

Titoli pubblicati

1. Il condizionamento dell'aria

Problematiche tecniche e ambientali
a cura di Renato Lazzarin

2. Celle a combustibile

Tecnologia e possibilità applicative
Marco Noro

3. Prontuario dei termini per il condizionamento dell'aria

Scienza – Applicazioni – Tecnologia
Carmine Casale

4. Ventilazione e dislocamento

Le nuove frontiere della climatizzazione
AA.VV.

5. La rivoluzione elettrica

Cosa è cambiato nella produzione, distribuzione
e nella vendita dell'energia elettrica in Italia
a cura di Renato Lazzarin

6. Guida alle travi fredde

Funzionamento, progetto e applicazioni
AA.VV.

7. Clima interno e produttività negli uffici

Come integrare la produttività nell'analisi del costo del ciclo di vita degli edifici
AA.VV.



RAFFRESCAMENTO E RISCALDAMENTO MEDIANTE SUPERFICI RADIANTI

NUOVE SOLUZIONI PER IL RISCALDAMENTO A BASSA TEMPERATURA
E IL RAFFRESCAMENTO AD ALTA TEMPERATURA

di

Jan Babiak, Bjaren W. Olesen, Dušan Petráš

Traduzione di Stefano P. Corgnati

AGGIORNAMENTI - ERRATA CORRIGE - ADDENDUM

Eventuali integrazioni o revisioni al presente testo saranno disponibili all'indirizzo www.darioflaccovio.it/aggiornamenti. È pertanto consigliabile visitare periodicamente tale pagina o iscriversi da www.darioflaccovio.it alla newsletter gratuita *Informazioni editoriali*, che riporta, tra le altre informazioni, anche gli eventuali aggiornamenti.

INDICE

1. TERMINOLOGIA, SIMBOLI E UNITÀ DI MISURA	
1.1. Termini e definizioni	pag. 11
1.2. Simboli e unità di misura	» 15
2. PRINCIPI BASE DEL RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO RADIANTE	
2.1. Trasmissione del calore	» 17
2.2. Principi di scambio termico radiativo	» 18
2.2.1. Emissività	» 18
2.2.2. Fattori di vista	» 19
3. CONDIZIONI MICROCLIMATICHE INTERNE	
3.1. Comfort termico	» 23
3.1.1. Temperatura operativa	» 24
3.1.2. Temperatura superficiale/Temperatura media radiante	» 25
3.1.3. Differenza verticale di temperatura dell'aria	» 27
3.1.4. Asimmetria della temperatura radiante	» 27
3.1.5. Corrente d'aria e velocità dell'aria	» 27
3.2. IAQ e sistemi di riscaldamento e raffrescamento radiante	» 29
3.2.1. Temperatura e umidità dell'aria	» 30
3.3. Comfort acustico e rumore	» 31
3.3.1. Rumore e sistemi di riscaldamento/raffrescamento radiante	» 31
3.3.2. Rumore e Thermally Active Building Systems (TABS)	» 31
4. TIPOLOGIA DI SISTEMI E POTENZIALITÀ DI RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO	
4.0. Coefficienti di scambio termico tra superficie radiante e ambiente	» 34
4.1. Pannelli radianti per il riscaldamento e raffrescamento	» 37
4.1.1. Descrizione generale	» 37
4.1.2. Potenzialità di riscaldamento e raffrescamento	» 40
4.2. Sistemi radianti per il riscaldamento e raffrescamento con serpentina inglobata	» 40
4.2.1. Descrizione generale	» 40
4.2.2. Resa (potenza specifica) di riscaldamento/raffrescamento	» 45
4.2.3. Verifica dei sistemi radianti	» 55
4.3. Thermally Active Building Systems (TABS, Sistemi edificio termicamente attivi)	» 55
4.3.1. Descrizione generale del sistema	» 56
4.3.2. Resa termica in riscaldamento e raffrescamento	» 58
4.4. Materiali a cambiamento di fase (PCM, Phase Change Materials)	» 65
4.4.1. Sistemi passivi a PCM	» 67
4.4.2. Sistemi attivi a PCM	» 67
5. CONTROLLO E FUNZIONAMENTO	
5.1. Descrizione generale, classificazione	» 70
5.2. Controlli di un impianto di riscaldamento radiante	» 70
5.2.1. Controllo centralizzato	» 71
5.2.2. Controllo singolo	» 71
5.2.3. Termostati/sensori di stanza	» 72
5.2.4. Massa di pavimento	» 73
5.2.5. Sfasamento nel tempo, risposta di tempo	» 73
5.2.6. Duty cycle	» 74
5.2.7. Effetto di autoregolazione	» 74
5.3. Controlli di un impianto di raffrescamento radiante	» 75
5.3.1. Controllo centralizzato	» 77
5.4. Controllo di TABS	» 78
5.5. Esercizio in relazione agli aspetti economici	» 80
5.6. Uso di energia in regime transitorio con strategia di controllo di temperatura alternata ..	» 80
6. FONTI ENERGETICHE	
6.1. Riscaldamento	» 81
6.2. Raffreddamento	» 82
6.3. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici a bassa exergia	» 83
6.3.1. Definizione di qualità e quantità di energia in termini di exergia	» 85

6.3.2. Exergia calda e fredda.....	»	86
6.3.3. Exergia radiante	»	86
6.3.4. Come migliorare il sistema a bassa exergia?	»	87
6.4. Pompe di calore.....	»	88
7. L'INSTALLAZIONE		
7.1. Installazione di tipo A-D, G	»	91
7.1.1. Requisiti generali	»	91
7.1.2. Fondazioni a muri portanti	»	91
7.1.3. Isolamento termico	»	91
7.1.4. Strato protettivo.....	»	94
7.1.5. Tubi ed accoppiamenti	»	94
7.1.6. Bloccaggio dei tubi, supporto dei tubi	»	94
7.1.7. Massetto	»	97
7.1.8. Giunzioni.....	»	97
7.1.9. Posa del massetto	»	97
7.1.10. Riscaldamento iniziale	»	97
7.2. Installazione di TABS	»	97
7.2.1. Calcestruzzo	»	98
7.2.2. Installazione dei tubi.....	»	98
7.2.3. Verifica di integrità	»	100
8. SICUREZZA		
8.1. La durabilità del sistema	»	103
8.1.1. Durabilità dei tubi di plastica	»	104
8.1.2. Tubi plastici, classificazione.....	»	104
8.1.3. Perdita di acqua dal tubo - Errata costruzione	»	105
8.2. Impatto sull'ambiente interno	»	105
8.2.1. Ustioni alle mani	»	106
8.2.2. Danno fisico	»	106
9. APPLICAZIONI	»	107
9.1. Edifici residenziali	»	108
9.2. Uffici	»	109
9.3. Edifici per l'istruzione	»	114
9.4. Centri sportivi	»	116
9.4.1. Piscine	»	116
9.4.2. Riscaldamento a pavimento sopraelevato.....	»	116
9.4.3. Bördeland hall in Magdeburg, Germania	»	117
9.5. Edifici industriali.....	»	117
9.5.1. Spazi di deposito	»	117
9.5.2. Centro industriale e uffici per AIRBUS ad Amburgo, Germania.....	»	118
9.6. Musei.....	»	118
9.6.1. Art Museum in Bregenz, Austria	»	119
9.7. Altri edifici pubblici	»	121
9.7.1. Aeroporto internazionale a Bangkok, Singapore	»	121
9.8. Procedura di progetto del sistema (flow chart).....	»	124
10. STRUMENTI DI PROGETTAZIONE		
10.1. Affidabilità delle simulazioni	»	127
10.2. Strumenti per l'analisi in regime stazionario	»	127
10.3. Strumenti per analisi in regime transitorio	»	128
10.4. Analisi tramite software di un sistema di tipo TABS (esempio)	»	128
10.5. Analisi di TABS tramite FEM	»	129
10.6. Analisi con metodo FEM dello spessore effettivo di una lastra di calcestruzzo attivata termicamente	»	131
<i>Riferimenti bibliografici</i>	»	135

REHVA

Federation of European Heating and Air-Conditioning Associations

REHVA, nata quasi 50 anni fa, è un'organizzazione di professionisti europei che operano nell'ambito del *building services* (riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria). REHVA rappresenta più di 100.000 ingegneri di 30 paesi europei. La principale attività di REHVA è lo sviluppo e la diffusione di tecnologie economiche, energeticamente efficienti e finalizzate al benessere, da impiegarsi nel *building services*. Le attività sono esaminate da un Comitato di supervisori. Ogni membro del comitato è responsabile di uno specifico settore.

Uno di questi settori si occupa delle *REHVA Guidelines* (Linee Guida). I suoi propositi sono di:

- intraprendere attività per la definizione di Linee Guida tecniche nel campo del *building service*;
- definire dei gruppi di lavoro per ciascuna di queste Linee Guida;
- incentivare la distribuzione delle Linee Guida della *REHVA* ai membri e agli altri professionisti;
- supervisionare la qualità delle Linee Guida della *REHVA*.

Numerosi gruppi di lavoro sono attualmente attivi. Tra questi, quello del commissioning degli impianti di condizionamento dell'aria e quello dell'uso della CFD per il progetto della ventilazione in ambiente.

I consumi energetici per il riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e illuminazione costituiscono circa un terzo della domanda di energia primaria del Pianeta. È quindi ovvia la necessità di migliorare l'efficienza energetica degli edifici, sia attraverso il risparmio di energia sia attraverso il miglioramento della modalità con cui l'energia è impiegata. L'idea di impiegare sistemi a bassa exergia si fonda sull'uso di impianti a bassa temperatura in riscaldamento e ad alta temperatura in raffrescamento, presenti già in modo massiccio sul mercato.

Gli impianti a bassa exergia rendono possibile un uso più ampio delle fonti di energia rinnovabile e lo sviluppo di soluzioni innovative di integrazione tra gli impianti e l'edificio.

Questa Guida presenta la teoria dei sistemi a bassa exergia, iniziando dalle basi dello scambio termico; quindi si concentra sugli aspetti di progetto e di esercizio. La Guida si indirizza a progettisti di impianti, installatori, architetti e proprietari di edifici. Attraverso le sue numerose illustrazioni ed esempi è anche un valido testo per esperti nel campo dei servizi agli edifici.

La Guida è scritta da un gruppo di esperti di grande qualità riconosciuti a livello internazionale nel campo della ricerca, del progetto e della consulenza. Il lavoro è svolto su base volontaria, senza interessi commerciali.

Il Comitato della REHVA desidera esprimere il suo più vivo ringraziamento al gruppo di lavoro, ringraziamento che si estende alle organizzazioni e alle società che hanno supportato finanziariamente il lavoro.

OLLI SEPPÄNEN

Presidente REHVA e Coordinatore del Comitato Tecnico REHVA.

STATI MEMBRI DI REHVA

Austria	Gran Bretagna	Romania
Belgio	Grecia	Russia
Bosnia Erzegovina	Ungheria	Serbia Montenegro
Bulgaria	Irlanda	Slovacchia
Croazia	Italia	Slovenia
Repubblica Ceca	Lettonia	Spagna
Danimarca	Lituania	Svezia
Estonia	Olanda	Svizzera
Finlandia	Norvegia	Turchia
Francia	Polonia	
Germania	Portogallo	

REHVA

Task Force sul riscaldamento a bassa temperatura

Questo lavoro è stato sviluppato da REHVA Task Force sul riscaldamento a bassa temperatura e raffrescamento a alta temperatura.

La Task Force si è organizzata durante i workshop della Conferenza “Clima 2005” a Losanna (ottobre 2005) e della conferenza “In Cold Climate” a Mosca 2006, dove i risultati della Task Force sono stati presentati e discussi. I risultati sono stati anche proposti alla Assemblea Generale REHVA a Vilnius 2004, Losanna 2005 e Mosca 2006.

I membri della Task Force sono:

Jan Babiak	Slovak University of Technology, Bratislava
Bjarne W. Olesen	ICIEE, MEK, Technical University of Denmark
Dušan Petráš	Slovak University of Technology, Bratislava

REVISORI

Il libro è stato revisionato dalle persone elencate di seguito, le quali hanno fornito validi suggerimenti che hanno consentito di apportare importanti miglioramenti.

László Bánhidi	Budapest University of Technology and Economics, Hungary
Derrick Braham	CIBSE – Chartered Institution of Building Services Engineers, United Kingdom
Reto M. Hummelshøj	Section Manager, Energy – COWI a/s, Denmark
Dietrich Schmidt	Fraunhofer Institute for Building Physics, Germany
Peter Novak	Energotech d.o.o. Slovenia

RINGRAZIAMENTI

La Task Force desidera esprimere gratitudine a Verity e Derrick Braham che hanno curato l’aspetto linguistico. Questo è stato particolarmente importante perché nessuno degli autori è di madrelingua inglese.

Un ringraziamento va a Mr Jarkko Narvanne per l'impostazione del layout finale della Guida.

1

Terminologia, simboli e unità di misura

1.1. TERMINI E DEFINIZIONI

I termini e le definizioni sono conformi alle principali norme CEN e ISO: EN ISO 7730, EN ISO 7726, EN 12828, CEN Report CR1752, EN 15377, EPBD - CEN TC228/WG4.

Apporti termici

Flusso termico generato all'interno dell'ambiente (apporti interni) o entrante in ambiente (apporti esterni, es. apporti solari).

Building automation e controllo

Prodotti, software e servizi di ingegneria per il controllo automatico, il monitoraggio, l'ottimizzazione e la gestione finalizzati al raggiungimento dell'efficienza energetica, economica e la sicurezza del sistema edificio-impianti.

Building service

Servizi di natura tecnica per l'edificio al fine di garantire gradevoli condizioni di comfort ambientale, illuminazione, acqua calda sanitaria e altre richieste dell'edificio.

Circuito

Parte di sistema connessa ad una distribuzione che può essere autonomamente attivata e controllata.

Coefficiente di scambio termico liminare

Coefficiente che tiene conto degli scambi termici convettivi e radiativi tra la superficie riscaldante/raffrescante e l'ambiente circostante.

Corrente d'aria

Involontario raffreddamento locale di una parte del corpo dovuto al moto e alla temperatura dell'aria.

Curva caratteristica

Curva che stabilisce la relazione tra la potenza termica specifica e la differenza di temperatura tra fluido e ambiente. Essa dipende da riscaldamento/raffrescamento della superficie (pavimento/parete/soffitto) e modalità di posizionamento delle serpentine.

Demand controlled ventilation

Sistema di ventilazione in cui la portata d'aria è regolata da un sistema di controllo automatico in funzione del livello di contaminanti in ambiente.

Distributore

Punto di connessione tra diversi circuiti.

Efficacia di ventilazione

Indice espresso dalla relazione tra la concentrazione di contaminante nell'aria espulsa e quella nella zona di inalazione.

Fabbisogno energetico per riscaldamento/raffrescamento ambientale

Energia immessa/estratta dall'ambiente al fine di bilanciare le richieste di condizionamento (riscaldamento/raffrescamento includendovi la deumidificazione) ambientale di uno spazio confinato.

Flusso termico specifico

Flusso termico tra la superficie calda/fredda e lo spazio circostante, diviso per l'area della superficie stessa.

Flusso termico specifico di progetto

Flusso termico specifico richiesto per bilanciare la potenza termica richiesta in ambiente in condizioni di progetto.

Pannelli radianti a soffitto per il riscaldamento e raffrescamento

Controsoffitto, tipicamente metallico, con temperature del fluido termovettore prossime a quella superficiale del pannello.

Percentuale Prevista di Insoddisfatti (PPD)

Indice che definisce la percentuale di persone insoddisfatte appartenente ad un grande gruppo di individui rispetto alla percezione termica in un ambiente confinato.

Portata d'aria esterna

Portata d'aria esterna condizionata e immessa in ambiente.

Potenza termica di riscaldamento/raffrescamento in condizioni di progetto

Potenza termica richiesta alla superficie riscaldante/raffrescante in condizioni di progetto.

Requisiti di progetto

Insieme di requisiti di carattere ambientale (comfort termico, illuminotecnico, acustico e qualità dell'aria), energetico e relativi al controllo in fase di progetto, e successivamente impiegati per la verifica in esercizio degli impianti.

Ricambio orario d'aria

Quantità di aria esterna immessa in ambiente, espressa in numero di volumi ambiente ricambiati all'ora.

Sistema di condizionamento dell'aria

Combinazione di tutti quei componenti richiesti per ottenere il desiderato trattamento dell'aria al fine di mantenere negli ambienti occupati temperatura, umidità e qualità dell'aria controllate.

Sistema (ad acqua) radiante a pavimento/soffitto/parete per il riscaldamento e raffrescamento

Sistemi a pavimento/soffitto/parete in cui le serpentine sono alimentate da acqua (additivata o meno).

Sistemi "annegati" di riscaldamento e raffrescamento

Sistema costituito da circuiti di tubazioni annegati a pavimento, soffitto o parete, dotato dei propri sistemi di controllo.

Sistemi "annegati" isolati rispetto alla struttura principale dell'edificio

Sistemi "annegati" a pavimento, soffitto o parete ma termicamente isolati rispetto alla struttura principale dell'edificio.

Sorgente energetica

Sorgente dalla quale può essere estratta o ricavata energia o per via diretta o attraverso un processo di conversione/trasformazione.

Superficie condizionata

Superficie di pavimento condizionata, escluse la parti non abitabili.

Superficie non attiva

Superficie non interessata dalla copertura delle serpentine per il riscaldamento/raffrescamento.

Superficie occupata

Superficie all'interno della superficie condizionata che è occupata per lunghi periodi. Normalmente, la zona è delimitata da 1,0 m dai muri/finestre esterne e dai sistemi di condizionamento e 0,5 m dalle pareti interne.

Superficie perimetrale

Superficie riscaldata/raffrescata a temperatura maggiore o minore. È generalmente una superficie di ampiezza massima di 1 m adiacente ai muri esterni. Non è una area occupata.

Superficie (attiva) riscaldante e raffrescante

Superficie di pavimento, soffitto o pareti, interessata dalla copertura delle serpentine per il riscaldamento/raffrescamento (considerando nella sua zona perimetrale una distanza dalle serpentine pari a metà dell'interasse tra le serpentine e comunque non superiore a 0,15 m).

TABS (Thermally-Active Building System)

Sistema radiante per riscaldamento/raffrescamento con la serpentina annegata e termicamente accoppiata alla struttura dell'edificio.

Ventilazione

Processo di immissione e rimozione dell'aria da un ambiente confinato attraverso processi naturali o meccanici.

Vettore energetico

Fluido impiegato per produrre e/o trasportare l'energia al fine di mettere in gioco processi di scambio termico o altri processi fisici.

Voto Medio Previsto (PMV)

Indice che definisce il voto medio (su una scala a 7 punti) attribuito alla sensazione termica da parte di un ampio gruppo di persone.

Zona occupata

Parte dello spazio progettata per essere occupato da persone e dove i requisiti di progetto devono essere soddisfatti.

Zona termica

Parte di uno spazio confinato a cui è attribuita una certa temperatura di set-point, e nel quale essa non presenta significative variazioni; il controllo avviene con uno specifico sistema di riscaldamento/raffrescamento/ventilazione.

1.2. SIMBOLI E UNITÀ DI MISURA

Simbolo	Quantità	Unità
a_B	Fattore di rivestimento superficiale	-
a_D	Fattore di diametro esterno della tubazione	-
A	Area	m^2
A_K	Fattore di correzione di contatto	-
a_k	Area di elemento di edificio (k) a contatto con il terreno	m^2
a_T	Fattore di interasse	-
a_u	Fattore di copertura	-
A_{WL}	Fattore di conduzione termica	-
B	Fattore di tipologia di sistema	$W/(m^2 \cdot K)$
B'	Parametro caratteristico	
$D = d_a$	Diametro esterno della tubazione	m
ε_t	Emissività	-
f_{g1}	Fattore di correzione che tiene conto dell'influenza della variazione annuale della temperatura esterna	-
f_{g2}	Fattore di riduzione delle temperature che tiene conto della differenza tra la temperatura esterna media annuale e la temperatura esterna di progetto	-
F_{max}	Fattore di vista, massimo	-
F_{P-N}	Fattore di vista tra persona e pareti del locale	-
h	Altezza di una superficie fredda	m
h_t	Coefficiente di scambio termico liminare	$W/(m^2 \cdot K)$
H_{Tig}	Coefficiente di trasmissione termica verso il terreno	W/m
K_H	Coefficiente di scambio termico per trasmissione equivalente	$W/(m^2 \cdot K)$
$m_{H,sp}$	Portata massica d'acqua nelle serpentine in condizioni specifiche di progetto	kg/s
m_T	Coefficiente di interasse delle serpentine	m
m_u	Fattore di spessore del rivestimento	m
P	Perimetro del pavimento radiante	m
q	Flusso termico specifico	W/m^2
q_1	Flusso termico specifico dal pavimento (verso l'alto)	
q_2	Flusso termico specifico dal soffitto (verso il basso)	
R	Resistenza termica	$m^2 \cdot K/W$
s	Spessore	m
T	Interasse tra le tubazioni	m
U	Trasmittanza termica	$W/(m^2 \cdot K)$
$U_{equiv,k}$	Trasmittanza termica dell'elemento di edificio (k)	$W/(m^2 \cdot K)$
x	Distanza dalla superficie fredda	M
β	Coefficiente di espansione termica	$10^{-6}K$
$\Delta\theta$	Differenza di temperatura	K
θ	Temperatura	$^{\circ}C$
λ	Conducibilità termica	$W/(m \cdot K)$
v_{max}	Velocità dell'aria, massima	m/s

2

Principi base del riscaldamento e raffreddamento radiante

I fattori fondamentali che influenzano la capacità di riscaldamento e raffreddamento di un sistema idronico radiante sono il coefficiente di scambio termico tra la superficie radiante e l'ambiente circostante (coefficiente di scambio termico "totale" = convezione + irraggiamento), la minima e massima temperatura superficiale (basate sui requisiti di comfort), il punto di rugiada dell'ambiente, lo scambio termico tra la serpentina e la superficie radiante, l'emissività della superficie radiante e i fattori di vista tra le superfici, e tra le superfici e gli occupanti.

2.1. TRASMISSIONE DEL CALORE

Sono tre i meccanismi fisici che descrivono la trasmissione del calore:

- conduzione;
- convezione;
- irraggiamento.

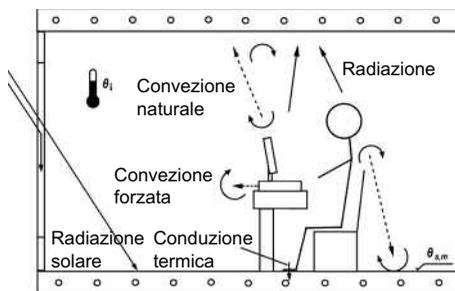


Figura 2.1
Modello di bilancio termico in un locale con sistema di riscaldamento/raffreddamento radiante [21]

Il flusso di calore per conduzione ha luogo nei corpi solidi e la sua entità è influenzata dalle proprietà termofisiche del materiale. I flussi di calore attraverso muri, soffitti o le scarpe di una persona rappresentano tipici esempi (figura 2.1). La conduzione ha una influenza diretta sul flusso termico tra la superficie del pavimento e il piede della persona, mentre l'aria ambiente non ne è direttamente influenzata.

Un importante meccanismo conduttivo ha luogo tra i tubi ove fluisce l'acqua e la superficie radiante nel locale. Questo flusso conduttivo è influenzato principalmente da tipo di tubo (diametro, spessore materiale), distanza tra i tubi e resistenza del materiale interposto tra tubo e superficie.

La convezione di calore ha sede tra aria e superfici. Essa può essere libera o forzata. Differenze di temperatura o di densità sono i motori della convezione libera. Esempi tipici sono il flusso di aria fresca nei pressi di una vetrata fredda, o il moto di aria calda ascendente dal corpo umano (pennacchio termico).

In convezione forzata l'aria lambisce a elevata velocità la superficie, come ad esempio l'aria movimentata da un ventilatore o da un condizionatore. Il flusso termico convettivo coinvolge direttamente l'aria e quindi, direttamente, ne influenza la temperatura.

L'irraggiamento è il meccanismo di scambio termico che si manifesta attraverso un flusso di onde elettromagnetiche (nel range tra 0,8 - 400 μm) tra due superfici a diversa temperatura. Le onde elettromagnetiche si propagano anche nel vuoto alla velocità della luce. Quindi l'irraggiamento non ha una influenza diretta sulla temperatura dell'aria.

I principi dello scambio termico radiativo sono esaminati in dettaglio nel paragrafo 2.2. La radiazione ad elevata lunghezza d'onda riscalda le superfici circostanti come il mobilio o le altre pareti, le quali "indirettamente" riscaldano l'aria [21].

2.2. PRINCIPI DI SCAMBIO TERMICO RADIATIVO

Lo scambio termico radiativo che ha luogo tra due superfici interne è fortemente influenzato dal fattore di vista tra la i -esima (superficie emettente) e la j -esima superficie (persona), nonché dalla emissività delle superfici stesse. La forma caratteristica dello spettro di emissione dipende dalla lunghezza d'onda e quindi dalla frequenza. La radiazione ad alta lunghezza d'onda, come l'infrarosso e la radiazione termica tra superfici interne, si manifesta nel range 0,8 - 100 μm . La bassa lunghezza d'onda come la radiazione solare si manifesta tra 0,3 - 3,0 μm mentre la luce tra 0,4 - 0,7 μm .

2.2.1. Emissività

La predisposizione allo scambio radiativo delle superfici varia con la lunghezza d'onda. Dal punto di vista teorico, l'emissività di una superficie (ε) può essere espressa come rapporto tra il flusso radiante totale emesso (q) rispetto a quello totale di un corpo nero (q_0). L'emissività di una superficie varia tra 0 - 1, dove 1 corrisponde alla emissività di un corpo nero.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_0} \quad (2.1)$$

Generalmente, le superfici emettenti comuni possono raggiungere emissività di 0,95, corrispondente alla radiazione ad alta lunghezza d'onda tra superfici interne. Questo valore non può essere applicato a superfici metalliche che presentano emissività più basse: questo fatto deve essere considerato.

Un ulteriore fattore che influenza significativamente la radiazione a bassa lunghezza d'onda è il colore della superficie. Questo effetto si manifesta in particolare nei confronti della radiazione solare o con sorgenti luminose a bassa lunghezza d'onda: ciò può essere utilizzato favorevolmente per azioni di isolamento passivo.

Al fine di diminuire lo scambio termico radiativo, alcuni accorgimenti sono di particolare utilità. Il rivestimento metallico applicato a soffitti o superfici laterali, grazie ai processi di riflessione della radiazione, può incrementare l'azione raffrescante del pavimento radiante, creando una sensazione di benessere ambientale riducendo la domanda energetica. Questa applicazione è nota con il termine inglese "in ice-rinks": si veda l'aeroporto di Bangkok al paragrafo 9.7.

2.2.2. Fattori di vista

I fattori di vista stabiliscono la correlazione tra forma geometrica, dimensione (area) e distanza tra due oggetti (per esempio persona e superficie della stanza). La somma tra i fattori di vista tra la persona e le superfici di una stanza è pari a 1. Il fattore di vista tra una persona in piedi o seduta e le superfici può essere ricavato da diagrammi (figure 2.2, 2.3, EN ISO 7726 [C17]) o calcolato sulla base delle equazioni 2.2, 2.3 e 2.4.

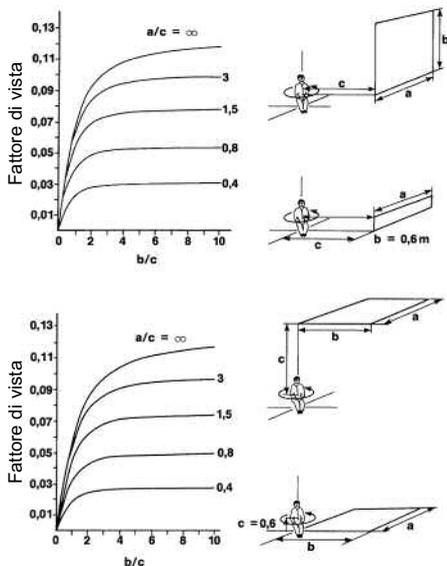


Figura 2.2
Valore medio del fattore di vista tra persona seduta e a) rettangolo orizzontale b) rettangolo verticale [C17]. Asse y: fattore di vista, asse x: fattore geometrico

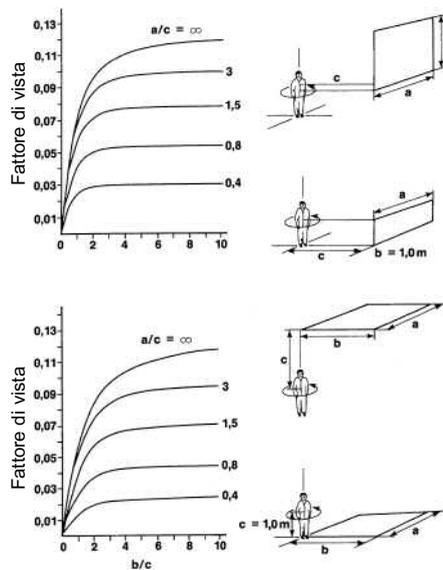


Figura 2.3
 Valore medio del fattore di vista tra persona in piedi e a) rettangolo orizzontale b) rettangolo verticale [C17]. Asse y: fattore di vista, asse x: fattore geometrico

Non essendo nota la direzione con cui la persona “vede” la superficie, direzione che spesso cambia, si raccomanda l’uso dei diagrammi omni-direzionali. Come la posizione della persona influenzi la temperatura media radiante e quindi quella operativa è discusso negli esempi che seguono.

Fattore di vista (EN ISO 7726):

$$F_{p-N} = F_{max} \left(1 - e^{-(a/c)/\tau}\right) \left(1 - e^{-(b/c)/\gamma}\right) \quad (2.2)$$

$$\tau = A + B(a/c) \quad (2.3)$$

$$\gamma = C + D(b/c) + E(a/c) \quad (2.4)$$

Tabella 2.1. Coefficienti dell’equazione per il calcolo dei fattori di vista [C17]

	F_{max}	A	B	C	D	E
PERSONA SEDUTA , Figura 2.2a Superficie verticale: parete, finestra	0,118	1,216	0,169	0,717	0,087	0,052
PERSONA SEDUTA , Figura 2.2b Superficie orizzontale: pavimento, soffitto	0,116	1,396	0,130	0,951	0,080	0,055
PERSONA IN PIEDI , Figura 2.3a Superficie verticale: parete, finestra	0,120	1.242	0,167	0,616	0,082	0,051
PERSONA IN PIEDI , Figura 2.3b Superficie orizzontale: pavimento, soffitto	0,116	1.595	0,128	1.226	0,046	0,044

Il centro di una persona seduta è 0,6 m (1,0 m se in piedi) dal pavimento, mentre ovviamente varia nel caso del soffitto (per una persona seduta 2,4 m in una stanza di 3,0 m di altezza). Quindi, nei confronti della persona, il pavimento presenta normalmente il fattore di vista maggiore rispetto alle altre superfici (pareti, finestre, soffitto).

A titolo di esempio, sono presentati in figura 2.4 un tipico ufficio e un ampio ambiente industriale. È ovvio che essendo il pavimento la superficie più prossima alla persona seduta o in piedi nel centro della stanza, lo scambio termico radiativo con il pavimento ha il peso più forte sulla temperatura media radiante percepita dalla persona. Questo peso aumenta al crescere dell'altezza del locale come mostrato in tabella 2.2. Il fattore di vista del pavimento in un ambiente industriale è 1,5 volte più grande che in un ufficio.

Per una persona al centro di un ufficio, il fattore di vista con il pavimento è 0,32 se seduta e 0,24 se in piedi. In un ambiente industriale è 0,48 sia seduta che in piedi in quanto la differenza di quota tra le due posizioni è trascurabile rispetto all'altezza dell'ambiente e alle sue dimensioni.

Tabella 2.2. Fattori di vista tra occupante al centro e superfici di un ambiente per due differenti locali

Superficie	Fattore di vista F_{p-N}			
	Locale ufficio		Locale industriale	
	Seduto	In piedi	Seduto	In piedi
Pavimento	0,32	0,24	0,48	0,48
Soffitto	0,12	0,12	0,22	0,22
Parete (di fronte)	0,03	0,04	0,03	0,03
Finestra	0,06	0,06	-	-
Parete (dietro)	0,09	0,10	0,03	0,03
Parete (lato destro)	0,19	0,22	0,12	0,12
Parete (lato sinistro)	0,19	0,22	0,12	0,12

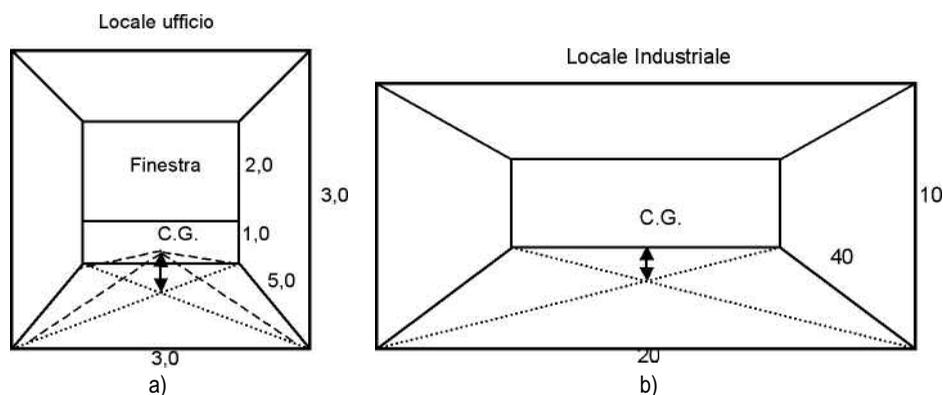


Figura 2.4
Layout di: a. locale ufficio; b. locale industriale; C.G. (Centre of Gravity) rappresenta il centro della persona seduta/in piedi

Per una persona al centro di un pavimento 6 per 6 m, il fattore di vista con il pavimento è 0,40 se seduta e 0,37 se in piedi. Se la temperatura del pavimento cambia di 5K e tutte le altre superfici mantengono la loro temperatura, allora la temperatura media radiante cambia di 2K. La temperatura operativa cambia di 1K. Detto in altro modo, 5K di variazione della temperatura superficiale del pavimento hanno circa lo stesso effetto della variazione di 2K della temperatura dell'aria.

Invece, il fattore di vista con il soffitto varia tra 0,15 e 0,20, cioè 1K di variazione di temperatura sul pavimento produce lo stesso effetto sulla temperatura media radiante della variazione di circa 2,5K della temperatura del soffitto [31].