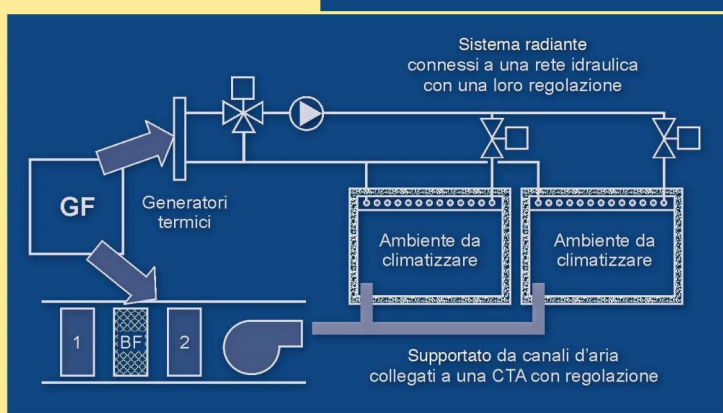


CLIMATIZZAZIONE CON SISTEMI RADIANTI

Guida alla progettazione



INDICE

Prefazione	III
CAPITOLO 1 - Elementi di base dei sistemi radianti	1
1.1 - Introduzione	1
1.2 - Sistemi di climatizzazione ad elementi radianti	1
1.3 - Interazione tra impianto ad elementi radianti e impianto ad aria	2
1.4 - Scambio termico dei sistemi radianti	4
1.4.1 - Scambio termico tra persone e ambiente	4
1.4.2 - Scambio termico tra sistema radiante e ambiente	5
1.4.3 - Differenze tra gli scambi di calore tra il sistema radiante, l'ambiente e le persone	5
CAPITOLO 2 - Scambio termico tra i sistemi radianti e le persone: comfort termico	7
2.1 - Comfort termico	7
2.2 - Bilancio di energia sul corpo umano	8
2.2.1 - Parametri che influenzano il bilancio di energia del corpo umano	10
2.2.1.a - Valutazione dei fattori di vista	12
2.2.2 - Temperatura operativa	14
2.2.3 - Abbigliamento	16
2.2.4 - Temperatura media della superficie esterna del corpo umano vestito tel	17
2.3 - Comfort e progettazione degli impianti	17
2.4 - Norma UNI EN ISO 77302	19
2.4.1 - Comfort termico globale	20
2.4.1a - Indice PMV	20
2.4.1b - Importanza della temperatura operativa	21
2.4.1c - Indice PPD	22
2.4.2 - Discomfort termico localizzato	22
2.4.2a - Elevata differenza verticale della temperatura dell'aria	23
2.4.2b - Pavimento troppo caldo o troppo freddo	23
2.4.2c - Elevata asimmetria radiante	24
2.4.2d - Correnti d'aria	26
2.4.3 - Criteri di accettabilità di un ambiente	27
2.4.4 - Analisi dell'andamento degli indici PMV e PPD	28
2.4.4a - Influenza dell'abbigliamento	29
2.4.4b - Influenza del metabolismo energetico	32
2.4.4c - Influenza dell'umidità relativa dell'aria	33
2.4.4d - Influenza della velocità dell'aria	34
2.4.5 - Analisi delle cause del discomfort localizzato	36
2.4.5a - Influenza del rischio di correnti d'aria	36
2.4.5b - Influenza del gradiente verticale di temperatura	36
2.4.5c - Influenza della temperatura del pavimento	37
2.4.5d - Influenza di una parete calda	38
2.4.5e - Influenza di una parete fredda	39
2.4.5f - Influenza di un soffitto caldo	39
2.4.5g - Influenza di un soffitto freddo	40
2.5 - Importanza dell'andamento spaziale della temperatura operativa e del PMV	40
2.6 - Miglioramento del comfort termico all'interno di un ambiente	44

CAPITOLO 3 - Scambi termici tra i sistemi radianti e l'ambiente	47
3.1 - Introduzione	47
3.2 - Scambio termico per irraggiamento	47
3.2.1 - Influenza della temperatura delle superfici dell'ambiente	51
3.2.2 - Influenza del sistema radiante sulla temperatura delle pareti dell'ambiente: radiazione mutua	52
3.2.3 - Influenza di più superfici attive all'interno dello stesso ambiente	54
3.2.4 - Ripartizione della potenza emessa sulle superfici inattive: bilancio energetico di un sistema radiante	55
3.2.4.a - Soffitti radianti	59
3.2.4.b - Pavimenti radianti	61
3.2.4.c - Pareti radianti	61
3.2.5 - Metodo di calcolo semplificato ASHRAE	63
3.2.6 - Effetti della presenza delle persone sulle prestazioni del sistema radiante	67
3.3 - Scambio termico per convezione	69
3.3.1 - Convezione forzata	70
3.3.2 - Convezione naturale	71
3.3.3 - Formule pratiche di utilizzo comune	74
3.4 - Determinazione della temperatura di pelle	78
3.5 - Influenza della portata dell'acqua sulla temperatura di pelle	80
 CAPITOLO 4 - Prestazioni dei sistemi radianti	 85
4.1 - Introduzione	85
4.2 - Parametri che influenzano le prestazioni dei sistemi radianti	86
4.3 - Importanza della temperatura media radiante delle superfici inattive	86
4.3.1 - Valutazione della temperatura media radiante delle pareti inattive	86
4.4 - Importanza della temperatura di pelle del sistema	90
4.4.1 - Funzionamento invernale	90
4.4.2 - Funzionamento estivo	91
4.5 - Prestazioni reali dei sistemi radianti	93
4.5.1 - Influenza dell'irraggiamento diretto sulle prestazioni dei sistemi radianti	93
4.5.2 - Importanza dei laboratori di prova	96
4.6 - Prestazioni secondo le norme, secondo le formule semplificate e prestazioni reali	97
4.6.1 - Pavimento radiante	97
4.6.2 - Soffitto radiante	100
4.6.3 - Pareti radianti	105
4.7 - Perché la temperatura operativa non può essere usata come parametro prestazionale	106
 CAPITOLO 5 - Sistemi radianti a pavimento, a soffitto e a parete	 109
5.1 - Introduzione	109
5.2 - Influenza dei sistemi radianti sul comfort termico	109
5.2.1 - Influenza della temperatura media radiante sulla temperatura dell'aria	111
5.2.2 - Andamento puntuale della temperatura operativa e del PMV	115
5.2.2a - Caso invernale: confronto tra diverse tipologie di impianto nel residenziale	115
5.2.2b - Caso estivo: confronto tra le diverse tipologie d'impianto negli uffici	120
5.3 - Ombre termiche dovute all'arredo: influenza dell'arredo nelle prestazioni dei sistemi radianti	121
5.3.1 - Influenza sulla potenza fornita dal sistema	122
5.3.1.a - Arredo che copre la superficie attiva: concetto di Superficie Attiva Utile	122
5.3.1.b - Arredo che maschera le superfici inattive	124
5.3.2 - Influenza sulla temperatura operativa e sul PMV	126
5.4 - Differenze fondamentali tra sistemi radianti a pavimento, a parete e a soffitto	128
5.4.1 - Sistemi radianti a pavimento	129
5.4.1a - Influenza della composizione del pavimento	133
5.4.1b - Inerzia termica del sistema	136
5.4.1c - Funzionamento in free-cooling estivo	145
5.4.1d - Influenza dell'altezza dell'ambiente	146
5.4.1e - Funzionamento in edifici con carichi termici contrapposti (impianto a quattro tubi)	146
5.4.1f - Limiti e pregi del sistema radiante a pavimento	146
5.4.2 - Sistemi radianti a soffitto	146
5.4.2.a - Influenza della composizione del soffitto	150
5.4.2b - Inerzia termica del sistema	151
5.4.2.c - Funzionamento in free-cooling estivo	157

5.4.2d - Influenza dell'altezza dell'ambiente	158
5.4.2e - Influenza della presenza di arredi	159
5.4.2f - Disposizione delle superfici radianti in funzione delle prestazioni desiderate	159
5.4.2g - Capacità di lavorare in edifici con carichi termici contrapposti (impianto a quattro tubi)	161
5.4.2h - Limiti e vantaggi del sistema	162
5.4.3 - Sistemi a parete radiante	162
5.5 - Sistemi ad attivazione della massa	163
CAPITOLO 6 - Trattamento dell'aria di rinnovo nei sistemi radianti	165
6.1 - Introduzione	165
6.2 - Qualità dell'aria	166
6.2.1 - Qualità dell'aria in ambienti non residenziali	166
6.2.2 - Qualità dell'aria in ambienti residenziali	168
6.2.3 - Influenza dell'umidità relativa dell'aria	170
6.2.4 - L'efficienza di ventilazione	171
6.2.5 - Norma UNI 10339	173
6.3 - Bilancio energetico in funzionamento invernale	175
6.3.1 - Bilancio energetico in funzionamento invernale	177
6.3.2 - Bilancio energetico in funzionamento estivo	178
6.4 - Sistemi radianti ad aria primaria	181
6.4.1 - Trasformazioni sul diagramma psicrometrico	183
6.4.2 - Recupero rigenerativo per limitare o annullare i guasti energetici prodotti dal post-riscaldamento	185
6.5 - Sistemi radianti senza aria primaria	188
6.5.1 - Prestazioni energetiche	189
6.5.2 - Ulteriori difetti dei deumidificatori isotermi a espansione diretta	192
6.6 - Sistemi radianti misti senza aria primaria	192
6.6.1 - Sistemi radianti misti con deumidificatore non isoterma	192
6.6.2 - Sistemi radianti misti con fan-coil	193
6.6.3 - Sistemi radianti misti con deumidificatore idronico con recupero rigenerativo	194
6.7 - Temperatura di produzione dell'acqua refrigerata per garantire la deumidificazione nel funzionamento estivo	195
6.8 - Temperatura di produzione dell'acqua calda per garantire la produzione di aria primaria	198
6.9 - Trattamento dell'aria primaria con sistemi ad espansione diretta	199
6.9.1 - Controllo della temperatura di immissione	201
6.9.2 - Funzionamento estivo: il problema del controllo dell'umidità relativa	202
6.9.3 - Funzionamento invernale: il problema dei cicli di sbrinamento	204
6.10 - Immissione dell'aria in ambiente	206
6.10.1 - Ottimizzazione delle prestazioni dei sistemi radianti	206
6.10.1a - Funzionamento invernale	206
6.10.1b - Funzionamento estivo	207
CAPITOLO 7 - Regolazione dei sistemi di climatizzazione radiante	209
7.1 - Introduzione	209
7.2 - Sistemi radianti di climatizzazione: apparecchi da controllare	210
7.3 - Controllo della temperatura dell'aria in ambiente	210
7.3.1 - Funzionamento invernale	211
7.3.2 - Funzionamento estivo	211
7.4 - Controllo dell'umidità relativa dell'aria in ambiente	211
7.4.1 - Funzionamento invernale	211
7.4.2 - Funzionamento estivo	212
7.5 - Avviamento dell'impianto nel funzionamento estivo	212
7.6 - Controllo della temperatura dell'acqua in ingresso al sistema radiante	213
7.7 - Controllo della temperatura dell'acqua in ingresso alle batterie della CTA	215
CAPITOLO 8 - Generazione di energia nei sistemi radianti	219
8.1 - Introduzione	219
8.2 - Funzionamento estivo	219
8.2.1 - Temperatura di produzione dell'acqua refrigerata	219
8.2.2 - Efficienza dei gruppi frigoriferi	220
8.3 - Funzionamento invernale	223
8.3.1 - Temperatura di produzione dell'acqua calda	224
8.3.2 - Efficienza delle pompe di calore	224

8.4 - Impianti a quattro tubi	228
8.4.1 - Richiesta contemporanea di caldo e di freddo	229
8.4.2 - Considerazioni energetiche	230
8.4.3 - Gruppi frigoriferi polivalenti a quattro tubi	230
8.4.4 - Limite del trattamento dell'aria ad espansione diretta negli impianti a quattro tubi	233
8.5 - Produzione di acqua sanitaria: gruppi frigoriferi polivalenti a due tubi	233
CAPITOLO 9 - Risparmi energetici e economici	235
9.1 - Introduzione	235
9.2 - Risparmi legati al sistema: confronto con impianto a fan-coil	235
9.2.1 - Risparmio sul consumo elettrico dei ventilatori dei fan-coil	235
9.2.2 - Funzionamento invernale	236
9.2.3 - Funzionamento estivo	237
9.2.4 - Possibilità di utilizzo del free-cooling estivo	237
9.3 - Risparmi legati al sistema radiante e alla sua regolazione	237
9.3.1 - Utilizzo di CTA a fluido intermedio	237
9.3.2 - Logiche evolute per il controllo dell'umidità relativa	237
9.3.3 - Variazione della temperatura di produzione del gruppo frigorifero	238
9.3.4 - Mantenimento dell'umidità relativa al 55% anziché al 50%	238
9.3.5 - Utilizzo del recupero rigenerativo	240
9.3.6 - Utilizzo di gruppi frigoriferi polivalenti	240
9.4 - Caso di un palazzo per uffici	240
9.4.1 - Risparmi energetici e economici rispetto ad altri sistemi radianti	240
9.4.1a - Utilizzo di CTA a fluido intermedio	241
9.4.1b - Controllo di UR evoluto	241
9.4.1c - Controllo UR al 55% anziché al 50%	241
9.4.1d - Utilizzo di gruppi frigoriferi in grado di modificare la temperatura dell'acqua prodotta	242
9.4.1e - Utilizzo del recupero rigenerativo	242
9.4.1f - Utilizzo di gruppi frigoriferi polivalenti	242
9.4.2 - Risparmi energetici e economici conseguiti rispetto a impianti a fan-coil e aria primaria	242
CAPITOLO 10 - Circuiti idraulici	245
10.1 - Introduzione	245
10.2 - Schemi idraulici per i terminali	245
10.2.1 - Schemi idraulici per i terminali: impianto a due tubi	245
10.2.2 - Schemi idraulici per i terminali: impianto a 4 tubi	247
10.3 - Schemi idraulici per lo sfruttamento del free-cooling da sorgente geotermica	249
CAPITOLO 11 - Applicazioni	253
11.1 - Introduzione	253
11.2 - Residenze	253
11.2.1 - Pavimento radiante	254
11.2.2 - Soffitto radiante	254
11.3 - Alberghi	255
11.3.1 - Pavimento radiante	256
11.3.2 - Soffitto radiante	256
11.4 - Ospedali	256
11.4.1 - Pavimento radiante	256
11.4.2 - Soffitto radiante	256
11.5 - Uffici	256
11.5.1 Pavimento radiante	256
11.5.2 - Soffitto radiante	256
11.6 - Attività commerciali	257
11.7 - Aule scolastiche, aule universitarie e sale conferenza	257
11.7.1 - Pavimento radiante	257
11.7.2 - Soffitto radiante	257
11.8 - Ristoranti e bar	257
11.9 - Palestre	257
CAPITOLO 12 - Procedure di calcolo	259
Calcoli estivi e invernali	259

PREFAZIONE

I sistemi radianti rappresentano la principale novità degli ultimi anni nel mondo della climatizzazione. I sistemi a pavimento non sono una novità assoluta, perché negli anni 50-60 erano già stati utilizzati in Italia, con risultati controversi: la speculazione edilizia degli anni del boom economico ha portato a molte installazioni del tutto sbagliate, dovute principalmente alla volontà di ridurre al minimo i costi. Sono stati riscoperti nell'ultimo decennio, grazie anche a ottime realizzazioni, e adesso sono divenuti particolarmente attraenti anche per l'utente finale. È invece una novità molto recente il loro uso nella climatizzazione estiva, come lo è anche l'utilizzo di sistemi a soffitto o a parete. Nella climatizzazione estiva le complicazioni sono maggiori, a causa soprattutto delle problematiche legate alla deumidificazione dell'aria: se non viene effettuata in modo corretto vi è il serio rischio di condensa superficiale sulle superficie attive fredde del sistema radiante, con tutte le conseguenze del caso. All'argomento avevo già dedicato ampio spazio nel mio testo "Impianti di climatizzazione – manuale di calcolo" oltre che un intero libro sul confronto tra radiatori e pavimento radiante nella climatizzazione invernale. Tuttavia ho ritenuto utile approfondire ulteriormente il tema con un testo, dedicato a chiunque voglia progettare un sistema radiante, che racchiude l'esperienza fatta sul campo nel corso della mia collaborazione pluriennale con la Rhoss (gruppo Irsap): molti argomenti trattati traggono spunto dalle indagini effettuate presso la camera di prova dello stabilimento di Codroipo (Ud), probabilmente la più evoluta sala test per sistemi radianti esistente oggi in Italia. Dal punto di vista didattico, il libro segue il programma impostato per una serie di corsi per progettisti di qualunque livello, tenuti negli ultimi tre anni con cadenza quasi mensile. Progettare un sistema radiante non è difficile, a patto di considerare con attenzione tutti i parametri che ne influenzano le prestazioni. Particolare

attenzione va fatta nel funzionamento estivo, periodo in cui le svariate formule di dimensionamento semplificate presenti in letteratura si dimostrano poco efficaci e possono portare ad errori anche grossolani.

Il capitolo 1 riporta una breve descrizione generale dei sistemi radianti e inquadra i le loro principali complessità. Il capitolo 2 è dedicato allo scambio termico tra i sistemi radianti e le persone, con particolare riguardo al comfort termico. Questo è un argomento fondamentale per capire quando e dove utilizzare i sistemi radianti, in alternativa agli impianti di climatizzazione tradizionali. Nel capitolo vengono descritti i parametri che influenzano il comfort termico, viene definita la temperatura operativa, grandezza molto importante nella progettazione di un sistema radiante, e viene sintetizzata la norma UNI EN 7730. Particolare attenzione è dedicata allo scambio per termico per irraggiamento tra le persone e le superfici dell'ambiente occupato, perché i sistemi radianti sono l'unica tipologia d'impianto in grado di influenzarlo attivamente sia nel funzionamento invernale che in quello estivo. Il capitolo 3 è dedicato allo scambio termico tra sistema radiante e superfici dell'ambiente, con particolare riguardo ai parametri geometrici. Lo scambio termico per irraggiamento viene affrontato separatamente da quello per convezione, per evidenziare meglio come debba essere utilizzato un sistema radiante, dove debba essere posizionato e quale sia l'influenza reciproca di più sistemi radianti installati in uno stesso ambiente (ad esempio a soffitto e a parete). Il capitolo 4 affronta le prestazioni dei sistemi radianti, come dovrebbero essere dichiarate e quali parametri le influenzano, quali siano i limiti delle formule semplificate e delle normative esistenti.

Il capitolo 5 descrive pregi e difetti delle varie tipologie di sistemi radianti, a pavimento, soffitto e parete, e mostra in particolare quale sia la loro influenza sul comfort termico e sulle prestazioni dell'intero impianto. In particolare si descrive l'influenza dei materiali di finitura e dell'arredo sulle prestazioni, sull'inerzia termica e, di conseguenza, sui tempi di reazione del sistema. Viene anche descritta la propensione delle varie tipologie al funzionamento in free-cooling estivo.

Il capitolo 6 è dedicato al trattamento dell'aria nei sistemi radianti, con particolare riguardo all'energia spesa per la deumidificazione dell'ambiente. Vengono descritti gli ad aria primaria, dotati di innovativi sistemi di recupero particolarmente efficienti, gli impianti misti a fan-coil e quelli con deumidificatore ad espansione diretta.

Il capitolo 7 è dedicato alla regolazione del sistema, con particolare approfondimento all'interfacciamento tra sistema radiante, impianto ad aria e generatori di calore per creare la sequenza d'inserimento ideale per garantire la massima flessibilità, i minori tempi di reazione nella totale sicurezza di funzionamento. Il capitolo 8 è dedicato alla generazione di energia termica con i sistemi radianti, in particolare tramite l'utilizzo di gruppi frigoriferi e pompe di calore. Il capitolo 9 fa una sintesi dei risparmi energetici raggiungibili con una corretta progettazione di un sistema radiante. Il capitolo 10 fornisce una sintesi degli schemi idraulici utilizzabili per sfruttare al massimo un sistema radiante, sia a due che a quattro tubi. In particolare è descritto come sia possibile sfruttare il free-cooling estivo da sorgente geotermica.

Il capitolo 11 descrive pregi e limiti dei sistemi radianti nelle varie applicazioni: residenziale, alberghiero, ospedaliero, terziario e commerciale.

Il capitolo 12 riassume una procedura di calcolo dei sistemi radianti.

CAPITOLO 1

ELEMENTI DI BASE DEI SISTEMI RADIANTI

1.1 - Introduzione

I sistemi radianti per la climatizzazione sono complessi, ma non sono difficili da progettare ed installare, a patto di capire bene le loro peculiarità. Lo scopo del libro è quello di aiutare il progettista a scegliere e dimensionare in modo corretto un sistema di climatizzazione radiante. Per fare questo è necessario comprendere:

1. cosa sia un sistema di climatizzazione ad elementi radianti;
2. come funzioni lo scambio termico nei sistemi radianti, in particolare come avvengano le interazioni con le persone e con l'ambiente;
3. cosa sia il comfort termico, con particolare riferimento al ruolo giocato dalla temperatura operativa;
4. quali siano le prestazioni dei sistemi radianti e quali dati debbano essere forniti dai costruttori per aiutare il progettista;
5. come si debba scegliere un sistema radiante e come lo si debba dimensionare, con particolare riferimento al problema della deumidificazione;
6. come si debba effettuare la logica di regolazione di un sistema radiante.

1.2 - Sistemi di climatizzazione ad elementi radianti

Un sistema radiante di climatizzazione si compone (Fig. 1.1) di:

- impianto ad elementi radianti presenti in ogni ambiente da climatizzare, collegati a dei circuiti idraulici e ad un sistema di regolazione;
- impianto ad aria di supporto, collegato mediante canali a una o più centrali di trattamento dell'aria (CTA) a loro volta dotate di una propria regolazione;
- uno o più generatori termici (gruppi frigoriferi, pompe di calore, gruppi frigoriferi polivalenti, caldaie) che forniscono l'energia necessaria sia all'impianto ad elementi radianti che all'impianto ad aria.

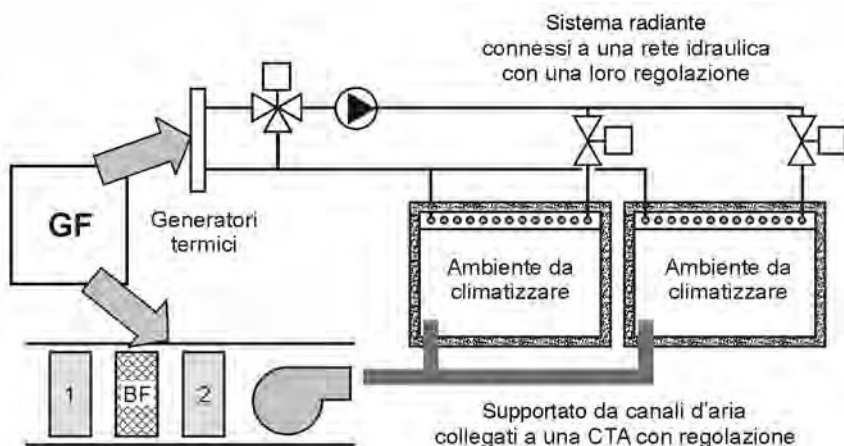


Fig. 1.1 - Sistema di climatizzazione a elementi radianti.

1.3 - Interazione tra impianto ad elementi radianti e impianto ad aria

Un ambiente da climatizzare è caratterizzato da una richiesta di potenza sensibile R_S e da una richiesta di potenza latente R_L . Un impianto di climatizzazione deve fornire una potenza sensibile P_S e una potenza latente P_L di pari valore, se si vuole controllare sia la temperatura che l'umidità all'interno dell'ambiente climatizzato.

In particolare, per controllare la temperatura è necessario che sia:

$$|P_S| = |R_S| \quad [1.1]$$

Se la potenza sensibile fornita dall'impianto di climatizzazione P_S fosse diversa da quella richiesta R_S , la temperatura all'interno dell'ambiente tenderebbe ad aumentare o diminuire.

Ad esempio, nel funzionamento estivo, se $P_S > R_S$, la temperatura scende, viceversa se $P_S < R_S$, la temperatura sale. Il contrario accade nel funzionamento invernale: se $P_S > R_S$, la temperatura sale, mentre scende se $P_S < R_S$.

Analogamente per controllare l'umidità ambiente è necessario che:

$$|P_L| = |R_L| \quad [1.2]$$

Se la potenza latente fornita dall'impianto di climatizzazione P_L fosse diversa da quella richiesta R_L , l'umidità relativa all'interno dell'ambiente tenderebbe ad aumentare o diminuire, con modalità analoghe a quella della temperatura nel caso delle potenze sensibili.

Con i sistemi di climatizzazione ad elementi radianti, nell'ambiente agiscono sia l'impianto radiante che l'impianto ad aria. Di conseguenza, la [1.1] e la [1.2] divengono rispettivamente:

$$|P_{SR} + P_{SA}| = |R_S| \quad [1.3]$$

$$|P_{LR} + P_{LA}| = |R_L| \quad [1.4]$$

dove i pedici R e A rappresentano l'impianto ad elementi radianti e l'impianto ad aria.

Il sistema radiante non può in alcun modo fornire potenza latente, perché non è in grado di deumidificare l'aria nel funzionamento estivo, né di umidificarla nel funzionamento invernale.

Pertanto, essendo $P_{LR} = 0$, tutta la potenza latente richiesta dall'ambiente deve essere fornita dall'impianto ad aria. Quindi, la portata trattata dall'impianto ad aria deve essere tale da sviluppare una potenza latente pari a quella richiesta dall'ambiente:

$$Q_{im} = \frac{R_L v_{im}}{2,5 (x_A - x_{im})} \quad [1.5]$$

con:

- Q_{im} = portata volumetrica dell'aria di immissione [m^3/s];
- R_L = potenza latente richiesta dall'ambiente [W];
- x_A = umidità assoluta alle condizioni ambiente [g/kg];
- x_{im} = umidità assoluta dell'aria di immissione [g/kg];
- v_{im} = volume specifico dell'aria di immissione [m^3/kg].

La portata d'aria Q_{im} può essere immessa alla stessa temperatura dell'aria in ambiente (aria neutra), oppure a temperatura diversa. La potenza sensibile fornita dall'impianto ad aria è nulla ($P_{SA} = 0$) nel primo caso, ha un valore diverso da zero nel secondo.

Generalmente, l'aria di immissione si trova a una temperatura sempre inferiore a quella ambiente. Infatti, lo scopo dell'immissione di aria è quello di mantenere "pulito" l'ambiente, sostituendo aria pura a quella viziata, soprattutto nella zona a circa 1,2 m di altezza dal pavimento, dove si posiziona la testa delle persone sedute. Quindi, considerato che l'aria più fredda è più pesante e quindi tende a scendere verso il basso, l'immissione di aria a temperatura inferiore a quella ambiente, anche nella stagione fredda, fa sì che la portata di rinnovo assolvga al compito di pulire l'ambiente.

Di conseguenza, la portata d'aria di rinnovo fornisce un contributo positivo alla potenza sensibile totale dell'intero sistema, in quanto:

$$P_{SA} = \frac{Q_{im}}{v_{im}} c(t_A - t_{im}) \quad [1.6]$$

con:

- P_{SA} = potenza sensibile fornita dall'impianto ad aria [W];
- Q_{im} = portata volumetrica dell'aria di immissione [m^3/s];
- c = calore specifico dell'aria (si può approssimare pari a 1) [$\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$];
- t_A = temperatura dell'aria in ambiente [$^\circ\text{C}$];
- t_{im} = temperatura dell'aria di immissione [$^\circ\text{C}$];
- v_{im} = volume specifico dell'aria di immissione [m^3/kg];

Ricordando la [1.3], la potenza sensibile richiesta al sistema radiante è:

$$P_{SR} = R_S - P_{SA} \quad [1.7]$$

È molto importante che la potenza sensibile fornita dall'impianto ad aria P_{SA} sia al massimo pari al 30% della potenza sensibile richiesta dall'ambiente R_S . Un normale impianto ad aria primaria non può controllare la temperatura dell'aria immessa ambiente per ambiente: di conseguenza il sistema nella sua globalità riesce a controllare la temperatura dell'aria in ambiente fino a quando $R_S = P_{SA}$. Se $R_S < P_{SA}$, il controllo della temperatura viene perso, perché il sistema radiante può essere al massimo disattivato (quindi $P_{SR} = 0$): in queste condizioni $R_S - P_{SA}$ diventa minore di zero. Ciò significa che in estate la temperatura dell'aria in ambiente scende più del dovuto tanto più quanto è maggiore P_{SA} rispetto a R_S .

1.4 - Scambio termico dei sistemi radianti

Un sistema radiante scambia calore in due modi:

- per irraggiamento;
- per convezione.

Lo scambio avviene sia con le persone che con l'ambiente.

Rimandando l'approfondimento ai prossimi capitoli, qui viene data solo una sintesi dei concetti principali.

1.4.1 - Scambio termico tra persone e ambiente

La figura 1.2 mostra gli scambi per irraggiamento e convezione tra ambiente e persone. Lo scambio per irraggiamento avviene tra le persone e le superfici dell'intero ambiente, sia quelle "attive", ovvero quelle del sistema radiante, sia quelle "inattive". Lo scambio per convezione avviene tra le persone e l'aria.

Negli ambienti civili le persone cedono calore perché si trovano ad una temperatura generalmente superiore a quella delle pareti (scambio per irraggiamento) e a quello dell'aria (scambio per convezione). I parametri in gioco sono 4:

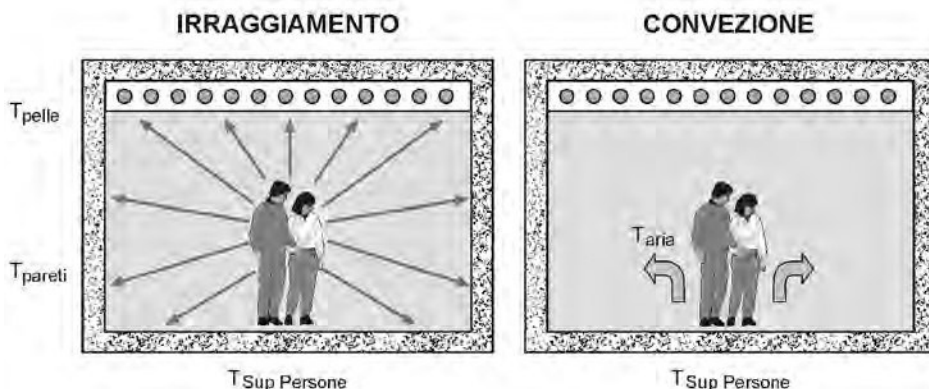


Fig. 1.2 - Scambi termici tra ambiente e persone.

1. t_P = temperatura superficiale del sistema radiante, detta anche temperatura di pelle [°C];
2. t_I = temperatura delle pareti inattive [°C];
3. t_A = temperatura dell'aria [°C];
4. t_{cl} = temperatura media della superficie esterna del corpo umano vestito [°C].

Questo argomento è approfondito nel capitolo 2.

1.4.2 - Scambio termico tra sistema radiante e ambiente

La figura 1.3 mostra gli scambi per irraggiamento e convezione tra ambiente e sistema radiante. Lo scambio per irraggiamento avviene tra la superficie del sistema radiante (superficie “attiva”) e le pareti dell'intero ambiente (superfici “inattive”). Lo scambio per convezione avviene tra la superficie del sistema radiante e l'aria. Quindi lo scambio termico per irraggiamento non influisce per nulla sulla temperatura dell'aria, ma solo su quella delle pareti. Viceversa, lo scambio termico per convezione influisce sulla temperatura dell'aria e, indirettamente, anche sulla temperatura delle pareti perché l'aria scambia poi calore con esse per convezione.

I parametri in gioco sono 3:

1. t_P = temperatura superficiale del sistema radiante, detta anche temperatura di pelle;
2. t_I = temperatura delle superfici inattive;
3. t_A = temperatura dell'aria.

Questo argomento è approfondito nei capitoli 4 e 5.

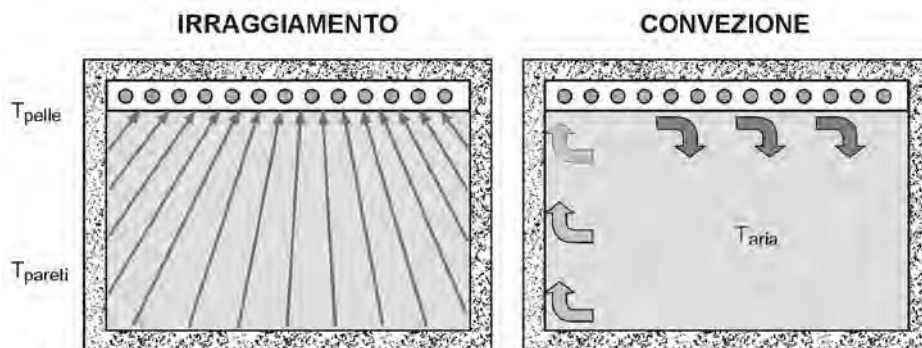


Fig. 1.3 - Scambi termici tra ambiente e sistema radiante.

1.4.3 - Differenze tra gli scambi di calore tra il sistema radiante, l'ambiente e le persone

Le differenze tra gli scambi di calore tra l'ambiente, il sistema radiante e le persone sono:

- L'ambiente scambia calore solo per irraggiamento e convezione, mentre le persone scambiano calore in modo più complesso (anche per sudorazione e respirazione: cfr. capitolo 2).

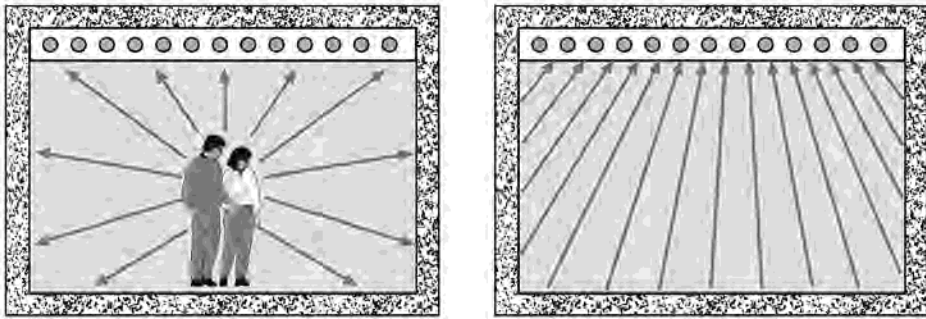


Fig. 1.4 - Differenza negli scambi tra sistema radiante e persone (a sinistra) e sistema radiante e ambiente (a destra): le persone vedono tutte le superfici sia quelle attive (il sistema radiante) che quelle inattive, mentre il sistema radiante vede solo le superfici inattive in quanto non vede se stesso.

- I parametri che regolano gli scambi di calore tra l'ambiente e le persone sono quattro, contro i tre relativi agli scambi di calore tra l'ambiente e il sistema radiante. Il quarto parametro è la temperatura superficiale delle persone.
- Persone e sistema radiante vedono l'ambiente in modo diverso: le persone vedono tutte le superfici sia quelle attive (il sistema radiante) che quelle inattive, mentre il sistema radiante vede solo le superfici inattive, in quanto non può vedere se stesso, come mostrato in figura 1.4.

CAPITOLO 2

SCAMBIO TERMICO TRA I SISTEMI RADIANTI E LE PERSONE: COMFORT TERMICO

2.1 - Comfort termico

Lo scopo della climatizzazione è quello di mantenere le persone nelle condizioni di comfort termico, anche detto comfort termoigrometrico, benessere termico, benessere termoigrometrico.

Il comfort termico è definito come quello stato psicofisico nel quale il soggetto esprime soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico.

Per ambiente termico s'intende il complesso dei sei parametri ambientali e soggettivi che determinano la sensazione termica provata da un soggetto esposto a fissate condizioni termoigrometriche.

Due parametri sono strettamente riferiti all'uomo: il metabolismo energetico e le proprietà termofisiche dell'abbigliamento. Altri quattro parametri sono di tipo ambientale: temperatura, velocità, umidità relativa dell'aria e temperatura media radiante. Di questi parametri ambientali, i primi tre possono essere controllati direttamente dall'impianto di climatizzazione mentre il quarto è funzione delle temperature superficiali dell'ambiente. Quest'ultimo parametro, quindi, dipende essenzialmente dalla progettazione edilizia dell'edificio. Su di esso possono influire in qualche modo solo i sistemi di climatizzazione radiante.

La Tabella 2.1 riassume quanto detto.

Tab. 2.1 - Parametri che concorrono al comfort ambientale

	Parametro	Da chi dipende	Chi lo controlla
<i>Riferiti all'uomo</i>	Metabolismo Energetico	Attività delle persone all'interno dell'ambiente	–
	Proprietà termofisiche dell'abbigliamento	Abbigliamento delle persone. Dipende dal tipo di attività, dal "decoro" richiesto ed è funzione della stagione, quindi della temperatura esterna	Nessuno: si possono solo dare delle indicazioni (ad esempio per risparmiare energia in estate si può permettere alle persone di non usare giacca e cravatta)

	Parametro	Da chi dipende	Chi lo controlla
<i>Riferiti all'ambiente</i>	Temperatura dell'aria in ambiente	È funzione della stagione, quindi della temperatura esterna	Qualunque impianto di climatizzazione è in grado di controllare la temperatura dell'aria in ambiente
	Umidità relativa dell'aria in ambiente	È funzione della stagione, quindi della temperatura esterna	Solo alcuni impianti di climatizzazione sono in grado di controllare perfettamente <i>UR</i> ambiente
	Velocità dell'aria ambiente	Dipende dalla tipologia d'impianto e dalla qualità della distribuzione dell'aria in ambiente	Non può essere controllata a posteriori, ma imposta mediante una progettazione consapevole, soprattutto nella scelta dei diffusori più adatti
	Temperatura media radiante	Dipende dalle condizioni ambientali esterne, dall'isolamento termico dell'involucro edilizio, dal tipo di superfici vetrate e di schermi solari eventualmente utilizzati	Non può essere controllata dall'impianto. Solo i sistemi radianti possono correggere i suoi eventuali effetti negativi sul comfort delle persone

2.2 - Bilancio di energia sul corpo umano¹

L'organismo umano è un sistema termodinamico complesso, che si può immaginare come formato da due cilindri concentrici, in grado di sviluppare energia termica per effetto delle reazioni chimiche. Al suo interno, l'energia termica viene trasmessa tra i due strati per conduzione attraverso gli strati stessi e per convezione attraverso il flusso ematico. Vi è anche lo scambio diretto tra l'interno e l'ambiente sotto forma di calore latente sensibile nella respirazione.

In superficie, l'energia viene scambiata per irraggiamento, convezione ed evaporazione del sudore. Lo scambio conduttivo è limitato alle parti di superficie a contatto con gli oggetti, ed è di solito trascurabile.

In ambienti moderati, nei quali gli scambi di energia termica avvengono dal corpo umano verso l'ambiente, perché la temperatura dell'ambiente stesso è inferiore a quella delle zone esterne del corpo umano, il bilancio di energia termica per unità di tempo sul corpo può essere scritto come:

$$A = M - W - S - L \cong M - S - L \quad [2.1]$$

A = accumulo di energia termica nell'unità di tempo o variazione di energia interno del corpo umano nell'unità di tempo [W];

M = metabolismo energetico [W];

^[1] Questo paragrafo è tratto essenzialmente da: F.R. d'Ambrosio Alfano, G. Riccio. Sistema ambientale interno. In: Manuale della climatizzazione, a cura di L. Stefanutti, cap. 11. Milano: Tecniche Nuove. 2007.

W = potenza meccanica che il corpo umano cede all'ambiente (può essere considerata nulla) [W];

S = calore sensibile ceduto dall'uomo all'ambiente nell'unità di tempo [W];

L = calore latente ceduto dall'uomo all'ambiente nell'unità di tempo [W].

Poiché generalmente conviene ragionare a parità di parametri fisici (altezza e peso) dell'individuo, nel seguito queste stesse grandezze saranno espresse in W/m^2 .

Se il valore di A è nullo, il corpo umano si trova in equilibrio con l'ambiente e la sensazione è di neutralità termica. Se invece il valore di A è maggiore di zero, il corpo umano sta accumulando energia termica e la sensazione provata è di caldo. Viceversa, se il valore di A è minore di zero, il corpo umano sta dissipando energia termica e la sensazione provata è di freddo.

Il **metabolismo energetico** è sostanzialmente l'energia potenziale chimica che all'interno del corpo umano si trasforma in energia termica e dipende da molte variabili. In pratica, per gli scopi legati alla climatizzazione, lo si può considerare unicamente come funzione dell'attività svolta dal soggetto. Spesso il metabolismo energetico viene espresso in met ($1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$).

La norma ISO 8996 riporta una serie di valori del metabolismo energetico in funzione dell'attività svolta. Ai fini del presente testo, possono essere sufficienti i dati riportati in tabella 2.2, tratta dalla norma UNI EN ISO 7730. Va tenuto presente che generalmente le persone anziane e quelle malate hanno un metabolismo energetico inferiore e questa cosa va considerata soprattutto quando si progettano ambienti dedicati proprio alle persone più anziane e/o deboli, come il caso degli ospedali.

La **potenza meccanica** rappresenta l'energia che nell'unità di tempo l'uomo scambia con l'ambiente esterno sotto forma di lavoro. Poiché il corpo umano può essere considerato una macchina termica a basso rendimento, questo valore può essere posto uguale a 0.

È utile capire come l'uomo scambi calore sensibile e calore latente con l'ambiente.

Tab. 2.2 - Valori del metabolismo energetico per alcune attività principali (allegato B della UNI EN ISO 7730 – altri valori sono contenuti nella UNI EN 8996)

ATTIVITÀ	Dati sul metabolismo energetico	
	W/m^2	met
Disteso a riposo	46	0,8
Seduto, rilassato	58	1,0
Attività sedentaria	70	1,2
In piedi: attività leggera	93	1,6
In piedi: attività media	116	2,0
In piedi: attività pesante - Camminare 2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Il calore sensibile può essere espresso dall'equazione:

$$S = C_{res} + C + R + K \cong C_{res} + C + R \quad [2.2]$$

con:

C_{res} = potenza termica ceduta nella respirazione come calore sensibile [W/m²];

C = potenza termica scambiata per convezione, [W/m²];

R = potenza termica scambiata per irraggiamento [W/m²];

K = potenza termica scambiata per conduzione (che si può generalmente trascurare nella maggior parte dei casi) [W/m²];

Il calore latente può essere espresso dall'equazione:

$$L = E_{res} + E \quad [2.3]$$

con:

E_{res} = potenza termica ceduta nella respirazione come calore latente [W/m²];

E = potenza termica ceduta per evaporazione dalla pelle [W/m²].

Sostituendo le [2.2] e [2.3] nella [2.1] si ottiene l'equazione di bilancio del corpo umano all'interno di un ambiente moderato:

$$A = M - S - L = M - C - R - C_{res} - E_{res} - E \quad [2.4]$$

2.2.1 - Parametri che influenzano il bilancio di energia del corpo umano

È importante capire quali siano i parametri che influenzano il bilancio di energia di corpo umano, quindi le eventuali sensazioni termiche provate dalle persone: neutralità, caldo, freddo.

Scambio latente

Per semplicità conviene cominciare dalle componenti dello scambio latente della [2.3].

L'aria espirata dall'uomo ha una temperatura e un titolo superiori a quella dell'aria ambiente. Per questo motivo durante la respirazione si disperde calore.

La **potenza termica scambiata nella respirazione come calore latente** può essere espressa in funzione del metabolismo energetico M dall'equazione:

$$E_{res} = 1,72 \cdot 10^{-5} M (5867 - \Phi p_{as}) \quad [2.5]$$

con:

p_{as} = tensione di vapore dell'acqua alla temperatura dell'aria in ambiente [Pa];

Φ = grado igrometrico dell'ambiente, adimensionale.

Quindi la potenza termica scambiata nella respirazione come calore latente è funzione sia del metabolismo energetico che dell'umidità relativa dell'aria.

La **potenza scambiata per evaporazione dalla pelle** è funzione di due diversi fenomeni: la diffusione di vapore attraverso la pelle e la sudorazione vera e propria, corrispondenti ai due termini dell'equazione:

$$E = 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99M(1 - \eta) - \Phi p_{as}] + 0,42 (M - 58,15) \quad [2.6]$$

GENERIAMO IDEE PER UN'ENERGIA SOSTENIBILE

AiCARR, Associazione italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione, crea e promuove cultura e tecnica per il benessere sostenibile, contribuendo al progresso delle tecnologie impiantistiche e alla definizione delle normative relative alla produzione, alla distribuzione e all'utilizzo dell'energia termica. Nata nel 1960 come costola italiana della prestigiosa associazione statunitense ASHRAE, AiCARR riunisce oggi circa 2000 associati di varia estrazione: progettisti, docenti, installatori e manutentori, aziende produttrici, funzionari di Enti e Agenzie governative, istituzioni territoriali, nazionali e internazionali, studenti e ricercatori. La presenza nelle sedi accademiche e istituzionali dove si progetta il futuro energetico del nostro Paese fa di AiCARR un punto di riferimento essenziale per la definizione delle strategie e delle politiche energetiche e un interlocutore insostituibile per chiunque si occupi di efficienza energetica, qualità ambientale, fonti rinnovabili e uso consapevole dell'energia.

LE COMPETENZE CONDIVISE SONO ALLA BASE DI OGNI PROGRESSO

Accrescere la cultura tecnica del settore e la professionalità dei Soci, condividere know-how, redigere e diffondere linee guida di supporto nella pratica professionale, dare un appoggio concreto al mondo imprenditoriale che si occupa di temi energetici, fornire il proprio contributo in ambito normativo sono i principali impegni che AiCARR svolge attraverso:

- Convegni nazionali e internazionali, webinar, seminari, workshop, tavole rotonde
- Incontri tecnici e visite a impianti e realizzazioni d'avanguardia
- Commissioni di studio e coordinamento di attività tecniche, culturali e normative
- Comitati Tecnici attivi su tematiche specifiche
- Attività congiunte con Associazioni, Università ed Enti italiani ed europei, pubblici e privati

- Gruppi di lavoro creati per dare un supporto operativo alle Istituzioni
- Partecipazione alla definizione di regolamenti, leggi, linee guida e collaborazione alla redazione di normativa tecnica con UNI, CEN e CTI, grazie alla Commissione Tecnica e Normativa.

AGGIORNAMENTO E FORMAZIONE: UN MUST

L'aggiornamento tecnologico e normativo è oggi imprescindibile per professionisti e aziende: in quest'ottica AiCARR offre formazione di alto standard teorico e applicativo attraverso AiCARR Formazione, business unit di AiCARR Educational srl, società certificata ISO 9001:2015.

AiCARR Formazione è provider di CNII e CNPI per i crediti formativi professionali e i suoi corsi, condotti da accademici e professionisti selezionati fra i migliori esperti del settore HVAC&R, sono rivolti a progettisti, tecnici, manutentori, personale tecnico e commerciale di Enti e industrie, studenti e ricercatori.

SE LE IDEE CIRCOLANO, ACQUISTANO PIÙ FORZA

AiCARR pubblica gli atti dei convegni, cura l'edizione delle collane dei volumi tecnici, delle guide e dei vademecum, invia la newsletter quindicinale con le notizie sulle novità associative, editoriali, normative, legislative e di formazione; è distributore esclusivo per l'Italia delle pubblicazioni e norme ASHRAE e applica ai Soci condizioni favorevoli per l'acquisto delle norme CEI e sconti sulle pubblicazioni di importanti editori tecnici.

La biblioteca propone un'ampia selezione di titoli tecnico-scientifici in libera consultazione.

Sul sito www.aicarr.org e attraverso la App, scaricabile da Google Play, è anche possibile consultare articoli tecnici e la rassegna news. Inoltre, i Soci ricevono gratuitamente il periodico AiCARR Journal, organo ufficiale dell'Associazione.

I sistemi radianti rappresentano la principale novità degli ultimi anni nel mondo della climatizzazione. Sono stati riscoperti nell'ultimo decennio, grazie anche a ottime realizzazioni, e ora sono divenuti particolarmente attraenti anche per l'utente finale. È invece una novità molto recente il loro uso nella climatizzazione estiva, come lo è anche l'utilizzo di sistemi a soffitto o a parete.

Il testo racchiude l'esperienza fatta sul campo dall'Autore nella collaborazione pluriennale con la RHOSS (gruppo IRSAP). Dal punto di vista didattico, il libro segue una serie di corsi per progettisti di qualunque livello, tenuti negli ultimi tre anni con cadenza quasi mensile.

Il volume aiuta a progettare un sistema radiante, considerando con attenzione tutti i parametri che ne influenzano le prestazioni. Particolare attenzione è posta nel funzionamento estivo, periodo in cui le svariate formule di dimensionamento semplificate presenti in letteratura si dimostrano poco efficaci e possono portare ad errori anche grossolani. Il testo analizza lo scambio termico tra sistemi radianti e persone e tra sistemi radianti e superfici, descrivendo i parametri che influenzano il comfort termico, e si inoltra poi nella descrizione delle varie tipologie di sistemi radianti.

Michele Vio si è laureato nel 1984 in Ingegneria Meccanica ad indirizzo Termotecnico all'Università di Padova, con una tesi dedicata all'inserimento degli impianti di climatizzazione nel restauro degli edifici storici. È stato direttore tecnico di un'azienda installatrice di cui era anche socio. Attualmente è contitolare dello Studio Associato Vio di Venezia e opera come consulente di aziende costruttrici di componenti per la climatizzazione dell'aria. È docente nei corsi AiCARR, la più importante associazione culturale italiana sul condizionamento dell'aria, di cui è stato anche membro di giunta ed è stato eletto Presidente nazionale per il triennio 2011-2013. Si occupa prevalentemente di sistemi di condizionamento dell'aria con particolare riguardo ai problemi energetici legati alla produzione di energia frigorifera e allo sfruttamento del free-cooling.

Si occupa anche di cogenerazione. Ha pubblicato oltre 150 lavori sulle riviste specializzate italiane ed estere, con le quali collabora attivamente, e ha partecipato a numerosi convegni in qualità di relatore, molto spesso ad invito. Ha vinto il premio biennale AiCARR "Roberto Sanguineti" per la migliore pubblicazione nel settore della climatizzazione nel 1996 e nel 2002.

AiCARR, Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione, è un'associazione culturale no profit. Dal 1960 crea e promuove cultura e tecnica per il benessere sostenibile, occupandosi di uso consapevole dell'energia e delle risorse naturali e di innovazione delle infrastrutture energetiche, sia nel settore impiantistico che in quello edilizio. AiCARR conta oltre 2.600 Soci fra progettisti, costruttori di macchine, installatori, manutentori, accademici, ricercatori, studenti, funzionari di Enti e Agenzie governative e di istituzioni nazionali e internazionali.

La Collana AiCARR propone testi tecnici elaborati da Soci e selezionati dalla Commissione Editoria AiCARR, traduzioni di Linee Guida pubblicate da associazioni internazionali quali REHVA e ASHRAE e le Guide AiCARR realizzate dai Comitati Tecnici dell'Associazione.

AiCARR - Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione - **www.aicarr.org**

CODICE CSR

www.editorialedelfino.it

ISBN 978-88-97323-00-6



Euro 39,00

Questo volume approvato dal balancino
e da considerarsi copia SAGGIO - CAMPIONE GRATUITO fuori commercio
(vendita e altri atti di disposizione vietati: art. 17, e 2, l. 633/1941).
Esente da IVA (D.P.R. 26/10/1972, n. 633, art. 2, lett. d),
Esente da bolli di accompagnamento (D.P.R. 6/10/1978, n. 627, art. 4, n. 6).

MICHELE VIO
CLIMATIZZAZIONE
CON SISTEMI RADIANTI
ISBN 978-88-97323-00-6