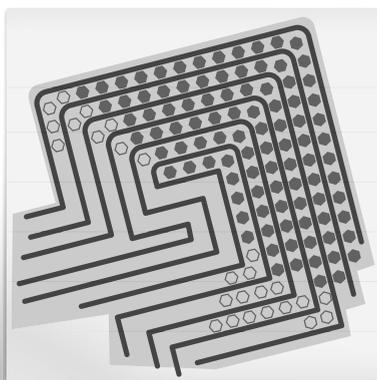


Valerio Di Stefano

MANUALE DEGLI IMPIANTI RADIANTI

INTEGRAZIONE E OTTIMIZZAZIONE NEGLI IMPIANTI

AGGIORNATO ALLA UNI EN 1264-2:2013



SOFTWARE INCLUSO

APPLICATIVI PER EFFETTUARE COMPUTI METRICI, ANALISI DELLA RESA E DEL COMFORT OTTENIBILE DA UN PAVIMENTO RADIANTE, VERBALE DI COLLAUDO E SCHEMI IDRAULICI EDITABILI

Glossario (principali termini tecnico-normativi), **F.A.Q.** (domande e risposte sui principali argomenti), **Test iniziale** (verifica della formazione di base), **Test finale** (verifica dei concetti analizzati)



GRAFILL

Valerio Di Stefano

MANUALE DEGLI IMPIANTI RADIANTI

ISBN 13 978-88-8207-575-0

EAN 9 788882 075750

Manuali, 161

Prima edizione, settembre 2014

Di Stefano, Valerio <1980->

Manuale degli impianti radianti / Valerio Di Stefano. –

Palermo : Grafill, 2014.

(Manuali ; 161)

ISBN 978-88-8207-575-0

1. Impianti di riscaldamento.

697 CDD-22

SBN Pal0272777

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Il presente volume è **disponibile anche in versione eBook** (formato *.pdf) compatibile con **PC, Macintosh, Smartphone, Tablet, eReader**.

Per l'acquisto di eBook e software sono previsti pagamenti con conto corrente postale, bonifico bancario, carta di credito e paypal. Per i pagamenti con carta di credito e paypal è consentito il download immediato del prodotto acquistato.

Per maggiori informazioni inquadra con uno smartphone o un tablet il codice QR sottostante.



I lettori di codice QR sono disponibili gratuitamente su Play Store, App Store e Market Place.

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

Finito di stampare nel mese di settembre 2014

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

*Alle persone che mi sono sempre state vicine
e con le quali ho condiviso bellezza e amarezze*

Ringraziamenti

Desidero ringraziare gli amici e ottimi colleghi R. Rinaldi, F. Bava, F. Liuzza, E. Milanesi e A. Sindoni che si sono gentilmente offerti di dare alcuni preziosi suggerimenti per la stesura di questo testo.

Un ringraziamento doveroso ai miei colleghi della Georg Fischer che hanno sviluppato a suo tempo alcune immagini e ad A. Mazzali che ha offerto un vivo supporto per testare i programmi allegati; in particolare un ringraziamento alla Direzione che ha accettato lo sviluppo di un testo di questo tipo.

Desidero esprimere gratitudine verso Fornitori ed Enti che producono e mettono pubblicamente a disposizione ottima documentazione tecnica della quale mi sono avvalso per dare un taglio concreto e documentato ai concetti discussi.

Un ringraziamento particolare a Te, amico lettore, che vorrai segnalare osservazioni, errori o semplicemente esprimere una considerazione su quanto sviluppato all'indirizzo valerio.distefano@libero.it.

Nota bene

Con il decreto del Presidente della Repubblica 12 gennaio 1982, n. 802 è stato adottato il Sistema Internazionale per la misura delle grandezze fisiche.

Fermo restando il comodo utilizzo di altri sistemi di misura, nel presente documento si è cercato di rispettare la rappresentazione secondo il S.I., a meno di casi in cui questo avrebbe costituito un solo appesantimento formale.

I sistemi radianti devono essere progettati e realizzati da personale qualificato, secondo la vigente normativa e le istruzioni tecniche dei costruttori: l'autore declina ogni responsabilità per un uso improprio delle informazioni contenute nel presente testo.

In questo manuale sono stati inseriti esempi di prodotti e di sistemi commerciali traendo immagini e soluzioni dal materiale informativo disponibile pubblicamente in rete. Si confida sul fatto che nessuno dei Fornitori citati consideri l'uso di tale documentazione in questo contesto impropria o fuorviante e l'autore è disponibile a valutare eventuali riserve.

L'autore, fra l'altro, vuole precisare che la scelta di alcuni Fornitori è legata esclusivamente a personali esperienze e/o conoscenze e non vuole essere riduttiva nei riguardi dei molti ottimi Fornitori che non sono stati citati per esigenze editoriali.

Resta quindi inteso che le citazioni seguenti hanno esclusivamente finalità didattiche e esulano da possibili scopi commerciali, che non possono essere ricercati.

INDICE

1. PRINCIPI GENERALI	p.	1
1.1. Benessere termoigrometrico	"	1
1.1.1. Il sistema di termoregolazione del corpo umano	"	2
1.1.2. I meccanismi di termoregolazione del corpo umano	"	2
1.1.3. Il bilancio energetico del corpo umano	"	3
1.1.4. L'equazione del benessere	"	14
2. CRITERI DI ANALISI DEI RISPARMI ENERGETICI	"	20
2.1. Risparmio energetico	"	20
2.1.1. Indicatori economici-ambientali	"	20
2.1.2. Applicazione ai consumi energetici di un sistema radiante	"	24
3. PROGETTAZIONE DELLO SCAMBIO TERMICO	"	49
3.1. Scambio termico radiativo	"	49
Fattori che influenzano lo scambio per irraggiamento	"	49
3.1.2. Fattori che influenzano lo scambio per convezione	"	53
3.1.3. Simultaneo scambio per convezione e irraggiamento	"	56
4. STRUTTURA DI UN IMPIANTO RADIANTE	"	62
4.1. Architettura generale	"	62
4.2. Soluzioni radianti	"	64
4.2.1. Soluzioni con supporto inerziale	"	64
4.2.2. Soluzione con pannelli prefabbricati e "a secco"	"	67
4.2.3. Soluzione ad attivazione termica della struttura o TABS	"	70
4.2.4. Soluzioni capillari e microcapillari	"	73
4.2.5. Soluzioni speciali in legno e ad attivazione per irraggiamento ...	"	75
4.2.6. Soluzioni speciali	"	76
4.2.7. Soluzioni non idroniche	"	77
4.2.8. Applicazioni tecniche speciali	"	78
4.3. Struttura dello "scambiatore"	"	79
4.3.1. Disposizione geometrica delle tubazioni	"	79
4.3.2. Tipologia di tubazioni	"	81
4.3.3. Il supporto	"	90
4.3.4. Il pannello isolante	"	92
4.3.5. La finitura	"	95
4.4. Elementi di isolamento acustico passivo	"	96

4.4.1.	Criterio normativo.....	p.	97
4.4.2.	Valutazione operativa.....	"	98
5.	PROGETTAZIONE A REGOLA D'ARTE.....	"	99
5.1.	Metodi FEM e FDM.....	"	101
5.2.	Metodo di calcolo della resistenza termica equivalente.....	"	103
5.3.	Metodo di calcolo tramite UNI 1264.....	"	104
5.3.1.	Alcune definizioni.....	"	105
5.3.2.	La curva caratteristica di base.....	"	109
5.3.3.	Limiti di temperatura raccomandati dalla normativa.....	"	110
5.3.4.	Calcolo dell'emissione areica.....	"	114
5.3.5.	La rappresentazione delle temperature limite.....	"	118
5.3.6.	Effetti termici della "caduta" di temperatura.....	"	120
5.3.7.	Criterio di dimensionamento.....	"	122
5.4.	Modifiche delle condizioni operative.....	"	130
5.4.1.	Effetti termici della geometria del pannello.....	"	130
5.4.2.	Effetti dell'isolamento termico.....	"	133
5.4.3.	Effetti termici dell'inerzia del massetto.....	"	135
5.5.	Dimensionamento soluzioni a freddo, a parete e a soffitto.....	"	138
5.5.1.	Metodo secondo UNI 1264-5.....	"	138
5.5.2.	Considerazioni pratiche.....	"	141
5.5.3.	Progettazione secondo curve di resa certificate e metodo EN 14240.....	"	142
6.	PROGETTAZIONE INTEGRATA E SCELTA DEI FORNITORI.....	"	146
6.1.	Dove termina il processo progettuale.....	"	146
6.1.1.	Organi del sistema radiante.....	"	147
6.1.2.	Elaborati tecnici.....	"	149
6.1.3.	La previsione delle fasi di realizzazione, le interferenze e le altre professionalità.....	"	151
6.1.4.	Il contratto d'opera, di appalto e la garanzia (per approfondimenti si rimanda alla legislazione vigente).....	"	152
6.2.	La scelta dei fornitori.....	"	155
6.2.1.	I fornitori di materiale.....	"	155
6.2.2.	L'impresa.....	"	156
6.2.3.	Le professioni intellettuali.....	"	156
7.	INSTALLAZIONE, COLLAUDO E MONITORAGGIO (A REGOLA D'ARTE).....	"	157
7.1.	Le condizioni al contorno.....	"	157
7.1.1.	La preparazione del cantiere.....	"	158
7.1.2.	Conseguenze termiche e igrometriche della presenza dell'impianto.....	"	161
7.2.	L'installazione.....	"	163

7.2.1.	Impianti inerziali	p.	164
7.2.2.	Impianti prefabbricati e non inerziali	"	170
7.2.3.	I giunti	"	174
7.2.4.	Il supporto inerziale	"	179
7.2.5.	Le condizioni di carico dei pavimenti	"	184
7.3.	Accorgimenti specifici	"	185
7.3.1.	Attraversamenti speciali per servizi elettrici ed idraulici	"	185
7.3.2.	Bagni e locali poveri di superficie disponibile	"	185
7.3.3.	Rivestimenti superficiali esigenti	"	187
7.3.4.	Circuiti a quota superiore rispetto al collettore	"	190
7.3.5.	Coibentazione e accorgimenti speciali per tubi e canali	"	190
7.3.6.	Controsoffitti e contropareti radianti – dettagli importanti	"	192
7.3.7.	Posizionamento di sonde ambientali e di collettori	"	194
7.3.8.	Come si legge lo schema di posa	"	195
7.4.	Avviamento	"	198
7.4.1.	Riempimento	"	198
7.4.2.	Collaudo idraulico	"	199
7.4.3.	Verifica della risposta termica dell'impianto radiante	"	200
7.5.	Gestione e manutenzione	"	200
7.5.1.	Controllo e manutenzione dei dispositivi	"	202
7.5.2.	Messa a riposo e riavvio	"	202
7.5.3.	Guasti	"	202
7.5.4.	Diagnosi termografica	"	203
8.	FONTI ENERGETICHE		
	E CONTROLLO DEL SISTEMA	"	209
8.1.	Confronto tra vettori energetici e tecnologie di impiego	"	210
8.1.1.	Tecnologie di utilizzo dei combustibili fossili	"	212
8.1.2.	Tecnologie di utilizzo della biomassa	"	219
8.1.3.	La pompa di calore	"	221
8.1.4.	Geotermia	"	231
8.1.5.	Integrazione da solare fotovoltaico e termico	"	237
8.2.	Il controllo del fluido termovettore	"	240
8.2.1.	Il controllo della portata	"	241
8.2.2.	Il controllo della temperatura	"	243
8.2.3.	Allarmi e dispositivi di emergenza	"	247
8.2.4.	Logiche di regolazione	"	250
8.3.	Il controllo della qualità dell'aria	"	256
8.3.1.	La sinergia sistema radiante e impianto aeraulico	"	258
8.3.2.	Soluzioni impiantistiche	"	259
8.3.3.	Gli attuatori dei circuiti radianti, le sonde ambiente e la domotica	"	267
8.3.4.	Ventilazione Meccanica Controllata	"	272
8.3.5.	La manutenzione	"	275

APPENDICE 1

VALUTAZIONE BRACCIO DI FLESSIONE DI UNA TUBAZIONE	p.	277
--	----	-----

APPENDICE 2

RIFERIMENTI NORMATIVI	"	282
) Leggi di rilievo.....	"	282
) Norme di rilievo.....	"	282

APPENDICE 3

BIBLIOGRAFIA	"	285
) Libri.....	"	285
) Siti (in ordine di utilizzo).....	"	286
INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE ALLEGATO	"	288
) Introduzione.....	"	288
) Requisiti hardware e software.....	"	288
) Download del software e richiesta della password di attivazione.....	"	288
) Installazione ed attivazione del software.....	"	289

PRINCIPI GENERALI

Se vi chiedessi di definire il “comfort” riceverei molte risposte che spaziano dall’idea di una temperatura ambiente ottimale allo stare a casa in pantofole a vedere un bel film.

Sono tutte definizioni corrette! Il problema semmai è che non sono definizioni esaustive: l’idea alla base e comune delle definizioni spontanee sta nel proporre che il “comfort” attiene alla percezione soggettiva di benessere (quindi alla valutazione psicologica del soggetto), ma anche ad alcuni parametri più scientifici, nel senso che si può cercare di misurarli, confrontarli e tentare una valutazione obiettiva.

Un tentativo più raffinato di definire il comfort deve tenere conto sia della percezione soggettiva, sia di grandezze misurabili. Chi ha studiato il problema ha proposto un’analisi statistica per affrontare l’aspetto soggettivo del comfort, e lo studio di un pacchetto di parametri tecnici per rendere informazioni comunque riproducibili.

L’idea alla base del comfort parte da un principio (ragionevole ma anche in parte assiomatico): chi giudica un ambiente confortevole non sente né caldo, né freddo, non suda o comunque questo non arriva a comportare un disagio ... tutte sensazioni associate a scambi di energia tra corpo e ambiente tramite calore sensibile e latente.

Sembra quindi opportuno affrontare il concetto di comfort in termini energetici e valutare se esistano correlazioni tra flussi di energia e sensazione fisiologica di benessere.

In letteratura il comfort o, più propriamente il benessere termoigrometrico di un ambiente, è definito come quello stato psicofisico nel quale una persona esprime soddisfazione nei confronti dell’ambiente; per ambiente si intende il complesso dei parametri, oggettivi e soggettivi, che determinano la sensazione termica provata da un individuo in determinate condizioni descrivibili in modo riproducibile e misurabile (quindi in maniera scientifica).

Esistono studi approfonditi applicati al comfort dell’organismo umano; si tratta per lo più di analisi sviluppate attraverso approcci empirici coadiuvati da strumenti tipici della termodinamica (scambi di calore uomo-ambiente, equilibrio termico, ...).

Spesso si propone un impianto radiante come l’impianto idoneo per eccellenza a garantire il benessere termoigrometrico: fate attenzione alle trappole dei venditori in quanto una tecnologia, di per sé, non garantisce il “comfort”, ma semplicemente può essere adoperata in maniera più o meno idonea per controllare alcuni parametri correlati al benessere termoigrometrico.

Vediamo di comprendere quali siano tali parametri.

1.1. Benessere termoigrometrico

Tra gli studi e le esperienze condotte nell’analisi del benessere termoigrometrico ci si riconduce in sintesi alla valutazione di 6 parametri di controllo: due parametri sono strettamente riferiti all’uomo: il metabolismo energetico e le proprietà termofisiche dell’abbigliamento, e 4

parametri sono correlati al contesto ambientale: temperatura, velocità e livello di umidità dell'aria e temperatura media radiante, dei quali i primi tre possono essere direttamente controllati con un impianto di climatizzazione e il quarto, essendo funzione delle temperature superficiali dell'ambiente, dipende essenzialmente anche dalle proprietà termotecniche e ottiche delle masse presenti nell'ambiente (pareti, infissi, mobili, impianti, ...) e dagli scambi di energia tra le stesse superfici (per come si indicherà meglio in seguito).

Gli ambienti nei quali è realizzabile il "comfort termoigrometrico" sono anche detti "moderati" in contrapposizione ai "severi" nei quali non è pensabile determinare condizioni generali di comfort, e si può al più evitare che gli occupanti arrivino in condizioni di ipo o iper-termia.

Le condizioni severe si verificano spesso in alcuni luoghi di lavoro, e anche in questi casi la tecnologia radiante può essere adoperata intelligentemente.

La sensazione termica si basa sui meccanismi di scambio termico tra l'uomo e l'ambiente e dipende, quindi, da condizioni generalmente in continua variazione; è stato studiato anche un meccanismo adattativo e psicologico dell'individuo che riesce comunque a modificare il giudizio iniziale di comfort adattandosi ovvero mostrando crescente insoddisfazione.

In linea di principio si può affermare che un essere umano sta bene se si trova in equilibrio energetico con l'ambiente, ovvero quando i flussi di energia in ingresso e uscita sono confrontabili e sono stazionari nel tempo; in questo caso si dice che l'individuo è in stato di "omeotermia".

1.1.1. Il sistema di termoregolazione del corpo umano

Il continuo adattamento dell'organismo umano alle condizioni termo igrometriche esterne è gestito da un sofisticato ed efficace sistema di regolazione biologico, il cui funzionamento può essere simulato da modelli che prevedono la risposta del corpo umano alle condizioni ambientali. Nel modello più semplice il corpo umano è suddiviso in due zone: una esterna, costituita da pelle e tessuti sottocutanei, e un'interna detta nucleo comprendente gli organi vitali.

Esistono poi modelli più complessi che dividono il corpo in compartimenti, ciascuno composto da più strati.

La temperatura del nucleo in un soggetto sano è assunta pari a 37 °C mediamente nel corso della giornata, mentre quella esterna può variare a secondo della zona corporea.

1.1.2. I meccanismi di termoregolazione del corpo umano

Esistono due tipi di termoregolazione, quella vasomotoria (o cardiovascolare) e quella comportamentale.

La termoregolazione vasomotoria interessa i capillari periferici e dipende da fattori locali e da impulsi provenienti dal sistema nervoso simpatico. I capillari sono dotati di sfinteri (valvole) che aprendosi o chiudendosi permettono o impediscono l'afflusso in periferia di sangue proveniente da zone del corpo interne che, trovandosi ad una temperatura superiore a quella della pelle scambiano per convezione energia termica con l'epidermide, innalzandone la temperatura e consentendo un maggiore flusso termico verso l'ambiente.

In ambienti freddi si ha la chiusura delle "valvole" (vasocostrizione) determinando una diminuzione dell'afflusso di sangue verso la periferia e quindi una diminuzione della temperatura superficiale e in definitiva dello scambio termico verso l'esterno; in ambienti caldi si ha la situazione opposta: l'apertura degli sfinteri determina un aumento del flusso sanguigno e quindi un aumento della temperatura superficiale e del flusso termico verso l'esterno.

In particolare è opportuno precisare che l'attivazione di tali meccanismi è dovuta non alla temperatura media dell'ambiente, ma agli scarti tra i valori di temperatura rilevati localmente dai termo recettori e i loro "set-point", il che giustifica la contemporanea attivazione di meccanismi antagonisti in zone differenti del corpo umano.

Quando la termoregolazione vasomotoria non riesce ad assicurare l'omeotermia del nucleo, interviene la termoregolazione comportamentale con la quale, in risposta al freddo, si attiva il meccanismo del brivido e, in risposta al caldo quello della sudorazione.

Il primo consiste in contrazioni muscolari sincrone.

La sudorazione è caratterizzata da più fasi:

- le ghiandole sudoripare situate sotto la pelle secernono il sudore;
- il sudore arriva alla superficie della pelle attraverso appositi condotti;
- il sudore si sparge sulla superficie ricoprendola di un film sottile;
- a regime permanente ed in assenza di gocciolamento, tutto il sudore passa nell'aria come vapore.

Se l'ultima fase non si verifica, per esempio, quando l'aria esterna è satura di vapore, non si ha alcun flusso termico verso l'ambiente e, al limite, si può avere condensazione di vapore sulla pelle. Se la termoregolazione comportamentale non è sufficiente ad assicurare l'omeotermia, si può avere ipotermia o ipertermia.

1.1.3. *Il bilancio energetico del corpo umano*

L'organismo è un sistema termodinamico complesso che sviluppa energia termica per effetto delle reazioni chimiche che in esso hanno sede. Al suo interno, l'energia termica viene trasmessa per conduzione attraverso i tessuti e per convezione attraverso il flusso sanguigno; inoltre c'è scambio diretto tra interno e ambiente sotto forma di calore latente e sensibile nella respirazione e nella traspirazione epidermica. In superficie l'energia termica viene scambiata con l'ambiente per irraggiamento, convezione ed evaporazione; lo scambio conduttivo è solitamente trascurabile e relativo a zone di contatto molto contenute.

In un generico istante può essere scritta la seguente relazione:

$$S = M - W - E_{res} - C_{res} - E_{skin} - C - R - K$$

In cui tutti i termini sono espressi come energia scambiata nell'unità di tempo (potenze medie):

- S rappresenta la variazione di energia interna del corpo nell'unità di tempo;
 M è una misura della potenza termica sviluppata dai processi metabolici;
 W è la potenza meccanica che il corpo cede all'ambiente (se ad esempio zappa il suo orticello o semplicemente spinge il carrellino della spesa);
 E_{res} è la potenza trasferita attraverso la respirazione come carico latente;
 C_{res} è la potenza trasferita attraverso la respirazione come carico sensibile;
 E_{skin} è la potenza trasferita per evaporazione;
 C è la potenza trasferita per convezione;
 R è la potenza trasferita per irraggiamento;
 K è la potenza trasferita per contatto.

I termini sopra esposti dovrebbero essere normalizzati rapportandoli all'area della superficie epidermica del corpo nudo A_b tramite la:

$$A_b = 0,202 W_b^{0,425} H_b^{0,725}$$

In cui:

W_b è la massa corporea [kg];

H_b è la statura [m].

In genere, ed in particolare per l'autore che certamente non è un gigante, si trovano valori poco inferiore ai 2 m², ad esempio 1,8 m².

M, metabolismo

Il corpo umano è un laboratorio chimico in continua attività. L'elaborazione biologica degli alimenti sviluppa energia. La quantità di energia potenziale chimica che all'interno del corpo umano si trasforma in energia termica è correlata al metabolismo, che viene spesso misurato tramite l'unità "met", pari a 58,2 W/m² o 50,0 kcal/hm². La quantità di "met" sviluppata può in prima approssimazione considerarsi funzione della sola attività svolta dal soggetto.

Come è facile intuire una persona seduta a riposo come il Lettore sta sviluppando 1 met.

Una persona che sta facendo del footing arriva a 3,4 met.

Esistono semplici tabelle per stimare l'energia metabolica sviluppata.

W, potenza meccanica

Il corpo umano sviluppa attraverso le contrazioni muscolari del lavoro.

Ad esempio mentre scendiamo le scale l'energia potenziale gravitazionale viene convertita in energia meccanica che deve essere gestita dalle nostre gambe per evitare di sfracellarsi!

Il rendimento medio della "macchina termica uomo" non è eccezionale: è dell'ordine del 20%, ovvero 4/5 del contenuto energetico potenziale chimico ricavato dagli alimenti viene degradato in calore durante l'attività motoria.

E_{res} e C_{res}, evaporazione e convezione durante la respirazione

La variazione di entalpia associata alla miscelazione tra aria espirata e aria ambiente si concretizza in trasferimenti di calore legati a differenza di temperatura e di titolo tra aria espirata e ambiente. Approssimativamente si può considerare il valore di potenza specifica espressa in [W/m²] come somma di un contributo latente e sensibile calcolabili separatamente.

Rispettivamente si ha:

$$E_{res} = 1,72 \cdot 10^{-5} M (5867 - \phi p_{as})$$

- in cui ϕ rappresenta l'umidità relativa [adimensionale];
- p_{as} la tensione di vapore dell'acqua a temperatura ambiente [Pa];

$$C_{res} = 0,0014 M (34 - t_a)$$

- in cui t_a è la temperatura dell'aria [°C].

In definitiva si evidenzia una dipendenza dall'attività svolta, dalla temperatura dell'aria e dall'umidità relativa.

E_{skin} evaporazione dalla pelle

È la somma dei contributi per l'evaporazione normale dalla pelle e per la sudorazione propriamente detta. La relazione è stata sviluppata per condizioni di indumento traspiranti, e deve essere opportunamente corretta per altri usi.

Approssimativamente si può considerare in [W/m²]:

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

In cui:

- ϕ rappresenta sempre l'umidità relativa [adimensionale];
- p_{as} la tensione di vapore dell'acqua a temperatura ambiente [mmHg];
- M indica il metabolismo [met];
- η è un parametro adimensionale.

C, potenza trasmessa per convezione

Si può adoperare la relazione seguente in [W/m²]:

$$C = f_{cl} h_c A_b (t_{cl} - t_a)$$

In cui:

- f_{cl} indica un fattore di abbigliamento empirico pari al rapporto tra la superficie vestita sul totale di superficie corporea [adimensionale];
- h_c è la conduttanza termica convettiva aria-indumenti [W/m²K];
- t_{cl} è la temperatura media superficiale degli indumenti [°C].

Senza entrare nei dettagli, l'ultimo parametro dipende dalla temperatura dell'aria, dei vestiti, dalla velocità relativa soggetto-aria e dall'esposizione all'aria degli indumenti.

Per calcolare la temperatura media superficiale degli indumenti si deve conoscere la resistenza termica degli stessi; in pratica si adopera un parametro indicativo della resistenza termica dell'abbigliamento espresso in unità di misura incoerenti note come "Clo".

La seguente tabella descrive esempi di calcolo del fattore di incremento f_{cl} di superficie corporea attraverso la resistenza I_{cl} [Clo] degli indumenti.

Tabella 1.1. Resistenza termica I_{cl} [Clo] e incremento relativo della superficie corporea tramite il parametro f_{cl}

Indumento	I_{cl}	f_{cl}
Corpo nudo	0,00	1,00
Pantaloni corti	0,10	1,00
Pantaloni corti e camicia leggera	0,35	1,05
Abbigliamento leggero da lavoro	0,60	1,10
Abito e soprabito	1,50	1,15
Abbigliamento clima polare	3,50	1,40

R, potenza trasmessa per irraggiamento

Ora vi inizio a confondere seriamente.

Rielaborando l'equazione di Stefan Boltzmann si ottiene in [W/m²]:

$$R = A_b f_{cl} f_r \varepsilon_n \sigma \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \right]$$

a volte espressa (si fa per dire ... sinteticamente) come:

$$R = f_{cl} h_r (t_{cl} - t_r) \rightarrow h_r = 16,1 \cdot 10^{-8} \left[\frac{t_r - t_{cl}}{2} + 273 \right]^3$$

In cui f_r è il rateo della superficie degli indumenti che scambia energia per irraggiamento, in quanto parte della superficie “vede sé stessa”¹ (in genere un 30% che avendo la medesima temperatura, non partecipa allo scambio di calore per irraggiamento).

Nella pratica si può porre per f_r il valore 0,71.

- t_r indica la temperatura media radiante [°C];
- ε_n indica l'emissività del corpo umano, che ha un valore alto pari a 0,97 [-];
- σ indica la costante di Stefan-Boltzmann pari a $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W m⁻² °C⁻⁴].

L'emissività per la pelle e nel campo delle temperature in gioco per gli impianti radianti viene a volte posta pari a 1 e quella dei vestiti pari a 0,95.

Si ricorda che l'emissività è il rapporto tra l'energia emessa dal corpo in esame rispetto ad un corpo “nero” ideale che si trovi alla medesima temperatura.

In genere l'emissività è un parametro variabile in funzione:

- a) della natura materica del corpo;
- b) dello stato superficiale del corpo (matto, liscio, ...);
- c) dell'angolo di visuale tra sorgente e ricettore dell'energia;
- d) della geometria dei corpi;
- e) della lunghezza d'onda associata all'emissione elettromagnetica;
- f) della temperatura della sorgente.

La temperatura media radiante è la temperatura di un corpo virtuale in condizioni di isotermità e capace di scambiare la stessa potenza termica dell'ambiente reale in cui si trova il corpo umano.

Per le usuali applicazioni in edilizia può calcolarsi semplicemente come:

$$t_r = \frac{\sum_i A_i t_i}{\sum_i A_i}$$

ovvero come media pesata delle temperature t_i relative alle “i” superfici/pareti aventi area A_i usate come pesi nella relazione precedente.

Sistemi più sofisticati di calcolo della temperatura radiante coinvolgono il calcolo del “fattore di vista”, ovvero una misura di intervisibilità di superfici a diversa temperatura affacciate fra loro.

¹ L'espressione “vedere sé stessi” non ha valenze teologiche o filosofiche! Sarà più chiaro in seguito.

A breve spiego meglio il concetto di fattore di vista perché è determinante: tenete duro!

La seguente figura evidenzia qualitativamente come due elementi di pavimento a diversa distanza dal soggetto possano contribuire diversamente allo scambio radiativo: un elemento che si trova prossimo al corpo ha maggiore “fattore di vista” e influenza maggiormente gli scambi di energia.

Una percentuale di energia irradiata viene assorbita dal tetto che diventa a sua volta sorgente di calore per irraggiamento, e una parte viene riflessa e “recuperata”.

In edilizia i materiali per lo più tendono ad assorbire e rimettere energia come rappresentato in figura, meno a rifletterla direttamente e molto meno ad esserne attraversati (come avviene per i raggi luminosi che passano un vetro); in altri termini i materiali in edilizia sono per lo più opachi alle “radiazioni termiche” dei corpi².

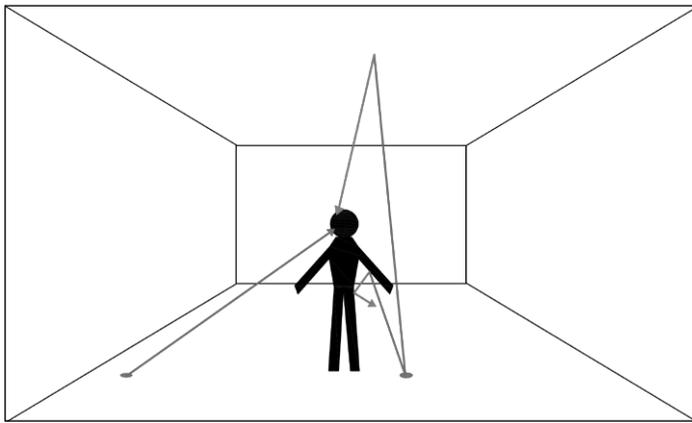


Figura 1.1. Esposizione radiante

La definizione matematica concettuale del fattore di vista è semplice, ma il calcolo operativo risulta difficoltoso anche in banali applicazioni.

Possiamo calcolare l’irraggiamento tra due corpi attraverso la seguente emozionante espressione:

$$W_{R1-2} = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{\pi A_1} \iint_{A_1, A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{r_{1-2}^2} dA_1 dA_2$$

che, superando il terrore iniziale, esprime semplicemente lo scambio di potenza termica radiativa tra due superfici “1” e “2” al variare della loro emissività media ε , della relativa temperatura assoluta media e di un termine che computa il fattore di vista adoperando il sofisticato calcolo integrale.

² Sarebbe giusto spendere qualche parolina in più. Meglio dire quindi: opachi alle radiazioni elettromagnetiche in un intervallo di lunghezze d’onda tra 1 e 16 μm , tipici dell’infrarosso e per le quali si ha il massimo di energia irraggiata da corpi aventi temperatura tra 10 °C e 40 °C.

L'integrale tiene conto dei coseni direttori del vettore distanza R , di modulo r tra due elementi di superficie infinitesima appartenenti alle superfici A_1 e A_2 che scambiano energia.

Al di là del formalismo matematico e delle difficoltà di calcolo (gestibili tuttavia attraverso programma di calcolo) la relazione mette in evidenza che:

- 1) lo scambio netto di energia si attiva per differenza di temperatura;
- 2) la distanza riduce lo scambio in maniera significativa a causa del termine quadratico;
- 3) il calcolo deve estendersi su elementi A_1 e A_2 in cui la temperatura possa considerarsi costante.

Comprendere questo ultimo concetto è determinante.

Nella figura che segue se la superficie "2", ad esempio corrisponde ad una finestra, avrà un comportamento radiante del tutto diverso dalla parete su cui è installata, trovandosi ad esempio a 40 °C contro i 29 °C del resto della parete.

Lo stesso deve immaginarsi per l'area "3" che potrebbe identificarsi come una porzione di soffitto radiante attivata a 20 °C rispetto al resto del soffitto che si trova a 28 °C .

Anche il quadratino "1" muovendosi lungo il pavimento sarà più o meno influenzato da "2", da "3" e da tutti gli altri elementi di superficie non rappresentati, al variare della reciproca distanza.

Nello schemino sono rappresentati due vettori "R" e con "θ" i coseni di giacitura che descrivono la posizione rispetto ad "1".

Per calcolare il fattore di vista di "1" rispetto all'ambiente devono essere computati tutti gli altri vettori (infiniti e quindi gestibili tramite calcolo integrale).

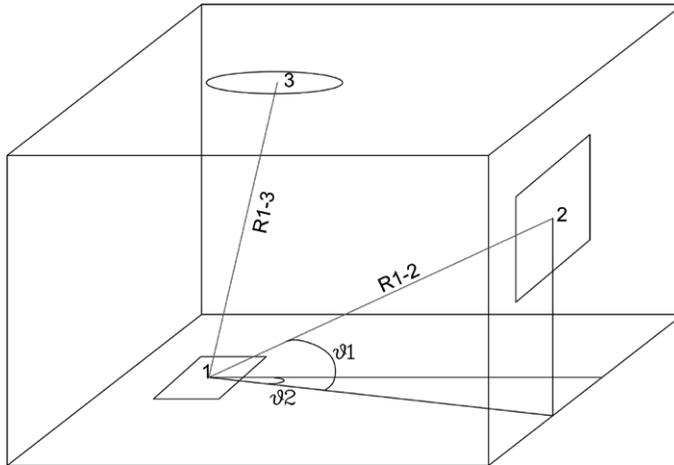


Figura 1.2. Il fattore di vista

Come il lettore dovrebbe avere intuito fissata la posizione di "1" si crea un mosaico di valori di potenza scambiata rispetto a tutti gli altri punti dell'ambiente. Chiaramente il quadratino "1" presentato nell'esempio ha l'altezza di una formica rispetto al locale, e in una trattazione più coerente bisogna tenere conto anche della distanza di "1" dal pavimento.

In realtà, fra l'altro, "1" vorrebbe rappresentare una persona che ha uno sviluppo geometrico reale ben diverso da un foglio di carta, ma il concetto dovrete sforzarvi di estenderlo al singolo elemento di superficie del corpo umano.

Nella pratica di calcolo, giusto per intendersi, si assume per “1” il baricentro del corpo o il livello del capo e si effettuano valutazioni molto più semplici e mediamente efficaci.

La UNI EN ISO 7726:2002 contiene istruzioni di calcolo del fattore di vista di superfici rettangolari adoperando diagrammi simili a quelli della figura seguente.

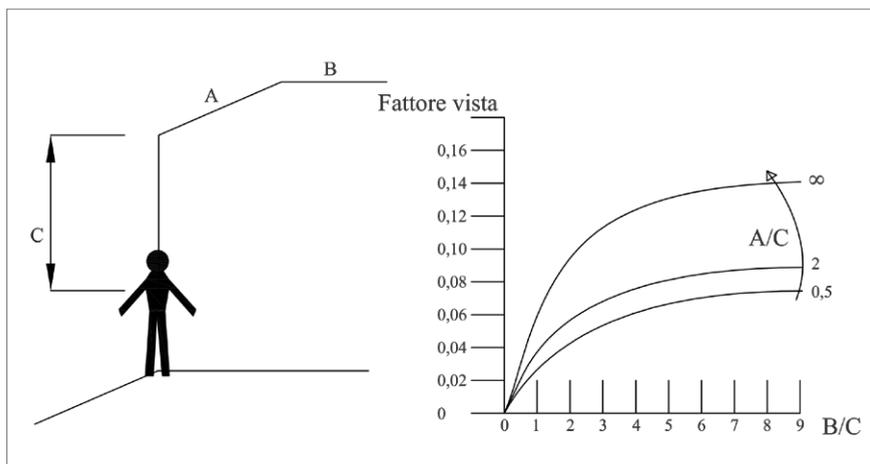


Figura 1.3. Esempi di diagrammi per quantificare il fattore di vista F

Anche se si adoperano criteri semplificati di calcolo della temperatura media radiante, non bisogna trascurare il significato fisico del fattore di vista e di come il trasferimento di calore ne risulti fortemente condizionato.

Il centro di una persona seduta è di 0,6 m (1,0 se in piedi) rispetto al pavimento, mentre ovviamente varia rispetto al soffitto (per una persona seduta 2,4 m in una stanza di 3,0 m di altezza).

Quindi, nei confronti di una persona al centro del locale, il pavimento presenta normalmente il fattore di vista maggiore rispetto alle altre superfici (pareti, finestre, soffitto).

A titolo di esempio, sono presentati nella seguente figura un tipico ufficio e un ampio ambiente industriale.

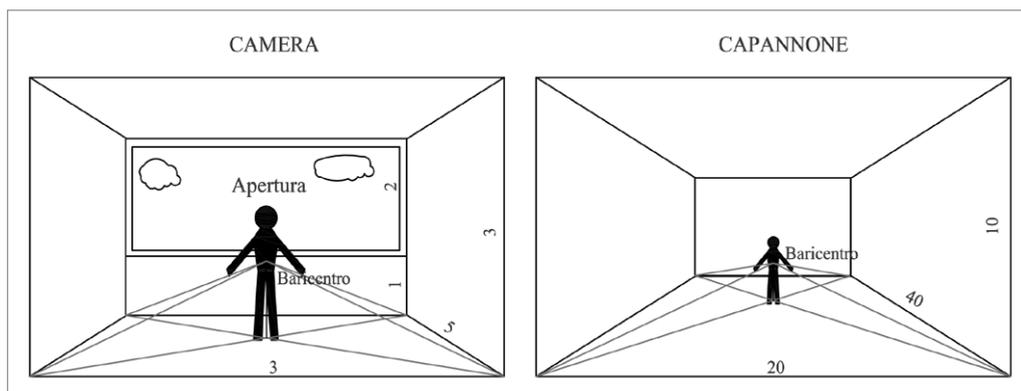


Figura 1.4. Fattore di vista F in due situazioni distinte

Tabella 1.2. *Fattori di vista tra occupante (al centro di due ambienti) e il locale*

Superficie	Camera		Capannone	
	<i>Seduto</i>	<i>In piedi</i>	<i>Seduto</i>	<i>In piedi</i>
Pavimento	0,32	0,24	0,48	0,48
Soffitto	0,12	0,12	0,22	0,22
Parete frontale	0,03	0,04	0,03	0,03
Apertura	0,06	0,06	–	–
Parete dietro	0,09	0,10	0,03	0,03
Parete destra	0,19	0,22	0,12	0,12
Parete sinistra	0,19	0,22	0,12	0,12

Applicando la norma e la tabella di cui sopra la temperatura media radiante si può calcolare con la relazione seguente in cui si sommano le temperature medie delle pareti opportunamente pesate dal rispettivo fattore di vista medio:

$$t_r = \sum_i F_{p-i} \cdot t_i$$

È ovvio che essendo il pavimento la superficie prossima alla persona 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.

In un ambiente industriale il fattore di vista è 1,5 volte più grande che nell’ufficio, poiché la quantità di superficie che “vede” un soggetto prossimo al pavimento è maggiore rispetto al caso dell’ufficio.

Per una persona al centro dell’ufficio, il fattore di vista relativo al pavimento è pari a 0,32 se seduta e a 0,24 se in piedi.

In un ambiente industriale il fattore vale 0,48 sia per una persona seduta che in piedi visto che è trascurabile la differenza di quota tra le due posizioni rispetto all’altezza del locale.

Possiamo dire che il fattore di vista esprime il peso che la superficie ha nel determinare una variazione della temperatura media radiante³.

Per una persona al centro di un pavimento 6×6 , il fattore di vista con il pavimento è di 0,4 se seduta e 0,37 se in piedi.

Se la temperatura del pavimento cambia di 5 K e tutte le altre superfici mantengono la stessa temperatura, allora la temperatura media radiante cambia di 2 K.

La seguente figura evidenzia qualitativamente il comportamento di ostacoli all’irraggiamento per un radiatore installato in un ambiente e aiuta a comprendere il motivo per cui si afferma, un poco brutalmente e in maniera non propriamente corretta, che il pavimento radiante eroga il calore uniformemente.

³ E quindi anche della temperatura operante come si vedrà a breve. Questo diviene indirettamente un criterio di valutazione della scelta della temperatura di progetto dell’aria ambiente; infatti dalla geometria del locale e dal tipo di impianto radiante (parete, soffitto, pavimento) si può stimare quale sia la potenzialità di una superficie radiante di variare la temperatura operante di un ambiente, agendo sulla temperatura della stessa superficie.