà quindi pari alla differenza tra la portata elaborata dal ventilatore principale (7) e quella estratta dal recuperatore (3). All'interno della macchina si riesce anche ad operare il bypass parziale descritto nel precedente capitolo, prendendo parte della portata di ricircolo, e parte di aria esterna.

Attribuendo maggiore importanza alla variazione di portata rispetto alla variazione di temperatura, si decide di operare la regolazione della portata \dot{m} con una curva di tipo esponenziale, in funzione della differenza di temperatura tra aria ambiente e temperatura di setpoint come mostrato in figura 32.

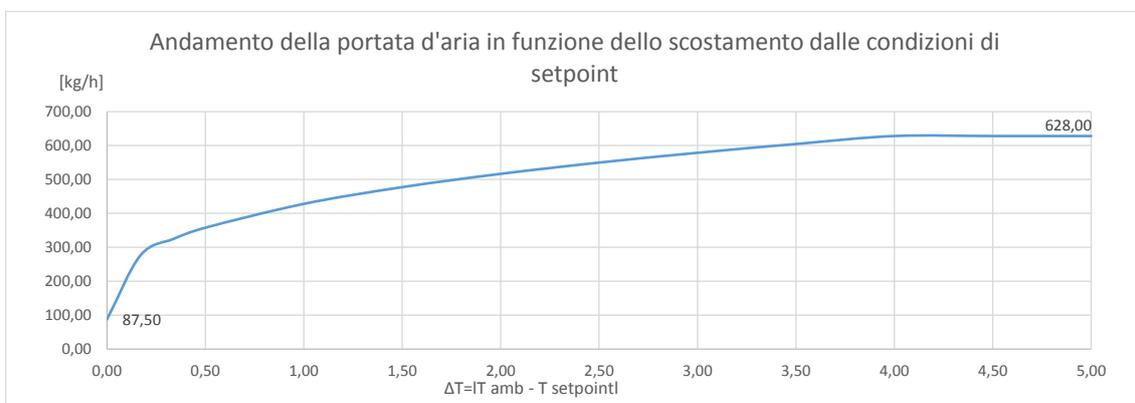


Figura 32: Grafico della portata massica d'aria [kg/h] in funzione della differenza di temperatura tra aria ambiente e condizioni di confort.

In presenza delle condizioni di setpoint, il ΔT è nullo, ed il ventilatore assume la portata minima di progetto. All'aumentare della differenza di temperatura la portata aumenta secondo l'espressione 8, assumendo valore massimo per $\Delta T \geq 4^\circ\text{C}$.

$$\dot{m} = 87.5 + 540.5 * \sqrt[3]{\frac{\Delta T}{4}} \quad (8)$$

La variazione di temperatura avviene mediante una centralina dedicata, in grado di valutare contemporaneamente temperatura e umidità dell'aria interna ed esterna, in maniera tale da eseguire un controllo entalpico. La regolazione si basa su una differenza di temperatura calcolata tra aria ambiente e temperatura di setpoint, come descritto in figura 33. Questa temperatura di setpoint, nel periodo invernale e nei mesi estivi, è pari alla temperatura di confort. La novità rispetto al sistema radiante consiste nel poter identificare una temperatura di setpoint anche per il periodo di mezza stagione, nel quale avviene la transizione tra la stagione di riscaldamento prevista da normativa (15 ottobre - 15 aprile, D.P.R. 412), e la stagione di raffrescamento ipotizzata tra il primo giugno il primo settembre.

Pertanto nei periodi compresi tra il 15 aprile ed il primo giugno, e tra il primo settembre ed il 15 Ottobre, si ipotizza una temperatura di setpoint pari a 23°C .

Quest'ipotesi deriva dal fatto che la normativa 11300 non identifica un periodo di raffrescamento per le varie zone climatiche ma afferma: "La stagione di raffrescamento include tutti i giorni nei quali il trasferimento (positivo) di calore non riesce a compensare gli apporti gratuiti (solari ed interni)". È evidente, come già visto nelle analisi precedenti, che in un edificio di questa tipologia la necessità di raffrescamento si verifica già prima del 15 aprile ed oltre il 15 ottobre. Si ritiene che passare da un giorno all'altro da una temperatura di 20°C ad una temperatura di 26°C (o viceversa) dentro le mura domestiche non rappresenti esattamente le condizioni di confort ideale, specie nella stagione definita "di transizione" in cui le temperature esterne sono spesso ancora molto basse.

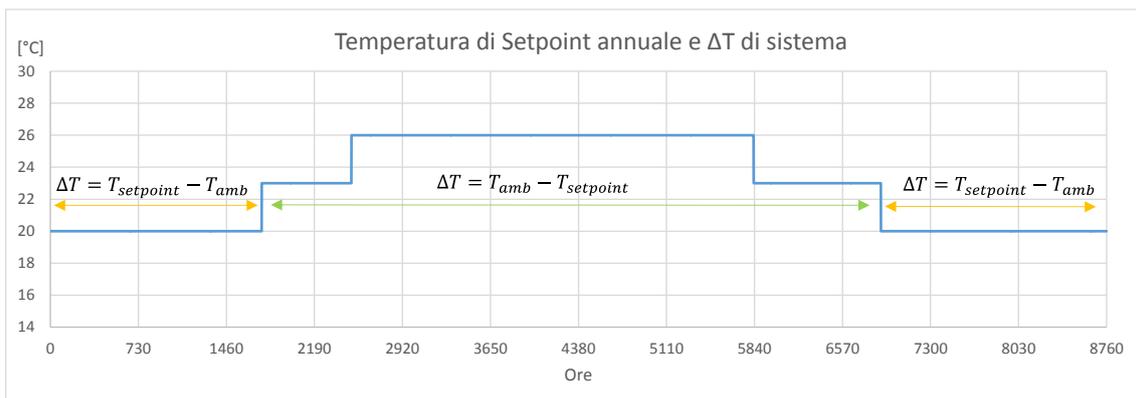


Figura 33: Andamento della Temperatura di setpoint durante l'anno. 20°C nel periodo invernale, 23°C nella stagione di transizione, 26°C nel periodo estivo.

La scelta della temperatura di immissione nella stanza viene eseguita dalla centralina climatica secondo la seguente logica:

Periodo invernale (15/10-15/04):

- Se $T_{amb} > T_{setpoint} \rightarrow T_{in} = 18^{\circ}C$
- Se $T_{amb} < T_{setpoint} \rightarrow T_{in} = f_i(\Delta T)$

Periodo di mezza stagione (15/04-01/06 e 01/09-15/10):

- Se $T_{amb} > T_{setpoint} \rightarrow \begin{cases} \text{per } h_{amb} > h_{ext} \rightarrow T_{in} = T_{esterna}(\text{free cooling}) \\ \text{per } h_{amb} < h_{ext} \rightarrow T_{in} = f_m(\Delta T) \end{cases}$
- Se $T_{amb} < T_{setpoint} \rightarrow T_{in} = f_i(\Delta T)$

Periodo estivo (01/06-01/09):

- Se $T_{amb} > T_{setpoint} \rightarrow \begin{cases} \text{per } h_{amb} > h_{ext} \rightarrow T_{in} = T_{esterna}(\text{free cooling}) \\ \text{per } h_{amb} < h_{ext} \rightarrow T_{in} = f_e(\Delta T) \end{cases}$
- Se $T_{amb} < T_{setpoint} \rightarrow \begin{cases} \text{per } h_{amb} > h_{ext} \rightarrow T_{in} = T_{setpoint} \\ \text{per } h_{amb} < h_{ext} \rightarrow T_{in} = T_{esterna}(\text{free cooling}) \end{cases}$

Dove h_{amb} e h_{ext} sono rispettivamente l'entalpia dell'aria in ambiente e l'entalpia dell'aria esterna.

Nelle figure 34, 35, e 36 sono illustrate le funzioni $f_i(\Delta T)$, $f_m(\Delta T)$ e $f_e(\Delta T)$ per il calcolo della temperatura di immissione dell'aria in ambiente.

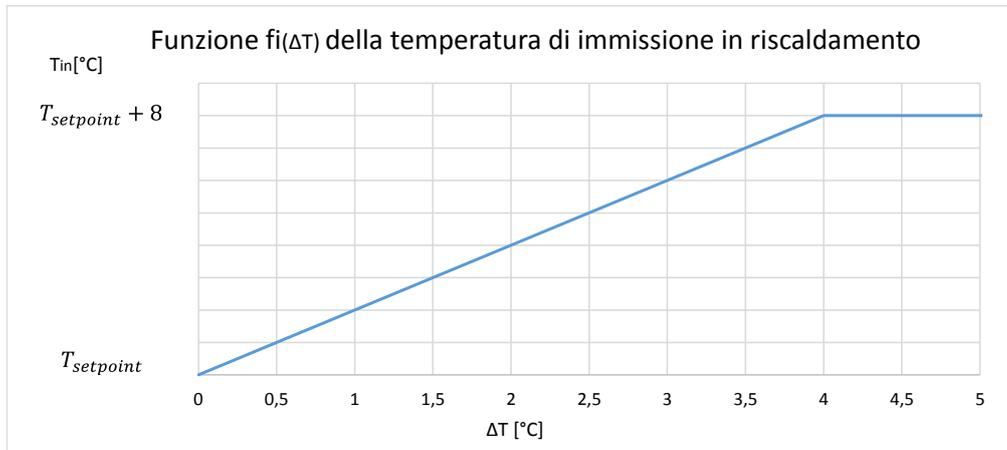


Figura 34: Temperatura di immissione T_{in} in condizioni di riscaldamento in funzione della temperatura di setpoint e del ΔT istantaneamente calcolati.

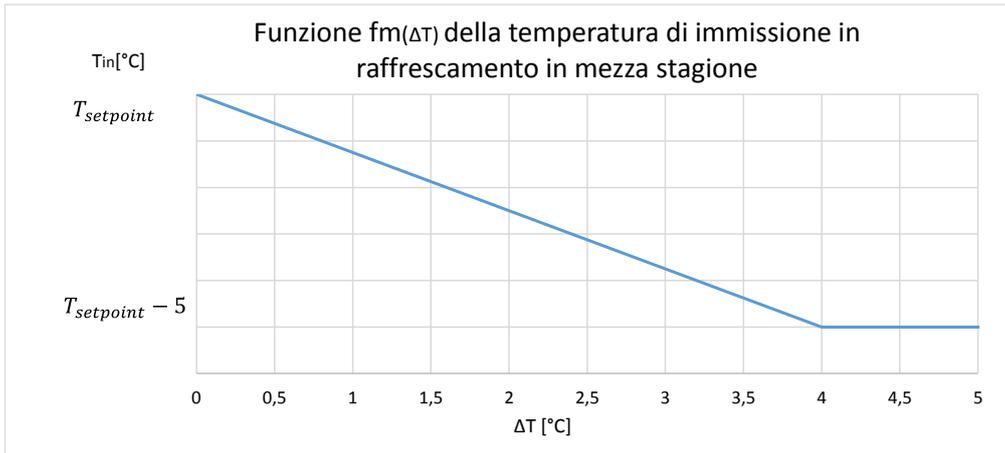


Figura 35: Temperatura di immissione T_{in} in condizioni di raffreddamento nella mezza stagione, in funzione della temperatura di setpoint e del ΔT istantaneamente calcolati.

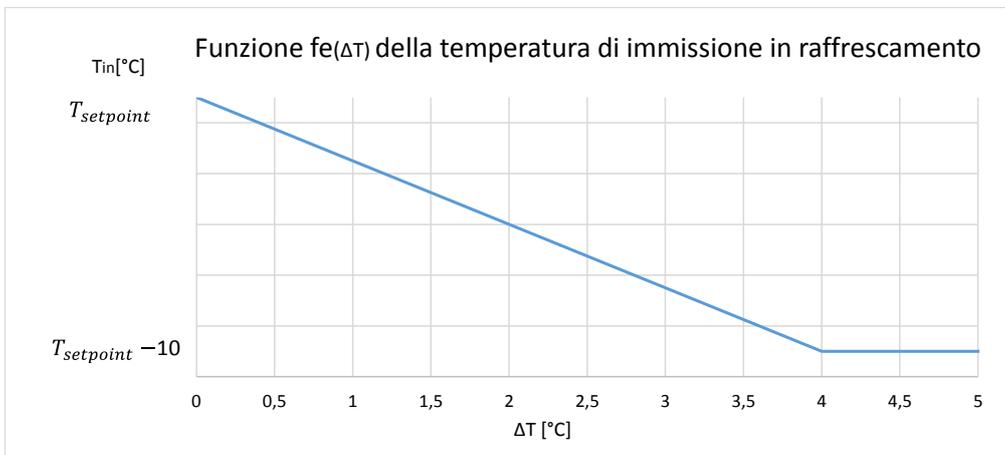


Figura 36: Temperatura di immissione T_{in} in condizioni di raffreddamento nella stagione estiva, in funzione della temperatura di setpoint e del ΔT istantaneamente calcolati.

Risultati del sistema

Simulando il sistema descritto in TRNsys si ricavano i seguenti profili di temperatura a seconda del profilo di carico utilizzato (figure dalla 37 alla 39).

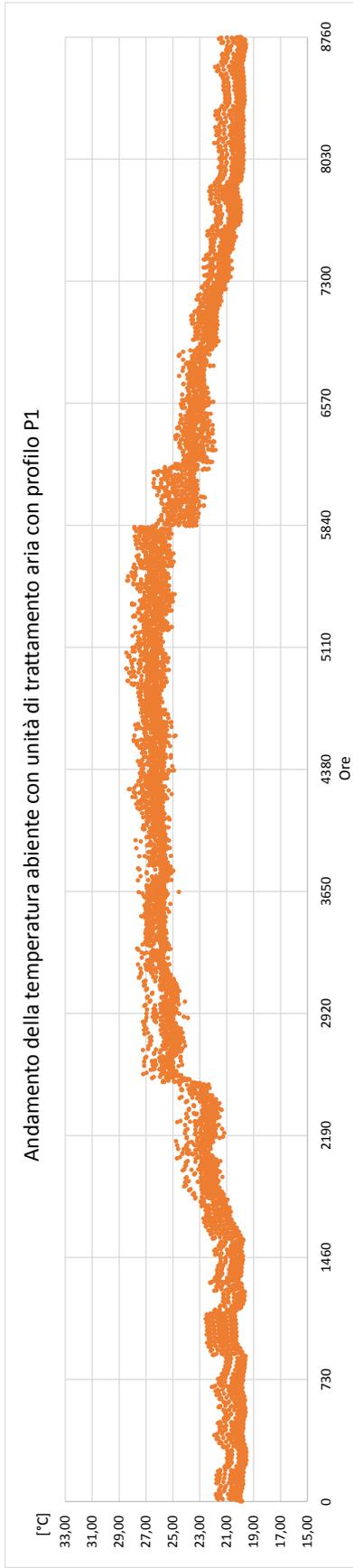


Figura 37: Andamento della temperatura della stanza nell'anno tipo con l'ausilio di un impianto a tutta aria ottenuto per il primo profilo di carico P1.

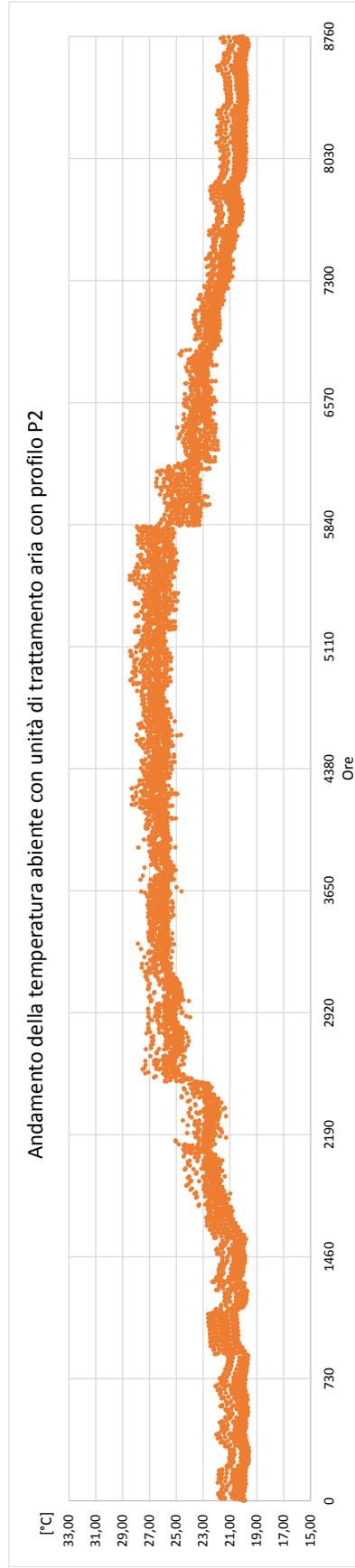


Figura 38: Andamento della temperatura della stanza nell'anno tipo con l'ausilio di un impianto a tutta aria ottenuto per il primo profilo di carico P2.

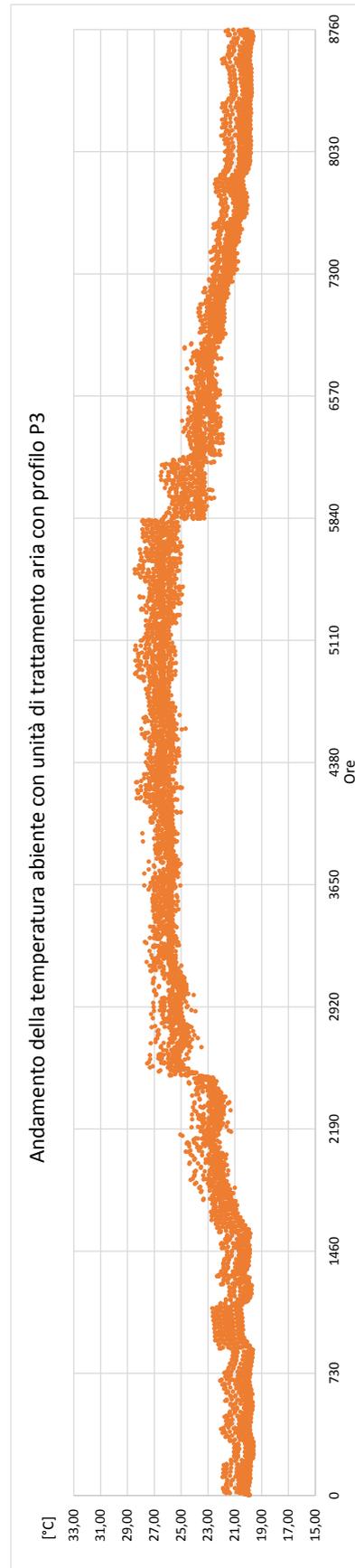


Figura 39: Andamento della temperatura della stanza nell'anno tipo con l'ausilio di un impianto a tutta aria ottenuto per il terzo profilo di carico P3.

La temperatura ambiente, durante l'anno tipo, ricalca la temperatura di setpoint molto più fedelmente rispetto al sistema radiante. A causa della repentina variazione di portata intorno alle condizioni di confort si riesce ad avere una minore dispersione dei dati intorno a questa temperatura. I picchi di temperatura si sono ridotti a 28°C e risultano molto inferiori in numero rispetto al caso radiante.

Grazie alla possibilità di scegliere l'opportuna quantità d'aria da miscelare (bypass parziale) si riesce a sfruttare correttamente il recuperatore di calore senza ricorrere all'utilizzo della batteria calda, sia per tutto il periodo di riscaldamento, sia nel periodo di mezza stagione.

La velocità dell'aria è un parametro importante per la determinazione degli effetti sul confort di questo tipo di sistema. Velocità troppo elevate sono spesso causa di fastidiose correnti d'aria e rumorosità elevata. In figura 40 si può osservare il periodo di impegno del ventilatore alle varie velocità durante l'anno tipo. Va sottolineato che nonostante il dimensionamento della portata venga fatto su una potenzialità del ventilatore di 5.2 vol/h, per la maggior parte del tempo questo si troverà a lavorare alla velocità minima. Parliamo infatti di circa 5900 ore di funzionamento alla velocità minima, e di una velocità media ponderata che non supera 1.2 vol/h nel caso profilo 3, cioè il più critico. Si tratta cioè di velocità dell'aria che ben si sposano con un sistemi di immissione a dislocazione, contribuendo così ad avere una temperatura dell'aria espulsa maggiore rispetto ad altri sistemi ad aria, e riducendo ulteriormente i tempi d'intervento della batteria calda nel periodo invernale.

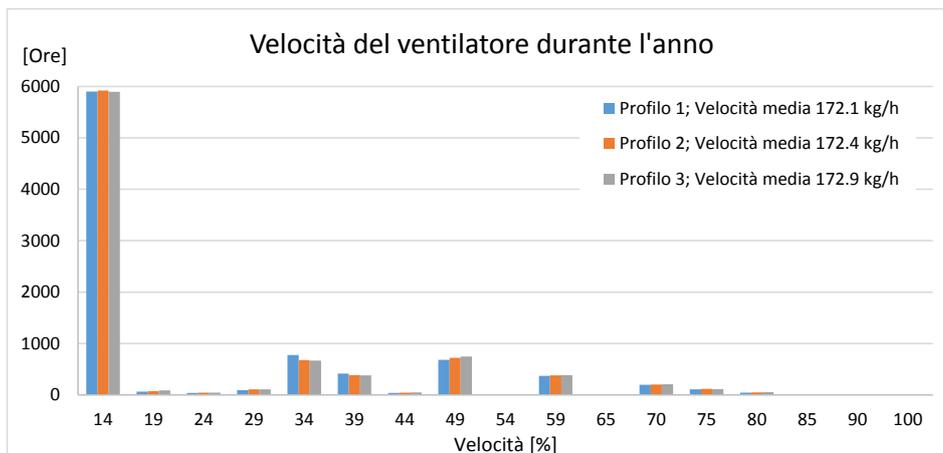


Figura 40: Ore di funzionamento del ventilatore principale alle varie velocità in [%] per i tre profili di carico. Valori calcolati nell'intero anno tipo.

La possibilità di immettere in ambiente una portata d'aria variabile, oltre alla possibilità di poter avere tutta (e sola) aria esterna, permette di utilizzare per maggior tempo il free cooling rispetto al caso radiante. Le possibilità di utilizzo di un free cooling totale con controllo solo sensibile sono evidenziate in figura 41. Se si eseguisse il controllo sulla sola differenza di temperatura tra ambiente ed esterno, i tempi di utilizzo sarebbero quattro volte superiori al caso radiante. Ciò avviene perché durante questo periodo di funzionamento la portata del ventilatore viene calcolata sul modulo della differenza di temperatura rendendo il sistema il più stabile intorno della temperatura di setpoint e contenendo l'aumento di temperatura provocato dai carichi endogeni.

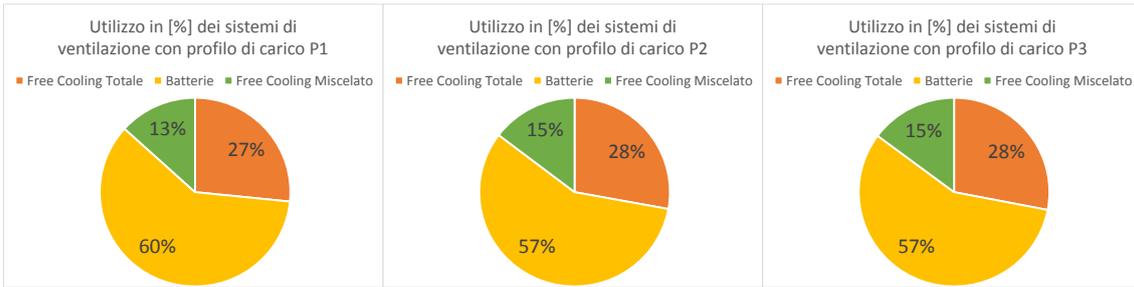


Figura 41: Periodo di utilizzazione del Free Cooling Sensibile nei tre profili di carico. Vengono illustrate la percentuale di ore di utilizzo, del Free Cooling Totale (arancione), del Free Cooling Miscelato (verde), e dell'utilizzo delle batterie (giallo).

La figura 42 evidenzia come le tempistiche di utilizzo del free cooling entalpico, ovvero eseguito anche con controllo sull'umidità assoluta, siano pressoché identiche. Le condizioni diminuiscono in quantità inferiore all'1%, ed il periodo di free cooling totale non scende sotto al 26% delle ore annuali. La forza del dispositivo in queste ore non risiede solamente nella capacità di raffreddare nonostante le basse differenze di temperatura, ma risiede soprattutto nella possibilità di espellere l'elevato carico latente prodotto dai carichi endogeni senza operare deumidificazione mediante batterie fredde.

Va sottolineato che nel periodo invernale, ovunque vi siano le possibilità di operare il bypass parziale descritto e desiderato nell'impianto radiante, il sistema si troverà a miscelare parte della portata di aria esterna con parte della portata di ricircolo. Questa operazione avviene per un numero di ore tra il 13% ed il 15% delle ore totali, indicate in figura 41 e 42 con il nome di Free Cooling Miscelato, corrispondenti a circa il 30% delle ore di climatizzazione invernale.

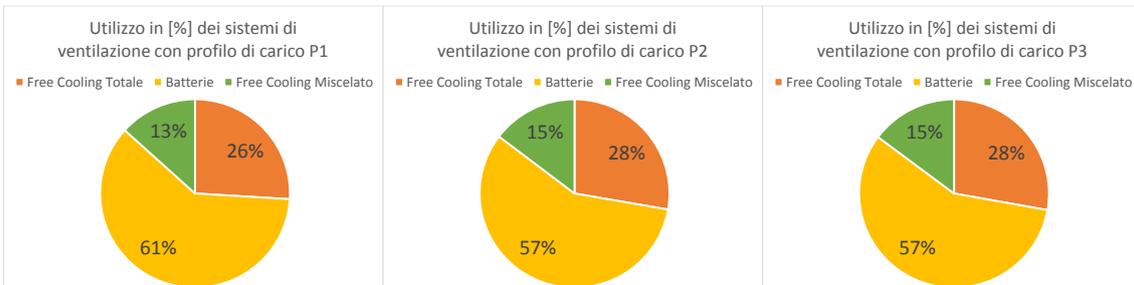


Figura 42: Periodo di utilizzazione del Free Cooling Latente nei tre profili di carico. Vengono illustrate la percentuale di ore di utilizzo, del Free Cooling Totale (arancione), del Free Cooling Miscelato (verde), e dell'utilizzo delle batterie (giallo).

È curioso vedere come il sistema riesca a lavorare con modeste portate anche nel periodo di Free Cooling Totale operando con il modulo della differenza di temperatura e differenze di temperature ridotte tra aria ambiente ed aria esterna. La portata media ponderata del ventilatore infatti è pari 323 kg/h (circa 2.2 vol/h).

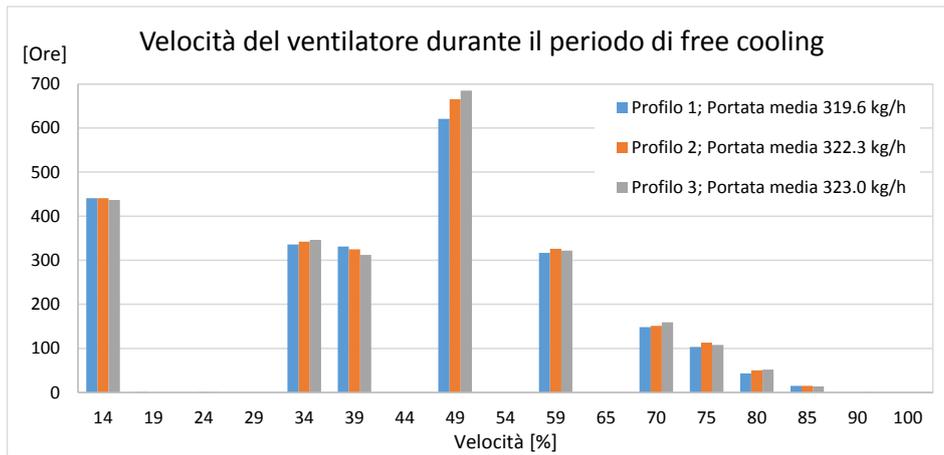


Figura 43: Ore di funzionamento del ventilatore principale alle varie velocità in [%] per i tre profili di carico. Valori calcolati per il solo periodo di Free Cooling Totale Latente.

In queste situazioni è normale che si riscontrino portate d'aria maggiori rispetto al resto dell'anno, l'importante è che queste portate siano adeguatamente distribuite in modo tale da non creare discomfort locale.

Nelle figure da 44 a 49 è possibile osservare l'andamento dei principali parametri di interesse per le giornate tipo del 15 Febbraio e del 15 Luglio.

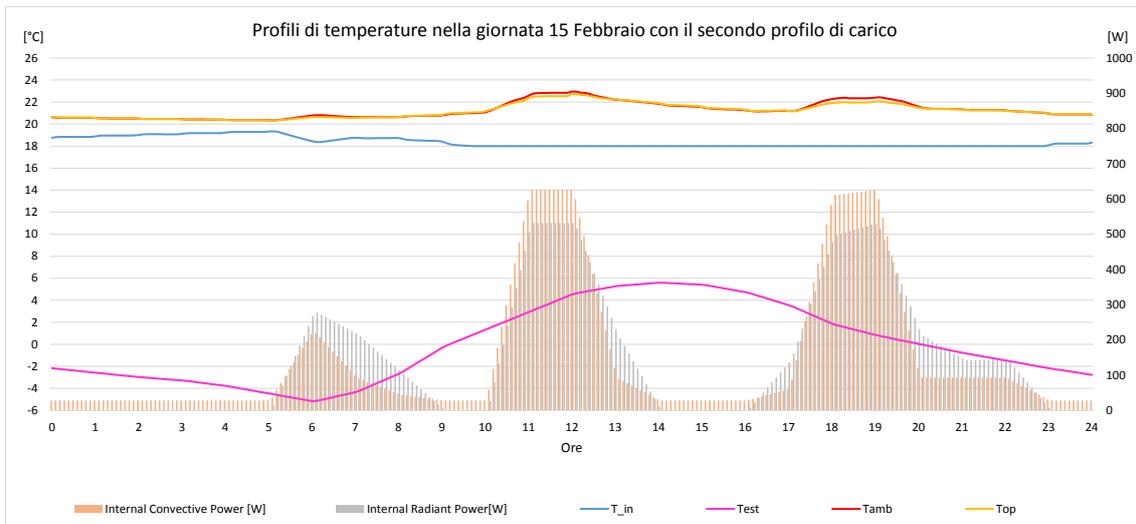


Figura 44: Andamento della T ambiente (rosso), T in ingresso dell'aria (azzurro), T operante (arancione), T esterna (rosa) e dei carichi interni, per la giornata del 15 Febbraio.

Vanno osservate innanzitutto le temperature massima e minima raggiunte dalla stanza nell'arco delle 24 ore, rispettivamente pari a 23.2°C alle ore 12:00, ed a 20.5°C alle ore 5:00, individuando una differenza di temperatura massima durante la giornata di 2.7°C insieme ad una temperatura media giornaliera di 21.3°C. La temperatura più elevata viene ottenuta in corrispondenza del massimo contributo endogeno. In questa condizione la portata d'aria si porta a 227 kg/h per tornare al valore minimo nell'arco di sole due ore di funzionamento (alle ore 14:00). Si ottiene un fenomeno analogo anche nelle ore serali intorno alle 19:00, ma con differenze di temperature dell'aria ancor meno marcate rispetto al caso diurno.

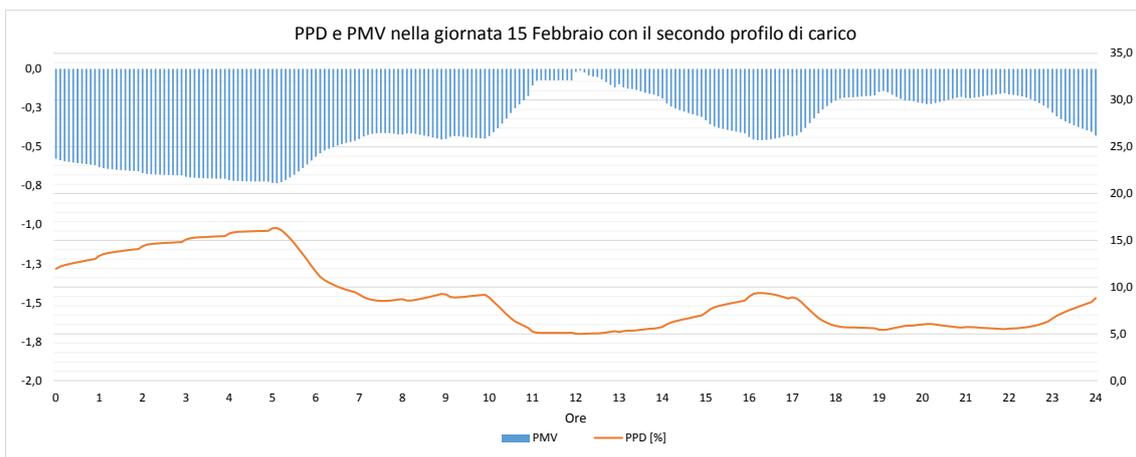


Figura 45: Indici di confort PMV (blu) e PPD (rosso) durante la giornata del 15 Febbraio ottenuti per il secondo profilo di carico con (1 met, 1 clo).

Si possono apprezzare particolarmente gli indici PMV e PPD durante la giornata tipo del 15 Febbraio. La figura 45 mette particolarmente in luce come l'aumento di temperatura in presenza dei massimi carichi endogeni comporti anche la miglior sensazione di benessere durante la giornata con PMV che raggiunge valore nullo alle ore 12:00, e che non supera il valore di -0,7

alle ore 5:00. I valori di PMV più elevati in modulo si ottengono solo nelle ore di minore occupazione, rimanendo a livelli decisamente apprezzabili per il resto della giornata.

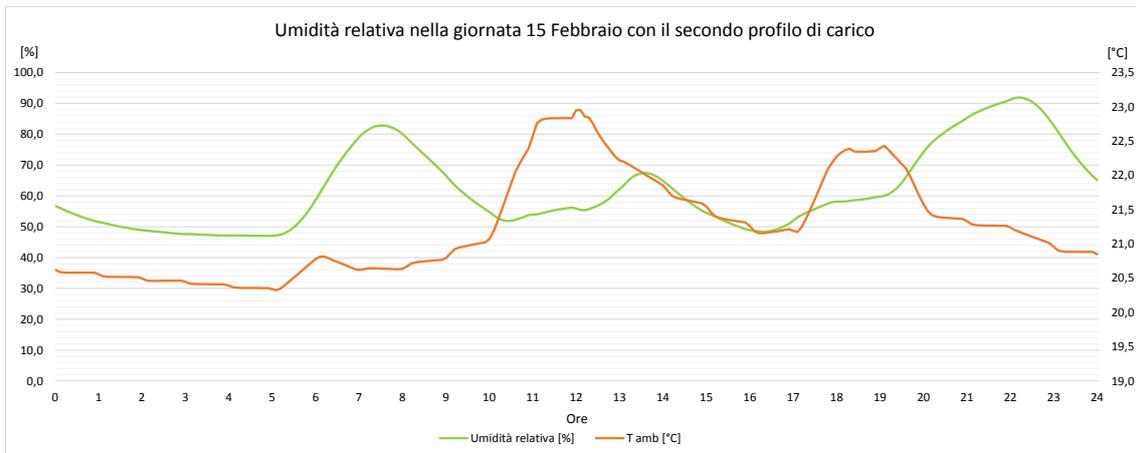


Figura 46: Andamento dell'Umidità relativa (verde) e della Temperatura ambiente (arancione) per la giornata del 15 Febbraio, ottenuto con il secondo profilo di carico.

In figura 46 si può osservare l'andamento dell'U.R. durante la giornata invernale. A causa dell'assenza di un deumidificatore dedicato, della ridotta portata d'aria, e della miscelazione tra aria esterna e aria proveniente dal recuperatore, si assiste a livelli di umidità relativa elevati in concomitanza dei principali carichi interni, superando anche l'85% alle ore 7:30 ed il 90% alle ore 22:30. Tuttavia in questi periodi si riscontra un PPD inferiore al 9% pertanto non si può dire che il fenomeno rappresenti un disagio.

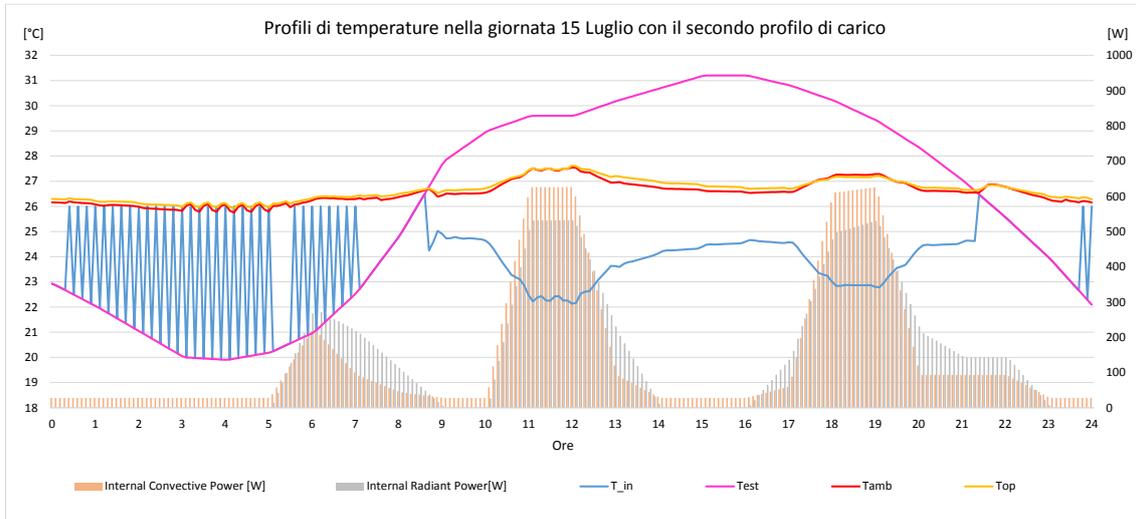


Figura 47: Andamento della T ambiente (rosso), T in ingresso dell'aria (azzurro), T operante (arancione), T esterna (rosa) e dei carichi interni, per la giornata del 15 Luglio.

Durante la giornata del 15 Luglio la temperatura massima raggiunta dalla stanza è pari a 27.5 °C alle ore 12:00 in presenza del picco di carichi interni; la temperatura minima è invece di 25.8°C ottenuta nelle prime ore del mattino. Si osserva quindi una differenza di temperatura di soli 1.7°C durante la giornata, intorno ad una temperatura media di 26.5°C.

Nelle ore notturne si presenta un fenomeno di pendolamento della temperatura di immissione dell'aria. Questo perché le condizioni esterne sono ampiamente favorevoli per eseguire il free cooling totale, tuttavia non vi sono carichi endogeni in questo intervallo temporale e la

temperatura dell'aria segue molto velocemente gli interventi dell'impianto di ventilazione. Si tratta di un fenomeno trascurabile perché l'unità di trattamento aria si troverebbe nella realtà ad eseguire un free cooling parziale con una oscillazione molto inferiore se non addirittura assente in queste ore. Andrebbe inoltre tenuto conto dei tempi di apertura e chiusura delle serrande che costituirebbero di ulteriore freno al fenomeno di oscillazione.

Alle ore 12:00, in presenza della massima temperatura interna, si trova una temperatura di immissione dell'aria di 21.9°C ed una portata di 477 kg/h . L'impianto ha ancora margine di regolazione, ma si stabilizza su tali valori in modo da recare il minor discomfort possibile a livello locale. A conferma di quanto detto, l'indice PMV di figura 48 non supera il valore di 0.5 in corrispondenza delle ore 12:00, e si annulla nel periodo notturno, risultando comunque molto stabile durante la giornata intorno ad un livello medio di 0.23.

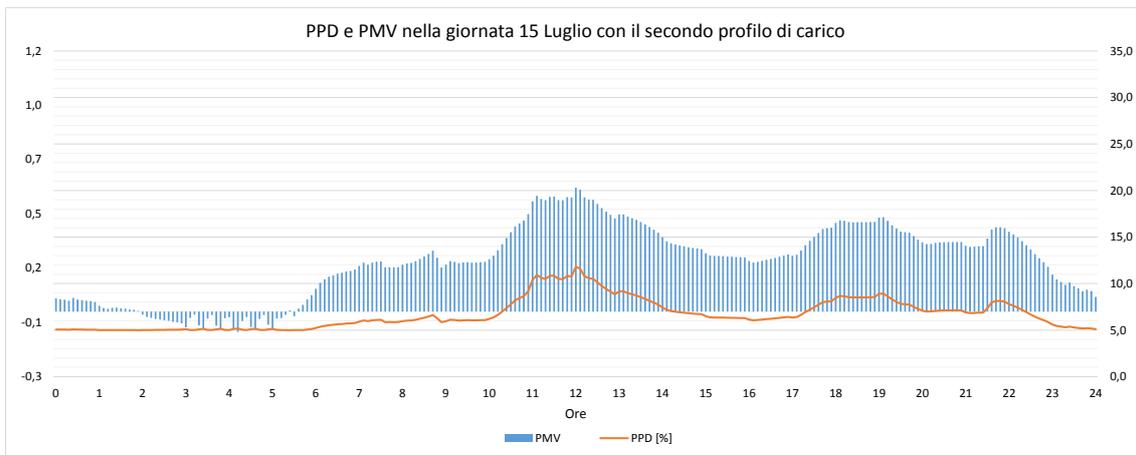


Figura 48: Indici di confort PMV (blu) e PPD (rosso) durante la giornata del 15 Luglio ottenuti per il secondo profilo di carico, (1 met, 0,5 clo).

Il sistema a tutta aria nel periodo estivo dimostra grande capacità di deumidificazione con valori di U.R. che oscillano tra il 55% ed il 70% nelle ore più critiche. La ragione risiede ancora una volta nell'elevata portata d'aria trattata dalla batteria durante la giornata, ed alla capacità di espulsione del carico latente nei periodi di attivazione del free cooling.

Tra le ore 6:00 e le ore 9:00 il sistema sta lavorando in totale free cooling, e l'umidità relativa dell'ambiente aumenta, poiché sta aumentando l'umidità relativa esterna. In questo frangente temporale si palesano i primi carichi endogeni della giornata e di conseguenza si somma il carico latente interno. Contemporaneamente aumenta anche la temperatura dell'aria ed il ventilatore reagisce con un aumento della portata secondo quanto previsto dall'equazione 8. Questo aumento di portata è sufficiente a smaltire il carico latente interno fino alle ore 8:30, dove l'entalpia esterna raggiunge il valore dell'entalpia dell'ambiente, e si attiva la batteria fredda con effetto deumidificante. Le portate d'aria in questo intervallo rimangono inferiori a 3 vol/h con ottimi indici di PPD (inferiore al 7%). La capacità deumidificante del sistema si manifesta anche nel successivo periodo tra le ore 10.00 e le ore 14:00, dove si registra la maggiore portata d'aria insieme alla minore temperatura di immissione e la ventilazione riesce a far fronte al picco latente. Alle ore 12:00 termina il contributo sensibile endogeno e diminuiscono quindi sia la portata d'aria che l'effetto deumidificante, complice anche l'aumento della temperatura di immissione, motivo per cui si registra una lieve crescita dell'U.R. per poi tornare al 58% alle ore 15:00.

Nelle ore serali si può assistere ad un fenomeno del tutto analogo, ma che si conclude con il ritorno del sistema al free cooling totale poiché le condizioni entalpiche lo permettono nuovamente.

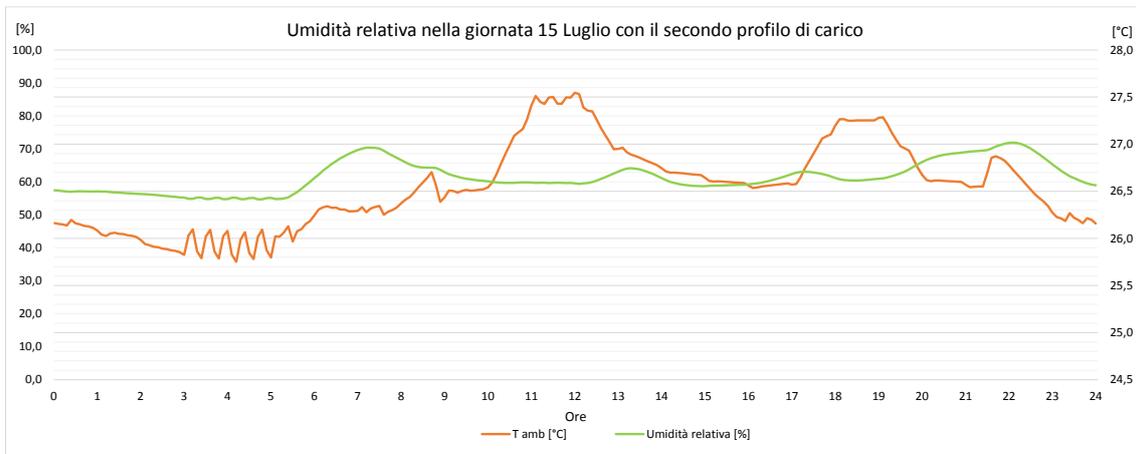


Figura 49: Andamento dell'Umidità relativa (verde) e della Temperatura ambiente (arancione) per la giornata del 15 Luglio, ottenuto con il secondo profilo di carico.

Riassumendo i risultati ottenuti per questo sistema si può dire che le prestazioni dell'impianto di ventilazione meccanica risultano notevoli sia nel soddisfacimento delle condizioni di confort, sia nello sfruttamento del free cooling totale per la diminuzione della spesa energetica legata al raffrescamento. Il riscontro di ciò è dato da:

- Periodo di utilizzo del Free Cooling totale indicativamente pari al 28% delle ore annue, ovvero più del quadruplo delle ore rispetto al caso radiante;
- Periodo di lavoro in bypass parziale pari al 30% delle ore in inverno (15 Ottobre – 15 Aprile).
- Temperature medie della stanza che ben ricalcano le temperature di setpoint durante l'anno, soprattutto nella mezza stagione;
- Elevata velocità di risposta del sistema (minore inerzia) dovuta alla capacità di variazione contemporanea di portata e temperatura e conseguente traduzione in ottima capacità di deumidificazione;
- Notevoli indici di confort PMV e PPD complice anche l'elevata capacità di deumidificazione di cui al precedente punto.

CONCLUSIONI

Si è visto come l'occupazione Interna crei un ruolo estremamente importante nella determinazione dell'entità dei carichi endogeni e nel dimensionamento dell'impianto di climatizzazione.

- La massima potenza sensibile richiesta nel periodo invernale è pari a 368 W. Tale valore è stato ottenuto in assenza di un profilo di carico, cioè a stanza non occupata, ed in corrispondenza di una temperatura esterna di -5°C. La potenza indicata si riferisce alla somma dei fenomeni di dispersione per trasmissione e ventilazione.
- La massima potenza sensibile per il raffrescamento estivo è pari a 1765 W. Tale valore è stato ottenuto in corrispondenza dell'ora 5173, con una temperatura esterna pari a 29.7°C, al pieno manifestarsi dell'occupazione interna nel profilo di carico più critico. Tiene conto di ancora di trasmissione e ventilazione.
- La massima potenza latente richiesta è pari a 1839 W.

Se da un punto di vista teorico una ridotta trasmittanza rappresenta un vantaggio sia in riscaldamento che in raffrescamento, permettendo di ridurre la potenza di progetto dell'impianto di climatizzazione in entrambi i casi, dal punto di vista pratico si traduce in nell'esigenza di raffrescare l'ambiente durante l'anno con potenze elevate. Questo perché la ridotta trasmittanza dell'involucro e dei serramenti rappresenta un freno alla dispersione del calore in eccesso in tutti gli istanti in cui la temperatura esterna sia inferiore alla temperatura ambiente, mantenendo temperature superiori alla temperatura di confort nel periodo invernale ed anticipando notevolmente durante l'anno la necessità di intervenire con sistemi di climatizzazione adeguati.

Il sistema radiante con recuperatore sensibile ad elevata efficienza trova oggi giorno grande applicazione nell'edilizia residenziale pur non rappresentando il miglior sistema in termini di confort performance.

- L'elevata entità dei carichi interni richiede potenze di raffrescamento di 40 W/m², al limite delle applicazioni in commercio per questo settore; ed esige il contributo di un deumidificatore spesso sottodimensionato rispetto alle reali necessità;
- Le elevate temperature della stanza costringono l'aria di rinnovo a bypassare il recuperatore sensibile per attraversare una batteria calda nel periodo invernale, introducendo quindi un inutile spesa energetica che potrebbe essere evitata con un free cooling parziale del recuperatore, ad oggi non presente in commercio;
- Il free cooling nella mezza stagione viene sfruttato solo per il 5% poiché necessiterebbe di una maggiore portata d'aria per attenuare la temperatura ambiente, ma soprattutto per attenuare il carico latente nel restante periodo dell'anno;
- Le elevate tempistiche di attivazione della massa del pavimento radiante, in contrapposizione al carattere impulsivo dei carichi endogeni, costituiscono un freno al mantenimento delle condizioni di confort, soprattutto nel periodo estivo.

La necessità di complicare il funzionamento del recuperatore sensibile dell'impianto radiante per meccanismo e per portate, insieme agli svantaggi legati alle inerzie del sistema, fanno pensare alla potenzialità dell'utilizzo di una centrale trattamento aria di tipo domestico rispetto al sistema radiante.

Simulando in TRNsys un impianto a tutta aria con possibilità di Free Cooling Totale si sono ottenuti notevoli vantaggi:

- Il Periodo di utilizzo del Free Cooling Totale entalpico aumenta fino al 28% delle ore annue, ovvero più del quadruplo delle ore rispetto al caso radiante;
- Grazie alla possibilità di bypass parziale nel periodo invernale (Free Cooling Miscelato) ed alla ventilazione per dislocazione si riesce ad ottenere un elevato utilizzo del recuperatore sensibile tutto l'anno.
- Le temperature medie della stanza ben ricalcano le temperature di setpoint durante l'anno, soprattutto nella mezza stagione;
- L'elevata velocità di risposta del sistema dovuta alla minore inerzia ed alla capacità di variazione contemporanea di portata e temperatura permette una minore dispersione dei dati intorno alla temperatura di setpoint;
- La distribuzione delle velocità di rotazione del ventilatore durante l'anno mostra come raramente il sistema si porti sopra a 3.7 vol/h , ovvero sopra il 58% della velocità massima dei ventilatori. Ciò ha un impatto positivo sulla rumorosità del sistema, soprattutto se si pensa che i ventilatori possano essere inglobati nella macchina all'interno di un vano tecnico. È quindi possibile parlare di confort acustico, elemento spesso a svantaggio dei sistemi di ventilazione.
- Gli indici di confort PMV e PPD di questo sistema sono notevoli in entrambe le stagioni, comportando differenze di PPD nella giornata tipo estiva del 15% rispetto al caso radiante.

Va tuttavia detto che le simulazioni sono state eseguite osservando il comportamento limitatamente ad una stanza e non vi sono quindi effetti di *smorzamento* dei fenomeni descritti legati a situazioni contemporaneamente diverse ambiente per ambiente. Non si è inoltre tenuto conto delle spese energetiche legate alla movimentazione dei ventilatori e dei dispositivi ausiliari del sistema. Risulterebbero quindi di interesse futuri approfondimenti quali:

- Un'analisi del comportamento di un'intera unità residenziale, mono o plurifamiliare;
- Un'analisi della convenienza economica nell'adozione di una siffatta Centrale Trattamento Aria rispetto ad un sistema radiante.

BIBLIOGRAFIA

Appunti di bilancio termico e progettazione dell'edificio dell'Architetto C.Naticchioni – Università Sapienza, facoltà di architettura 2009/2010

Appunti delle lezioni dell'Ing.De Carli del corso di Impianti termici e frigoriferi – Università di Padova, Facoltà di Ingegneria 2014/2015

R. Lazzarin, A Gasparella “Il recupero energetico negli impianti di ventilazione: gli scambiatori di calore”, CdA, n. 10-11 1996

M. Vio, M. Grossoni: “L'evoluzione degli impianti di condizionamento negli edifici dedicati alla tecnologia dell'informazione e della comunicazione” – Atti del Convegno AICARR “Condizionamento, Riscaldamento, Refrigerazione: innovazioni e tendenze” sessione Condizionamento, Milano marzo 2002.

Normative UNI, EN, ISO, DIN disponibili presso l'Ente Italiano di Normazione:
<http://store.uni.com/magento-1.4.0.1/>