



REGIONE SICILIANA
ASSESSORATO INDUSTRIA

ENERGIA efficiente per l'edificio

Normativa e tecnologie



SICENEA
pura energia di Sicilia



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

Energia efficiente per l'edificio

Normativa e tecnologie

Energia efficiente per l'edificio
Normativa e tecnologie

2008 ENEA
Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - Roma

ISBN 88-8286-170-8



REGIONE SICILIANA
ASSESSORATO INDUSTRIA

Energia efficiente per l'edificio

Normativa e tecnologie

a cura di

Francesco Paolo Vivoli e Michele Zinzi

con il contributo di

E. Canterino, M. Citterio, G. Corallo, L. De Sanctis

G. Fasano, A. Federici, E. Ferrero, G. Giorgiantoni

G. Lai, P. Signoretti, L. Terrinoni



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

Presentazione

Il volume viene pubblicato nell'ambito del programma SICENEA, finanziato dall'Assessorato Industria della Regione Siciliana per promuovere una maggiore consapevolezza riguardo i problemi energetici e ambientali e sensibilizzare all'impiego delle fonti rinnovabili e all'uso razionale dell'energia nei vari settori produttivi e civili.

Obiettivo di rilievo del programma è sollecitare l'attenzione di Enti locali, Imprese, progettisti, installatori e energy manager sulle opportunità di sviluppo e crescita di un mercato e un'industria locale delle fonti rinnovabili e dell'efficienza energetica, in grado di incidere sulla crescita di competitività del sistema produttivo regionale.

Il volume inizia con una attenta analisi del parco edilizio nazionale e siciliano in particolare, e delle sue caratteristiche nel contesto energetico coinvolto. Segue un esame della recente legislazione in materia di efficienza energetica degli edifici e l'esplorazione attenta delle tecnologie più innovative e promettenti finalizzate alla progettazione e ottimizzazione dell'involucro edilizio e dei principali sistemi impiantistici, con alcune incursioni in temi più specifici di particolare interesse.

L'opera, rivolta a professionisti del settore, tipicamente ingegneri, architetti e diplomati tecnici, vuole costituire uno strumento di aggiornamento tecnico sulla normativa e sulle tecnologie connesse all'utilizzo dell'energia e al risparmio energetico in edilizia, e fornire spunti di riflessione cui il progettista possa attingere nell'esercizio della sua attività.

Indice

Premessa	12
Capitolo Uno	
Il parco edilizio nazionale e siciliano: caratteristiche e consumi energetici	14
1.1 Introduzione	15
1.2 Il parco edilizio italiano	15
1.2.1 Dati sul parco edilizio in Italia	16
1.2.2 Stato del parco edilizio	18
1.2.3 Il settore delle costruzioni	20
1.3 Il parco edilizio in Sicilia	22
1.4 Consumi energetici in Italia e livelli di emissione. Confronto con i paesi dell'UE	24
1.5 Consumi energetici in Sicilia	29
1.5.1 Usi finali di energia (1990-2004)	29
1.5.2 Usi finali di energia per il riscaldamento – impianti di riscaldamento per tipo di combustibile o energia e stima dei consumi	31
1.5.3 Consumi elettrici	32
Capitolo Due	
Normativa sull'efficienza energetica degli edifici	36
2.1 Quadro normativo di riferimento	37
2.1.1 Evoluzione della normativa in Italia	37
2.1.2 La Direttiva Europea 2002/91/CE	39
2.1.3 Quadro normativo attuale: Dlgs 192/05 e Dlgs 311/06	41
2.2 Verso la Certificazione Energetica	46
2.2.1 Modalità operative della Certificazione Energetica previste dal Dlgs 192/05: doveri, oneri e responsabilità delle figure professionali coinvolte	46
2.2.2 Efficienza energetica dell'involucro edilizio	49
2.2.3 Efficienza degli impianti	52
2.3 Aggiornamenti al quadro normativo	57
2.4 Il calcolo della prestazione energetica dell'edificio	58

Capitolo Tre

L'involucro edilizio	60
3.1 Introduzione	61
3.2 I componenti opachi	62
3.2.1 Materiali di involucro	62
3.2.2 Isolamento dei componenti opachi	69
3.2.3 L'inerzia termica dell'involucro edilizio	71
3.2.4 La riflessione e l'assorbimento della radiazione solare	72
3.3 I serramenti	74
3.3.1 Caratteristiche della radiazione solare	75
3.3.2 Caratteristiche ottiche ed energetiche del vetro	77
3.3.3 Componenti vetrati per edilizia	78
3.3.4 Materiali trasparenti ad elevata innovazione	83
3.3.5 Gli infissi	87
3.4 Sistemi schermanti	90
3.4.1 Classificazione dei sistemi schermanti	91
3.4.2 Alcune proprietà ottiche e termiche	94

Capitolo Quattro

Gli impianti di riscaldamento	96
4.1 Introduzione	97
4.2 I rendimenti dell'impianto termico	97
4.2.1 Il rendimento di emissione	98
4.2.2 Il rendimento di regolazione	100
4.2.3 Il rendimento di distribuzione	102
4.2.4 Il rendimento di produzione	104
4.3 Le tecnologie impiantistiche termiche efficienti	106
4.3.1 Generalità sulle caldaie	106
4.3.2 Le caldaie a temperatura scorrevole	109
4.3.3 Le caldaie ad alta efficienza	110
4.3.4 Le caldaie a condensazione	112
4.4 Le tecnologie innovative a bassa temperatura lato utilizzazione	115
4.4.1 Le valvole termostatiche	115
4.4.2 I sistemi radianti innovativi	116

Capitolo Cinque

La ventilazione negli edifici	122
5.1 Introduzione	123
5.2 Definizioni	123
5.3 Modalità di funzionamento della ventilazione	124

5.4	Modalità di somministrazione della ventilazione	125
5.5	Carichi termici per ventilazione e qualità dell'aria	126
5.6	La ventilazione naturale	128
5.6.1	Effetto del vento	128
5.6.2	Effetto camino	129
5.6.3	Combinazione delle diverse forze	130
5.6.4	Flussi d'aria attraverso le aperture	131
5.6.5	Portate d'aria per ventilazione naturale	131
5.6.6	Portata d'aria dovuta al vento	131
5.6.7	Portata d'aria dovuta ad effetti termici	131
5.6.8	Linee guida per la ventilazione naturale	132
5.7	La ventilazione ibrida. Indicazioni progettuali	133
5.8	Sistemi per il raffrescamento passivo	135
5.8.1	Il reirraggiamento notturno	135
5.8.2	Il raffrescamento evaporativo	137
5.8.3	Il raffrescamento di spazi esterni	138
5.8.4	Raffrescamento con il terreno	140
5.8.5	La ventilazione notturna	141
5.9	La ventilazione meccanica	142
5.9.1	Configurazioni della ventilazione meccanica	145
5.9.2	Sistemi a tutt'aria. Unità di generazione dei fluidi termovettori	146

Capitolo Sei

Illuminazione artificiale	150	
6.1	Introduzione	151
6.2	La fotometria e la visione. Luce e spettro visibile	152
6.3	Le grandezze fotometriche	153
6.4	Le sorgenti luminose artificiali	154
6.4.1	Tipi di lampade	154
6.4.2	Caratteristiche fotometriche delle sorgenti di luce artificiale	156
6.4.3	Efficienza e classificazione delle lampade	157
6.4.4	Apparecchi di illuminazione	157
6.4.5	Sistemi di illuminazione	158
6.4.6	Sistemi di controllo	159
6.5	Elementi di progettazione illuminotecnica	159
6.5.1	Curve fotometriche	159
6.5.2	Rendimento di un apparecchio di illuminazione	160
6.5.3	Calcolo illuminotecnico elementare. Metodo del flusso totale	160

6.5.4	Controllo della luminanza della sorgente luminosa . . .	162
6.5.5	Controllo della luminanza globale di un ambiente ai fini dell'abbagliamento	163
6.6	Schede GreenLight: tipologie e specifiche delle lampade	164
Capitolo Sette		
	Sistemi di controllo degli edifici e domotica	172
7.1	I sistemi di controllo	173
7.1.1	Funzioni di un sistema di controllo	174
7.1.2	Schema di Building Energy Management System	178
7.2	Strategie di controllo	179
7.2.1	Strategie a regole fisse	181
7.2.2	Strategie a regole fuzzy	182
7.2.3	Sistemi esperti	182
7.2.4	Reti neurali	183
7.3	Il concetto di "Casa Intelligente" e le sue funzionalità	184
7.3.1	I servizi integrabili con la "Casa intelligente"	185
7.3.2	I componenti di un sistema domotico	187
7.3.3	Topologia del sistema domotico	188
7.3.4	La trasmissione dei dati	188
7.3.5	Gli standard domotici	189
Capitolo Otto		
	Le pompe di calore	192
8.1	Introduzione	193
8.2	Pompa di calore a compressione	193
8.3	Pompa di calore ad assorbimento	196
8.4	Efficienza del ciclo termodinamico e unità di misura	197
8.5	Schemi impiantistici e applicazioni	200
8.5.1	Sistemi split a espansione diretta	200
8.5.2	Sistemi VRV – VRF a espansione diretta	202
8.5.3	Pompe di calore con sonde geotermiche	204
8.5.4	Pompe di calore ad assorbimento	207
Capitolo Nove		
	Cogenerazione e generazione distribuita	212
9.1	Introduzione	213
9.2	La cogenerazione	214
9.2.1	Definizione	214
9.2.2	Utilità della cogenerazione	215

9.2.3	Tipologie impiantistiche per la cogenerazione	216
9.2.4	Applicazioni: il teleriscaldamento	219
9.3	La microgenerazione	222
9.3.1	Definizione	222
9.3.2	Le tecnologie	223
9.3.3	Applicazioni	224
9.4	La trigenerazione	225
9.4.1	Definizione	225
9.4.2	La tecnologia	226
9.4.3	Applicazioni	228
9.5	La generazione distribuita	228

Premessa

Gli studi, le strategie e i provvedimenti normativi e legislativi in campo energetico hanno assunto oggi una importanza centrale in tutti i settori produttivi; sulla scia di questi dibattiti anche la legislazione si è sviluppata, orientandosi verso la definizione di strumenti adeguati alla realizzazione degli obiettivi previsti dal Protocollo di Kyoto e dalle Direttive Europee.

Il dibattito iniziato con le conferenze del clima, ha portato come risultato alla definizione di concetti fondamentali, quale quello di sviluppo sostenibile, che oggi sono entrati a far parte del nostro quotidiano, e hanno favorito la stipulazione di accordi comuni per cercare di arginare i cambiamenti climatici in atto.

Perseguire politiche di efficienza energetica nel settore civile è una strategia adottata in tutti i piani di azione energetica in Europa, nati dal recepimento della Direttiva 2002/91/CE inerente le prestazioni energetiche degli edifici e soprattutto della Direttiva 2006/32/CE riguardante i servizi energetici. Gli usi finali di energia nel settore civile, residenziale più terziario, ammontano in Italia a circa 80 Mtep (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio) su un fabbisogno nazionale di circa 200 Mtep. Questo significa che il 40% dell'energia utilizzata in Italia viene spesa essenzialmente per riscaldare, raffrescare, ventilare ed illuminare gli edifici. Gli usi finali di energia in Italia sono bassi rispetto ad altri Paesi europei ma la situazione si inverte se il dato è messo in relazione ai gradi giorno invernali. Questo significa che, in un continente in cui buona parte dell'energia negli edifici è spesa per il riscaldamento, il comportamento apparentemente virtuoso del nostro sistema è dovuto soprattutto alla mitezza media del clima, più che ad un parco edilizio energeticamente efficiente. A questo si deve aggiungere l'aumento incontrollato dei consumi elettrici dovuti alla climatizzazione estiva delle abitazioni, trend di recente ma intensa crescita, che sta vanificando gli sforzi per ridurre i consumi invernali. Non a caso i consumi globali di settore non sono in discesa, come ci si attendeva vista l'attuazione di nuove politiche di efficienza energetica.

Si usa dire spesso che la migliore energia alternativa è l'energia non consumata. Da questo punto di vista il settore civile, con la sua enorme potenzialità di risparmio energetico, si pone come campo di applicazione di numerose tecnologie in grado di perseguire questo scopo.

Questo volume non ha la presunzione di essere una guida completa ai molteplici aspetti che un progettista si trova ad affrontare, vuoi nella progettazione o riqualificazione energetica di un edificio, vuoi nella certificazione energetica dello stesso, ma piuttosto vuole costituire uno strumento di aggiornamento tecnico sulla normativa e sulle tecnologie che attengono al mondo dell'energia e del risparmio energetico in edilizia,

oltre che all'impiantistica dedicata, e fornire spunti di riflessione cui il progettista possa attingere nell'esercizio del suo lavoro.

Si inizia con una attenta analisi del parco edilizio, nazionale e siciliano in particolare, e delle sue caratteristiche nel contesto energetico coinvolto. La chiave di lettura dei dati energetici e delle caratteristiche dell'industria e del parco edilizio non è però quella di ancorare la conoscenza del lettore a dati specifici che perdono naturalmente di attualità con il passare degli anni, ma quella di mettere il lettore nelle condizioni di comprendere quali siano "i numeri" del problema energetico, focalizzare le dinamiche che interesseranno nei decenni futuri i consumi di energia, e fare previsioni ai fini dell'elaborazione di strategie d'intervento considerando gli scenari appena trascorsi.

Vengono poi esaminati nel dettaglio i riferimenti normativi, aggiornati agli ultimi decreti, e i principi di applicazione della legislazione, ivi comprese la certificazione energetica. È inoltre fatto un cenno alle norme tecniche di recente emanazione.

Si procede quindi con l'esplorazione molto attenta delle tecnologie più innovative e promettenti finalizzate alla realizzazione di una edilizia con virtuose connotazioni di utilizzo razionale dell'energia, di cui sono affrontati gli aspetti progettuali ed applicativi più salienti. Le tecnologie rappresentano il corpo principale del volume e riguardano l'involucro edilizio e i principali sistemi impiantistici, con alcune incursioni in temi più specifici di particolare interesse.

Capitolo **Uno**



Il parco edilizio nazionale e siciliano: caratteristiche e consumi energetici

[1.1] Introduzione

Il Protocollo di Kyoto assegna all'Italia un obiettivo di riduzione delle emissioni di gas serra, da realizzarsi entro il 2012, del 6,5% rispetto ai livelli del 1990. In realtà nel nostro Paese le emissioni, invece di diminuire, sono aumentate del 13%, portando a circa il 20% la riduzione da realizzarsi da oggi al 2012. Gli aumenti più consistenti di emissioni hanno riguardato i trasporti (+27,5%) e la produzione di energia termoelettrica (+17%).

Va osservato che per conseguire gli obiettivi di Kyoto si dovrebbe realizzare una riduzione del consumo di combustibili fossili tra il 15 e il 20%, con una conseguente riduzione della fattura energetica per il Paese di circa 5-7 miliardi di euro per anno. Viceversa, il mancato raggiungimento dell'obiettivo di riduzione di gas serra fissato nell'ambito del Protocollo comporterebbe per l'Italia, stante la situazione attuale, un esborso di 1,5 miliardi di euro l'anno, fra acquisti di diritti di emissioni e progetti di cooperazione per realizzare tali riduzioni all'estero. La complessità dei problemi energetico-ambientali, qui brevemente delineati, richiede un approccio sovranazionale e impone la necessità di sviluppare a livello internazionale (ed europeo in particolare) azioni congiunte in grado di armonizzare le poli-

tiche e gli strumenti di intervento, assicurando una cooperazione adeguata per lo sviluppo di attività di ricerca e di innovazione tecnologica.

Questo capitolo disegna lo scenario del settore civile in termini di patrimonio edilizio e consumi energetici associati. Varrà la pena fissare attenzione sulla modesta qualità energetica dei nostri edifici e pensare al potenziale ambientale ed economico che la riqualificazione energetica potrebbe consentire, fermo restando che stretti criteri di controllo e penalità andranno adottati affinché almeno le nuove costruzioni rispettino gli standard prefissati.

[1.2] Il Parco edilizio italiano

Questo paragrafo intende fare un quadro generale sul parco edilizio nazionale. L'obiettivo è duplice: da un lato è necessario comprendere la situazione siciliana nel contesto nazionale, dall'altro i fruitori di questo quaderno si troveranno ad operare su scala nazionale. Si ritiene dunque opportuno fotografare il quadro nazionale per introdurre gli operatori su un mercato probabilmente differente da quello locale, e mettendoli in condizione di potere indirizzare in modo specifico le proprie attività.

[1.2.1]

Dati sul parco edilizio in Italia

Per la prima volta, con il censimento ISTAT del 2001, sono stati analizzati tutti i fabbricati esistenti sul territorio nazionale, a partire da quelli presenti nelle città e limitrofi ai centri urbani. Tra i fabbricati realizzati fuori dai contesti urbani, sparsi a macchia di leopardo sul territorio nazionale, sono stati identificati solamente quelli adibiti all'uso abitativo. In figura 1.1 si riportano i dati più significativi del suddetto censimento.

Nella figura 1.1 e nella tabella 1.1 sono rappresentati i dati relativi al parco edilizio italiano raggruppati per le 20 regioni. Dal censimento emerge che, sul territorio nazionale, esistono circa 13 milioni di fabbricati di cui più dell'87% sono destinati al residenziale. Il numero di abitazioni è maggiore di 27 milioni, di cui l'80% è occupato da residenti. Circa 13 milioni di queste abitazioni si concentra in sole cin-

que regioni: Sicilia, Lombardia, Veneto, Puglia e Piemonte. La Sicilia e la Lombardia, da sole, raggiungono il 24,52% del totale delle abitazioni.

Il rapporto tra il numero totale di abitazioni ed il numero totale dei fabbricati usati come abitazioni è in media di 2,2 abitazioni/fabbricati, ovvero ogni fabbricato destinato all'uso abitativo, contiene circa due abitazioni. I fabbricati ed i complessi di edifici utilizzati sono 12.086.592 milioni, e rappresentano il 94,3% del totale. I fabbricati destinati all'uso abitativo sono 11.226.595 milioni, e 441.070 mila sono impiegati per alberghi, uffici, nel settore commerciale ed industriale e nel settore delle comunicazioni e dei trasporti.

Infine più di 400 mila fabbricati, ospitano attività ricreative e sportive, scuole, ospedali e chiese. I rimanenti 725.936 fabbricati risultano non utilizzati, per recupero edilizio o perché in condizioni precarie per la sicurezza.

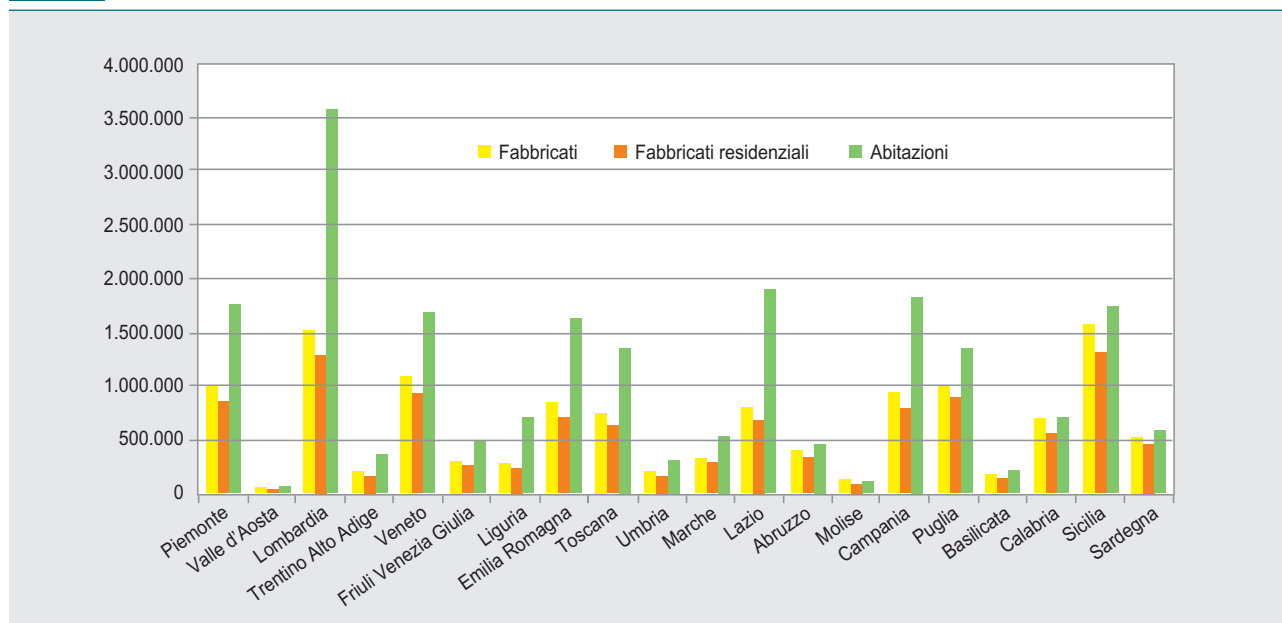
Fig. 1.1**Fabbricati residenziali e abitazioni occupate da persone residenti, per Regione (censimento 2001)**

Tabella 1.1 – Fabbricati residenziali e abitazioni regione (censimento 2001)

Regioni italiane	Fabbricati	Fabbricati residenziali	Abitazioni
Piemonte	1.001.863	877.144	2.214.164
Valle d'Aosta	53.524	39.061	100.540
Lombardia	1.534.257	1.339.458	4.143.870
Trentino Alto Adige	213.282	185.960	490.243
Veneto	1.092.500	960.256	2.017.576
Friuli Venezia Giulia	318.077	280.314	601.772
Liguria	277.795	247.712	991.029
Emilia-Romagna	831.313	735.066	1.970.977
Toscana	740.732	667.722	1.667.100
Umbria	196.046	172.017	369.290
Marche	329.639	289.834	672.785
Lazio	798.677	732.567	2.433.815
Abruzzo	392.597	328.278	658.931
Molise	122.380	101.682	173.279
Campania	936.914	822.747	2.193.435
Puglia	1.027.249	893.864	1.845.622
Basilicata	173.350	147.972	284.467
Calabria	698.326	586.832	1.111.680
Sicilia	1.566.659	1.352.838	2.549.269
Sardegna	535.620	465.271	802.149
Italia	12.840.800	11.226.595	27.291.993

Dall'analisi del **figura 1.2** emerge che la maggior parte dei fabbricati residenziali sono presenti tra il nord ovest e il nord est (circa il 42% del totale nazionale). La Sicilia è la regione che contiene sulla sua superficie il 74% dei fabbricati residenziali totali presenti nelle due isole.

Dei 27 milioni di abitazioni, 21.653.288 milioni di queste sono occupate da persone residenti, e 5,2 milioni (19,6% del totale) non sono occupate o risultano occupate da non residenti.

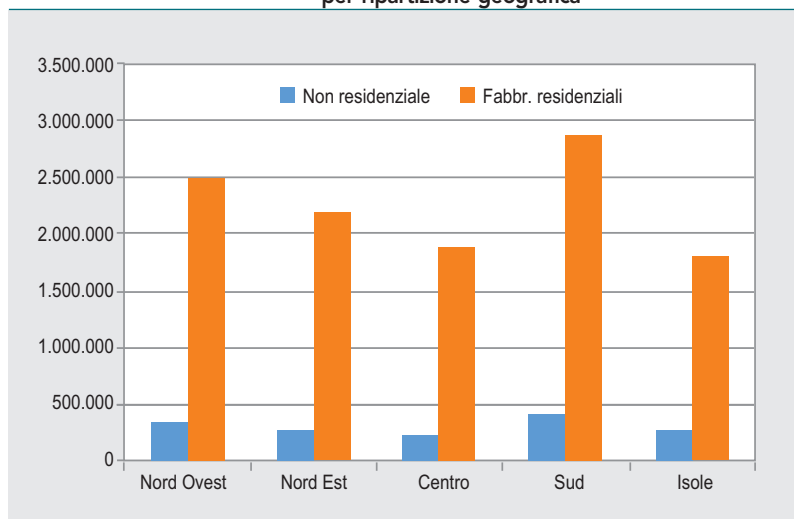
Confrontando i dati del censimento 2001 con i dati del 1991, si riscontra un incremento di circa 2 milioni di abitazioni nel

2001 (9% in più del totale). Le abitazioni esistenti nel 1991 infatti erano 25,0 milioni.

Ulteriori nuovi dati sono emersi dall'indagine Istat per il biennio 2003/2004. Nel 2003 sono stati ritirati, dai diversi comuni di competenza, i permessi di costruire per la realizzazione di circa 48.507 mila nuovi fabbricati, destinati ad un uso prevalentemente abitativo. La tendenza all'aumento della dimensione media dei fabbricati è proseguita in questo biennio (**tabella 1.2**): il volume medio per fabbricato è passato dai 2.101 metri cubi del 2003 ai 2.161 metri cubi del 2004. La superficie media dei fabbricati è aumentata da 666 metri quadri nel 2003 ai 682 metri quadri nel 2004; il numero medio delle abitazioni per fabbricato è passato da 4,7 nel 2003 a 5 nel 2004.

Per quanto riguarda la dimensione media delle nuove abitazioni, emerge la tendenza alla diminuzione dei valori, che prevale da diversi anni: la superficie utile si riduce da 76,5 metri quadri nel 2003 a 74,1 metri quadri nel 2004. Continuando con questa analisi, emerge anche la diminuzione del numero medio delle stanze e quello degli accessori interni all'abitazione, come corridoi, bagni, ingressi, etc.

Il numero delle stanze ha come valore medio 3,5 nel 2003 contro il valore 3,4 del 2004, mentre il numero dei vani accessori risulta pari a 3,0 nel 2003 e a 2,9 nel 2004. Tra le nuove abitazioni aumenta la quota complessiva di quelle con un minor numero di stanze: le abitazioni con meno di 4 stanze salgono dal 52,3% nel 2003 al 55,8% del 2004. Le abitazioni aventi tre stanze sono la tipologia più frequente tra quelle progettate e il relativo peso passa dal 27,9% nel 2003 al 29,0% nel 2004. Risulta in calo l'incidenza delle abitazioni con quattro stanze: pur rimanendo la seconda tipologia per frequenza, subisco-

Fig. 1.2 Confronto tra fabbricati e fabbricati residenziali per ripartizione geografica**Tabella 1.2 – Permessi di costruire: fabbricati residenziali nuovi, anni 2003-2004**

Anni	Volume medio (m³)	Superficie totale media (m²)	Media abitazioni
2003	2101	666	4,7
2004	2161	682	5,0

no una diminuzione, dal 25,7% nel 2003 al 24,1% nel 2004.

È interessante notare l'evoluzione delle nuove costruzioni rispetto alla localizzazione geografica durante il biennio 2003/04. Il 57% dei nuovi fabbricati è costruito al nord, il 26% al sud e il rimanente nell'Italia centrale. A livello regionale, la Lombardia è la regione con la maggiore quota delle volumetrie per i nuovi fabbricati residenziali, con circa il 20% del totale nazionale nel 2003. Essa è seguita dalla regione Veneto, che rappresenta il 13,6% circa.

[1.2.2]

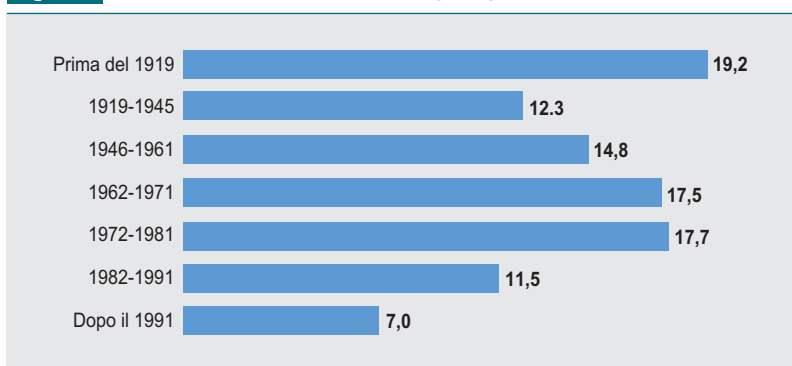
Stato del parco edilizio

Dal censimento del 2001 emerge che il 61,5% dei fabbricati residenziali (6.903.982

milioni) è costruito in muratura portante, il 24,7% (2.768.205 milioni) in calcestruzzo armato e il 13,8% (1.554.408 milioni) in materiali di altro tipo, quali legno, acciaio o strutture miste. Più del 50% dei fabbricati residenziali (5.955.086 milioni) è isolato dagli altri edifici, mentre la restante percentuale è contigua ad altre strutture su uno o più lati, contiguo ad altre strutture su un solo lato o contiguo ad altre strutture su due lati.

Dall'analisi di figura 1.3 emerge che, circa il 20% del patrimonio edilizio nazionale è stato costruito prima del 1919 con un quantitativo di fabbricati residenziali pari a 2.150.259 milioni. Nel periodo compreso tra le due guerre mondiali, si è avuta una contrazione dell'attività edilizia che ha comportato la realizzazione del solo 12% dei fabbricati residenziali odierni. Il periodo che va dalla fine del secondo dopoguerra fino ai primi degli anni ottanta, segna un incremento dell'attività edilizia che ha determinato la realizzazione di circa il 50% del parco edilizio odierno. Infine, dai primi degli anni ottanta fino ad oggi si è avuta una nuova contrazione dell'attività edilizia.

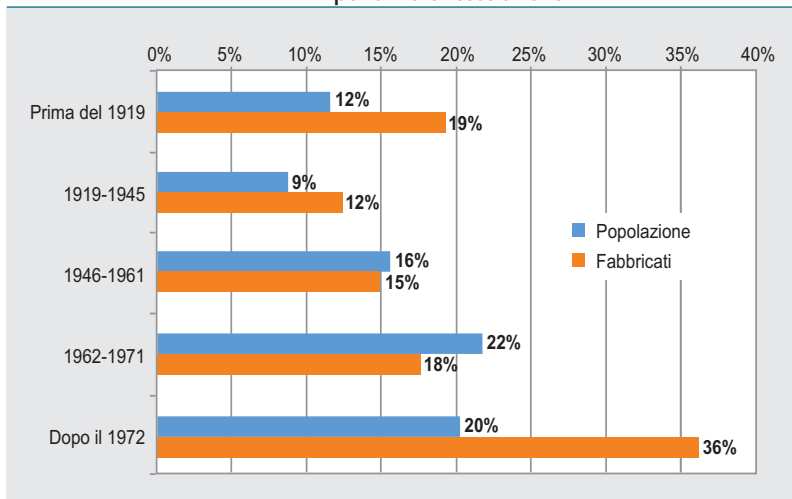
Questa contrazione risulta più pesante dal '91 in poi, con una tendenza maggiore nelle attività di recupero edilizio (dati riferiti al paragrafo successivo: Il settore delle costruzioni) rispetto all'attività edificatoria. Dall'analisi della figura 1.4 emerge che la maggior parte della popolazione abita in fabbricati realizzati dal dopoguerra in poi. Infatti il 15,5% della popolazione abita in fabbricati costruiti tra il '46 e il '61, il 21,7% abita in fabbricati realizzati tra il '62 e il '71, e il 20,1% abita il edifici realizzati dal '72 in poi. Le percentuali più basse si registrano nel periodo che va antecedentemente al 1919 fino al secondo dopoguerra con valori percentuali rispettivamente del

Fig. 1.3 Fabbricati residenziali per epoca di costruzione

11,5% e del 8,7%. Da questa analisi emerge che, la percentuale maggiore della popolazione, vive in edifici realizzati nel periodo del boom edilizio che va dal '61 al '72.

Più del 50% dei fabbricati residenziali è costituito da due piani, mentre il 22,6% è costituito da un solo piano.

La rimanente percentuale è rappresentata dalla tipologia di fabbricato residenziale costituita da tre piani (17,3%) e quella realizzata su quattro o più piani (7,2%),

Fig. 1.4 Popolazione che abita in fabbricati residenziali suddivisi per anno di costruzione

inoltre più della metà dei fabbricati residenziali (58,0%) contiene un'unità immobiliare, dove vive il 22,0% della popolazione residente, mentre il 21,6% degli stessi contiene due unità, dove vive il 17,6% dei residenti. Infine la restante percentuale dei fabbricati residenziali possiede dalle 3 alle 15 unità immobiliari, dove vive il restante 60,4% della popolazione residente.

Dall'analisi dei dati censiti nel 2001, risulta che lo stato di conservazione della parte strutturale dei fabbricati residenziali (figura 1.5) è ottimo per il 25,6% degli edifici, buono per il 51,8%, mediocre per il 20,3% e pessimo per il 2,3%.

Nel 1999 il CENSIS aveva valutato che circa 3.575.000 milioni di fabbricati (circa il 27% del totale) erano a rischio di crollo, di cui il 36,5% di questi (corrispondenti a circa 1.103.000 milioni fabbricati) aveva un rischio legato all'età di costruzione e il 63,5% aveva un rischio legato alle caratteristiche strutturali. Così questi fabbricati a rischio di crollo sono stati classificati in base a:

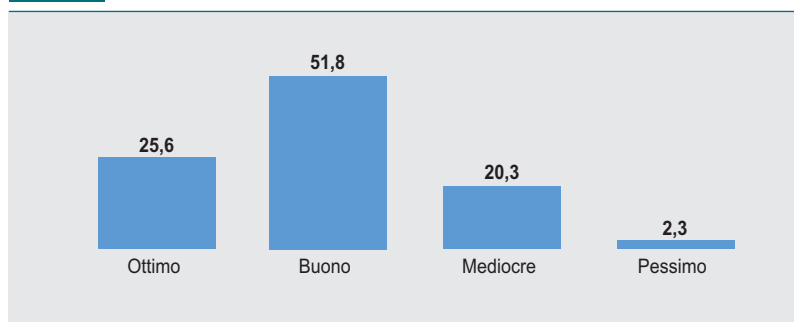
■ età:

- costruzioni storiche in città importanti: 2,9%;
- costruzioni storiche nel resto del paese: 12,1%;
- costruzioni con età maggiore ai 40 anni: 21,5%;

■ motivi difettosi della costruzione:

- costruzioni abusive realizzate alla fine degli anni sessanta: 19%;
- costruzioni abusive realizzate prima del 1986: 44,5%.

Se si fa una considerazione d'insieme, su tutti i dati che sono stati analizzati in questo paragrafo, emerge che in Italia si vive prettamente in edifici piccoli ed in muratura portante, che godono di uno stato di mantenimento strutturale buono.

Fig. 1.5 Fabbricati ad uso abitativo per stato di conservazione strutturale**[1.2.3]****Il settore delle costruzioni**

I dati di ANCE (Associazione Nazionale Costruttori Edili) evidenziano che il settore delle costruzioni edilizie è importante per l'economia italiana e particolarmente per il sud, dove i settori inerenti ai lavori pubblici e residenziali rappresentano insieme il 40,7% dell'occupazione totale nell'industria. Al livello nazionale questa percentuale è il 25%, corrispondente a circa l'otto per cento di tutta l'occupazione nazionale. L'occupazione in questo settore era circa di 1.675.000 milioni di lavoratori nel primo semestre del 2001 ed è aumentato del 2,4% nel 2002, confrontato con i dati del 2001. I precedenti dati sono riportati nella **tabella 1.3**.

Le percentuali di investimento nell'attività edilizia sono presentati nella **tabella 1.4**. Confrontando i dati del 2001, per quanto riguarda le attività nel settore dell'edilizia residenziale, si nota nel 2002 c'è stato un aumento del +2,3% dovuto alla realizzazione di nuove costruzioni e dovuto soprattutto alle attività di recupero edilizio. Questi dati sono resi disponibili dalle elaborazioni ANCE sui dati dell'ISTAT. L'aumento delle attività nel campo edilizio è dovuto principalmente alle iniziative private nella costruzione di nuovi edifici

residenziali, mentre gli edifici residenziali pubblici rimangono stabili come presenza sul territorio nazionale. Il recupero edilizio è l'unico settore che mostra un aumento sempre più crescente, principalmente dovuto all'attività edilizia nel sud dell'Italia.

Il settore delle costruzioni, dal 2002 sino ad oggi, conferma ancora il suo ruolo fondamentale per il sistema economico italiano offrendo un contributo considerevole nei confronti della produzione industriale e dell'occupazione del paese. Infatti dall'analisi delle elaborazioni Ance su dati Istat risulta che, dal 1998 al 2006, gli investimenti nel settore delle costruzioni hanno avuto un incremento del 25,5% (**tabella 1.5**), mentre per lo stesso intervallo temporale il prodotto interno lordo è cresciuto del solo 11,3%. Nel 2006, gli investimenti in questo settore risultano pari al 9,9% del prodotto interno lordo nazionale (145.548 milioni di euro).

Ad oggi, nel settore delle costruzioni, lavorano circa 1.900.000 milioni di lavoratori i quali rappresentano il 27,4% dell'occupazione nel settore dell'industria e il 8,3% dell'occupazione nel totale dei diversi settori economici. Infatti dal 1998 al 2006, gli addetti al settore delle costruzioni sono aumentati del 27,3%, mentre se si considera l'insieme dei diversi settori economici, il numero degli occupati è cresciuto dell'11,6%. Da questi dati si capisce come questo settore abbia sostenuto, dagli anni settanta in poi, i livelli occupazionali della nazione.

In riferimento al settore residenziale, gli investimenti economici che hanno permesso la realizzazione di nuove abitazioni e il recupero di quelle esistenti, ammontano a 76.980.000 milioni di euro nel solo 2006, con una crescita percentuale degli stessi del 3,6% rispetto agli investimenti

Tabella 1.3 – Variazione dell'occupazione per settore di attività e per regione (2002)

Regione	Agricoltura	Industria			Altre attività		Totale
		Totale	Indu. prod.	Costruzione	Totale	Commercio	
Piemonte	-6,4%	0,3%	0,5%	0,0%	0,9%	0,4%	0,4%
Valle d'Aosta	-13,4%	12,6%	14,1%	12,3%	-2,1%	8,7%	0,6%
Lombardia	3,9%	2,1%	1,8%	3,5%	1,2%	-1,3%	1,6%
Liguria	4,3%	-2,1%	-4,7%	4,4%	0,1%	-4,0%	-0,2%
Trentino-Alto Adige	-4,4%	3,1%	0,8%	7,9%	0,7%	-8,9%	0,9%
Veneto	-3,7%	-0,2%	-1,2%	6,1%	2,0%	6,6%	0,9%
Friuli-Venezia Giulia	-2,2%	4,0%	2,5%	10,3%	-0,6%	-10,4%	0,8%
Emilia-Romagna	-2,6%	0,5%	0,3%	0,0%	2,6%	5,1%	1,6%
Toscana	0,0%	-2,8%	-4,3%	2,6%	2,3%	4,4%	0,5%
Umbria	-3,4%	-0,1%	2,8%	-6,5%	-0,8%	-1,2%	-0,7%
Marche	3,7%	1,4%	1,7%	1,8%	1,8%	0,8%	1,7%
Lazio	-5,8%	4,5%	4,8%	5,7%	3,4%	2,9%	3,3%
Abruzzo	-2,8%	-4,3%	-0,8%	-13,9%	3,6%	0,5%	0,5%
Molise	-1,4%	-2,3%	-0,1%	-5,4%	1,8%	-3,1%	0,2%
Campania	-4,0%	3,2%	2,5%	4,7%	3,9%	0,1%	3,2%
Puglia	-10,5%	5,0%	6,3%	2,8%	2,9%	-0,5%	1,9%
Basilicata	-2,0%	-2,5%	-2,1%	-2,2%	4,7%	5,7%	1,5%
Calabria	4,9%	4,9%	7,9%	3,6%	1,2%	10,9%	2,4%
Sicilia	-1,7%	3,3%	8,1%	-1,4%	0,6%	-1,7%	0,9%
Sardegna	3,6%	3,3%	6,7%	-1,0%	0,3%	7,2%	1,3%
Italia	-2,7%	1,3%	1,0%	2,4%	1,9%	1,2%	1,5%

Tabella 1.4 – Variazione degli investimenti nell'edilizia dal 1971 al 2002

Periodo	Investimenti			PIL
	Abitazioni	Altre costruzioni	Totale	
1971-1975	-1,5	2,4	0,1	2,9
1976-1980	-0,2	-0,4	-0,3	4,3
1981-1985	-0,6	-0,2	-0,4	1,7
1986-1990	0,7	4,5	2,4	2,9
1991-1995	0,1	-5,5	-2,4	1,3
1996-1998	-1,6	3,3	0,5	1,6
1999	1,9	3,4	2,6	1,7
2000	5,3	6,7	5,9	3,1
2001	3,0	4,5	3,7	1,8
2002	2,5	2,1	2,3	0,4

Tabella 1.5 – Investimenti in costruzioni e PIL dal 1998-2006

Periodo	Variazione % in quantità rispetto all'anno precedente	
	Investimenti in costruzioni	PIL
1999	2,6	1,9
2000	6,4	3,6
2001	4,1	1,8
2002	4,8	0,3
2003	1,4	0
2004	1,5	1,2
2005	0,3	0,1
2006	2,1	1,9
2006/1998	25,5	11,3

nel 2005, anno in cui si ebbe un incremento quantitativo del 2,2%. Infatti nel 2006 l'incremento della produttività nel settore edilizio si traduce in investimenti per nuove abitazioni, con tassi di crescita pari al 3,0%, e in investimenti per il recupero edilizio, con tassi del 4,1% (tabella 1.6). Il 2006, quindi, risulta essere l'anno in cui si verificano gli incrementi più alti per gli investimenti precedentemente citati, in riferimento al periodo che va dal 2005 fino al 2007. Infine dall'analisi della tabella 1.6 viene confermato, in accordo con le tendenze del 2001, l'incremento degli investimenti più verso il recupero edilizio, che rispetto la realizzazione di nuove abitazioni.

Tabella 1.6 – Investimenti in costruzioni e PIL dal 1998 al 2006

Costruzioni	2006 (milioni di euro)	Variazione % in quantità			
		2004	2005	2006	2007
Abitazioni:	76.980.000	4,8%	2,2%	3,6%	1,2%
Nuove	37.132.000	4,5%	2,5%	3,0%	0,4%
Recuperate	39.848.000	5,0%	2,0%	4,1%	2,0%
Non residenziali:	68.568.000	-1,8%	-1,7%	0,4%	0,4%
Private	38.057.000	-5,7%	-1,9%	1,5%	2,0%
Pubbliche	30.511.000	3,5%	-1,5%	-1,0%	-1,5%

[1.3]

Il parco edilizio in Sicilia

La Sicilia è la prima regione per numero di fabbricati (1.566.659, pari al 12,2% del totale in Italia) e la seconda regione per numero di abitazioni (2.549.269, pari al 9,3% del totale nazionale, cfr. figura 1.6). La densità dei fabbricati residenziali per chilometro quadrato è pari a 60,8 e il numero medio di abitazioni per fabbricato residenziale è di 1,9, mentre il numero medio di persone per fabbricato residenziale è pari a 3,7. Pertanto, in Sicilia sono presenti in media circa due persone per ogni abitazione, la cui superficie media è di circa 70 metri quadri (34,9 metri quadri a persona, secondo i dati del Censimento 2001). Inoltre, il 53,8% dei fabbricati residenziali (728.168) è costruito in muratura portante, il 34,9% (473.195) in calcestruzzo armato e il 11,3% (151.475) in materiali di altro tipo quali legno, acciaio o strutture miste (figura 1.7). La Sicilia si caratterizza per le percentuali più elevate a livello nazionale di edifici in cemento armato (il 17,1% del totale in Italia), e di edifici in muratura portante (10,5% del totale nazionale). Dall'analisi della figura 1.8 emerge che la maggior parte dei fabbricati residenziali sono stati realizzati tra il 1962 ed il 1981, periodo durante il quale sono stati realizzati oltre 500.000 fabbricati, pari ad oltre il 38% dell'attuale parco edilizio. Prima del 1919 il parco edilizio siciliano contava 149.826 fabbricati residenziali (circa l'11% del totale odierno), mentre tra il 1919 ed il 1961 sono stati costruiti circa 415.000 edifici (poco più del 30% del parco edilizio attuale). Infine, la figura 1.8 evidenzia un calo dell'attività edilizia dall'82 sino ad oggi, con una percentuale di fabbricati costruiti dall'82 al '91 del 14%, mentre dal '91 in poi la quota

Fig. 1.6

Ripartizione percentuale delle abitazioni per Regione

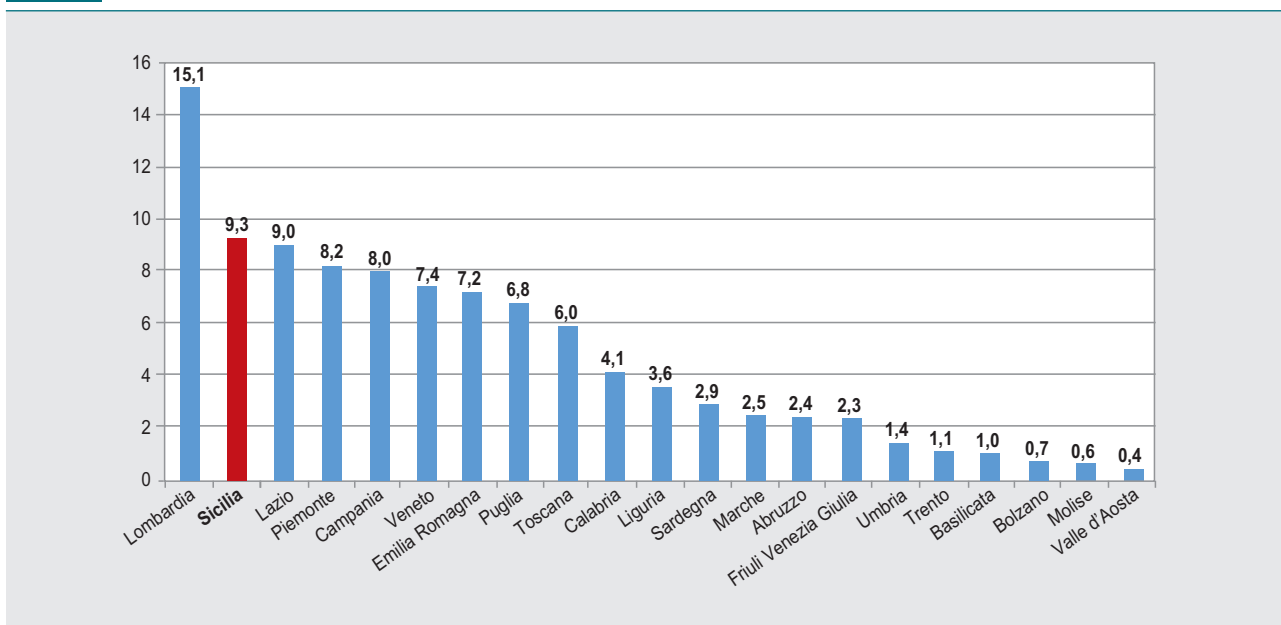
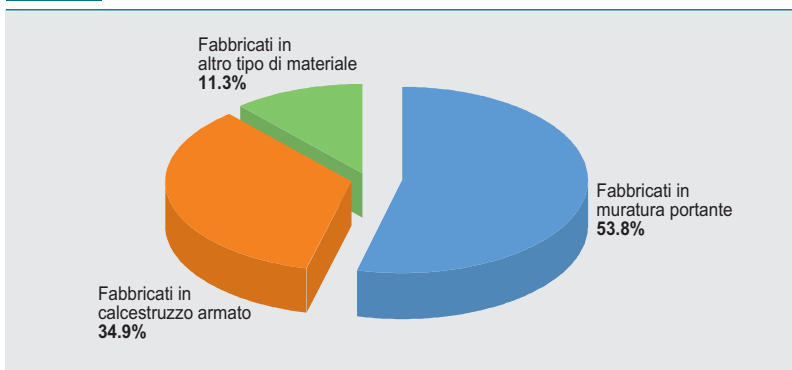
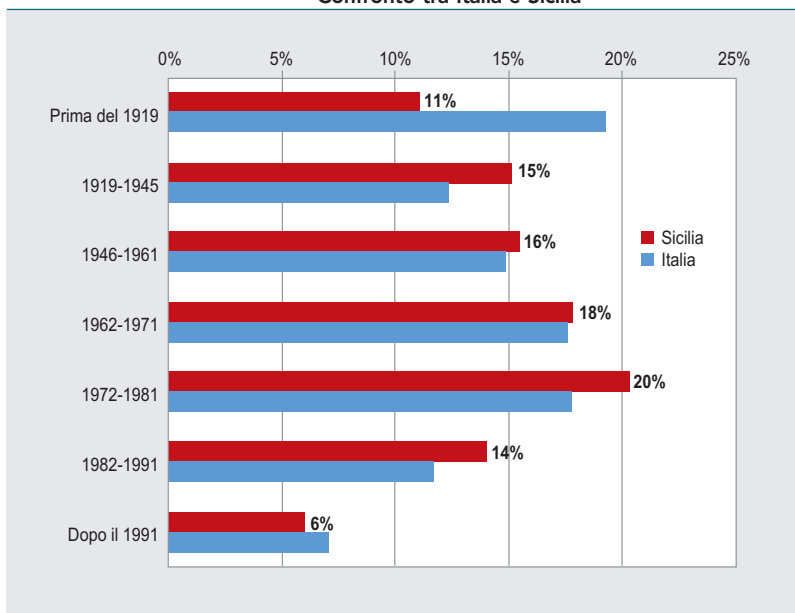
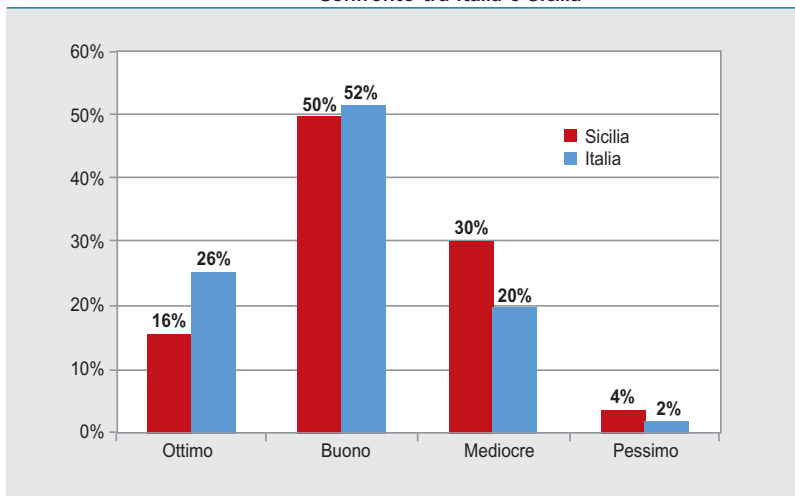


Fig. 1.7

Tipologia di materiale per i fabbricati Siciliani. Valori percentuali



di edifici costruiti rispetto al totale scende al 5,9%. Il 43,4% dei fabbricati residenziali ha due piani, seguito poi dal 31,7% che ha solo il piano terra, mentre il 17,9% ne ha tre e solo il 6,9% ha 4 o più piani. Il 68,2% degli edifici residenziali possiede una unità immobiliare e il 17,6% ne possiede due di unità. Infine l'8,0% delle abitazioni possiede dalle 3 alle 4 unità immobiliari, il 3,1% possiede 5 o 8 unità, il 1,5% ne possiede 9 o 15, e solo l'1,1% ha più di 15 unità immobiliari. Dai dati del Censimento del 2001 risulta che lo stato di conservazione strutturale dei fabbricati residenziali è ottimo per il 15,9% di essi, buono per il 50,0%, mediocre per il 30,0% e pessimo per il restante 4,1% (figura 1.9). Confrontando tali valori con gli omologhi a livello nazionale, emerge che le quote regionali di edifici in uno stato mediocre o pessimo, rispetto al parco edilizio complessivo, sono molto più elevate di quelle osservate a livello nazionale.

Fig. 1.8 Fabbricati residenziali per epoca di costruzione. Confronto tra Italia e Sicilia**Fig. 1.9** Fabbricati residenziali per stato di conservazione. Confronto tra Italia e Sicilia

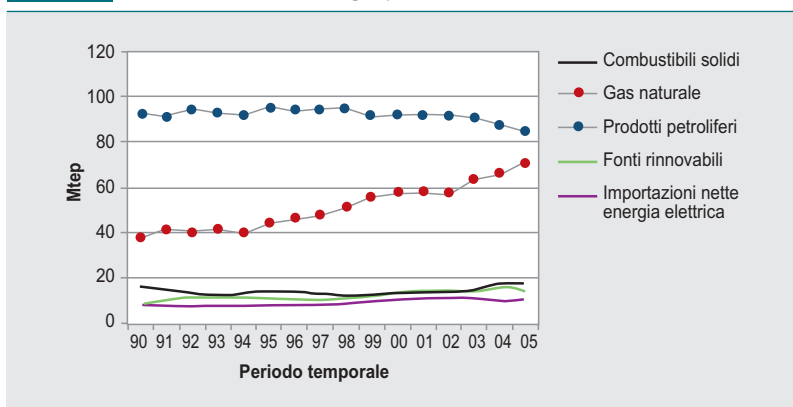
[1.4] Consumi energetici in Italia e livelli di emissione. Confronto con i paesi dell'UE

Alla modesta crescita dell'economia italiana è corrisposto, nel corso del 2005, un limitato innalzamento della domanda complessiva d'energia e dell'intensità energetica. Il consumo di energia primaria per fonti evidenzia un'ulteriore riduzione dei consumi dei prodotti petroliferi, che restano comunque la fonte che contribuisce in quota maggiore alla domanda di energia. La corrispondente crescita del ricorso al gas naturale conferma d'altronde un processo di sostituzione in atto già dalla metà degli anni novanta (figura 1.10). Anche il carbone fa segnare un calo nel 2005, invertendo in questo caso una tendenza all'aumento che si era verificata negli anni precedenti.

Sostanzialmente stabile nel lungo periodo il dato dell'energia elettrica importata, che vede nel 2005 una riduzione rispetto al 2004. In riduzione di quasi 1 punto percentuale è il contributo delle rinnovabili che, data la forte prevalenza della fonte idroelettrica, è condizionato dai fattori stagionali. I dati dal 2002 al 2005 mettono in evidenza un aumento continuo dei consumi totali di energia con un tasso più elevato nel periodo 2002-2003 e un rallentamento nel periodo 2004-2005, mentre l'andamento del PIL nello stesso periodo è rimasto quasi stazionario, registrando una leggera diminuzione nel 2005.

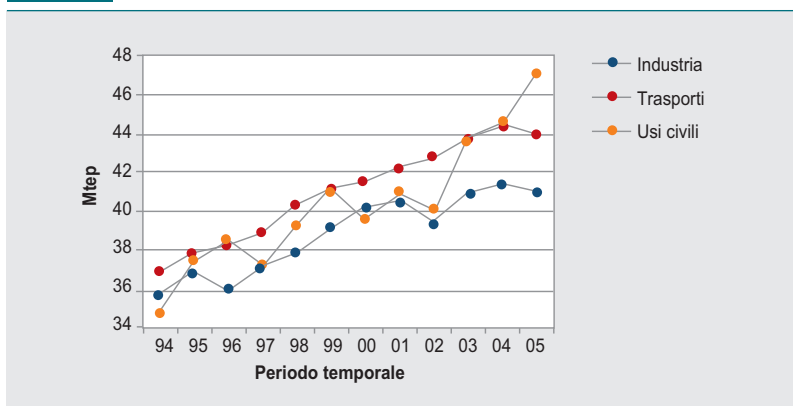
L'aumento della domanda di energia riguarda soprattutto i settori residenziale e terziario ed è causato essenzialmente da fattori climatici. In particolare, nel 2003, tali consumi sono aumentati in maniera soste-

Fig. 1.10 Consumi di energia per fonte in Italia, trend 1990/2005



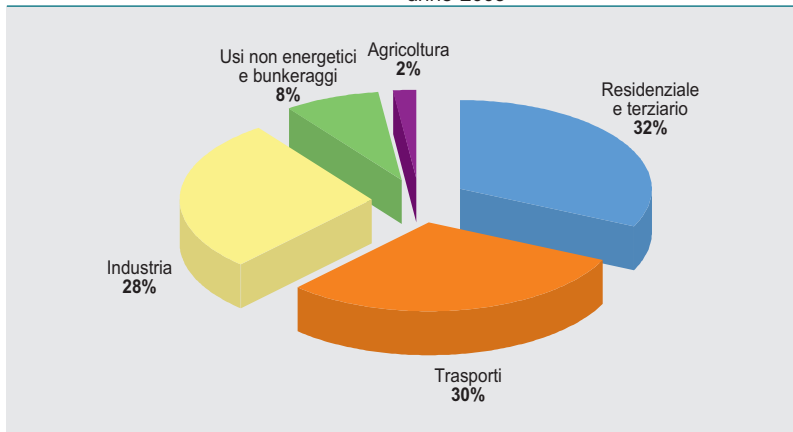
Fonte: elaborazione su dati MSE

Fig. 1.11 Consumo di energia per settori di uso finale in Italia, trend 1994/2005



Fonte: elaborazione su dati MSE

Fig. 1.12 Quote per settore di uso finale dei consumi di energia in Italia, anno 2005



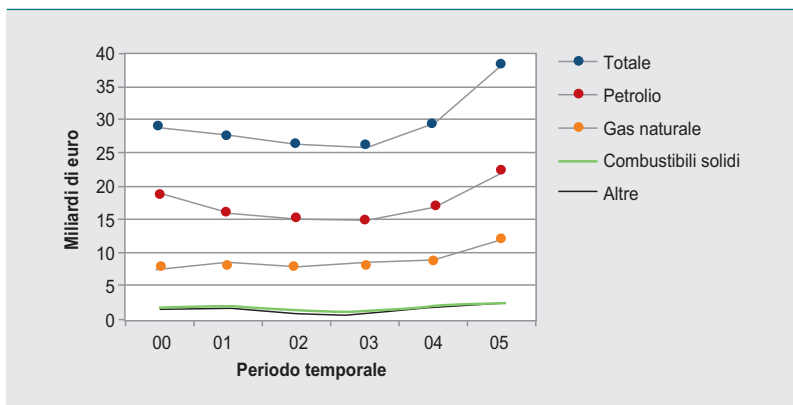
nuta con un incremento sia dei consumi di gas per il riscaldamento ambientale sia dei consumi elettrici per la climatizzazione estiva. Il trend di crescita si conferma nel 2004, anche se ad un ritmo più contenuto, e nel 2005. Nell'ultimo anno la crescita dei consumi nel settore civile controbilancia la leggera diminuzione nel settore dell'industria e dei trasporti (figura 1.11 e 1.12).

L'andamento dei prezzi del greggio ha fatto crescere ulteriormente la fattura energetica italiana che ha sfiorato, nel 2005, i 40 miliardi di euro, una cifra che rappresenta il 2,9% del PIL, facendo segnare uno degli incrementi annuali più elevati degli ultimi due decenni con un aumento di oltre il 30% rispetto al 2004 (figura 1.13). L'aumento della fattura energetica riflette un andamento delle importazioni di fonti primarie dall'estero, e quindi della dipendenza energetica dell'Italia, il cui andamento è in continua crescita a partire dalla fine degli anni novanta. Come evidenziato in figura 1.14, la dipendenza complessiva dalle importazioni sale, nel 2005, all'85,07% e fa segnare il suo massimo in relazione alle importazioni di petrolio (92,86%) e il suo minimo per le importazioni di energia elettrica (16,13%).

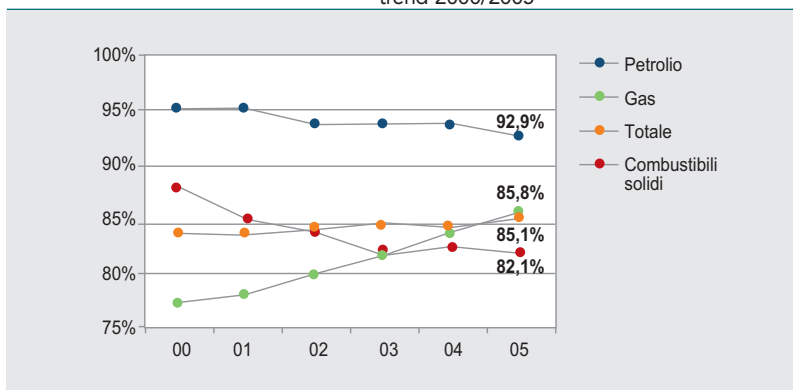
Confronto tra Italia e i paesi dell'UE

È interessante sottolineare i dati pubblicati da EURIMA, Associazione dei produttori di materiali isolanti a livello europeo. EURIMA conduce da oltre 20 anni studi sugli sviluppi degli standard qualitativi dei materiali utilizzati per l'isolamento termico e acustico.

Nel 2001 la stessa Associazione ha condotto studi sul livello di integrazione dei materiali termoisolanti nei nuovi fabbricati residenziali comunitari, inoltre ha condotto studi sulla quantità di CO₂ e sul

Fig. 1.13 Andamento della fattura energetica, trend 2000/2005

Fonte: elaborazione su dati MSE

Fig. 1.14 Andamento della dipendenza energetica per fonte trend 2000/2005

Fonte: elaborazione su dati MSE

livello dei consumi energetici imputabili agli usi energetici standard legati al settore residenziale. Da questi studi emerge che i paesi scandinavi, capeggiati dalla Svezia, sono quelli in cui si sono avuti progressi negli standard di isolamento termico. I restanti paesi, soprattutto quelli dell'Europa meridionale, tra cui l'Italia, rimangono molto indietro rispetto a tali sviluppi.

Dall'analisi della figura 1.15, emerge che l'Italia è al primo posto per quanto riguarda la percentuale maggiore di emissioni

di CO₂ (17,5% sul totale europeo), imputabile agli usi energetici standard legati al settore residenziale. Infatti da tale indagine emerge che in Italia si emettono annualmente 86.028 milioni di tonnellate di CO₂, mentre nell'intera comunità europea vengono emessi annualmente 551.499 milioni di tonnellate di CO₂, sempre per gli stessi usi energetici. Dall'analisi dai grafici in figura 1.16 e 1.17 emerge che le perdite di energia che si verificano per dispersione, attraverso le pareti e i tetti delle abitazioni italiane, risultano essere pari a 246 MJ/m² anno. Nello specifico, in Italia viene superato del 73% il livello di consumo di energia consigliato attraverso le pareti (52 MJ/m² anno). Anche se nella graduatoria di tali consumi di energia siamo all'ottavo posto con 90 MJ/m² anno, si deve considerare che i paesi europei che ci precedono sono quelli che si trovano a latitudini maggiori rispetto a quella nazionale, e che quindi subiscono un clima più freddo rispetto all'Italia (si faccia eccezione per la Spagna). Inoltre, emerge il negativo primato dell'Italia nella graduatoria delle perdite di energia attraverso i tetti, con 156 MJ/m² anno. Si ricorda che per isolamento termico di un edificio si intende l'isolamento integrale dell'involucro che lo costituisce, il quale comprende anche la superficie dei tetti. Evidentemente alla maggior parte dei professionisti italiani sfugge questo "piccolo" particolare, e le conseguenze sono quelle che si leggono in questo paragrafo. Percentualmente in Italia si supera del 445% il livello di consumo di energia consigliata attraverso i tetti (35 MJ/m² per anno). In questa graduatoria è possibile apprezzare la lungimiranza nella visione delle problematiche energetiche e l'attuazione di politiche ambientali serie implementate dai paesi scandinavi, i quali

Fig. 1.15 Ripartizione percentuale delle emissioni di CO₂ annuale, imputabile alle abitazioni europee

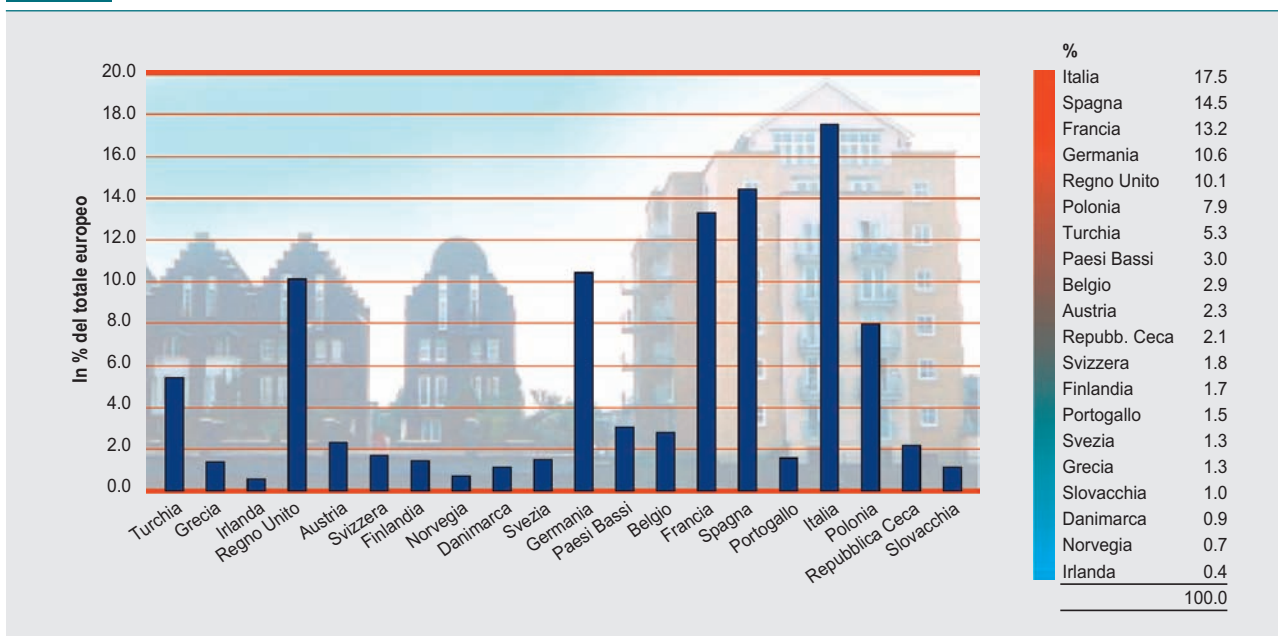


Fig. 1.16 Perdite termiche attraverso le pareti in Europa

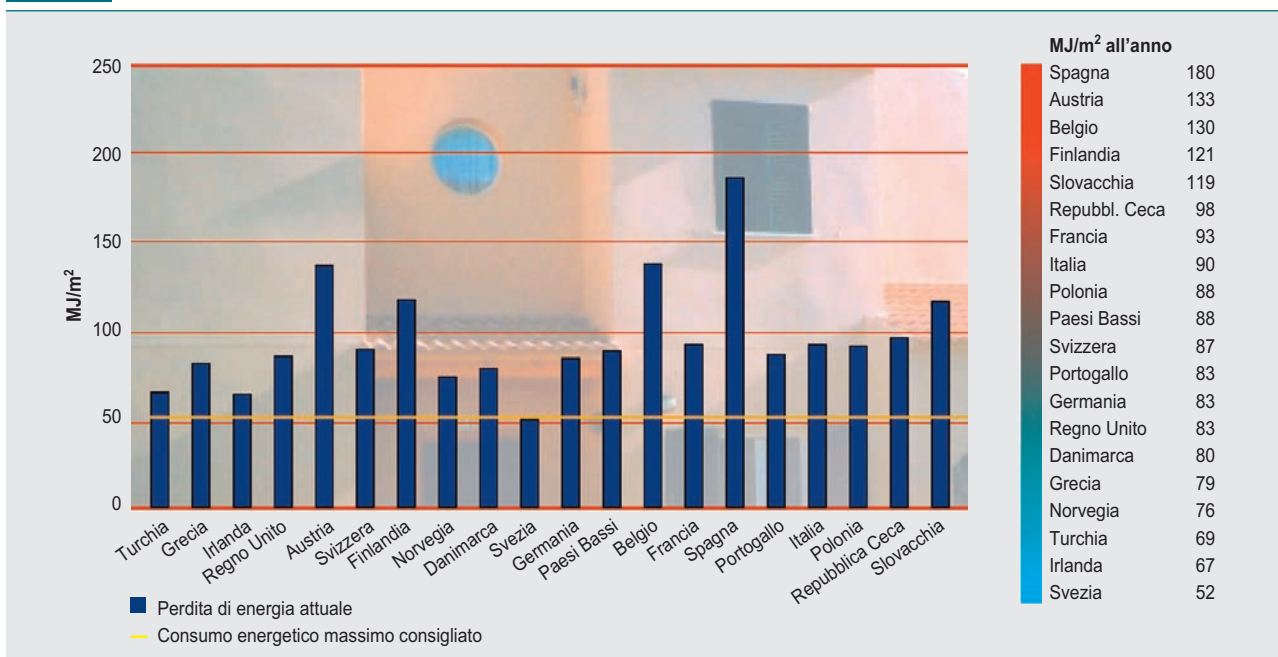


Fig. 1.17

Perdite termiche attraverso le coperture in Europa

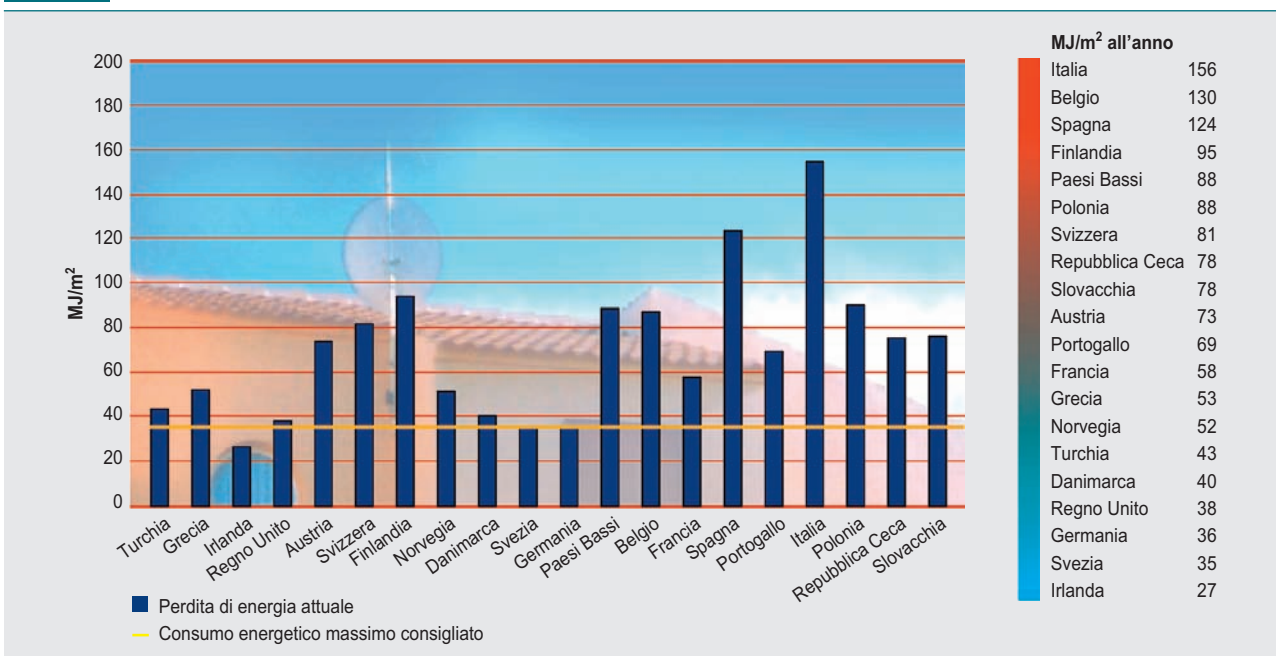
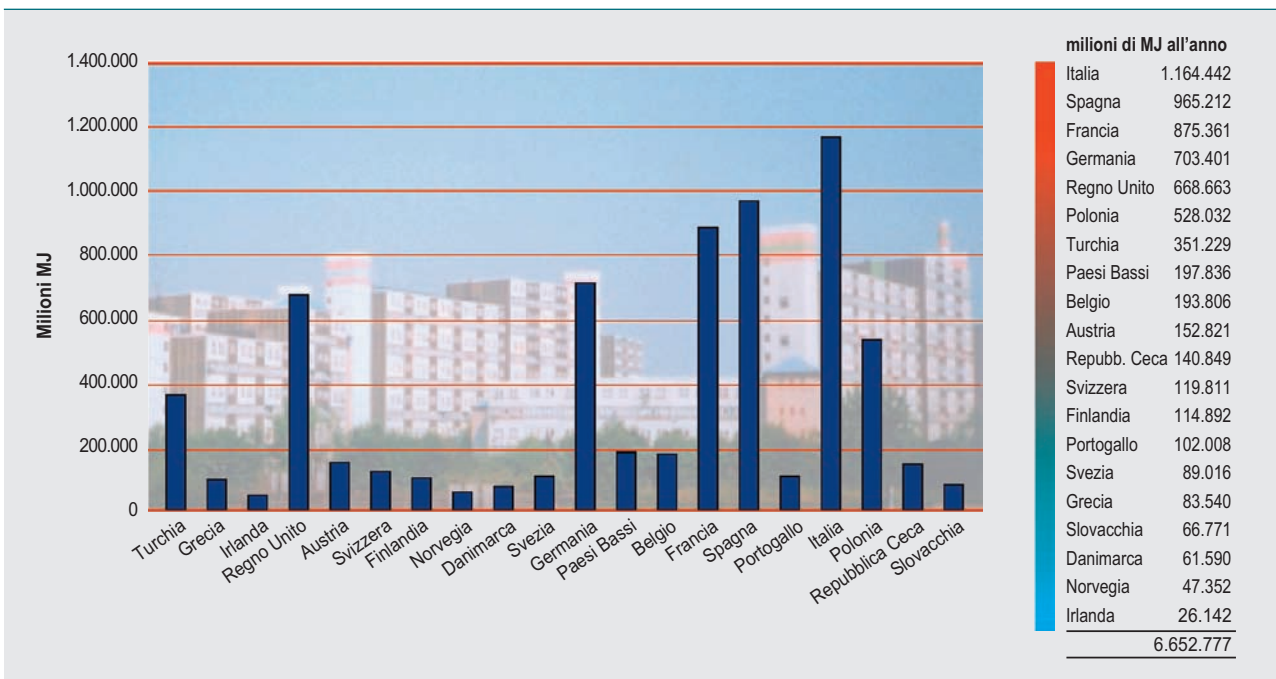


Fig. 1.18

Perdite termiche annuali nelle abitazioni in Europa



si posizionano positivamente negli ultimi posti di tale graduatoria.

Dall'analisi della figura 1.18 si ha una conferma di quanta energia viene consumata in più in Italia nel settore edilizio, dato che le perdite energetiche derivanti dallo scarso (o nullo) isolamento termico sono superiori al milione di Mega Joule (1.164.442 MJ), da confrontare con il valore complessivo europeo, che è dell'ordine dei 6.652.777 milioni di MJ.

Migliorando solo il livello dell'isolamento termico delle abitazioni, in Italia si potrebbero recuperare circa 27,80 Tep/anno.

In Italia la cultura dell'isolamento termico delle abitazioni è stata imposta con la legge 373/76, ma ancora oggi gli standard di isolamento termico sono molto bassi. Anche se l'Italia non è un paese particolarmente freddo, si deve capire che un buon isolamento dell'involucro edilizio determina un comfort termico maggiore, negli spazi controllati termicamente, a parità di fonti energetiche utilizzati negli impianti tecnologici. Tutto ciò ha come conseguenza una riduzione importante

dei consumi, determinando così una minore quantità di CO₂ emessa nell'aria e determinando un risparmio economico apprezzabile sulle bollette energetiche. Tale discorso deve essere affrontato anche per quanto riguarda il raffrescamento estivo, dato che quest'ultimo sta diventando una problematica energetica rilevante negli ultimi anni, con l'uso spropositato di impianti di condizionamento, per far fronte ad estati sempre più calde.

[1.5]

Consumi energetici in Sicilia

Per analizzare i consumi di energia nella regione Sicilia si è fatto riferimento sia ai dati elaborati da Terna Rete Elettrica Nazionale, che dal novembre 2005 cura la raccolta dei dati statistici del settore elettrico nazionale, che ai dati Istat inseriti nel Censimento della Popolazione e delle Abitazioni 2001. Nei seguenti paragrafi si confronteranno sia i consumi di energia totali che quelli dovuti agli usi domestici.

[1.5.1]

Usi finali di energia (1990 - 2004)

Per l'analisi dei consumi energetici in Sicilia sono stati presi in esame i dati contenuti nel *Rapporto Energia Ambiente (REA)*, pubblicato annualmente dall'ENEA. La figura 1.19 confronta l'andamento dei consumi energetici finali della Sicilia con quelli dell'Italia, dal 1990 al 2004. Posto pari a 100 il valore osservato per il 1990, i dati relativi alla Sicilia mostrano un andamento irregolare ed oscillante: al 2004 il livello dei consumi si attesta a 7.568 ktep, circa l'8% in più rispetto alle 7.027 ktep registrate nel 1990. L'andamento dei dati nazionali è stato invece molto più regolare, con un incremento dei

Fig. 1.19 Consumi finali di energia in Italia e in Sicilia (1990/2004)

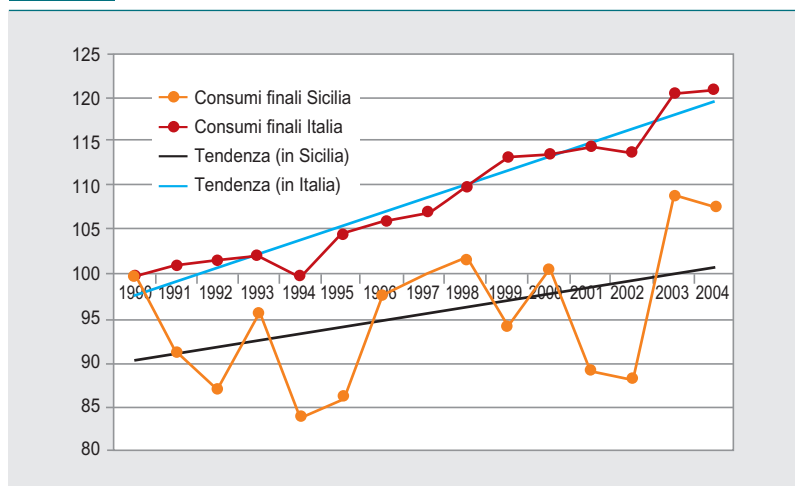
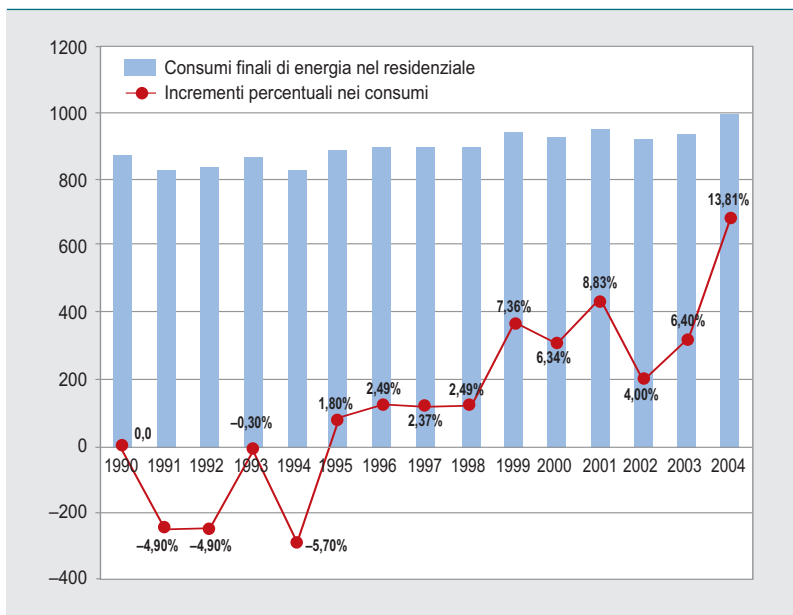
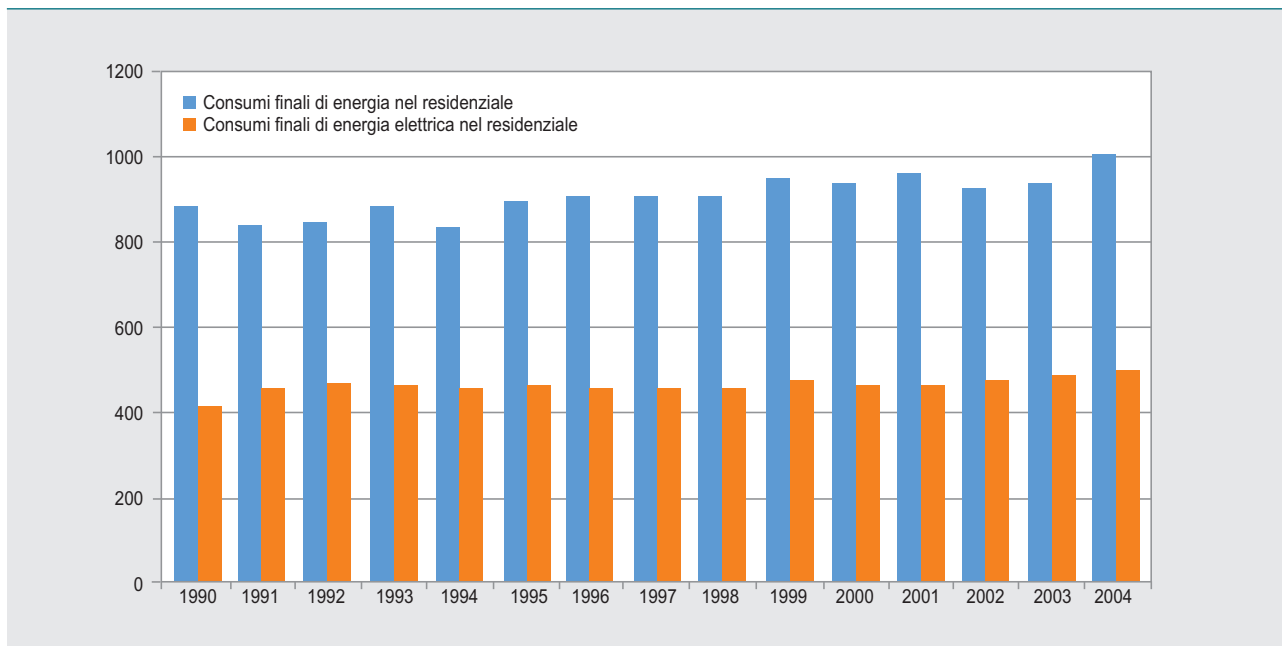


Fig. 1.20 Consumi finali di energia nel residenziale in Sicilia (1990/2004)

consumi finali proporzionalmente molto più marcato rispetto a quanto osservato per la Sicilia: infatti, al 2004 è stato registrato un livello di consumi pari a 131.477 ktep, circa il 21% in più rispetto alle 108.702 ktep osservate nel 1990.

I consumi finali di energia elettrica pesano in media per il 18% sui consumi finali e si sono mantenuti pressoché costanti per i 14 anni presi in esame rispetto il totale dei consumi. Dalla figura 1.20 emerge che i consumi di energia elettrica imputabili agli usi domestici hanno avuto un andamento dinamico nel periodo preso in esame: dal 1990 al 1994 i consumi subivano una forte contrazione, con un valore percentuale negativo massimo del -5,70% nel 1994, mentre dal 1995 fino al 2004 si è osservato un continuo incremen-

Fig. 1.21 Consumi finali di energia ed energia elettrica nel residenziale in Sicilia (1990/2004)

to che ha portato i consumi a superare nel 2004 la soglia dei 1.000 ktep.

Tale tendenza è coerente con i dati relativi ai consumi energetici nel settore civile a livello nazionale, dai quali emerge che dal 1994 in poi i consumi di gas per il riscaldamento di interni e di energia elettrica per il condizionamento estivo hanno determinato un notevole incremento dei consumi finali.

Dalla figura 1.21 emerge che in Sicilia il consumo di energia elettrica pesa mediamente per il 51% sui consumi finali di energia nel residenziale, mentre il restante 49% (441,67 ktep/anno) è da imputare all'uso di gas naturale, prodotti petroliferi, combustibili solidi ed energie rinnovabili. Mediamente i consumi finali di energia elettrica nel residenziale, per i 14 anni presi in esame, sono nell'ordine di 465,13 ktep/anno.

[1.5.2]

Usi finali di energia per il riscaldamento - impianti di riscaldamento per tipo di combustibile o energia e stima dei consumi

In Sicilia il numero di abitazioni è pari a 2.549.269 (cfr. paragrafo 1.3): dalla tabella

1.7 emerge che soltanto il 48% di esse (1.227.650) dispone di un impianto di riscaldamento.

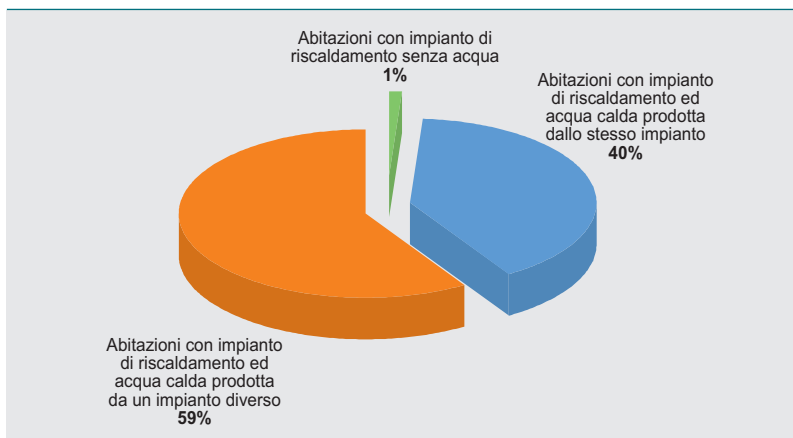
Dall'analisi della tabella 1.7 e della figura 1.22 emerge che le abitazioni che hanno disponibilità di acqua calda sanitaria prodotta dallo stesso impianto di riscaldamento sono 493.878, pari a circa il 40% di quelle provviste di impianto di riscaldamento.

Inoltre, le abitazioni che dispongono di acqua calda sanitaria prodotta da un impianto diverso sono 718.927, cioè circa il 59% di quelle provviste di un impianto di riscaldamento. In particolare, in 4.040 abitazioni l'acqua calda sanitaria è prodotta grazie ad impianti ad energia solare. Il restante 1% delle abitazioni con impianto di riscaldamento (14.845) non dispone di un impianto che produce acqua calda sanitaria.

Nel 64% delle abitazioni, l'impianto di riscaldamento è alimentato con combustibile liquido e gassoso, grazie al quale si ottiene anche acqua calda sanitaria nel 34% delle abitazioni. Inoltre, nel 25% delle abitazioni l'impianto di riscaldamento è alimentato con l'energia elettrica, nel 10% dei casi con combustibile solido, nell'1% da altro tipo di combustibile e solo nello

Tabella 1.7 – Abitazioni occupate da persone residenti con impianto di riscaldamento per tipo di combustibile o energia

Disponibilità acqua calda e impianto riscaldamento	Tipi di combustibile o energia per riscaldamento					Totale
	Liquido o gassoso	Solido	Energia elettrica	Olio combustibile	Alto tipo	
Abitazioni con impianto di riscaldamento senza acqua calda	4.984	3.416	6.281	17	147	14.845
Abitazioni con impianto di riscaldamento ed acqua calda prodotta dallo stesso impianto	426.513	13.637	50.242	284	3.202	493.878
Abitazioni con impianto di riscaldamento ed acqua calda prodotta da un impianto diverso	345.849	108.386	254.246	1.140	9.306	718.927
Totale	777.346	125.439	310.769	1.441	12.655	1.227.650

Fig. 1.22 Suddivisione delle abitazioni per tipologia di impianto, in Sicilia

0,01% delle abitazioni l'alimentazione è ad olio combustibile.

Prendendo in esame i dati della **tabella 1.8** si possono stimare i consumi finali di energia elettrica per il riscaldamento delle abitazioni. Dai dati precedentemente esposti nel paragrafo precedente, emerge che per il periodo temporale che va dal '90 al '04, i consumi finali imputabili all'uso domestico sono dell'ordine dei 900 ktep/anno, di cui circa il 50% da imputa-

re ai consumi finali di energia elettrica. Dall'analisi della **tabella 1.8** emerge che, per il periodo temporale che va dal 2001 al 2005, il valore medio del consumo di energia elettrica per il riscaldamento è di circa 170,12 GWh/anno. Sapendo che 1 tep equivale a 11.400 kWh e che 170,12 GWh equivalgono a $170.120 \cdot 10^3$ kWh, si stima che in Sicilia si consumano annualmente per il riscaldamento 14,93 ktep, ovvero il 3,2% dei 465,13 ktep destinati al consumo di energia elettrica nel settore residenziale.

Dalla **tabella 1.9** emerge che, per il biennio 2004 e 2005, i maggiori consumi di gas metano per uso domestico (cucina ed acqua calda sanitaria) e per riscaldamento sono imputabili ai comuni di Enna, Caltanissetta e Ragusa, che superano il consumo medio regionale, pari a 121,18 m³ per abitante.

Considerando che convenzionalmente il potere calorifico inferiore del gas metano è di circa 33,84 MJ/m³ (fonte ENI), e che la popolazione siciliana è pari 4.968.991, si stima che per il biennio 2004-2005 sono stati consumati 486,31 ktep di gas metano. Il consumo di gas metano per uso domestico incide soltanto per l'1,5% sul consumo totale di gas metano nelle abitazioni siciliane, pertanto il 98,5% dei 486,31 ktep stimati in precedenza è da attribuire al riscaldamento degli appartamenti siciliani durante lo stesso periodo (479 ktep) nel 2004 e 2005.

[1.5.3]

Consumi elettrici

Dall'analisi dei dati forniti da Terna (acronimo di Trasmissione Elettricità Rete Nazionale, ovvero la società che si occupa della trasmissione dell'energia elettrica via rete) e riportati nella **tabella 1.10** emer-

Tabella 1.8 – Consumi di energia elettrica per riscaldamento (GWh)

Provincia	2001	2002	2003	2004	2005
Agrigento	13,8	14,1	14,4	14,9	15,3
Caltanissetta	8,1	8,2	8,5	8,7	9,0
Catania	33,4	34,2	35,5	36,4	36,6
Enna	4,6	4,7	5,0	5,1	5,1
Messina	22,1	22,4	23,2	23,5	23,7
Palermo	42,4	43,2	43,6	45,2	46,1
Ragusa	9,9	10,1	10,5	10,7	11,1
Siracusa	12,8	13,1	13,8	14,2	14,7
Trapani	14,9	15,3	15,7	16,8	16,3
Totale	162,0	165,3	170,1	175,4	177,8

Tabella 1.9 – Consumi di gas metano per uso domestico e riscaldamento (2004-2005, m³ per abitante)

Comuni	Consumo di gas per uso domestico e riscaldamento (m ³ per abitante)
Trapani	48,28
Palermo	56,92
Messina	99,72
Agrigento	76,61
Caltanissetta	223,14
Enna	335,39
Catania	44,15
Ragusa	135,30
Siracusa	71,16
Totale	121,18

ge, dal 1995 al 2005, un incremento del 21% del consumo di energia elettrica per abitante: dai 3.050 kWh/abitante del 1995 ai 3.745 kWh/abitante del 2005. Per quanto riguarda i consumi domestici, è stato registrato un incremento di circa l'11% durante il periodo considerato: passando dai 1.062 kWh/abitante del 1995 ai 1.182 kWh/abitante del 2005.

Inoltre, analizzando i dati inerenti ai consumi di energia elettrica per abitante in

Italia, per il periodo che va dal 1995 al 2005 si è avuto un incremento del 22% per i consumi totali e del 14% per quelli domestici: pertanto, la variazione dei consumi di energia elettrica per abitante osservata in Sicilia è risultata essere inferiore all'andamento nazionale.

In particolare, per gli usi domestici è stato registrato durante il decennio considerato un tasso medio annuo di incremento pari all'1,1%, inferiore di un punto percentuale rispetto al valore del mezzogiorno, di cinque punti percentuali rispetto i valori medi del centro Italia e di tre punti percentuali rispetto il valore medio delle regioni settentrionali.

Per quanto riguarda l'ultimo anno considerato, i consumi totali nel 2005 hanno avuto un incremento dell'1,7% rispetto il 2004: gli incrementi maggiori sono stati registrati nel settore terziario (+6,4%) e nell'agricoltura (+2,7%); di contro, variazioni più contenute si sono avute per i consumi domestici (+1,3%), mentre il settore dell'industria ha subito un decremento di circa l'1%.

Nella **tabella 1.11** sono riportati i consumi di energia elettrica per categoria di utilizzatori e province nel biennio 2004/2005.

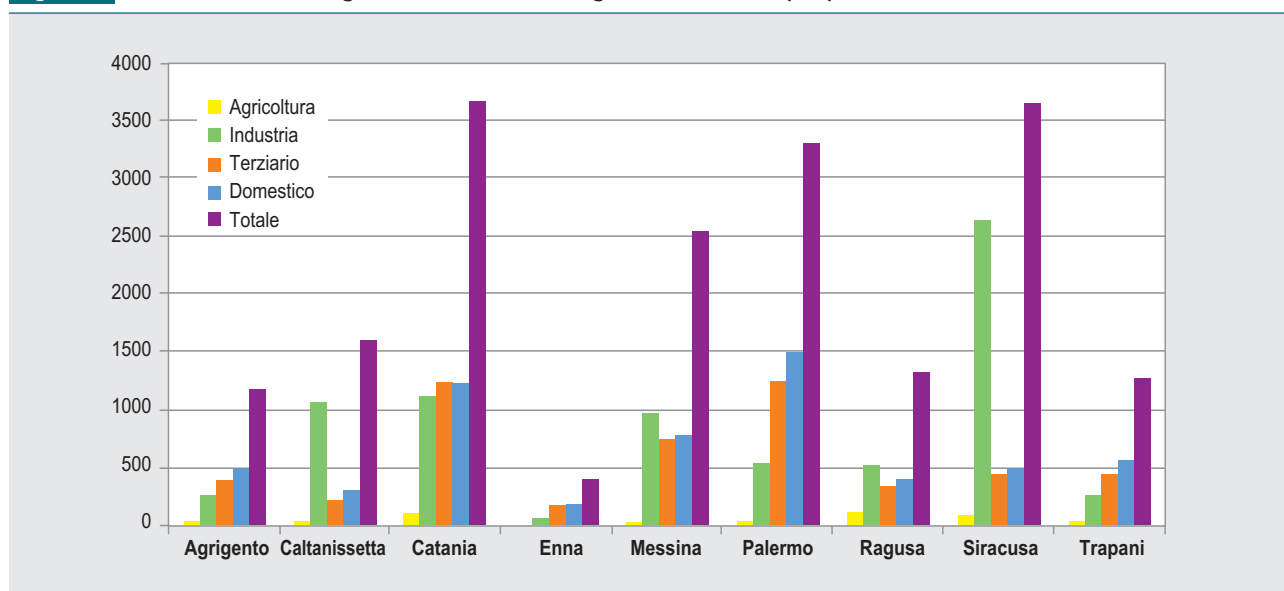
Tabella 1.10 – Consumi di energia elettrica per abitante nel periodo 1995/2005

	Consumi elettrici in Italia, per ripartizione geografica, e Sicilia - (kWh/abitante)			
	TOTALE		DOMESTICO	
	kWh/abitante	tasso medio annuo di incremento	kWh/abitante	tasso medio annuo di incremento
	2005	2005/1995	2005	2005/1995
Italia Settentrionale	6.469	2,00%	1.155	1,40%
Italia Centrale	4.994	2,50%	1.242	1,60%
Italia Meridionale	3.931	2,30%	1.071	1,20%
Sicilia	3.745	2,10%	1.182	1,10%
Italia	5.286	2,20%	1.142	1,40%

Tabella 1.11 – Consumo di energia elettrica secondo categoria di utilizzatori, per provincia (GWh)

Province	Agricoltura		Industria		Terziario		Domestico	
	2004	2005	2004	2004	2005	2005	2004	2005
Agrigento	20,6	23,7	230,6	323,6	355,2	242,7	323,6	355,2
Caltanissetta	14,2	14,6	1.198,7	204,6	216,5	1.043,5	204,6	216,5
Catania	97,8	106,6	1.044,1	1.056,3	1.110,7	1.081,3	1.056,3	1.110,7
Enna	11,1	9,9	65,7	121,5	128,9	55,6	121,5	128,9
Messina	22,1	23,0	910,5	653,6	694,0	963,8	653,6	694,0
Palermo	27,5	27,9	514,4	1.135,0	1.197,5	501,6	1.135,0	1.197,5
Ragusa	97,3	97,4	479,2	266,9	281,5	485,7	266,9	281,5
Siracusa	81,0	79,4	2.921,6	374,8	407,1	2.893,7	374,8	407,1
Trapani	24,8	24,7	239,4	346,9	383,9	261,5	346,9	383,9
Sicilia	396,3	407,1	7.604,1	4.483,2	4.775,3	7.529,5	4.483,2	4.775,3

Fig. 1.23 Consumo di energia elettrica secondo categoria di utilizzatori, per provincia (variazioni nel biennio 2004/2005)



Come detto, il settore industriale ha subito delle contrazioni rilevanti nei consumi, in particolare nelle province di Caltanissetta, Enna, Palermo e Siracusa. I maggiori incrementi nei consumi si sono verificati per il settore terziario, in particolare per le province di Agrigento, Trapani e Siracusa (rispettivamente +10,6%, +9,70% e +8,60%). Per gli usi domestici, gli incrementi maggiori sono stati osservati per la province di Ragusa (+4,2%), Caltanissetta (+3,7%), Siracusa (+3%) e Agrigento (+2,8%). In sintesi, Le province che incidono di più sui consumi totali di energia

elettrica in Sicilia sono quelle di Siracusa, Catania, Palermo e Messina.

Le province che hanno subito gli incrementi percentuali più consistenti dei consumi totali di energia elettrica, nel biennio 2004/2005, sono quelle di Agrigento, Catania, Messina e Trapani. Mentre i valori assoluti aggiornati al 2007, **figura 1.23**, evidenziano che i centri di maggior consumo sono in localizzati nelle province principali, ovvero Palermo, Catania e Messina, a cui si aggiunge Siracusa per la consistente attività industriale che ha luogo nella provincia.





Capitolo Due

Normativa sull'efficienza energetica degli edifici

[2.1]

Quadro Normativo di Riferimento

[2.1.1]

Evoluzione della normativa in Italia

Con la legge n. 373 del 30 aprile del 1976, l'Italia muove il suo primo passo verso il contenimento dei consumi energetici negli edifici, sulla spinta delle varie crisi energetiche verificatesi a metà dei settanta. Questa legge è stato il primo strumento legislativo nazionale che ha introdotto il concetto di isolamento termico minimo necessario per ogni edificio. La legge 373/76 è diventata operativa col D.P.R. 1052/77, che ha definito i criteri con cui applicare la legge, le modalità e i termini per la presentazione della relazione tecnica.

In concomitanza al D.P.R. 1052/77 è stato emanato il D.M. 10/3/77, che ha stabilito le zone climatiche ed i valori minimi e massimi del coefficiente volumico di dispersione termica negli edifici, denominato Cd. Infine con il D.M. 30/7/1986 sono stati aggiornati i valori limite del coefficiente volumico di dispersione termica Cd.

La legge n. 373 è stata strutturata in tre parti, aventi per oggetto: gli impianti di produzione del calore e i sistemi di termoregolazione, l'isolamento dell'involucro e le sanzioni previste in caso di non rispetto della legge.

Il secondo riferimento legislativo fondamentale è la legge 10/91, con conseguente abrogazione della legge 373/76. Questa legge, insieme al D.P.R. 412/93 (e successive integrazioni e modifiche), è diventata il nuovo strumento legislativo principale per regolare l'efficienza energetica degli edifici, fino al luglio 2005. La legge 10/91, ha per oggetto: "Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia".

Questa legge però è stata penalizzata dalla lunga e lenta attuazione del comma 1 dell'articolo 4 e del comma 1 dell'articolo 30, che risultavano essere importanti per il settore residenziale.

Infatti l'attuazione del comma 1 dell'art. 4 doveva definire i criteri generali tecnico-costruttivi che avrebbero permesso ai professionisti del settore di progettare e realizzare nuovi edifici, o ristrutturare quelli già esistenti, con un'alta efficienza energetica, in modo tale da assolvere gli obiettivi che la legge 10/91 si prefiggeva. Inoltre tale comma si proponeva di individuare le diverse tipologie per l'edilizia convenzionata, sovvenzionata, pubblica e privata per poi sviluppare i diversi requisiti tecnico-costruttivi, da applicare ad ogni singola categoria edilizia individuata. L'attuazione in forte ritardo di questo comma non ha permesso ai professionisti

del settore di valutare pienamente tutta una serie di fattori e requisiti energetico-ambientali utili per una progettazione che dia soluzioni energeticamente ottimali. Il risultato odierno è che la salute del parco edilizio italiano soffre di eccessivi ed inutili sprechi e di una bolletta energetica tra le più alte in tutta l'Europa.

Infine, l'attuazione del comma 1 dell'art. 30 prevedeva l'emanazione di norme che avrebbero messo in moto un sistema burocratico per la certificazione energetica degli edifici. Infatti con la legge 10/91 si è introdotto per la prima volta in Italia il discorso della certificazione energetica degli edifici, adottando le linee guida della direttiva comunitaria 93/76/CEE volta a limitare le emissioni di anidride carbonica, migliorando l'efficienza energetica degli edifici. Anche in questo caso il discorso si è concluso in un nulla di fatto, dato che i professionisti del settore non hanno potuto fruire di strumenti normativi idonei per poter attivare la certificazione energetica sugli edifici (problema ancora attuale).

Il D.P.R. 412/93 ha permesso l'attuazione del comma 4 dell'articolo 4 della legge 10/91, infatti tale decreto ha per oggetto: "Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi d'energia, in attuazione all'articolo 4 comma 4 della legge 10/91".

Questo decreto è importante perché definisce il fabbisogno di energia primaria, cioè la quantità di energia da destinare all'impianto di riscaldamento, che permette di mantenere una temperatura costante di 20 °C negli ambienti riscaldati, in funzione dei gradi giorno per le diverse zone climatiche. Tale fabbisogno energetico è un dato da calcolare in funzione

delle caratteristiche climatiche della zona, delle caratteristiche termo-fisiche dell'involucro e del regime di funzionamento degli impianti. Una volta analizzati tutti questi fattori è possibile arrivare ad una stima del fabbisogno di energia primaria del sistema edificio-impianto, che diventa un dato di verifica con i requisiti minimi richiesti dalla legge. Tutto questo è innovativo, in quanto la legge 373/76 non prevedeva un approccio simile nella verifica del fabbisogno di energia primaria, per un impianto di riscaldamento.

Successivamente al D.P.R. 421/93 sono stati emanati una serie di decreti che hanno continuato il processo attuativo della legge 10/91. Tra questi decreti sono riportati i più significativi, qui di seguito. Il D.M. 13/12/1993 è stato il decreto attuativo del comma 3 dell'art. 28 della legge 10/91. Questo decreto ha permesso l'approvazione dei modelli tipo per la compilazione della relazione tecnica, attestante la rispondenza alle prescrizioni in materia di contenimento del consumo energetico, degli edifici. Tale decreto è stato importante perché ha introdotto un modello di relazione tecnica chiara, semplice e idonea per valutare il contenimento dei consumi energetici nel campo edilizio, nel rispetto degli obiettivi di legge.

Il D.P.R. 06/08/1994 è stato il decreto che ha concluso, in parte, i commi attuativi della legge 10/91, infatti ha permesso di modificare ed integrare la tabella relativa alle zone climatiche di appartenenza dei comuni italiani allegata al D.P.R. 412/93. Tale decreto, inoltre, ha permesso il recepimento di norme UNI che regolavano, prima dell'entrata in vigore della legge 192/05, il contenimento dei consumi di energia degli impianti termici degli edifici, e rettificavano il valore limite del fabbisogno energetico normalizzato.

Dopo questa serie di decreti, nella legge 10/91 rimangono delle lacune attuative. Infatti, in riferimento al giugno 2005, mancava ancora la completa attuazione del comma 1 dell'art. 4, in riferimento al settore edilizio privato e del successivo comma , in riferimento agli edifici pubblici. Inoltre mancava ancora l'attuazione dell'articolo 30, in riferimento alle modalità per la certificazione energetica degli edifici.

Con la riforma Bassanini e con il D.Lgs. 112/98 vengono affidate le competenze amministrative, per la certificazione energetica degli edifici, alle regioni. Il 16 dicembre 2002 è stata emanata la Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio sul rendimento energetico degli edifici. Tale Direttiva si propone di promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici che si trovano nella Comunità Europea, invitando gli stati membri a recepire tale direttiva entro il 4 gennaio 2006. Con la pubblicazione di questa Direttiva, le regioni avevano bisogno di linee guida dettate dal governo, in modo tale da avere un riferimento standard nazionale su cui muoversi nell'implementazione della certificazione energetica.

Infine il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, mediante il D.M. 27/07/2005 pubblicato sulla G.U. n. 178 del 02/08/2005, presenta una norma che contiene il regolamento d'attuazione della legge 10/91, in riferimento ai commi 1 e 2 dell'articolo 4. Questo decreto ha dato la possibilità di definire i criteri generali tecnico-costruttivi e le tipologie edilizie in grado di incentivare l'uso razionale dell'energia, e favorire quindi il contenimento dei consumi.

Attualmente l'Italia, dopo la breve vita del D.M. 27/07/2005, dispone di due strumen-

ti normativi quali il D.Lgs. 192/05 e il D.Lgs. 311/06. Questi due decreti rappresentano il recepimento della Direttiva 2002/91/CE e dovrebbero colmare definitivamente le lacune attuative della 10/91, instaurando una politica energetica efficace per risolvere gradualmente le problematiche energetiche nazionali attuali e future.

[2.1.2]

La Direttiva Europea 2002/91/CE

Il Parlamento europeo emana, il 16 dicembre 2002, la Direttiva 2002/91/CE relativa al miglioramento dell'efficienza energetica nel settore edilizio. La sua pubblicazione si è avuta sulla G.U.C.E.L. il 4 gennaio 2003.

Per quanto riguarda la Direttiva 2002/91/CE, il preambolo introduttivo fa leva sul rafforzamento, con un adeguato strumento normativo, di una precedente Direttiva cioè la 93/76/EEC. Tale Direttiva era nata chiedendo agli stati membri di sviluppare ed implementare dei programmi atti a promuovere l'efficienza energetica nel settore edilizio.

La Direttiva 2002/91/CE nasce con l'intento di rendere il più veloce possibile le azioni di risparmio energetico negli edifici, siti nella Comunità Europea. Per rendere più veloce il risparmio energetico, la Direttiva si propone di mettere in evidenza con chiarezza e semplicità i requisiti per determinare i consumi energetici.

Si propone l'introduzione di criteri e metodologie, condivisibili al livello comunitario, che permettano di determinare le prestazioni energetiche degli edifici. Inoltre si propone di implementare i processi ispettivi con cadenza temporale sul sistema edificio-impianto, da parte di tecnici qualificati, i quali a loro volta possano contribuire agli aggiornamenti delle analisi

energetiche di ogni singolo stato comunitario. Infine si propone di richiedere e migliorare gli standard progettuali di edifici di nuova costruzione e degli edifici da ristrutturare.

La Direttiva esprime la volontà di un approccio teso al miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici. In questo modo si può contribuire insieme al raggiungimento degli obiettivi di risparmio energetico e di riduzione delle emissioni del biossido di carbonio e di altri inquinanti in atmosfera. Inoltre, una migliore prestazione energetica di un edificio determina un valore aggiunto anche di tipo economico. Questo potrebbe essere un motivo in più per progettare e realizzare edifici con alte performance energetiche. In questo contesto, la certificazione energetica di un edificio diventa uno strumento atto a garantire trasparenza e consapevolezza per i proprietari e gli utilizzatori, nel campo delle prestazioni energetiche degli edifici realizzati o ristrutturati.

La Direttiva inoltre raccomanda che gli edifici pubblici, regolarmente visitati da un elevato numero di persone, siano d'esempio per le misure atte a migliorare le performance energetiche e ambientali e che siano sottoposti alle procedure di certificazione a intervalli regolari.

La Direttiva pone l'attenzione anche sul crescente impatto dei sistemi di condizionamento dell'aria. Si deve stabilire una priorità per le strategie progettuali volte a migliorare le performance energetiche dell'edificio nel periodo estivo. A questo scopo ci deve essere un ulteriore sviluppo delle tecniche di raffrescamento passivo, soprattutto quelle che migliorano le condizioni climatiche e micro-climatiche in sito.

La Direttiva definisce i principi generali per un sistema energeticamente efficien-

te e gli obiettivi da raggiungere e lascia inoltre agli Stati membri il compito di implementare i suoi principi generali e gli obiettivi con opportune disposizioni legislative, prevedendo che gli stessi si impegnino a sorvegliare e seguire il processo di applicazione della norma, favorendolo con forme di incentivazioni.

Commento agli Articoli della Direttiva 2002/91/CE

La Direttiva si compone di 17 articoli. Di seguito, però, sono commentati quelli relativi ai contenuti principali e che quindi caratterizzano la filosofia con cui tale Direttiva è nata.

Articolo 1 e 2: La Direttiva si propone l'obiettivo di promuovere il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici, migliorando di conseguenza il loro rendimento energetico. Si deve raggiungere questo obiettivo tenendo conto delle condizioni climatiche esterne locali e delle condizioni di benessere all'interno degli edifici, nonché dell'efficacia sotto il profilo dei costi. Importante è la lettura dell'articolo 2, in quanto vengono definite tutte le terminologie tecniche in riferimento al sistema edificio-impianto.

Articoli 3 e 4: La Direttiva richiede agli stati membri l'adozione di una metodologia di calcolo per il rendimento energetico degli edifici, sulla base di un quadro normativo generale in essa contenuto. Infatti ogni singolo stato membro, recependo la presente Direttiva, deve sviluppare ed implementare una metodologia per calcolare il rendimento energetico degli edifici, in base alle peculiarità climatiche nazionali. L'adozione di tale metodologia, deve permettere ad ogni singolo stato membro di sviluppare dei requisiti

minimi di rendimento energetico da poter applicare alle diverse tipologie edilizie, esistenti o da realizzare sul proprio territorio.

Articoli 5 e 6: Gli stati membri devono provvedere all'applicazione degli articoli 3 e 4, in modo tale che gli edifici di nuova costruzione rispettino i requisiti minimi di prestazione energetica. Inoltre per gli edifici di nuova costruzione con superficie utile superiore ai 1000 m², devono essere fatte valutazioni tecnico-economico-ambientali per l'eventuale installazione di impianti alternativi che utilizzino fonti rinnovabili, o che sfruttino i principi tecnologici della cogenerazione, teleriscaldamento e pompe di calore. Si tiene presente che questo tipo di valutazione deve essere inserita nella fase progettuale.

Infine, gli edifici esistenti con superficie totale superiore ai 1000 m² che subiscono operazioni di ristrutturazione importanti devono migliorare il loro rendimento energetico in riferimento ai requisiti minimi di prestazione energetica (art. 4), per quanto sia possibile tecnicamente, funzionalmente ed economicamente.

Articolo 7: La Direttiva indica disposizioni sulla compilazione di un attestato di certificazione energetica al momento della costruzione, della compravendita o della locazione di un edificio di nuova costruzione o esistente. Nel caso di edifici di nuova costruzione, è il costruttore a mettere a disposizione del futuro acquirente l'attestato di certificazione energetica. Nel caso di compravendita o locazione, è il proprietario che mette a disposizione del futuro acquirente o locatario l'attestato di certificazione energetica. L'attestato ha validità massima di dieci anni. L'attestato di certificazione energetica, è un documento che permette al consumatore di confrontare e

valutare il rendimento energetico di un edificio, con i valori vigenti a norma di legge e con i valori di riferimento. Inoltre tale attestato deve essere accompagnato da raccomandazioni che possono migliorare il rendimento energetico di un edificio, in termini di costi e benefici.

Articoli 8, 9 e 10: La Direttiva promuove la riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di anidride carbonica, regolamentando le ispezioni periodiche delle caldaie e dei sistemi di condizionamento dell'aria (con potenza nominale > 12 kW) da parte di personale qualificato.

[2.1.3]

Quadro normativo attuale: D.Lgs. 192/05 e D.Lgs. 311/06

Il Decreto legislativo n. 192/05 ha come oggetto: "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia", pubblicato sulla G.U. del 23 settembre 2005 n. 222. Tale decreto modifica le modalità di calcolo delle dispersioni di energia in un edificio e soprattutto introduce la "Certificazione Energetica". In questo nuovo contesto normativo vi è l'obbligo, entro un anno dall'entrata in vigore di tale decreto, del rilascio di un "attestato di certificazione energetica" da parte del costruttore. In questo attestato di certificazione energetica sono portati i livelli di consumo di energia dei fabbricati.

Il Decreto legislativo n. 311/06, pubblicato sulla G.U. n. 26 del 1 febbraio 2007, ha come oggetto: "Disposizioni correttive ed integrative della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico in edilizia". Quindi allo stato attuale, la normativa energetica nazionale è regolamentata dal D.Lgs. 192/05 modificato e integrato dal D.Lgs. 311/06. Resta vigente l'impianto

normativo della legge 10/91 e dei suoi decreti attuativi D.P.R. n. 412/93, D.M. 06/08/94 e D.M. 27/06/05, ad eccezione degli articoli abrogati dall'articolo 16 integrato con il D.Lgs. 311/06.

Con l'attuazione della Direttiva 2002/91/CE tramite il Decreto 192/05 integrato dal D.Lgs 311/06 (ne seguito richiamati con il solo termine "Decreto"), il governo italiano fa un nuovo passo verso l'uso razionale dell'energia nell'edilizia, per limitare sprechi inutili e dannosi per l'ambiente, per la salute delle generazioni future e per le tasche degli italiani. Senza troppo addentrarsi nel formalismo lessicale normativo del Decreto, tramite questo paragrafo si vuole focalizzare l'attenzione sugli articoli più significativi, in modo tale da comprendere meglio questo nuovo strumento normativo e poterlo utilizzare nel modo più idoneo. Successivamente si tratteranno in modo approfondito i punti salienti della certificazione energetica e le specifiche tecniche richieste nei metodi di verifica dei requisiti minimi, in riferimento alla prestazione energetica del sistema edificio-impianto.

Commento ai principali Articoli e Commi

Nell'articolo 1 vengono descritte le finalità che sono:

... i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica, contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal protocollo di Kyoto, promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico.

Inoltre l'art. 1 disciplina (comma 2):

- a. la metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche integrate degli edifici;
- b. l'applicazione di requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici;
- c. i criteri generali per la certificazione energetica degli edifici;
- d. le ispezioni periodiche degli impianti di climatizzazione;
- e. i criteri per garantire la qualificazione e l'indipendenza degli esperti incaricati della certificazione energetica e delle ispezioni degli impianti;
- f. la raccolta delle informazioni e delle esperienze, delle elaborazioni e degli studi necessari all'orientamento della politica energetica del settore;
- g. la promozione dell'uso razionale dell'energia anche attraverso l'informazione e la sensibilizzazione degli utenti finali, la formazione e l'aggiornamento degli operatori del settore.

Nell'articolo 3 viene definito l'ambito d'intervento. Ai fini del contenimento dei consumi di energia il Decreto si applica:

- a. alla progettazione e realizzazione di edifici di nuova costruzione, nonché ad edifici esistenti con superficie utile superiore ai 1.000 m², che subiscano interventi di ristrutturazione integrale, su elementi edilizi costituenti l'involucro, o subiscano interventi di manutenzione straordinaria quali demolizione o ricostruzione dello stesso; all'ampliamento di un edificio, se interessa un volume superiore al 20% dell'intero edificio esistente;
- b. alla progettazione e realizzazione di impianti installati in edifici di nuova costruzione o ad impianti nuovi instal-

lati in edifici esistenti. Inoltre l'applicazione si estende all'esercizio, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici installati su tutti gli edifici, anche già esistenti, con le modalità descritte dagli articoli 7, 9 e 12;

- c. alla certificazione energetica degli edifici, secondo quanto previsto dall'articolo 6 del medesimo Decreto.

È importante notare che nel caso di edifici esistenti sono definite tre modalità di applicazione: integrale (ristrutturazione integrale e demolizione e ricostruzione in manutenzione straordinaria degli elementi dell'involucro di edifici maggiori di 1000 metri quadrati), integrale limitata (al solo ampliamento di edifici se il volume interessato è inferiore al 20% del volume totale) e parziale (ovvero applicata nel rispetto di specifici livelli prestazionali e prescrittivi per ristrutturazioni dell'involucro edilizio, installazione di nuovi impianti o loro ristrutturazione, sostituzione dei singoli generatori di calore).

Il decreto, secondo il comma 3, non è applicato a:

- d. immobili ricadenti nell'ambito della disciplina dei beni culturali o ad immobili di notevole interesse pubblico, nel caso in cui si altererebbero i caratteri storici e artistici di questi beni;
- e. fabbricati industriali, artigianali ed agricoli non residenziali, dove gli spazi interni vengono riscaldati dal calore o dai reflui energetici (altrimenti non utilizzabili) derivanti da esigenze tecniche del processo produttivo;
- f. fabbricati isolati con superficie utile totale inferiore ai 50 m²;
- g. impianti installati in un edificio, il cui uso principale è legato al processo produttivo e l'uso meno preponderante è legato agli utilizzi tipici del settore civile.

Nell'articolo 4 sono definiti i criteri, le metodologie di calcolo delle dispersioni energetiche e la definizione di requisiti minimi per valutare la prestazione energetica degli edifici. Entro il 5 febbraio 2006 (centoventi giorni dall'entrata in vigore del presente Decreto) con uno o più decreti del Presidente della Repubblica, si dovevano rendere applicabili i seguenti criteri, metodologie e requisiti:

- a. i criteri generali, le metodologie di calcolo e i requisiti minimi finalizzati al contenimento dei consumi di energia e al raggiungimento degli obiettivi di cui all'articolo 1, tenendo conto di quanto riportato nell'allegato B e della destinazione d'uso degli edifici. Questi decreti disciplinano la progettazione, l'installazione, l'esercizio, la manutenzione e l'ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici, per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari e, limitatamente al settore terziario, per l'illuminazione artificiale degli edifici;
- b. i criteri generali di prestazione energetica per l'edilizia sovvenzionata e convenzionata, nonché per l'edilizia pubblica e privata, anche riguardo alla ristrutturazione degli edifici esistenti e sono indicate le metodologie di calcolo e i requisiti minimi finalizzati al raggiungimento degli obiettivi di cui all'articolo 1, tenendo conto di quanto riportato nell'allegato B e della destinazione d'uso degli edifici;
- c. i requisiti professionali e i criteri di accreditamento per assicurare la qualificazione e l'indipendenza degli esperti o degli organismi a cui affidare la certificazione energetica degli edifici e l'ispezione degli impianti di

climatizzazione. I requisiti minimi sono rivisti ogni cinque anni e aggiornati in funzione dei progressi della tecnica;

In attesa che vengano emanati i Decreti attuativi e le linee guida ministeriali, per la progettazione degli edifici e degli impianti si dovrà fare riferimento agli articoli presenti nel Titolo II (Norme Transitorie) del Decreto. I riferimenti normativi a cui ci si dovrà attenere nel regime transitorio sono riportati qui di seguito.

- per calcolare la prestazione energetica degli edifici nella climatizzazione invernale, in particolare il fabbisogno annuo di energia primaria, si deve fare riferimento alla legge 10/91 con i suoi decreti attuativi modificati (art.16, della 311/06), e alle disposizioni presenti nell'Allegato I del Decreto (articolo 11, comma 1);
- il contenimento dei consumi energetici, nell'esercizio e nella manutenzione degli impianti per il riscaldamento invernale già esistenti, nonché la regolamentazione delle ispezioni periodiche sugli stessi per la verifica dei requisiti minimi, sono regolamentati dal D.P.R. 412/93 con successive modifiche ed integrazioni, dall'articolo 7, articolo 9 e dall'Allegato L del Decreto (articolo 12, comma 1);
- la regolamentazione della certificazione energetica valida per il regime transitorio, qui richiamata con rapidi cenni riguardanti l'articolo 6, verrà trattata in modo approfondito nel paragrafo successivo. Nell'articolo 6 si reintroduce e si evidenzia l'importanza della "certificazione energetica degli edifici", tematica comunque già introdotta dalla legge 10/91 e ribadita con l'entrata in vigore della Direttiva 2002/91/CE. I punti salienti che caratterizzano la certificazione energetica, con l'entrata in vigore del Decreto sono:
 - l'attestato di certificazione energetica di un edificio, un documento che contiene i dati relativi all'efficienza energetica propri dell'edificio, i valori vigenti a norma di legge e i valori di riferimento, che consentono ai cittadini di confrontare e valutare la prestazione energetica dello stesso, quindi valutare i consumi energetici annuali; inoltre l'attestato deve essere corredato da suggerimenti che, tramite interventi significativi ed economicamente convenienti, possono realmente migliorare la prestazione energetica dell'edificio, quindi permettere consumi ed immissioni più contenute (comma 6, art. 6); l'attestato ha una validità decennale, e deve essere aggiornato ogni qualvolta vengano eseguiti interventi di ristrutturazione che modifichino la prestazione energetica dell'edificio o dell'impianto (comma 5, art. 6);
 - per gli edifici di nuova costruzione e per gli edifici esistenti, in riferimento a quelli descritti precedentemente nel punto a) dell'articolo 3 (art. 3, comma 2.a), risulta essere a carico del costruttore la compilazione dell'attestato di certificazione energetica dell'edificio, redatto secondo le disposizioni dell'articolo 4, comma 1 già citato. (comma 1 e 1 bis, art. 6);
 - per tutti gli edifici esistenti, in cui vi è il trasferimento a titolo oneroso o la locazione dell'intero immobile o della singola unità abitativa, spetta al proprietario l'onere dell'attestato di certificazione energetica da allegare all'atto di compravendita o nell'atto che attesta la locazione, con la gradualità temporale prevista dai commi 3 e 4 del Decreto;
 - la certificazione di un appartamento

sito in un condominio può essere realizzata valutando i requisiti prestazionali dell'appartamento stesso, oppure valutando due condizioni diverse. Se l'edificio condominiale dispone di un impianto termico centralizzato, allora la certificazione energetica dell'appartamento può essere realizzata valutando la certificazione dell'intero edificio condominiale, oppure se ogni appartamento dispone di un impianto termico autonomo, la certificazione dell'appartamento può essere realizzata valutando la certificazione di un appartamento dello stesso condominio e della stessa tipologia;

- dal 1 gennaio 2007, l'attestato di certificazione energetica di un edificio o della singola unità immobiliare conforme a quanto prescritto nel comma 6 dell'articolo 6, diventa anche uno strumento necessario per poter accedere ad incentivi e ad agevolazioni sia come sgravi fiscali sia come contributi derivanti da fondi pubblici, per interventi che permettano il miglioramento delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto.

Quanto descritto fino ad ora avrà veramente valenza giuridica quando il Ministero delle attività produttive, di concerto con altri Ministeri, avvalendosi di metodologie di calcolo definiti dai decreti attuativi (non ancora redatti) del Decreto, metterà a disposizione dei progettisti e dei professionisti qualificati (comma 1, art. 4), le Linee Guida Nazionali per la certificazione energetica degli edifici.

Per colmare queste lacune attuative, si fa riferimento al regime transitorio del Decreto, prendendo in esame i commi 1 bis, 1 ter dell'articolo 11:

Fino alla data di entrata in vigore delle Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, di cui all'articolo 6, comma 9, l'attestato di certificazione energetica degli edifici è sostituito a tutti gli effetti dall'attestato di qualificazione energetica rilasciato ai sensi dell'articolo 8, comma 2 o da una equivalente procedura di certificazione energetica stabilita dal Comune con proprio regolamento antecedente alla data dell'8 ottobre 2005 (comma 1 bis). Trascorsi dodici mesi dall'emanazione delle Linee guida nazionali di cui all'articolo 6 comma 9, l'attestato di qualificazione energetica e la equivalente procedura di certificazione energetica stabilita dal Comune perdono la loro efficacia ai fini di cui al comma precedente (comma 1 ter).

Nell'articolo 7 vengono date disposizioni sull'esercizio e la manutenzione degli impianti per la climatizzazione invernale ed estiva; il Decreto presenta la novità dell'estensione della propria regolamentazione agli impianti per la climatizzazione estiva.

- Il proprietario (il conduttore, l'amministratore di condominio, o per chi ne fa le veci) detiene la responsabilità per il mantenimento in esercizio degli impianti e provvede affinché siano eseguite le operazioni di controllo e di manutenzione secondo quanto previsto dal Decreto.
- L'operatore qualificato ed incaricato per il controllo la manutenzione degli impianti, esegue dette attività a regola d'arte e nel rispetto della normativa vigente, ed al termine delle medesime operazioni, ha l'obbligo di redigere e sottoscrivere un rapporto di controllo tecnico conforme ai modelli previsti dagli Allegati F e G del Decreto.

[2.2]

Verso la Certificazione Energetica

Ogni edificio di nuova costruzione dovrà gradualmente avere una propria "carta d'identità energetica", che ne dichiari quali siano le prestazioni in termini di *efficienza energetica*. Il parametro di riferimento è l'*indice di prestazione energetica* (EP) con il quale si esprime la quantità annua di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell'edificio, compresi la climatizzazione invernale e estiva, la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, la ventilazione e l'illuminazione. L'*attestato di certificazione energetica* di un edificio, o di un alloggio, deve garantire che questo è ben progettato e che porta ad un risparmio di energia. Fatto questo ragionamento, appare corretto che l'*attestato di certificazione energetica* pesi sulla valutazione economica dell'edificio (sia esso in vendita o in affitto), a garanzia dell'oggettiva qualità dello stesso portata a conoscenza dell'acquirente o dell'affittuario. Di riflesso, una casa avente *attestato di certificazione energetica*, dovrebbe avere un valore di mercato più alto. Questo deve spingere i costruttori a migliorare le prestazioni energetiche, in modo tale da rendere più appetibile e più conveniente la scelta degli edifici costruiti all'acquirente.

[2.2.1]

Modalità Operative della Certificazione Energetica, previste dal 192/05: doveri, oneri e responsabilità delle figure professionali coinvolte

Il presente paragrafo è suddiviso in tre parti, in modo tale da mettere in risalto i

punti salienti del sistema di certificazione energetica. Nel primo sottoparagrafo sono individuate le figure professionali coinvolte in tale sistema, nonché i loro doveri e oneri. Nel secondo sottoparagrafo sono definite le procedure per il rilascio dell'*attestato di certificazione energetica* e nel terzo ed ultimo sottoparagrafo sono descritte le sanzioni che gravano sulle diverse figure professionali coinvolte, nel momento in cui queste risultino essere inadempienti verso le procedure. Per quanto attiene alle figure professionali coinvolte, sono definite le seguenti condizioni:

A. ai sensi dell'articolo 6, è previsto che tutti gli edifici di nuova costruzione e nel caso di ristrutturazione integrale degli elementi edilizi costituenti l'involucro e di demolizione e ricostruzione, in manutenzione straordinaria, di edifici esistenti di superficie utile superiore a 1000 m², al termine della costruzione medesima il costruttore ha il dovere di rilasciare un *attestato di certificazione energetica* secondo le metodologie descritte nell'articolo 4 (comma 1), del presente Decreto. Questo è quanto prevedeva il D.Lgs. 192/05 entro il 5 febbraio 2006, con l'attuazione del comma 1, dell'articolo 4 tramite uno o più decreti del presidente della repubblica. In realtà questi decreti attuativi non sono ancora stati redatti, quindi attualmente l'impianto normativo che regola la certificazione energetica è affidata alle norme transitorie, introdotte dal D.Lgs. 311/06. In questo contesto normativo, dal 2 febbraio 2007 fino a che il Ministero delle Attività Produttive non disporrà di Linee Guida Nazionali per regolare la certificazione energetica degli edifici, l'*attestato di certificazione energetica* può essere

sostituito con l'attestato di qualificazione energetica che deve essere rilasciato o dal progettista o dal direttore dei lavori;

B. ai sensi dell'articolo 6, diversamente da quanto già previsto dal comma 1, tutti coloro che intendono trasferire a titolo oneroso, od affittare, un edificio o una singola unità immobiliare si assumono il dovere e l'onere di farsi rilasciare, da un professionista qualificato, l'attestato di certificazione energetica. Tale attestato verrà poi allegato all'atto di compravendita, o consegnato in copia dichiarata dal proprietario al conduttore dell'immobile, in caso di affitto (comma 3 e 4, art. 6). Le modalità operative e temporali previste nei commi 3 e 4, sono introdotte dal D.Lgs. 311/06 e vengono descritte qui di seguito:

- a decorrere dal 1 luglio 2007, il venditore (o affittuario) si assume l'onere dell'attestato per il trasferimento a titolo oneroso (o affitto) di edifici aventi superficie utile superiore a 1.000 m²;
- a decorrere dal 1 luglio 2008, il venditore (o affittuario) si assume l'onere dell'attestato per il trasferimento a titolo oneroso (o affitto) di edifici aventi superficie utile fino a 1.000 m²; in questo caso si fa riferimento al trasferimento a titolo oneroso (o affitto) dell'intero immobile, e non della singola unità immobiliare;
- a decorre dal 1 luglio 2009, il venditore (o affittuario) si assume l'onere dell'attestato per il trasferimento a titolo oneroso (o affitto) delle singole unità immobiliari.

In riferimento al comma 1 ter dell'articolo 6, a decorre dal 1 gennaio 2007 l'attestato di certificazione energetica dell'edificio o della singola unità immobiliare è

obbligatoria per accedere agli incentivi ed alle agevolazioni di qualsiasi natura, sia come sgravi fiscali o contributi a carico di fondi pubblici o della generalità degli utenti, finalizzati al miglioramento delle prestazioni energetiche dell'unità immobiliare, dell'edificio o degli impianti. Nella gestione del periodo transitorio l'attestato di certificazione energetica è sostituito dall'*attestato di qualificazione energetica*.

In riferimento alla definizione riportata nell'Allegato A, comma 2 del Decreto, per "attestato di qualificazione energetica" si intende:

il documento predisposto ed asseverato da un professionista abilitato, non necessariamente estraneo alla proprietà, alla progettazione o alla realizzazione dell'edificio, nel quale sono riportati i fabbisogni di energia primaria di calcolo, la classe di appartenenza dell'edificio, o dell'unità immobiliare, in relazione al sistema di certificazione energetica in vigore, ed i corrispondenti valori massimi ammissibili fissati dalla normativa in vigore per il caso specifico o, ove non siano fissati tali limiti, per un identico edificio di nuova costruzione.

Per quanto riguarda gli edifici di nuova costruzione e quelli esistenti descritti precedentemente nel punto A., il progettista o il costruttore devono mettere a disposizione del direttore dei lavori, un attestato di qualificazione energetica. Infatti il direttore dei lavori è tenuto ad asseverare ed a allegare, insieme alla dichiarazione di fine lavori e alla documentazione di conformità dell'opera realizzata, l'attestato di qualificazione energetica. Se l'attestato non verrà allegato, si terrà inefficace da parte del comune competente la

dichiarazione di fine lavori (articolo 8, comma 2).

Al di fuori di quanto è previsto nel comma 2 dell'articolo 8 del Decreto e per gli edifici esistenti descritti precedentemente nel punto B., l'attestato di qualificazione energetica diventa un documento facoltativo. Tale documento viene predisposto dal proprietario di un edificio o di una singola unità immobiliare già esistente, avvalendosi della consulenza di un professionista abilitato. In questo caso, nell'attestato di qualificazione energetica devono essere indicati tutti i possibili interventi che possono migliorare la prestazione energetica dell'edificio, e deve essere indicata la classe energetica d'appartenenza dello stesso, in relazione al sistema di certificazione in vigore. Inoltre devono essere indicati, sempre nell'attestato, i passaggi di classe energetica se sull'edificio (o unità immobiliare) si sono avuti interventi che hanno migliorato le prestazioni energetiche dello stesso.

Infine si ricorda che l'attestato di qualificazione energetica, per gli edifici descritti sia nel punto A. che B., è un documento che il certificatore terzo valuterà per poi rilasciare (se lo riterrà conforme alle disposizioni future in materia) l'attestato di certificazione energetica, quando saranno ormai in vigore le Linee Guida Nazionali che renderanno operativa la certificazione energetica. Si ricorda inoltre che trascorsi 12 mesi dall'emanazione delle Linee guida Nazionali, l'attestato di qualificazione energetica perderà di efficacia, quindi spetterà ai soggetti interessati far valutare l'attestato di qualificazione energetica da certificatori terzi, in modo tale che l'attestato di qualificazione possa essere convertito poi in quello di certificazione energetica (comma 1 ter e 1 bis, articolo 11) Fino all'entrata in vigore delle Linee Guida

Nazionali che renderanno operativa la certificazione energetica, l'attestato di qualificazione energetica è un documento valido per il sistema attuale di certificazione, in regime transitorio. Quindi è un documento:

- messo a disposizione sempre dal *direttore dei lavori*, al termine della realizzazione di un edificio di nuova costruzione o di lavori che modificano le prestazioni energetiche di un edificio o di un impianto;
- necessario per la stipula di atti di compravendita o locazione e per la richiesta di incentivi tramite la consegna al comune della dichiarazione energetica;
- che dovrà essere fatto valutare da un certificatore terzo, quando entreranno in vigore le Linee Guida Nazionali per la certificazione energetica.

In condizioni in cui il fatto costituisca reato, il *professionista qualificato* che rilascia un attestato di qualificazione energetica (o di certificazione energetica in futuro) non veritiero, è punito con una sanzione amministrativa pari al 70% della parcella, calcolata secondo le vigenti tariffe professionali. Inoltre l'autorità che applica tale sanzione è tenuta a comunicare all'ordine o al collegio professionale competente la sanzione imputata al professionista incaputo nel reato, per i provvedimenti disciplinari conseguenti.

Il *direttore dei lavori* che omette di allegare, alla dichiarazione di fine lavori da consegnare al comune competente, l'asseverazione di conformità delle opere e l'attestato di qualificazione energetica (art.8, comma 2) è punito con una sanzione amministrativa pari al 50% della parcella calcolata secondo le vigenti tariffe professionali. Inoltre l'autorità che applica tale sanzione è tenuta a comunicare all'ordine o al collegio professionale competente, la

sanzione imputata al professionista incaputo nel reato, per i provvedimenti disciplinari conseguenti.

In condizioni in cui il fatto costituisca reato, il *direttore dei lavori* che presenta al comune l'asseverazione prevista dall'articolo 8, comma 2, nella quale viene attestata falsamente la correttezza dell'attestato di qualificazione energetica, è punito con la sanzione di 5.000 euro.

Il costruttore che non consegna al proprietario, contestualmente all'immobile, l'originale dell'attestato di qualificazione energetica (o dell'attestato di certificazione energetica in futuro) è punito con una sanzione amministrativa non inferiore ai 5.000 euro e non superiore ai 30.000 euro.

Nel caso in cui il proprietario, il quale trasferisce a titolo oneroso il proprio immobile, omette il trasferimento dell'attestato di qualificazione energetica all'acquirente, il contratto di compravendita risulta nullo. La nullità può essere fatta valere dall'acquirente.

Nel caso in cui il proprietario, il quale trasferisce a titolo oneroso l'uso dell'immobile tramite affitto, omette il trasferimento dell'attestato di qualificazione energetica al conduttore, il contratto di affitto risulta nullo. La nullità può essere fatta valere dal conduttore.

[2.2.2]

Efficienza energetica dell'involucro edilizio

Per quanto riguarda i criteri generali, le metodologie di calcolo e i requisiti minimi finalizzati al contenimento dei consumi di energia e al raggiungimento degli obiettivi descritti nell'art. 1, si fa riferimento alle "Norme Transitorie" che sono contenute nel Titolo II del Decreto, all'articolo 11. Tali norme transitorie avranno valenza giuridica fino all'entrata in vigore dei

decreti attuativi dei commi 1 e 2 dell'articolo 4 del Decreto.

Per quanto riguarda l'efficienza energetica dell'involucro, nella progettazione di edifici di nuova costruzione e di ristrutturazione di edifici esistenti (comma 2.a.b), si effettua la verifica qui di seguito riportata, in riferimento all'Allegato I, comma 1.c del Decreto.

Le trasmittanze termiche U delle diverse strutture opache e delle chiusure trasparenti costituenti l'involucro edilizio non devono superare il 30% dei valori limite riportati nelle pertinenti tabelle relative ai punti 2, 3 e 4 dell'Allegato C, del Decreto. Il Valore di verifica delle trasmittanze U non deve superare il valore limite di oltre il 30%:

$$\text{Valore di Verifica } U < 1,3 U_{\text{lim}}$$

I valori di trasmittanza limite U_{lim} sono riportati in tabelle suddivise per tipologia di strutture, che rappresentano l'involucro di un edificio. Quindi le strutture di cui deve essere verificata la trasmittanza U sono quelle: opache verticali, orizzontali o inclinate di copertura, inoltre sono le strutture orizzontali di pavimento e quelle chiusure trasparenti che costituiscono gli infissi. Le tabelle dell'Allegato C sono riportate di seguito.

Per tutte le categorie di edifici classificati in base alla destinazione d'uso, in riferimento all'articolo 3 del D.P.R. 412/93 ad eccezione delle categorie E.6 ed E.8, il progettista, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti, nel caso di edifici di nuova costruzione e nel caso di ristrutturazioni di edifici esistenti di cui all'articolo 3, comma 2.a.b (anche per il comma 2.c, numero 1, quest'ultimo limitatamente alle ristrutturazioni totali):

Tabella 2.1 – Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache verticali, in W/(m²K)

Zona climatica	Dal 1 gennaio 2006 U, in W/(m ² ·K)	Dal 1 gennaio 2008 U, in W/(m ² ·K)	Dal 1 gennaio 2010 U, in W/(m ² ·K)
A	0,85	0,72	0,62
B	0,64	0,54	0,48
C	0,57	0,46	0,40
D	0,50	0,40	0,36
E	0,46	0,37	0,34
F	0,44	0,35	0,33

Tabella 2.2 – Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, in W/(m²K)

Zona climatica	Dal 1 gennaio 2006 U, in W/(m ² ·K)	Dal 1 gennaio 2008 U, in W/(m ² ·K)	Dal 1 gennaio 2010 U, in W/(m ² ·K)
A	0,80	0,42	0,38
B	0,60	0,42	0,38
C	0,55	0,42	0,38
D	0,46	0,35	0,32
E	0,43	0,32	0,30
F	0,41	0,31	0,29

Tabella 2.3 – Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali di pavimento, in W/(m²K)

Zona climatica	Dal 1 gennaio 2006 U, in W/(m ² ·K)	Dal 1 gennaio 2008 U, in W/(m ² ·K)	Dal 1 gennaio 2010 U, in W/(m ² ·K)
A	0,80	0,74	0,65
B	0,60	0,55	0,49
C	0,55	0,49	0,42
D	0,46	0,41	0,36
E	0,43	0,38	0,33
F	0,41	0,36	0,32

- a. valuta puntualmente e documenta l'efficacia dei sistemi schermanti delle superfici vetrate, esterni o interni, tali da ridurre l'apporto di calore per irraggiamento solare;
- b. verifica, in tutte le zone climatiche ad

esclusione della F, per le località nelle quali il valore medio mensile dell'irradiazione sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva, $I_{m,s}$, sia maggiore o uguale a 290 W/m², che il valore della massa superficiale M_s delle pareti opache verticali, orizzontali o inclinate sia superiore a 230 kg/m²;

- c. utilizza al meglio le condizioni ambientali esterne e le caratteristiche distributive degli spazi per favorire la ventilazione naturale dell'edificio; nel caso che il ricorso a tale ventilazione non sia efficace, può prevedere l'impiego di sistemi di ventilazione meccanica nel rispetto del comma 13, articolo 5, decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412;

Gli effetti positivi che si ottengono con il rispetto dei valori di massa superficiale delle pareti opache previsti alla lettera "b", possono essere raggiunti, in alternativa, con l'utilizzo di tecniche e materiali, anche innovativi, che permettano di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti in funzione dell'andamento dell'irraggiamento solare.

In tal caso deve essere prodotta una adeguata documentazione e certificazione delle tecnologie e dei materiali che ne attestino l'equivalenza con le predette disposizioni.

Per tutte le categorie di edifici classificati in base alla destinazione d'uso, in riferimento all'articolo 3 del D.P.R. 412/93 ad eccezione delle categorie E.1, E.6 ed E.8, con superficie superiore ai 1.000 m², la schermatura con sistemi esterni deve essere installata obbligatoriamente per gli edifici di nuova costruzione e ristrutturazioni totali e parziali di edifici esistenti. Nel caso di ristrutturazioni totali o parziali e manutenzione straordinaria dell'involucro edilizio, all'infuori di quanto già defi-

Tabella 2.4 – Valori limite della trasmittanza termica U delle chiusure trasparenti comprensive degli infissi, in $W/(m^2K)$

Zona climatica	Dal 1 gennaio 2006 U, in $W/(m^2\cdot K)$	Dal 1 gennaio 2008 U, in $W/(m^2\cdot K)$	Dal 1 gennaio 2010 U, in $W/(m^2\cdot K)$
A	5,5	5,0	4,6
B	4,0	3,6	3,0
C	3,3	3,0	2,6
D	3,1	2,8	2,4
E	2,8	2,4	2,2
F	2,4	2,2	2,0

Tabella 2.5 – Valori limite della trasmittanza centrale termica U dei vetri, in $W/(m^2K)$

Zona climatica	Dal 1 gennaio 2006 U, in $W/(m^2\cdot K)$	Dal 1 gennaio 2008 U, in $W/(m^2\cdot K)$	Dal 1 gennaio 2010 U, in $W/(m^2\cdot K)$
A	5,0	4,5	3,7
B	4,0	3,4	2,7
C	3,0	2,3	2,1
D	2,6	2,1	1,9
E	2,4	1,9	1,7
F	2,3	1,7	1,3

nito nel precedente punto a., si applica quanto segue:

- per quanto riguarda le strutture opache verticali, per tutte le categorie di edifici, classificati secondo la destinazione d'uso nell'articolo 3 del D.P.R. 412/93, il valore della trasmittanza termica U delle strutture opache verticali, confinanti con l'esterno o con spazi interni non riscaldati, deve essere minore o uguale ai valori di trasmittanza riportati nella **tabella 2.1** al punto 2 dell'Allegato C del Decreto, in riferimento alla zona climatica e all'anno di realizzazione degli interventi sull'edificio. Quanto appena esposto vale per la verifica di strutture opache verticali con ponte termico corretto. Inoltre per

le strutture opache verticali aventi ponti termici non corretti, si deve prendere in esame la trasmittanza termica media (della struttura in esame e del ponte termico) e verificarla sempre con i valori di trasmittanza riportati nella **tabella 2.1** al punto 2 dell'Allegato C del Decreto. Infine se su una struttura opaca verticale sono presenti delle piccole superfici aventi spessore ridotto (sottofinestre o altre altri componenti), la verifica della trasmittanza termica U viene comunque fatta in riferimento ai valori di trasmittanza riportati nella **tabella 2.1** al punto 2 dell'Allegato C del Decreto, considerando la superficie totale;

- per quanto riguarda le strutture opache orizzontali, per tutte le categorie di edifici, classificati secondo la destinazione d'uso nell'articolo 3 del D.P.R. 412/93 ad eccezione di edifici adibiti ad attività industriali, artigianali ed assimilabili (E.8), il valore della trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate, confinanti con l'esterno o con spazi interni non riscaldati, deve essere minore o uguale ai valori di trasmittanza riportati nelle tabelle relative al punto 3 dell'Allegato C del Decreto, in funzione della zona climatica e dell'anno di realizzazione dell'intervento sull'edificio. Quanto appena esposto vale per la verifica di strutture opache verticali con ponte termico corretto. Inoltre per le strutture opache orizzontali (o inclinate) aventi ponti termici non corretti, si deve prendere in esame la trasmittanza termica media (della struttura in esame e del ponte termico) e verificarla sempre con i valori di trasmittanza riportati nelle tabelle relative al punto 3 dell'Allegato C del Decreto. Infine per strutture opache orizzontali

realizzate su di un terreno, si deve analizzare la trasmittanza termica del sistema struttura-terreno e verificarla sempre con i valori di trasmittanza riportati nelle tabelle relative al punto 3 del Decreto;

- per quanto riguarda le chiusure trasparenti, per tutte le categorie di edifici, classificati secondo la destinazione d'uso nell'articolo 3 del D.P.R. 412/93 ad eccezione di edifici adibiti ad attività industriali, artigianali ed assimilabili (E.8), il valore della trasmittanza termica U delle chiusure trasparenti (comprensive di infisso) deve essere minore o uguale ai valori di trasmittanza riportati nelle tabelle relative al punto 4 dell'Allegato C del Decreto, in funzione della zona climatica e dell'anno di realizzazione dell'intervento sull'edificio;
- in riferimento a tutte le categorie di edifici (ad eccezione della categoria E.8) realizzati in zona climatica C, D, E e F, il valore di trasmittanza termica U , delle strutture di edilizie verticali od orizzontali, che dividono un edificio da un altro o da una unità immobiliare confinante (salvo il rispetto del decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 5 dicembre 1997 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici"), deve essere minore o uguale $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Tale valore deve essere verificato anche per tutte quelle strutture opache verticali, orizzontali ed inclinate che confinano con l'ambiente esterno, e che delimitano ambienti non riscaldati;
- inoltre per tutte le categorie di edifici (ad eccezione della categoria E.8) deve essere verificato che sulle superfici interne, costituenti l'involucro, non vi sia presenza di condense superficiali e per le condense interstiziali, qualora esi-

stenti, queste devono essere presenti nella percentuale rievaporabile conformemente ai valori limite descritti dalla normativa tecnica vigente. Nel caso in cui non si disponga di un sistema per il controllo dell'umidità, per i calcoli sarà necessario considerare l'umidità relativa interna pari al valore del 65%, alla temperature di $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

[2.2.3]

Efficienza degli impianti

Per gli edifici di nuova costruzione e per gli edifici esistenti che subiscono interventi disposti nel comma 2a.b, valgono le disposizioni qui di seguito riportate, per il calcolo del fabbisogno annuo di energia primaria. Quindi in sede progettuale:

- si deve calcolare l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale (EPI), e si deve verificare che tale valore sia inferiore ai valori limite riportati nelle pertinenti tabelle presenti nel punto 1 dell'Allegato C del Decreto, in relazione alla classificazione dell'edificio, alla data di realizzazione dell'edificio o dell'intervento, al rapporto di forma S/V e alla zona climatica dell'edificio; l'indice EPI è espresso in kWh/m^2 per anno o kWh/m^3 per anno;
- si deve calcolare il rendimento globale medio stagionale dell'impianto termico, e di deve verificare che tale valore sia maggiore del valore limite calcolato con la seguente relazione:

$$\eta_g = (65 + 3 \log P_n) \%$$

dove P_n è la potenza utile nominale del generatore o dei generatori espressa in kW ; per valori di P_n superiori ai 1.000 kW , la relazione qui sopra espressa non viene più utilizzata ma si assume come valore limite di η_g , un valore pari al 74%;

- nel caso in cui il rapporto St/Su (*super-*

ficie trasparente complessiva/superficie utile) di un edificio sia minore del valore numerico 0,18, il calcolo del fabbisogno annuo di energia primaria può essere omesso se l'edificio o l'intervento realizzato rispettano contemporaneamente le disposizioni previste nel punto B., in riferimento all'efficienza energetica dell'involucro, e le seguenti prescrizioni impiantistiche:

- a. siano installati generatori di calore con rendimento termico utile, a carico pari al 100% della potenza termica utile nominale, maggiore o uguale al valore di verifica presente nella **tabella 2.6**; se P_n risulta maggiore di 400 kW, si utilizza il valore calcolato in corrispondenza a 400 kW;
- b. le nuove pompe di calore elettriche installate abbiano un rendimento utile (η_u) in condizioni nominali, in riferimento all'energia primaria, maggiore o uguale al valore limite calcolato con la formula a $(90 + 3 \log P_n)$; la verifica è fatta utilizzando come fattore di conversione tra energia elettrica ed energia primaria $0,36 W_{en.elettr}/W_{en.primaria}$; il termine $\log P_n$ rappresenta il logaritmo in base 10 della potenza utile nominale del generatore, espressa in kW;
- c. sia installata almeno una centralina

di termoregolazione programmabile per ogni generatore di calore, presente in ogni unità immobiliare, ed inoltre siano installati dispositivi modulanti per la regolazione automatica della temperatura ambiente nei singoli locali o nelle singole zone che, per loro caratteristiche di uso ed esposizione, possono godere, a differenza di altri ambienti riscaldati, di apporti di calore solari o comunque gratuiti;

- d. la temperatura media del fluido termovettore, in corrispondenza delle condizioni di progetto sia inferiore o uguale ai 60° C.

In riferimento ai primi due punti del presente paragrafo, negli edifici di nuova costruzione e in quelli esistenti che subiscono interventi descritti nel comma 2.a.b, si deve cercare di ottenere le seguenti condizioni di verifica:

- $E_{Pi} < E_{Pi_{lim}}$, quindi l'indice di prestazione energetica dell'edificio, in riferimento alla climatizzazione invernale, deve risultare inferiore ai valori ($E_{Pi_{lim}}$) riportati nelle **tabelle 1.1, 1.2** del punto 1 dell'Allegato C del Decreto;
- $\eta_g > \eta_{g_{lim}}$, quindi il rendimento globale medio stagionale dell'impianto termico deve risultare maggiore del valore limite espresso dalla relazione $\eta_{g_{lim}} = (65 + 3 \log P_n)$.

Le tabelle appena citate precedentemente possono essere visionate anche qui di seguito. Le **tabelle da 2.7 a 2.9** presentano i valori di $E_{P_{lim}}$ validi per gli edifici residenziali di classe E.1, esclusi collegi, conventi, case di pena e caserme. Per tutte le altre categorie di edifici, valgono i valori di $E_{P_{lim}}$ espressi nelle **tabelle 2.10, 2.11, 2.12**.

Tabella 2.6

Zona climatica	$\eta \geq$
A	
B	$(90 + 2 \log P_n)$
C	
D	
E	$(93 + 2 \log P_n)$
F	

Tabella 2.7 – Valori limite dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, in kWh/m² per anno

Rapporto di forma dell'edificio S/V	Zona climatica										
	A		B		C		D		E		F
	fino a 600 gg	a 601 gg	a 900 gg	a 901 gg	a 1400 gg	a 1401 gg	a 2100 gg	a 2101 gg	a 3000 gg	oltre 3000 gg	
≤ 0,2	10	10	15	15	25	25	40	40	55	55	
≥ 0,9	45	45	60	60	85	85	110	110	145	145	

Tabella 2.8 – Valori limite, applicabili dal 1 gennaio 2008, dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, in kWh/m² per anno

Rapporto di forma dell'edificio S/V	Zona climatica										
	A		B		C		D		E		F
	fino a 600 gg	a 601 gg	a 900 gg	a 901 gg	a 1400 gg	a 1401 gg	a 2100 gg	a 2101 gg	a 3000 gg	oltre 3000 gg	
≤ 0,2	9,5	9,5	14	14	23	23	37	37	52	52	
≥ 0,9	41	41	55	55	78	78	100	100	133	133	

Tabella 2.9 – Valori limite, applicabili dal 1 gennaio 2010, dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, in kWh/m² per anno

Rapporto di forma dell'edificio S/V	Zona climatica										
	A		B		C		D		E		F
	fino a 600 gg	a 601 gg	a 900 gg	a 901 gg	a 1400 gg	a 1401 gg	a 2100 gg	a 2101 gg	a 3000 gg	oltre 3000 gg	
≤ 0,2	8,5	8,5	12,8	12,8	21,3	21,3	34	34	46,8	46,8	
≥ 0,9	36	36	48	48	68	68	88	88	116	116	

Per gli edifici esistenti che subiscano interventi descritti nel comma 2.c (numero 1), in cui si effettui una nuova installazione, ristrutturazione degli impianti termici o sostituzione del generatore o dei generatori di calore (comma 2.c, numero 2 e 3 dell'art. 3), si deve:

- calcolare il rendimento globale medio stagionale e tale valore deve essere superiore al valore calcolato con la seguente relazione

$$\eta_g = (75 + 3 \log P_n) \%$$

per valori di P_n superiori ai 1.000 kW, la relazione qui sopra espressa non viene più utilizzata, ma si assume come valore limite di η_g , un valore pari all'84%;

- allegare alla relazione tecnica (disposizioni previste dal comma 1, articolo 8) una diagnosi energetica dell'edificio e dell'impianto, se si effettua una installazione di un nuovo generatore di calore con potenza nominale del focolare (P_{n_f}) maggiore o uguale a 100 kW. In tale diagnosi si devono individuare gli interventi significativi per ridurre la

Tabella 2.10 – Valori limite dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, in kWh/m³ per anno

Rapporto di forma dell'edificio S/V	Zona climatica										
	A		B		C		D		E		F
	fino a 600 gg	a 601 gg	a 900 gg	a 901 gg	a 1400 gg	a 1401 gg	a 2100 gg	a 2101 gg	a 3000 gg	oltre 3000 gg	
≤ 0,2	2,5	2,5	4,5	4,5	7,5	7,5	12	12	16	16	
≥ 0,9	11	11	17	17	23	23	30	30	41	41	

Tabella 2.11 – Valori limite, applicabili dal 1 gennaio 2008, dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, in kWh/m³ per anno

Rapporto di forma dell'edificio S/V	Zona climatica										
	A		B		C		D		E		F
	fino a 600 gg	a 601 gg	a 900 gg	a 901 gg	a 1400 gg	a 1401 gg	a 2100 gg	a 2101 gg	a 3000 gg	oltre 3000 gg	
≤ 0,2	2,5	2,5	4,5	4,5	6,5	6,5	10,5	10,5	14,5	14,5	
≥ 0,9	9	9	14	14	20	20	26	26	36	36	

Tabella 2.12 – Valori limite, applicabili dal 1 gennaio 2010, dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, in kWh/m³ per anno

Rapporto di forma dell'edificio S/V	Zona climatica										
	A		B		C		D		E		F
	fino a 600 gg	a 601 gg	a 900 gg	a 901 gg	a 1400 gg	a 1401 gg	a 2100 gg	a 2101 gg	a 3000 gg	oltre 3000 gg	
≤ 0,2	2,0	2,0	3,6	3,6	6,0	6,0	9,6	9,6	12,7	12,7	
≥ 0,9	8,2	8,2	12,8	12,8	17,3	17,3	22,5	22,5	31	31	

spesa energetica, i tempi di ritorno degli investimenti applicati a tali interventi e i possibili miglioramenti della classe energetica dell'edificio sulla base della quale sono state ponderate le scelte impiantistiche che si sono realizzate. Si ricorda che i possibili miglioramenti della classe energetica dell'edificio devono essere valutati in funzione del sistema di certificazione energetica in vigore;

- allegare alla relazione tecnica una diagnosi energetica, con le caratteristiche

precedentemente esposte, a seguito dell'installazione di un impianto termico autonomo (derivante dalla decisione autonoma del singolo o dalla volontà condominiale di dismettere l'impianto termico centralizzato) nel caso in cui la somma delle potenze P_{n_f} dei singoli generatori di calore installati nell'edificio (o dell'impianto termico preesistente se con potenza superiore a 100 kW) raggiunge o supera il valore di 100 kW (Allegato I, punto 3).

Per gli edifici esistenti che subiscano inter-

venti descritti nel comma 2.c (numero 1), nel caso in cui avvenga la mera sostituzione dei generatori di calore (comma 2.c, numero 3 dell'art. 3) non si applicano le disposizioni del punto B., se sussistono le seguenti condizioni:

- a. i nuovi generatori di calore a combustione abbiano rendimento termico utile, in corrispondenza di un carico pari al 100% della potenza termica utile nominale, maggiore o uguale al valore limite calcolato con la formula $(90 + 2 \log P_n)$, dove $\log P_n$ è il logaritmo in base 10 della potenza utile nominale del generatore, espressa in kW. Per valori di P_n maggiori di 400 kW si applica il limite massimo corrispondente a 400 kW;
- b. le nuove pompe di calore elettriche abbiano un rendimento utile in condizioni nominali, η_u , riferito all'energia primaria, maggiore o uguale al valore limite calcolato con la formula $a(90 + 3 \log P_n)$; dove $\log P_n$ è il logaritmo in base 10 della potenza utile nominale del generatore, espressa in kW; la verifica è fatta utilizzando come fattore di conversione tra energia elettrica ed energia primaria $0,36 \frac{W_{en.eletr}}{W_{en.primaria}}$;
- c. siano presenti, salvo che ne sia dimostrata inequivocabilmente la non fattibilità tecnica nel caso specifico, almeno una centralina di termoregolazione programmabile per ogni generatore di calore e dispositivi modulanti per la regolazione automatica della temperatura ambiente nei singoli locali o nelle singole zone che, per le loro caratteristiche di uso ed esposizione possano godere, a differenza degli altri ambienti riscaldati, di apporti di calore solari o comunque gratuiti. Detta centralina di termoregolazione si differenzia in relazione alla tipologia impiantistica e deve possedere almeno i requisiti già previsti all'articolo 7 del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, nei casi di nuova installazione o ristrutturazione di impianti termici. In ogni caso detta centralina deve:
 - essere pilotata da sonde di rilevamento della temperatura interna, supportate eventualmente da una analoga centralina per la temperatura esterna, con programmatore che consenta la regolazione della temperatura ambiente su due livelli di temperatura nell'arco delle 24 ore, nel caso di impianti termici centralizzati,
 - consentire la programmazione e la regolazione della temperatura ambiente su due livelli di temperatura nell'arco delle 24 ore, nel caso di impianti termici per singole unità immobiliari;
- d. nel caso di installazioni di generatori con potenza nominale del focolare maggiore del valore preesistente, l'aumento di potenza sia motivato con la verifica dimensionale dell'impianto di riscaldamento;
- e. nel caso di installazione di generatori di calore a servizio di più unità immobiliari, sia verificata la corretta equilibratura del sistema di distribuzione, al fine di consentire contemporaneamente, in ogni unità immobiliare, il rispetto dei limiti minimi di comfort e dei limiti massimi di temperatura interna; eventuali squilibri devono essere corretti in occasione della sostituzione del generatore, eventualmente installando un sistema di contabilizzazione del calore che permetta la ripartizione dei consumi per singola unità immobiliare;
- f. nel caso di sostituzione dei generatori di calore di potenza nominale del focolare

lare inferiore a 35 kW, con altri della stessa potenza, è rimessa alle autorità locali competenti ogni valutazione sull'obbligo di presentazione della relazione tecnica di cui la comma 19 (Allegato L) e se la medesima può essere omessa a fronte dell'obbligo di presentazione della dichiarazione di conformità ai sensi della legge 5 marzo 1990, n. 46 e successive modificazioni e integrazioni.

Qualora, nella mera sostituzione del generatore, per garantire la sicurezza non fosse possibile rispettare le condizioni alla lettera a dell'elenco precedente, in particolare nel caso in cui il sistema fumario per l'evacuazione dei prodotti della combustione è al servizio di più utenze ed è di tipo collettivo ramificato (e qualora sussistano motivi tecnici o regolamenti locali che impediscano di avvalersi della deroga prevista all'articolo 2, comma 2 del decreto Presidente della Repubblica 21 dicembre 1999, n. 551), le disposizioni previste nell'elenco precedente applicarsi ugualmente, fermo restando il rispetto di altre condizioni previste, e a condizione di:

- a. installare generatori di calore che abbiano rendimento termico utile a carico parziale pari al 30% della potenza termica utile nominale maggiore o uguale a $(85 + 3 \log P_n)$; dove $\log P_n$ è il logaritmo in base 10 della potenza utile nominale del generatore o dei generatori di calore al servizio del singolo impianto termico, espressa in kW. Per valori di P_n maggiori di 400 kW si applica il limite massimo corrispondente a 400 kW;
- b. predisporre una dettagliata relazione che attesti i motivi della deroga dalle disposizioni della lettera c dell'elenco precedente, da allegare alla relazione tecnica o alla dichiarazione di confor-

mità, ai sensi della legge n. 46 del 1990, e successive modifiche e integrazioni, correlata all'intervento, qualora le autorità locali competenti si avvalgano dell'opzione di cui alle lettera "f" dell'elenco precedente.

[2.3]

Aggiornamenti al quadro normativo

Il quadro normativo sta subendo diverse modifiche sia a livello nazionale che a livello Regionale e, questo, rende la materia particolarmente impegnativa nell'aggiornamento delle norme.

Facendo riferimento al decreto Legislativo 115/08 che tratta dell'efficienza nei servizi energetici, ad esempio, la materia sulla certificazione energetica degli edifici pur facendo riferimento al D.Lgs. 192/05 riporta, nell'allegato, che le norme di riferimento per la certificazione energetica sono le UNI TS 11300 che superano alcune delle norme riportate nell'allegato M al decreto 192/05 e di conseguenza rendono non applicabili i SW che non sono aggiornati con queste nuove norme.

Ad Agosto 2008, su proposta del Ministero dello Sviluppo Economico, poi è stato approvato un emendamento al 192/05, con il quale sono stati abrogati l'art. 6 commi 3 e 4 relativo alla procedura di rilascio della certificazione/qualificazione energetica da allegare ai contratti di compravendita e locazione degli edifici e l'art 12 commi 8 e 9 relativo alle sanzioni amministrative. Questo ha comportato una modificazione della materia molto significativa. Anche a livello Regionale si sta assistendo ad un forte fermento per cui molte regioni, Liguria Piemonte Toscana Sicilia e Marche, stanno promuovendo

vendo atti e leggi di recepimento che porteranno probabili differenze di attuazione sul panorama nazionale.

[2.4] Il calcolo della prestazione energetica dell'edificio

Il calcolo del fabbisogno termico degli edifici, secondo lo schema fissato dalla norma UNI EN ISO 13790, è recepito a livello nazionale con l'emanazione della norma UNI TS 11300-1 *Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*. Il calcolo dell'energia primaria e dei rendimenti di impianto in accordo con le varie norme EN approvate è recepito secondo la seconda parte della suddetta norma, avente per titolo "Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria".

Lo schema operativo di calcolo è schematizzato di seguito, per illustrare i contenuti principali delle norme di riferimento, cui si rimanda per analisi di dettaglio.

La norma UNI EN ISO 13790 conferma la metodologia di bilancio mensile della UNI EN ISO 832 estendendola agli edifici non residenziali ed integrandola con metodi dinamici ed orari. Il recepimento delle UNI TS consente di effettuare dei calcoli:

- di progetto, edifici di nuova costruzione;
- di valutazione, tipicamente per la certificazione energetica in condizioni standard;
- di diagnosi energetica.

La norma adotta una metodologia di calcolo per il fabbisogno energetico annuale, basata sull'ipotesi del regime staziona-

rio in riferimento ai flussi termici in entrata ed uscita. Inoltre viene tenuto conto delle variazioni della temperatura esterna ed interna, e attraverso un fattore di utilizzazione si tiene conto degli effetti dinamici dovuti agli apporti solari ed apporti termici gratuiti interni. Nel bilancio energetico vengono considerate quindi:

- le dispersioni termiche per trasmissione e ventilazione che si hanno dall'ambiente interno verso quello esterno,
- le dispersioni termiche per trasmissione e ventilazione o gli apporti gratuiti di calore con zone adiacenti,
- gli apporti di calore gratuiti interni,
- gli apporti di calore dovuti alla radiazione solare,
- le perdite che si hanno nel sistema di riscaldamento,
- il fabbisogno energetico del sistema di riscaldamento.

Il fabbisogno di energia termica dello spazio riscaldato si calcola attraverso la relazione (1), che troviamo qui di seguito:

$$Q_h = Q_i - \eta Q_g$$

dove:

Q_h è il valore mensile del fabbisogno di energia termica mensile;

Q_i è il contributo relativo alle dispersioni termiche;

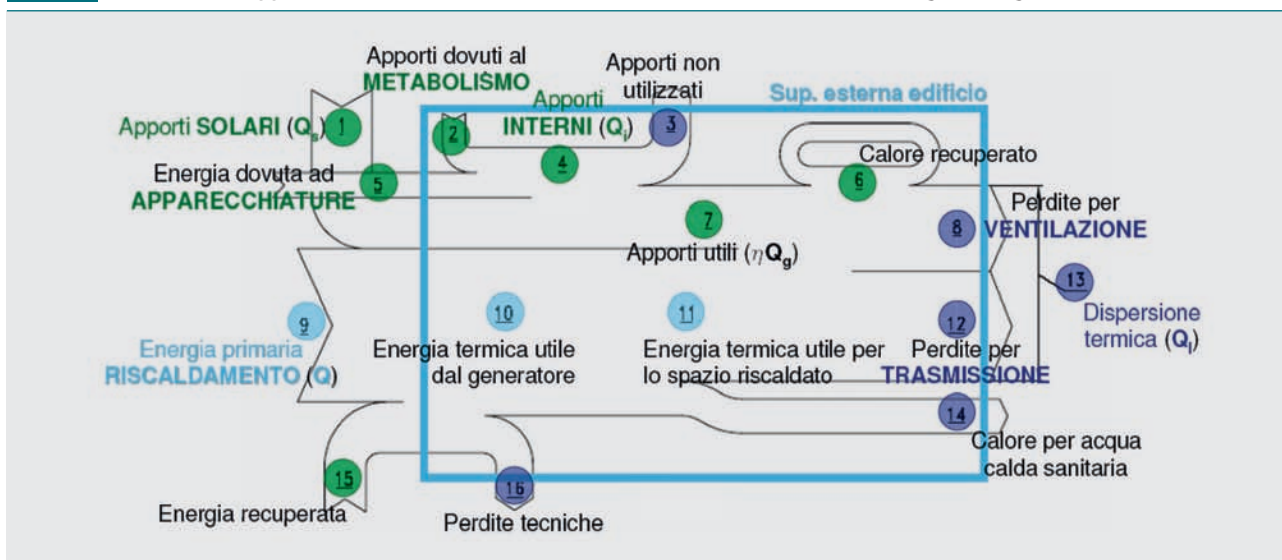
Q_g è il contributo relativo agli apporti di calore gratuiti;

η è il fattore di utilizzazione degli apporti termici gratuiti, utile a considerare l'effetto dinamico degli apporti solari ed interni; è un fattore di riduzione introdotto per considerare il comportamento dinamico dell'edificio.

La determinazione dei consumi a partire dai fabbisogni è definita attraverso la norma UNI TS 11300-2 "Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale".

Fig. 2.1

Rappresentazione di tutte le voci che concorrono al calcolo del fabbisogno energetico annuale



le e per la produzione di acqua calda sanitaria". In poche righe, la norma stabilisce che, definito il fabbisogno di riscaldamento è necessario procedere alla determinazione dei rendimenti/perdite dell'impianto termico, in particolare ai sottosistemi di:

- emissione,
- regolazione,
- distribuzione,
- accumulo,
- generazione.

Noti i rendimenti/perdite dei suddetti sottosistemi, fissate le perdite termiche recuperabili e i consumi elettrici degli ausiliari (opportunamente convertiti da elettrici in *fossili*), si calcola il fabbisogno energetico per il riscaldamento dell'edificio. Essendo i rendimenti di conversione dei

combustibili fossili posti, almeno attualmente, pari ad uno, questo valore esprime il fabbisogno di energia primaria Q_p , ovvero il valore EP di prestazione energetica.

In maniera analoga si opera per il fabbisogno di energia primaria, il dato di partenza sarà in questo caso l'uso di acqua calda sanitaria di un edificio in funzione di una serie di indicatori (occupanti, metro quadrato, uso dell'edificio, ecc.).

Si rimanda infine alla normativa di riferimento, in particolare ai riferimenti presenti nell'allegato M del decreto legislativo 192 e nell'elenco delle norme UNI TS 11300 parte 1 e 2, per l'elenco delle norme tecniche nazionali che afferiscono alla prestazione energetica dell'edificio.

An aerial photograph of a historic town, likely in Italy, featuring a prominent blue-tiled dome on a stone tower. The tower has decorative murals of vases. To the right, a church with a classical facade and a pedimented entrance is visible. The town is built on a hillside with terracotta roofs and narrow streets. A semi-transparent pink banner is overlaid on the right side of the image.

Capitolo **Tre**

L'involucro edilizio

[3.1] Introduzione

L'involucro, chiusura di un edificio, separa l'ambiente esterno e lo spazio costruito, caratterizzati da condizioni microclimatiche differenti e, al tempo stesso, definisce l'immagine dell'edificio nel contesto urbano e territoriale.

L'involucro edilizio dovrebbe teoricamente mantenere separato il regime termico interno da quello esterno, garantendo le condizioni di comfort per gli occupanti, obiettivo fisicamente di difficile realizzazione. Praticamente si richiede all'involucro di:

- minimizzare i consumi energetici in edifici climatizzati (riscaldamento e raffrescamento);
- minimizzare il numero di ore in cui si verificano condizioni di discomfort termico (stagione estiva in edifici non climatizzati);
- minimizzare il numero di ore in cui si è necessario fare ricorso all'illuminazione artificiale.

Il fabbisogno di energia netta, secondo le norme attuali è determinato proprio dalla capacità dell'involucro di limitare i flussi termici che lo interessano sia in estate che in inverno. Tali flussi possono essere entranti (apporti), il calore fluisce dall'esterno verso l'interno, oppure uscenti (dispersioni). Nel dettaglio si hanno:

- flussi termici nei due sensi (variabili nel giorno e nella stagione) per trasmissione attraverso componenti opachi e trasparenti verso l'esterno, verso il terreno, verso altri ambienti;
- guadagni solari attraverso i componenti trasparenti;
- flussi per ventilazione naturale o meccanica (variabili nel giorno e nella stagione);
- flussi termici per infiltrazione (variabili nel giorno e nella stagione).

Senza entrare nel dettaglio sull'evoluzione delle tecniche costruttive e gli approcci progettuali, vale la pena ricordare che i criteri del buon costruire in accordo con il clima e le funzioni dell'edificio sono noti da secoli, se non millenni. Già gli antichi greci, ed ancor più gli antichi romani, avevano codificato una sorta di approccio progettuale secondo il clima. Proteggere le esposizioni fredde, utilizzo della massa termica per ritardare i flussi termici, presenza di schermi ed oggetti per la protezione e lo schermo del sole nelle stagioni calde, l'utilizzo di camini e condotti verticali per sfruttare la ventilazione naturale. Per secoli l'architettura e l'edilizia sono state caratterizzate da una forte interazione con l'ambiente circostante. Si trattava spesso di architettura bioclimatica, sebbene il concetto sia stato codificato molto tempo dopo.

Con il modernismo e l'industrializzazione

sono radicalmente cambiate le tecnologie e l'approccio alla progettazione architettonica, così come le esigenze di comfort per gli utenti e delle soluzioni affinché questo fosse garantito. Climatizzare ed illuminare gli ambienti in modo artificiale rende meno stringente il vincolo dell'ambiente esterno. Il contesto climatico diventa sempre più labile ed i consumi per gli edifici diventano la voce più importante negli usi finali di energia. Gli edifici tendono a perdere le peculiarità del contesto locale e nuovi materiali entrano in scena: acciaio e vetro, specialmente per edifici non residenziali. Le conseguenze energetiche ed ambientali sono bene note, ed in parte introdotte nel capitolo precedente.

Questo capitolo presenta le principali caratteristiche dell'involucro edilizio in termini di: materiali, proprietà, prestazioni, funzioni; ordinate secondo le due tipologie principali di componenti: opachi e trasparenti

[3.2] I componenti opachi

Come detto, l'involucro edilizio determina la frontiera tra lo spazio costruito e l'ambiente esterno.

Maggiore sarà la qualità del primo, minori saranno i consumi energetici necessari a garantire le condizioni di comfort per gli occupanti dell'edificio stesso. Ai fini di una corretta progettazione energetica dell'edificio è necessario quindi realizzare un involucro adeguatamente isolato ai fini di limitare le dispersioni per perdite termiche durante la fase invernale.

Accanto alla principale funzione di isolamento termico, i componenti opachi sono importanti anche durante la fase estiva

anche se incidono in maniera minore e differente rispetto alle superfici trasparenti. Ai fini della riduzione dei carichi di raffrescamento, o comunque di un accettabile microclima interno, i componenti opachi devono essere adeguatamente progettati in funzione dell'inerzia termica, ovvero dello sfasamento temporale del flusso termico entrante dall'esterno verso l'interno. Anche le finiture superficiali esterne hanno un ruolo significativo, che si realizza nella capacità di riflettere la radiazione solare incidente riducendo l'incremento della temperatura delle superfici esterne dell'involucro.

[3.2.1]

Materiali di involucro

I materiali più comunemente usati nelle costruzioni, e dunque descritti in questo capitolo, sono: laterizi, mattoni in terra cruda, calcestruzzo, legno, malte e materiale isolante. La scelta del materiale è influenzato da numerosissimi parametri quali: costo, tecnologie costruttive, tradizioni tipiche del luogo, caratteristiche climatiche, reperibilità del prodotto ed altre ancora. Evidentemente si fa riferimento ai materiali più comuni, sia convenzionali che ad elevate prestazioni. La proprietà fisica che caratterizza il comportamento termico dei materiali è la conduttività termica λ , espressa in $W/(m \cdot K)$.

Laterizi

I laterizi sono prodotti da un impasto di argilla acqua e sabbia, modellati per estrusione o a mano, asciugati e cotti a una temperatura tra i 900 e 1.200 °C. I prodotti ricavati da tale lavorazione sono: mattoni pieni, semipieni e forati, blocchi, tegole ecc. I laterizi sono classificati in funzione del grado di foratura che, evidentemente, influisce anche sulle loro proprie-

tà termiche, infatti la loro conduttività termica cade in un range molto variabile, compreso tra 0,25 e 0,9 W/(m·K). Il range delle densità di tale materiale, va dai 700 ai 1.600 kg/m³, in riferimento al valore percentuale della superficie forata che costituisce il mattone.

I mattoni pieni e semipieni grazie alla loro maggiore densità ed inerzia termica sono buoni accumulatori di calore e possiedono un elevato potere fono-isolante. Esistono poi i laterizi forati alleggeriti che vengono utilizzati per murature perimetrali portanti e di tamponamento. Il laterizio di questo tipo contiene in se una microporosità conferisce al mattone un elevato grado di isolamento termico, elevata permeabilità al vapore e resistenza al gelo e al fuoco. I blocchi vengono prodotti in diversi formati: lisci e ad incastro per realizzare murature portanti e di tamponamento; le prestazioni termiche sono ottime, con valori di conduttività tra 0,1 e 0,4 W/(m·K).

Inoltre per rendere la struttura del laterizio molto poroso, a livello microscopico, vengono impiegate sostanze inorganiche come la perlite espansa. La perlite inglobata nella massa di argilla è stabile, non subisce quindi cambiamento di stato durante la cottura del laterizio, la cui struttura risulta compatta, senza cavità. Questi blocchi si presentano privi di fori superficiali. Tale tipo di mattone composto dalla perlite espansa, è caratterizzato da un notevole potere isolante, con una conduttività compresa tra 0,25 e 0,3 W/(m·K).

Di grande efficacia a livello costruttivo sono i blocchi rettificati, ovvero elementi con facce di appoggio superiori ed inferiori perfette per planarità e parallelismo. Questo permette di eseguire murature con giunti di anche di 1 solo mm e con sistemi molto più semplici dei tradiziona-

li, e con miglioramento delle capacità isolanti.

Calcestruzzo

Materiale di prestazioni termiche scadenti (conduttività compresa tra 1,1 e 2,0 W/(m·K)) e notevole densità apparente (1.500-2.000 kg/m³) rappresentava la parte debole delle tamponature dell'involucro dell'edificio, di cui ne costituisce generalmente la struttura portante. Il calcestruzzo è un materiale composito ottenuto impastando i leganti idraulici con sabbia, inerti grossi (ghiaie e pietrischi) e acqua. Recentemente il calcestruzzo, opportunamente alleggerito, è usato anche nelle tamponature grazie a migliori prestazioni termiche. Nel caso del calcestruzzo alleggerito l'inerte è costituito per la maggior parte da argilla espansa i cui granuli sono ottenuti mediante cottura a circa 1.200 °C, in forno rotante, di granuli di argilla di cava. La forma e la disposizione delle camere d'aria sono studiate per conferire alla muratura ottimi valori di isolamento termico, acustico, elevata inerzia termica, salubrità ambientale e buone caratteristiche meccaniche. La conduttività di questo prodotto ha un range piuttosto variabile, compreso tra 0,5 e 2,0 W/(m·K), inversamente proporzionale al peso, e funzione delle caratteristiche delle camere d'aria. I blocchi in calcestruzzo cellulare autoclavato sono un altro esempio di calcestruzzo alleggerito.

Legno

Il legno è il materiale ecologico da costruzione per eccellenza, per le sue caratteristiche di resistenza meccanica, coibenza termica, traspirabilità e neutralità ai campi elettrostatici. Il legno subisce molto lentamente i fenomeni di invecchiamento e, con le nuove tecnologie, è possibile rea-

lizzare edifici in legno con elevata resistenza al fuoco, grazie anche all'accoppiamento con materiali isolanti incombustibili. È così superato uno dei maggiori problemi relativi all'utilizzo di questo materiale nella percezione dei non addetti ai lavori.

Anche se separato dalle sue radici, continua a vivere e a respirare migliorando la qualità del microclima domestico, compensando naturalmente tutte le variazioni di umidità all'interno di un ambiente (assorbe l'umidità in eccesso per restituirla, quando l'ambiente è secco). Inoltre il legno è un materiale "caldo" ha la stessa temperatura del corpo umano, isola dalle correnti indotte, attutisce i suoni, filtra e depura l'aria. La scelta dell'essenza deve essere fatta in base all'utilizzo che se ne deve fare:

- abete, castagno, cipresso, faggio, larice, pino larice, pino marittimo, pino silvestre sono essenze consigliate per usi strutturali;
- abete (bianco e rosso), castagno, faggio, rovere, quercia, larice, noce, pino silvestre, pino cembro, pioppo, robinia sono essenze consigliate per pavimentazioni, infissi e arredamenti.

Dal punto di vista termico il legno ha un ottimo comportamento, infatti la sua conduttività, che dipende ovviamente da numerosi parametri, varia tra 0,10 e 0,25 W/(m·K) e la densità tra 400 e 800 kg/m³. Un uso più recente del legno è quello di produrlo sotto forma di mattone. Questo sistema costruttivo si basa su elementi standard in legno massiccio assemblabili e accorpabili ad incastro, ed è adatto per la realizzazione sia di murature perimetrali che di tramezzature. L'intercapedine interna può essere riempita con materiali isolanti sfusi (fibra di cellulosa) al fine di ottenere una migliore coibentazione, con valori compresi tra 0,15 e 0,20 W/(m·K) di conduttività.

Intonaci

L'intonaco deve:

- proteggere le strutture sulle quali viene applicato,
- essere traspirabile in modo da regolare in parte l'umidità del clima interno,
- realizzare una finitura regolare delle murature su cui viene applicato.

Gli intonaci appartengono alla categoria delle malte, essi sono materiali di finitura utilizzati internamente ed esternamente agli edifici con il compito di proteggere le murature e di assorbire l'umidità superficiale e pertanto devono necessariamente essere igroscopici e traspiranti. Le malte per intonaci presentano di solito uno o più leganti (gesso, calce aerea, calce idraulica) miscelati a secco con gli aggregati. La quantità di acqua aggiunta sarà proporzionale alla quantità di materie prime impiegate in modo da non creare danni dovuti al successivo ritiro del materiale durante il periodo di asciugatura. Gli inerti aggiunti all'impasto possono essere di diverso tipo: sabbia, polvere di marmo, pozzolana e cocchio pesto (ottenuto da cocci di mattoni e di tegole frantumate). L'omogeneità della miscela è indispensabile per garantire al prodotto posato gradevolezza estetica, facilità di posa e durabilità. La conduttività termica di circa 0,80 W/(m·K) anche se, specialmente per gli intonaci a base di gesso, è possibile ottenere delle prestazioni decisamente migliori.

Molto interessanti sono i recenti intonaci termoisolanti, con una nuova funzione, la cui stesura consente di risolvere i ponti termici creati dall'accostamento di materiali differenti e conseguentemente con conducibilità diverse. Nella scelta degli inerti, oltre ad una percentuale convenzionale di sabbie, sono aggiunti i così detti inerti leggeri come inerti minerali espan-

si che garantiscono all'intonaco una struttura microporosa capace di soddisfare i requisiti di isolamento. Questi realizzano isolamenti termici, del tipo a cappotto, e sono in grado di assicurare rivestimenti monolitici, di assoluta stabilità dimensionale, fonoassorbenti resistenti al fuoco e con valori di conduttività termica di circa $0,20 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Le caratteristiche tecniche di questi prodotti sono prevalentemente di natura termica, l'uso è indicato per:

- impedire che il calore attraversi per conduzione la parete;
- impedire che la parete perda calore per irraggiamento;
- procurare un isolamento continuo, senza lasciare ponti termici in corrispondenza delle solette e dei pilastri;
- ottenere un alto potere di igroscopicità e idrorepellenza in modo da garantire una difesa continua contro l'umidità.

Lo spessore minimo per intonaci con caratteristiche termoisolanti varia tra pareti interne ed esterne: nel primo caso 10 mm, 20 mm nel secondo. I supporti sui quali vengono applicati tali intonaci dovranno essere assorbenti, solidi, esenti da sali e non soggetti a contrazioni o movimenti.

Isolanti

La grandezza che permette di definire iso-

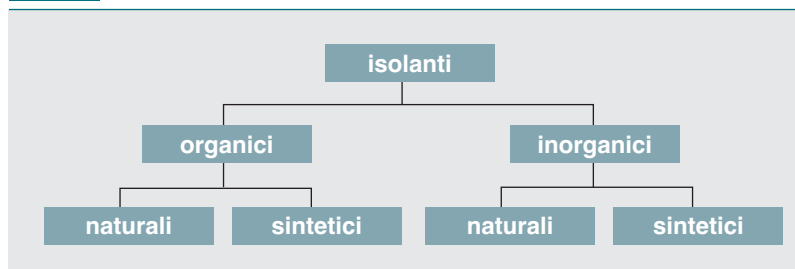
lante un materiale è la conduttività termica, espressa in $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Un materiale è definito isolante se la sua conduttività è inferiore a $0,065$, è debolmente isolante se tale grandezza è compresa tra $0,065$ e $0,09$, se è maggiore non si parla più di materiale isolante. Gli isolanti sono una categoria di materiali molto ampia. Uno schema generale è presentato in figura 3.1, in cui sono differenziati per origine e processo. La scelta del materiale è legata a molteplici parametri di natura economica (costo), prestazionale (in termini energetici ma anche di altra natura, ad esempio meccanica), di durabilità ed ambientale (in particolare il loro impatto in fase di processo). Nei seguenti sottoparagrafi ne sono presentati alcuni tra i più diffusi e altri tra i più innovativi in campo energetico ambientale.

I materiali isolanti organici sintetici sono tra i materiali più usati. Il polistirene espanso, conosciuto più comunemente con il nome di polistirolo, è forse l'isolante più conosciuto e anche quello più discusso per via di presunte "sublimazioni" (passaggio dallo stato solido a quello gassoso) del materiale. Il polistirene espanso invece, usato negli impieghi idonei e con la sicurezza di qualità garantita, rappresenta un materiale versatile, di durata illimitata e di costo contenuto. Il polistirene espanso può presentarsi commercialmente sotto forma di lastre tagliate da blocchi o lastre preformate, stampate con pellicola superficiale.

Il polistirene espanso può essere impiegato per quasi tutti i lavori di coibentazione. Da evitare gli isolamenti in condizioni non protette, di forte sollecitazione meccanica e di temperature elevate di lavoro. La conduttività del polistirene espanso può variare notevolmente, oltre che con la densità, anche con il processo di produ-

Fig. 3.1

Classificazione materiali isolanti



zione. Per il polistirene espanso sinterizzato, in lastre ricavate da blocchi, la conduttività varia da 0,045 W/(m·K), per una densità pari a 15 kg/m³, a 0,039 W/(m·K) per una densità pari a 35 kg/m³. Per il polistirene espanso in lastre stampate per termocompressione, la conduttività varia da 0,040 W/(m·K), per una densità pari a 20 kg/m³, a 0,039 W/(m·K) per una densità pari a 30 kg/m³.

Un'altra tipologia di polistirene è quello estruso. La massa di tale materiale risulta formata da minutissime celle perfettamente chiuse e non comunicanti che permettono alle lastre una eccellente tenuta all'acqua. Il polistirene estruso ha un costo decisamente più elevato. Viene commercializzato essenzialmente in due versioni: con pelle superficiale di estrusione e senza pelle; il primo si comporta ancora meglio in presenza di acqua. Il polistirene estruso è utile in tutti gli impieghi in cui l'isolante è permanentemente o per lunga durata a contatto con acqua o umidità. Per le due classi di conduttività diffuse, il 30 kg/m³ e il 50 kg/m³ la conduttività vale 0,041 e 0,034 W/(m·K).

Il poliuretano espanso è uno dei materiali isolanti più noti per via del suo elevato potere coibente. Il materiale è prodotto mediante iniezione di componenti a rapida espansione fra i vari rivestimenti (carta bitumata, ecc.) adatti all'impiego finale dell'isolante, fino a formare delle lastre piane di vario spessore. Il poliuretano può essere altresì messo in opera direttamente mediante spruzzaggio. Da evitare contatto ed esposizione ai raggi ultravioletti (luce) e all'acqua. Sono consigliati quindi tutti gli impieghi in cui l'isolante risulta protetto. La conduttività termica delle lastre espanse in continuo è pari a circa 0,029 W/(m·K), con densità compresa tra 30 e 40 kg/m³.

Altri materiali sintetici largamente usati come isolanti sono il poliesteri in fibre ed il polietilene espanso. La loro conduttività termica di circa 0,06 W/(m·K) e sono spesso accoppiati ad altri materiali. Sono utilizzati per combinare isolamento termico ed acustico al tempo stesso.

I materiali isolanti organici naturali sono di origine vegetale ed a struttura fibrosa. Sono a basso impatto ambientale e con buone caratteristiche termo-fisiche. Se ne descrivono alcuni tipi. I pannelli di fibra di legno sono prodotti attraverso la lavorazione di scarti e residui di legname di conifere e latifoglie non trattato chimicamente, proveniente da segherie di paesi europei. La materia prima è rigenerabile e disponibile in misura praticamente illimitata. I pannelli possiedono buone proprietà di isolamento termico e acustico. La struttura a pori aperti, permeabile al vapore, consente un'ottima traspirabilità; la conduttività dei pannelli in fibra di legno varia tra 0,04 e 0,06 W/(m·K).

La fibra di cellulosa (carta) è una preziosa materia prima, e si adatta particolarmente bene come isolante termico per via della struttura dei suoi pori in grado di rinchiodare grandi quantità d'aria, riducendo le perdite di calore. La fibra di cellulosa è traspirante ed igroscopica, in grado di assorbire umidità dall'ambiente e cederla poi successivamente, non contiene sostanze tossiche. È un materiale molto indicato dal punto di vista ecologico, poiché la materia prima è carta di giornale riciclata e il dispendio di energia per produrla è ridotto. La fibra di cellulosa in pannelli trova applicazione in intercapedini di strutture lignee, cappotti ecc. La conduttività vale all'incirca 0,04 W/(m·K) per la fibra in fiocchi, 0,069 per quella in granuli e 0,040 per i pannelli.

Altre piante largamente usate in altri set-

tori industriali cominciano a trovare impiego nell'edilizia grazie al loro basso impatto ambientale ed alle notevoli capacità termoisolanti, ma con costi ancora elevati. Tra le varie piante: canapa, lino, cocco, juta, canna.

Il sughero, isolante di origine vegetale ma a struttura cellulare, è un materiale rigenerabile ma di limitata disponibilità; si ricava dalla corteccia della quercia da sughero, pianta che cresce nell'area mediterranea. Può essere prelevato dalla pianta solo intorno al 20° anno di età. Il sughero traspirante e permeabile al vapore, inattaccabile dagli agenti acidi, inappetibile agli insetti, imputrescibile anche in condizione di elevata umidità. Il sughero granulare fuso trova impiego in intercapedini oppure, se impastato con acqua e legante idraulico vetrificante, come impasto per la realizzazione di sottofondi isolati praticabili, controsoffitti, sottotetti, sottopavimenti e solai. I granuli vengono ottenuti mediante la frantumazione in appositi mulini e la pulitura dalle scorie legnose, vengono poi vagliati con apposite griglie per ottenere diverse granulometrie. Si ottiene così il granulato biondo (80-120 Kg/m³). In base al tipo di lavorazione si ottengono diversi tipi di pannelli:

- pannello di sughero agglomerato espanso autocollato di colore bruno, ottenuto dalla cottura dei granuli in autoclave a circa 350-380 °C, processo attraverso cui la suberina contenuta nei granuli si scioglie saldando i singoli granuli. I granuli si rigonfiano alleggerendo il prodotto e producendo fenolo. Si ottengono blocchi, successivamente raffreddati e tagliati in lastre;
- pannelli di sughero naturale compresso, di colore biondo, ad alta densità (200-500 Kg/m³) ottenuti mediante aggiunta ai granuli di collante sintetico;

l'impasto è poi laminato o sfogliato con coltelli meccanici.

La conduttività dipende dal tipo di lavorazione. Per i pannelli espansi o compressi varia tra 0,035 e 0,045 W/(m·K), per i granuli il range varia molto, tra 0,035 e 0,1 W/(m·K), a seconda che si abbiano granuli naturali o espansi, sciolti o impastati.

Diversi materiali isolanti inorganici naturali sono utilizzati in edilizia. L'argilla espansa è un materiale che si ottiene dalla cottura di sferette d'argilla in forni rotativi a 1.200° C. La cottura sinterizza (vetrifica) la superficie delle sferette conferendo loro un'elevata resistenza alla pressione e contemporaneamente la sua struttura cellulare interna le conferisce leggerezza e un buon potere isolante. È utilizzato in forma sfusa all'interno di intercapedini, coperture, pavimenti, sottotetti non praticabili, nella produzione di calcestruzzi alleggeriti. L'argilla espansa è un materiale isolante inalterabile nel tempo, anche in presenza di temperature e umidità estreme. La conduttività dipende dalla massa volumica, varia da 0,01 a 0,03 W/(m·K) per massa da 300 a 1.400 kg a metro cubo.

La perlite è un vetro vulcanico la cui struttura è formata da piccole sfere. La perlite espansa si ottiene attraverso un processo che sottopone la perlite, opportunamente frantumata, ad alte temperature (850-1.000 °C), e il prodotto finale è un materiale di colore sempre bianco. La sua struttura cellulare, costituita da microcavità chiuse non comunicanti tra loro e con l'esterno, ne determina l'impermeabilità all'acqua e il potere isolante. In forma sfusa è utilizzata per il riempimento di intercapedini. La perlite a granulometria fine è impiegata per la realizzazione di intonaci termoisolanti. La conduttività termica è circa 0,05 W/(m·K).

La vermiculite è una roccia di origine vul-

canica costituita da silicato di alluminio e magnesio idrato con tracce di ossido di ferro, ed è una variazione morfologica della mica. Il minerale grezzo viene frantumato, macinato e sottoposto ad elevate temperature (1.000 °C). Da tale processo si ottiene così una struttura cellulare costituita da microcavità chiuse non comunicanti tra loro e con l'esterno, che ne determina l'impermeabilità all'acqua e il potere isolante. Si presenta sotto forma di granuli irregolari commercializzati in diverse granulometrie. Impastata con acqua e legante idraulico è impiegata nella realizzazione di sottofondi e massetti. La vermiculite a granulometria fine viene impiegata come inerte per la realizzazione di intonaci termoisolanti, fonoassorbenti e resistenti al fuoco. La conduttività termica è intorno a 0,055 W/(m·K). La pomice è una roccia vulcanica effusiva costituita da un silicato naturale complesso costituito da silice allo stato amorfo in cui sono disciolti ossidi di vari elementi. È caratterizzata da una struttura alveolare con pori di grandezza variabile. È un materiale dalle buone proprietà fonoassorbenti, traspirante, incombustibile, privo di sostanze tossiche per la salute, stabile nel tempo, inattaccabile da parassiti. Può essere impiegata sia sfusa che miscelata come inerte nei calcestruzzi alleggeriti termo-isolanti in: solai interpiano o controterra, sottotetti praticabili e coperture. Trova impiego anche nel confezionamento di malte di posa che migliorano sensibilmente l'isolamento termico delle murature senza influenzare la resistenza meccanica. La pomice può presentare caratteristiche diverse nella sua composizione in funzione dall'ubicazione delle cave da cui viene estratta. Macinata per ottenere diverse granulometrie può essere trattata con sostanze idrofobe per renderla idro-

repellente. La conduttività termica è intorno a 0,1 W/(m·K).

Tra i materiali isolanti inorganici sintetici rientrano alcuni dei più comuni isolanti, caratterizzati da un buon rapporto prestazione termica/prezzo, ma con impatto ambientale non trascurabile. La lana di vetro è un materiale costituito da ammassi fibrosi ottenuti per azione di violenti getti d'aria su colate di vetro. Le fibre che la costituiscono sono piuttosto grossolane e hanno lunghezza e diametro variabili. La semplicità del processo di realizzazione, il basso costo delle materie prime e le particolari proprietà di cui è dotata (bassa conduttività termica, capacità di catturare l'aria negli interstizi tra fibra e fibra) fanno della lana di vetro un materiale molto usato come isolante termico. La conduttività termica dipende soprattutto dal diametro medio delle fibre e dalla massa volumica dei manufatti. La conduttività termica varia tra 0,03 e 0,045 W/(m·K).

La lana di roccia deve la sua origine al processo di risolidificazione, sotto forma di fibre, della lava fusa, lanciata nell'aria durante le attività eruttive. È un prodotto completamente naturale che combina la forza della roccia con le caratteristiche di isolamento termico tipiche della lana. Le prestazioni termiche della lana di roccia sono assimilabili a quelle della lana di vetro. Il vetro cellulare espanso è composto da sabbia di quarzo (silice pura) con una proporzione di vetro riciclato del 45-50%, proveniente da lampade al neon e da vetri di autovetture usate. Si presenta sotto forma di pannelli, lastre, coppelle, gomiti ed altri elementi di colore scuro. Presenta una struttura a celle ermeticamente chiuse che gli conferisce una totale impermeabilità all'acqua che ai gas, è durevole e conserva nel tempo le sue caratteristiche. È impiegato in tutte quelle applicazioni in

cui è necessaria una totale impermeabilità all'acqua. Se accoppiato con gesso fibra si possono ottenere pannelli prefabbricati per la realizzazione a secco di pavimenti. La conduttività termica varia tra 0,04 e 0,05 W/(m·K).

[3.2.2]

Isolamento dei componenti opachi

Ai componenti di involucro è richiesto un livello di isolamento termico, espresso attraverso la nota proprietà trasmittanza termica (coefficiente di perdite termiche) U , misurato in $W/(m^2 \cdot K)$. Nel capitolo precedente si è visto che per nuove costruzioni e per ristrutturazioni, con qualificazione energetica, sono richiesti dei limiti piuttosto stringenti riassunti nelle tabelle dell'allegato C del decreto legislativo 192 del 2005. Si rimanda dunque al capitolo precedente per la verifica di tali limiti. È interessante fare alcuni cenni alle caratteristiche costruttive. Fino a pochi decen-

ni fa le tamponature esterne erano realizzate con laterizi o materiali lapidei. Solo successivamente, a causa di una maggiore sensibilizzazione in campo energetico, si è cominciato a porre il problema dell'isolamento dei componenti opachi, dapprima realizzando delle intercapedini d'aria tra gli strati di laterizio e poi inserendo uno strato di materiale isolante da accoppiare all'aria o a riempire completamente l'intercapedine.

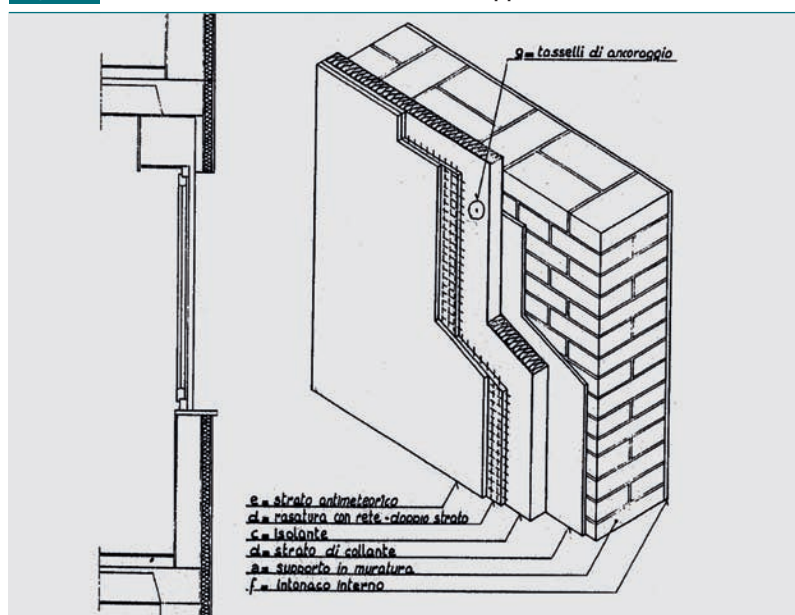
La tecnologia attuale, nel caso di nuove costruzioni, prevede una soluzione come in figura 3.2, in cui l'isolante aderisce alla tamponatura esterna, mantenendo un'intercapedine d'aria di qualche centimetro. I valori di trasmittanza termica dipendono dallo spessore d'isolante e dovrebbero essere scelti in relazioni alle caratteristiche climatiche della località.

Nel caso di edifici esistenti con tamponatura a camera d'aria è possibile migliorare le prestazioni termiche insufflando materiale isolante, generalmente granulare o schiumoso, all'interno dell'intercapedine. La procedura richiede la realizzazione di fori per l'insufflazione del materiale, nonché l'iniezione del materiale, la procedura di controllo che il materiale sia omogeneamente distribuito ed infine la chiusura dei fori eseguiti.

Nel caso di edifici esistenti non isolati l'intervento di recupero energetico deve realizzarsi sulla superficie esterna o interna della tamponatura. L'isolamento esterno, più efficace perché elimina le discontinuità dell'involucro, è comunemente detto a cappotto. Si realizza mediante l'utilizzo di elementi isolanti che aderiscono alla facciata e sul quale sono poi effettuate le opere di finitura, l'intervento è abbastanza leggero dal punto di vista strutturale, intono ai 15-25 kg/m². Il vantaggio del cappotto consiste nell'eliminare i ponti

Fig. 3.2

Isolamento a cappotto



termici, nel aumentare l'isolamento dell'edificio, nell'aumentare la temperatura delle pareti riducendo i rischi di fenomeni di condensa. È evidente l'importanza impermeabilizzare perfettamente le superfici trattate per non vanificare tutto l'intervento. In figura 3.3 è schematizzato questo tipo di intervento che richiede generalmente l'utilizzo di materiali isolanti in lastre, quali polistirene espanso (o estruso), fibre di vetro e roccia, sughero compresso, legno mineralizzato.

Interessante è l'opzione di creare una parete ventilata tra lo strato isolante e la finitura esterna. In tal modo è possibile operare anche ai fini delle prestazioni energetiche estive. Grande cura andrà dedicata a fare in modo che la parete ventilata sia adeguatamente protetta dagli agenti atmosferici.

Con i prodotti attualmente sul mercato è possibile realizzare un cappotto con solo l'intonaco isolante. Si tratta di soluzioni

tampone in quanto, viste le caratteristiche di questi materiali, le prestazioni dell'involucro migliorano sensibilmente senza però arrivare ai livelli di trasmittanza ottenibili con egli isolanti veri e propri.

L'isolamento dell'involucro può avvenire anche dall'interno, con procedimento simile all'isolamento a cappotto, con lo stesso tipo di materiali isolanti. La soluzione è adottabile per edifici di nuova costruzione e, anche e soprattutto, in caso di retrofit. Un notevole svantaggio è la riduzione delle dimensioni dei locali per l'aggiunta dello strato isolante e delle finiture, nonché una correzione non sempre efficace dei ponti termici.

In maniera del tutto analoga si possono considerare gli interventi sulle chiusure orizzontali. Valgono le considerazioni fatte per gli interventi all'esterno ed all'interno delle chiusure verticali. Negli edifici di nuova costruzione l'isolamento delle chiusure piane è fatto all'esterno, si veda figu-

Fig. 3.3 Isolamento in intercapedine

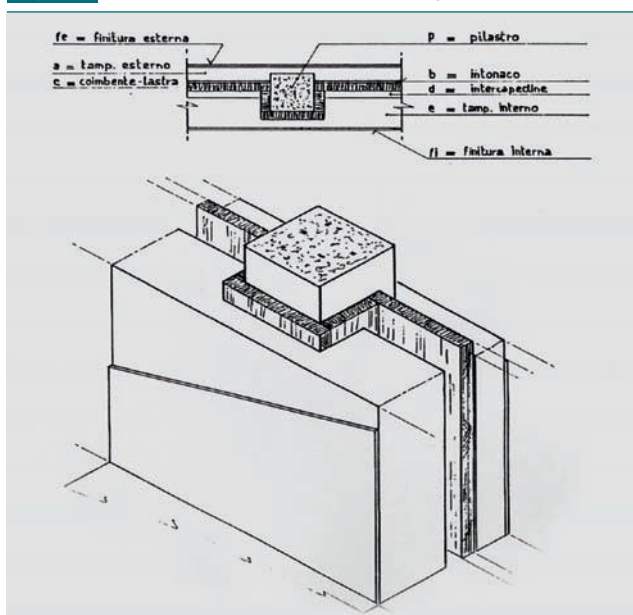


Fig. 3.4 Isolamento esterno per coperture

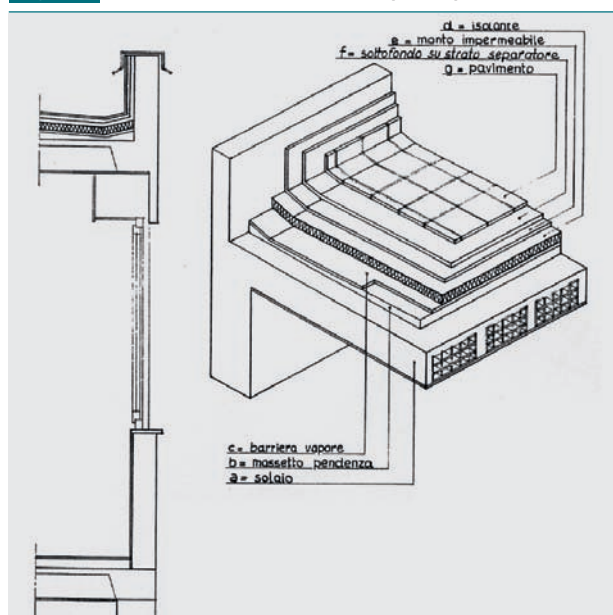
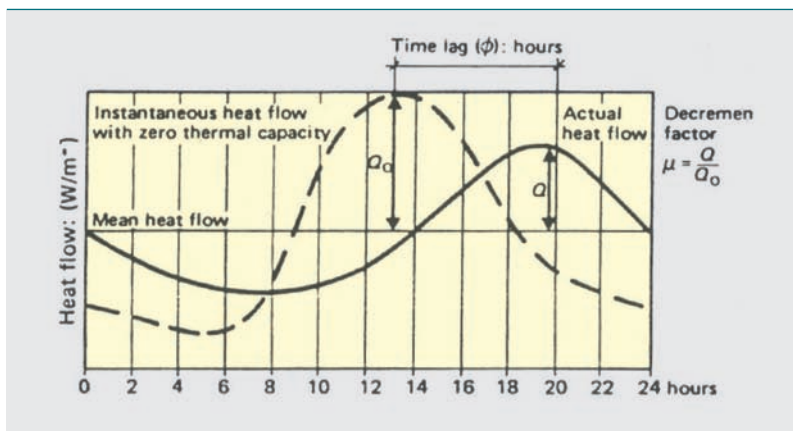


Fig. 3.5 Flussi termici su pareti a diversa capacità termica

ra 3.4, per il terrazzo e dall'interno per i solai di base, che siano su vespaio, terreno o piltois. Nel caso di tetto a falde l'isolamento può essere realizzato al di sotto del manto antimeteorico (tegole, coppi...) utilizzando polistirene espanso estruso, poliuretano espanso con opportuna barriera al vapore. L'isolamento all'intradosso della falda è realizzato invece essenzialmente per ragioni estetiche qualora sia abitabile la mansarda. In questo caso si amplia la gamma di materiali utilizzabili, ad esempio con lana di roccia e vetro, resine fenoliche, perlite espansa ed altri ancora.

[3.2.3]

L'inerzia termica dell'involucro edilizio

Il termine inerzia termica è generalmente utilizzato per descrivere la capacità di un materiale o di una struttura edilizia di immagazzinare energia termica e di ritardare la trasmissione del calore.

Gli effetti dovuti all'inerzia termica degli ambienti si sintetizzano in tre risultati. Primo, il più basso tempo di risposta di una struttura dotata di inerzia notevole rispetto ad una struttura "leggera" tende

a moderare le fluttuazioni di temperatura all'interno, dovute alle variazioni della temperatura esterna. Secondo, il consumo di energia di un edificio ad alta inerzia termica può essere minore di quello di un edificio più "leggero". Terzo, l'accumulo di energia nella massa dell'edificio consente di spostare temporalmente i picchi di domanda dell'impianto di climatizzazione in ore in cui l'uso degli ambienti è limitato se non nullo.

La figura 3.5 mostra la variazione durante una giornata dei flussi termici che attraversano un parete con capacità termica nulla e un'altra avente la medesima trasmittanza termica, ma capacità termica maggiore di zero. La stessa figura mostra come sia possibile caratterizzare l'effetto della capacità termica sull'onda termica attraverso la definizione di due grandezze:

- lo sfasamento ϕ , che rappresenta il ritardo temporale del picco di flusso termico della parete capacitiva rispetto a quello istantaneo;
- il fattore di decremento μ , che è uguale al rapporto fra il massimo flusso della parete capacitiva e il massimo flusso della parete a massa termica nulla.

La tabella 3.1, estratta dalla norma UNI 10375, riporta alcuni valori caratteristici di ϕ e μ riferiti a pareti verticali con diversa massa. L'efficacia dell'inerzia termica aumenta con l'aumentare dell'escursione termica notte-giorno.

Nei climi caldi, negli edifici occupati di giorno la parete accumula il calore rilasciandolo di notte. Poiché il comfort termico dipende anche dalla temperatura radiante, e quindi dalla temperatura superficiale delle pareti, ed essendo questa nei picchi giornalieri minore di quella dell'aria, l'inerzia termica gioca anche in questo senso un ruolo positivo. Inoltre, la massa termica dell'edificio può essere

Tabella 3.1 – Coefficienti di attenuazione e sfasamento (ore) di pareti verticali

U [W/(m ² ·K)]	m [kg/m ²]											
	150		200		250		300		350		400	
	μ	φ	μ	φ	μ	φ	μ	φ	μ	φ	μ	φ
< 0,4	0,45	6	0,35	8	0,25	10	0,15	12	0,10	14	0,07	16
0,4-0,6	0,48	6	0,40	8	0,30	9	0,20	10	0,15	12	0,12	14
0,6-0,8	0,54	6	0,46	8	0,35	9	0,27	10	0,20	12	0,14	14
> 0,8	0,60	6	0,50	8	0,43	8	0,27	10	0,20	12	0,14	14

“raffreddata” durante la notte mediante ventilazione ottenendo anche l'effetto di aumentare l'effetto di sfasamento e di riduzione dei flussi termici. Nei climi freddi, la massa termica contribuisce a immagazzinare il calore proveniente dalla radiazione solare durante la giornata e temperare le condizioni serali e notturne.

L'isolamento di una parete può essere disposto sulla faccia interna o esterna della muratura oppure in uno strato intermedio, la posizione dell'isolante influenza il comportamento dinamico della parete in quanto determina fisicamente una separazione della massa termica degli strati più interni da quelli più esterni. Se l'isolamento è disposto sulla faccia interna della parete, esso separa praticamente tutta la massa termica della parete dall'ambiente con il risultato di ridurre l'iner-

zia complessiva dello stesso. L'ambiente, e le pareti, potranno quindi essere portate più rapidamente a regime da un impianto di climatizzazione, ma si allontaneranno altrettanto velocemente da tale condizione una volta che si sia spento l'impianto. In questo modo si riducono sensibilmente i periodi di tempo in cui, pur essendo la temperatura dell'aria vicina a valori considerati accettabili, la temperatura delle pareti è tale da generare discomfort. La massa termica interna può invece essere convenientemente inglobata in quella dell'ambiente, ponendo l'isolante sulla faccia esterna. Le fluttuazioni di temperatura superficiale e dell'aria sono quindi più moderate e l'ambiente impiega più tempo a riscaldarsi e a raffreddarsi. Per questo motivo questa soluzione è più utile quando si prevede un funzionamento prevalentemente continuo dell'impianto di climatizzazione. Gli spegnimenti transitori dell'impianto, non generano rapide variazioni delle temperature superficiali in ambiente. La **tabella 3.2** riporta alcuni valori caratteristici dei coefficienti di attenuazione e di sfasamento per pareti di diversa natura e per diverse disposizioni dello strato di isolante.

Il decreto legislativo 192 con le successive integrazioni, nella parte relativa alle norme transitorie, fissa i limiti di massa superficiale richiesta ai componenti opachi in quelle zone climatiche in cui maggiore è l'influenza della radiazione solare.

Tabella 3.2 – Influenza del posizionamento dell'isolante nell'inerzia termica di una parete

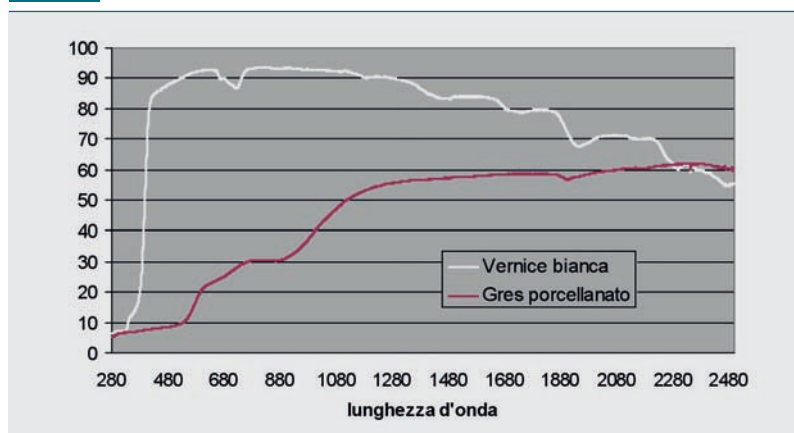
Tipo di parete	Pos. isolamento	μ	φ [h]
Muratura portante con isolamento concentrato	Interno	0,28	11
	Intermedio	0,22	11
	Esterno	0,20	11
Muratura non portante con isolamento concentrato	Interno	0,48	8
	Intermedio	0,44	8
	Esterno	0,44	8
Pareti di tamponamento multistrato	Isolante spessore 6 cm	0,75	4
Pareti finestrate		1,00	0

[3.2.4]

La riflessione e l'assorbimento della radiazione solare

La radiazione solare incidendo sulla superficie di un componente opaco può essere assorbita o riflessa. La parte assorbita provoca l'innalzamento della superficie e la conseguente remissione di calore in parte

Fig. 3.6 Riflettanza di materiali da costruzione



verso l'esterno ed in parte, attraverso la massa del componente, verso l'interno. L'utilizzo di finiture, siano esse vernici, membrane, intonaci speciali (ecc.), ad elevata riflessione solare consente di mitigare tale flusso termico che in alcuni casi, specialmente attraverso le coperture piane ed inclinate, è causa di notevoli carichi di raffrescamento e surriscaldamento interno. Si veda il confronto tra la riflessione solare di una vernice bianca ed un gres porcellanato convenzionale rosso, figura 3.6.

Questa esigenza di abbassare le temperature superficiali degli edifici ha assunto importanza negli ultimi anni a causa del fenomeno "isola di calore", ovvero l'innalzamento della temperatura dell'aria nelle città rispetto a i profili che si registrano nelle zone ad essa circostanti.

Fenomeno imputabile alle elevate temperature superficiali degli edifici, delle sedi stradali, dalla scarsità di superfici termicamente permeabili (parchi, ville, ecc.) ed alle attività umane (trasporto, impianti, ecc.). Limitare l'innalzamento termico delle superfici degli edifici aiuta dunque a limitare l'innalzamento della temperatu-

ra dell'aria outdoor e i carichi frigoriferi esterni.

Per quanto riguarda i rivestimenti degli edifici, la zona più critica è la copertura, poiché la posizione del sole in estate è tale da determinare livelli di irraggiamento molto elevati.

Esistono diverse soluzioni che possono essere raggruppate come segue:

- rivestimenti bianchi, ottenuti con materiali polimerici e pigmenti bianchi. La riflessione può essere spinta fino ad oltre l'80% della radiazione incidente. Prestazioni leggermente inferiori si possono ottenere con altre colorazioni leggere;
- rivestimenti in alluminio, sono realizzati con delle resine particolari in cui si trovano particelle di alluminio. La caratteristica di questi fiocchi fa sì che la superficie esterna del rivestimento sia praticamente un continuo di metallo, garantendo dei valori di riflettanza accettabili (50-60%);
- membrane, realizzate con materiali idrorepellenti ad elevata resistenza, del tipo mono o multi strato. Sono realizzate con elementi di feltro, fibra di vetro o poliestere, successivamente laminato con materiale polimerico flessibile. I valori di riflettanza cadono in un range molto elevato, prodotti di buona qualità hanno valori compresi tra 70 ed 80% della radiazione incidente;
- altre soluzioni possono essere le coperture in metallo (riflettanza intorno al 60%) o con tegole di tipo particolare (riflettanza intorno al 40%, ma alcune tegole in calcestruzzo trattato arrivano al 70%).

La scelta di questi materiali dipende comunque da diversi fattori tra cui: il costo, la durabilità del prodotto, la destinazione d'uso della copertura (calpestabile, con locali tecnici, ecc.), la giacitura del tetto, le caratteristiche costruttive del

componente opaco. Ad esempio il metallo è altamente riflettente ma ha una grande conduttività che lo porta a temperature considerevoli, quindi non va accoppiato direttamente alla tamponatura ma opportunamente distanziato da un'intercapedine.

In figura 3.7 sono riportati i carichi di raffrescamento per una casa ad un piano a Roma. I carichi (kW/m^2 per anno) sono calcolati per diversi livelli di isolamento (U_0 , poco isolato, U , isolamento a legge, U_1 ,

molto isolato) e livelli di riflettanza di copertura e pareti (da 0,2 e 0,4 a 0,8 e 0,7, rispettivamente). Riduzioni di fabbisogno totale fino al 10% sono stati calcolati. I risparmi sono anche maggiori in climi più caldi. In assenza di climatizzazione estiva, a ridursi notevolmente sono le ore in cui la temperatura dell'aria è superiore ai livelli di comfort in funzione della riflessione delle pareti e della copertura, come si evince dalla figura 3.8.

Quantificare e generalizzare i risparmi energetici derivanti dall'adozione di materiali di questo tipo è piuttosto complicato. Essi dipendono dalla geometria dell'edificio, dalle condizioni climatiche, dalla destinazione d'uso dell'edificio, ma è indubbio che la tecnologia è molto utile per ottimizzare le prestazioni dell'involucro nella stagione estiva.

Fig. 3.7 Carichi di raffrescamento in funzione della riflessione dell'involucro

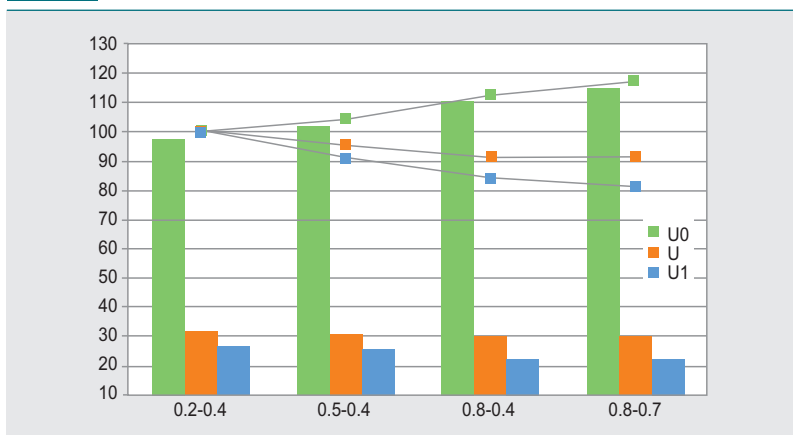
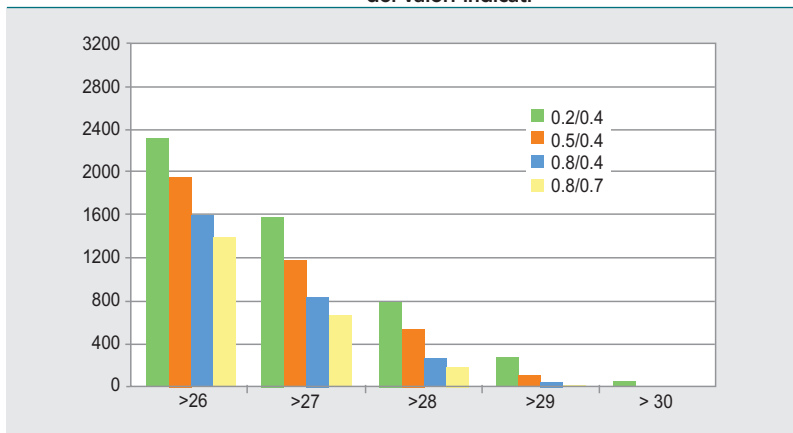


Fig. 3.8 Distribuzione cumulativa delle ore con temperature più elevate dei valori indicati



[3.3] I serramenti

I serramenti sono la parte trasparente e semitrasparente dell'involucro edilizio. È evidentemente la porzione di edificio più delicata dal punto di vista termico, sia perché il livello di isolamento è più basso rispetto ai componenti opachi, sia perché sono più complessi i meccanismi di scambio termico. Questi ultimi includono oltre alle dispersioni termiche viste al capitolo precedente, anche i guadagni solari a breve lunghezza d'onda. Sono quindi trattati con dei cenni le caratteristiche della radiazione solare, e poi i componenti tipici dei serramenti, ovvero: parte trasparente, infissi ed eventuali sistemi ombreggianti. Sono, infine, presentate delle potenzialità di risparmio energetico derivanti dall'uso di sistemi vetrati più efficienti.

[3.3.1]

Caratteristiche della radiazione solare

I materiali trasparenti hanno un comportamento ben diverso da quelli opachi, contribuendo al bilancio energetico dell'edificio in modo più complesso. Fermo restando quanto detto al capitolo precedente sull'isolamento dell'involucro, parlando di serramenti è necessario definire alcune nozioni sulla radiazione solare e sul modo in cui essa penetra nell'ambiente costruito attraverso le superfici trasparenti. La radiazione elettromagnetica emessa dal sole copre uno spettro di lunghezze d'onda teoricamente infinito, tuttavia dal punto di vista applicativo può essere suddivisa negli intervalli definiti nella tabella 3.3. Lo spettro che va dai

300 ai 2.500 nanometri viene comunemente detto intervallo solare, in quanto è al suo interno che avvengono gli scambi energetici, inoltre, come evidenzia la tabella, è quello in cui cade la maggior parte dell'energia solare.

Quando la radiazione solare incide su un materiale trasparente è trasmessa, assorbita e riflessa in funzione di parametri che riguardano le caratteristiche della radiazione, come la distribuzione spettrale e l'angolo di incidenza, e la natura del materiale stesso. In figura 3.9 è riportato, in maniera molto schematica, ciò che avviene allorché un fascio di radiazioni colpisce un elemento trasparente, dalla figura sono facilmente comprensibili i seguenti coefficienti:

- **trasmissione τ** : rapporto tra radiazione che attraversa il materiale e radiazione incidente.
- **riflettanza ρ** : rapporto tra radiazione riflessa dal materiale e radiazione incidente.
- **assorbimento α** : rapporto tra radiazione assorbita dal materiale e radiazione incidente.

Per i tre coefficienti sussiste sempre la relazione:

$$\tau + \rho + \alpha = 1$$

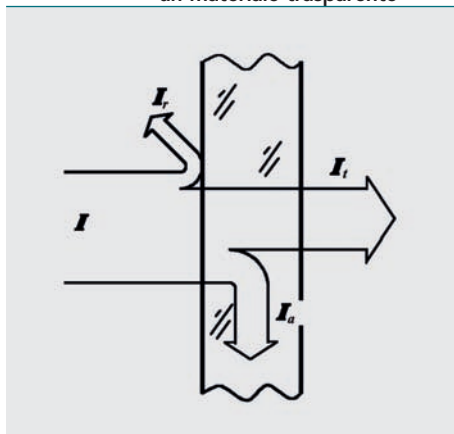
I concetti espressi di seguito valgono per i tre coefficienti, per brevità si farà riferimento alla sola trasmissione in quanto parametro più importante utilizzato, ma è intrinseco che queste considerazioni valgono anche per gli altri due. Ovviamente è necessario approfondire le definizioni sopra riportate con una serie di considerazioni. Innanzi tutto in funzione del materiale, la radiazione incidente sulla superficie può essere trasmessa con le seguenti modalità:

- regolare, il raggio è trasmesso (riflesso)

Tabella 3.3 – Suddivisione spettrale dell'energia solare

Spettro	λ (nm)	% energia
Ultravioletto	150-380	2,3
Visibile	380-780	54,0
Infrarosso vicino	780-2.500	42,4
Infrarosso lontano	2.500-1 mm	1,3

Fig. 3.9 Flussi di energia solare in un materiale trasparente



con angolo pari all'angolo della radiazione incidente;

- **diffondente**, secondo la legge del coseno, il raggio incidente viene trasmesso come somma di infiniti raggi emessi in tutte le direzioni; la radiazione I_{α} , nella generica direzione α , si ricava, secondo la legge del coseno, dalla relazione: $I_{\alpha} = I_0 \cos \alpha$, essendo I_0 la radiazione in direzione normale alla superficie;
- **parzialmente diffondente (scattering)**, il raggio incidente è trasmesso in modo più o meno diffuso mantenendo come direzione principale quella dell'angolo di incidenza; si parlerà di low o high scattering se la diffusione avviene per angoli prossimi alla direzione della radiazione incidente oppure in modo più uniforme;
- **a selettività angolare**, cioè la radiazione è trasmessa in modo regolare ma secondo direttrici preferenziali, dovute ad esempio ad elementi prismatici.

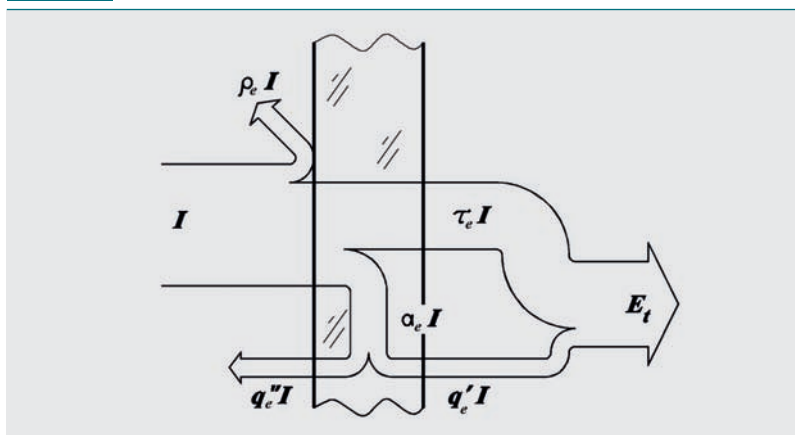
I coefficienti precedentemente introdotti, esattamente come la radiazione incidente, non sono costanti ma dipendono dalla lunghezza d'onda e dalla natura del materiale stesso. Ai fini pratici la trasmittanza

viene calcolata in conformità con i contenuti della normativa ISO 9050. Nella valutazione di tale grandezza risulta importante l'analisi della trasmittanza solare τ_e e di quella luminosa τ_v . Per determinare τ_e , si suppone di illuminare un certo materiale tramite la radiazione solare, successivamente si valuta il rapporto tra l'energia globalmente trasmessa e quella incidente su tale materiale (si prenda in considerazione la radiazione solare contenente le lunghezze d'onda del visibile e del vicino infrarosso). Inoltre per determinare τ_v , si analizza qual è la quota parte dello spettro, relativo ad un illuminante bianco standard, ricevuto dall'occhio umano. I valori dei parametri ottici variano sensibilmente in funzione dell'angolo d'incidenza, infatti la trasmittanza mantiene valori pressoché costanti fino ad angoli intorno ai 30° per decrescere, in maniera più o meno rapida a seconda del materiale, ed ad annullarsi a 90° , la riflettanza ha un comportamento complementare, con il minimo ad incidenza normale e dai 30° aumenta progressivamente fino a diventare pari a 1 a 90° , viceversa l'assorbimento varia con il percorso ottico della radiazione all'interno del materiale.

Oltre alle grandezze di natura ottica, è importante introdurre alcune di carattere energetico le quali sono fondamentali per la scelta dei materiali ed il corretto dimensionamento ed orientamento delle superfici trasparenti. La figura 3.10 approfondisce quanto descritto in figura 3.9, dallo schema si può evincere come parte dell'energia assorbita dal materiale venga poi riemessa sia verso l'interno che verso l'esterno, con contributi che dipendono dalle condizioni ambientali indoor e outdoor e, soprattutto, dalle caratteristiche del materiale trasparente. Viene così definito g , coefficiente di trasmissione totale

Fig. 3.10

Definizione del fattore solare



di energia solare (o brevemente fattore solare), che indica la quota di energia globalmente trasmessa attraverso il materiale, rispetto a quella incidente:

$$g = \frac{I_t}{I} q'_e + \tau_e$$

Il fattore solare è sempre maggiore della trasmittanza solare, con contributi che in alcuni casi possono essere di diversi punti percentuali; con tale parametro si possono valutare al meglio gli apporti solari gratuiti.

Fig. 3.11 Proprietà ottiche spettrali di una lastra di vetro chiara

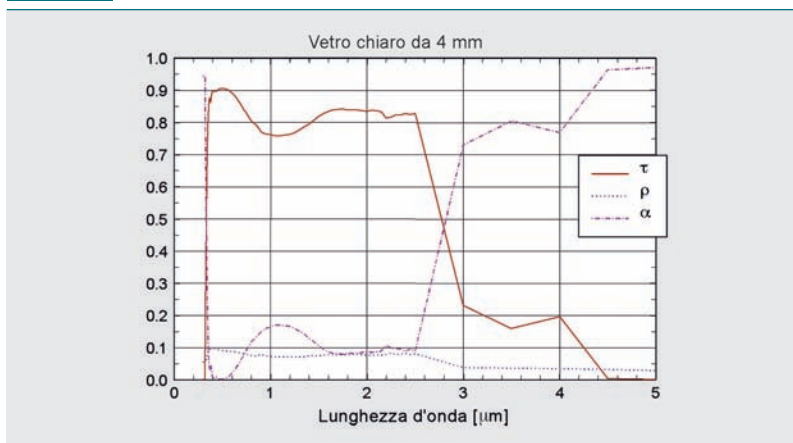
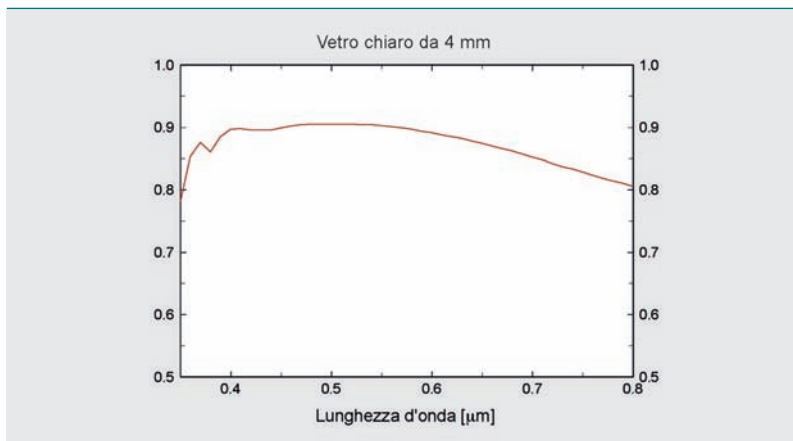


Fig. 3.12 Trasmittanza nell'intervallo visibile di una lastra di vetro chiara



[3.3.2] Caratteristiche ottiche ed energetiche del vetro

Nei seguenti grafici e tabelle sono riassunte alcune delle proprietà più interessanti del vetro chiaro sia come lastra singola sia come doppio vetro con telaio. In figura 3.11 sono tracciate le grandezze ottiche al variare della lunghezza d'onda della radiazione solare ed in figura 3.12 la trasmittanza nel solo intervallo visibile. Come si può vedere dal primo tracciato, una delle caratteristiche più interessanti del vetro è che al sotto dei 2.500 nm presenta una buona trasmittanza, consentendo quindi alla radiazione solare di essere trasmessa quasi per intero. Il comportamento cambia per lunghezze d'onda maggiori, in tale zona, infatti, l'assorbimento di energia è pressoché completo costituendo una barriera alla riemissione di energia (il già citato effetto serra).

I tracciati di figura 3.13 rappresentano il comportamento angolare della trasmittanza e riflettanza solare di un vetro chiaro. Si può notare che solo per angoli dopo i 45° le curve cominciano a variare rapidamente rispetto ai valori di incidenza normale.

Nella tabella 3.4 sono indicate alcune proprietà fisiche del vetro è interessante notare come il valore di conduttività sia indicativo di un materiale non particolarmente isolante, inoltre l'elevato valore di emissività indica un'elevata propensione agli scambi termici di tipo radiativo. È bene ricordare che i valori riportati sono indicativi, perché variazioni nella composizione possono far variare questi valori, sebbene in percentuali molto basse delle proprietà fisiche del vetro chiaro. I valori dei parametri ottici integrati (per lastra singola e vetro camera) sono riportati nella tabella 3.5.

Tabella 3.4 – Proprietà fisiche del vetro

Densità ρ [Kg/dm ³]	Conducibilità λ [W/(m·K)]	Emissività ε [-]
2,5	1,0	0,84

Tabella 3.5 – Caratteristiche finestre con vetri chiari



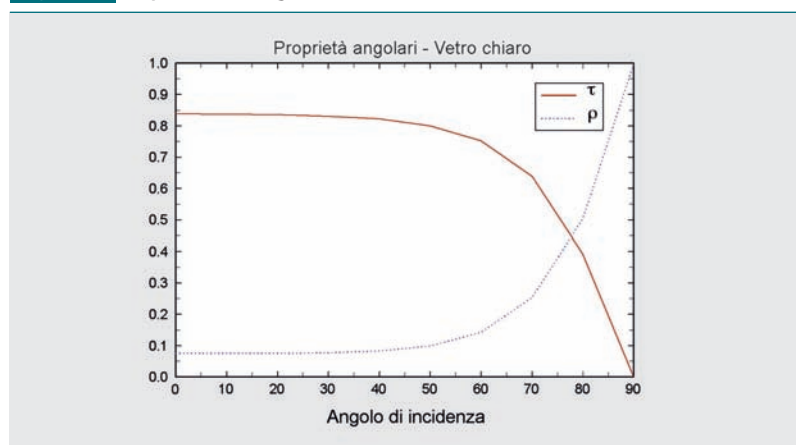
Finestra	τ_c [-]	ρ_c [-]	α_c [-]	τ_v [-]	τ_{IR} [-]	g [-]	U_c [W/(m ² ·K)]
 3 mm	0,84	0,075	0,088	0,898	0,000	0,86	6,306
 3-13-3 mm	0,737	0,128	0,135	0,810	0,000	0,76	2,790

Fig. 3.13 Dipendenza angolare di trasmittanza e riflettanza di un vetro chiaro



[3.3.3]

Componenti vetrati per edilizia

Le proprietà isolanti del vetro convenzionale sono scadenti, cosa che ha portato l'industria ad innovare il settore sempre di più. Inizialmente con il semplice vetrocamera, successivamente con soluzioni sempre più efficienti, descritte a seguire. La tabella 3.6, estratta dalla norma UNI TS 11300, e la 3.7, riassumono le tipologie più comuni.

Si fa, in particolar modo, riferimento ad una distinzione tra vetri ad elevate presta-

zioni e vetri a controllo solare. I secondi non sono propriamente innovativi per un duplice motivo, sia per la tecnologia risalente ai primi anni ottanta, sia perché non innovano sostanzialmente il vetro semplice dal punto di vista energetico.

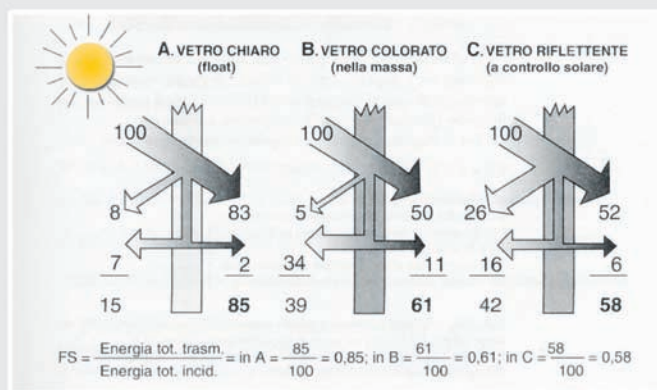
Viceversa, i vetri basso-emissivi alcune innovazioni le introducono effettivamente. Tuttavia è utile accorparli sia per alcune similitudini produttive, sia per risolvere la dicotomia che esiste riguardo a tali materiali. Infatti, esiste la percezione di una sorta di dualismo tra vetri a controllo solare, per i climi caldi, ed a bassa emissività, per i climi freddi; in realtà i due tipi vanno ad agire su proprietà differenti, ma, mentre i vetri a controllo solare sono efficaci solo in zone calde, i basso-emissivi lo sono in qualsiasi condizione, migliorando in assoluto le prestazioni della finestra.

Vetri a controllo solare, vetri basso emissivi e ad elevate prestazioni

I vetri a controllo solare sono stati il primo vero miglioramento rispetto ai tradizionali vetri chiari e sono in commercio già da parecchi anni, con l'obiettivo di ridurre i carichi termici (oltre ad un eccessivo illuminamento) dovuti alla radiazione solare entrante attraverso le aperture vetrate. L'obiettivo è perseguito con l'utilizzo di vetri colorati nella massa o con depositi superficiali. Nel primo caso parte della radiazione incidente è assorbita dal materiale e parzialmente riemessa verso l'esterno, nel secondo la radiazione incidente è direttamente riflessa all'esterno. Questi principi sono schematizzati in figura 3.14. Il mercato più attivo è senz'altro quello dei vetri riflettenti, essi possono ottenersi attraverso due procedimenti:

- pirolisi, ovvero deposito di ossidi metallici sulla linea di produzione di vetro chiaro o colorato in massa; la tecnolo-

Fig. 3.14 Trasferimento della radiazione nei vetri a controllo solare



gia determina la fusione degli ossidi ad elevata temperatura che vengono inglobati nella superficie delle lastre, ottenendo grande stabilità, durezza e resistenza agli agenti atmosferici;

- polverizzazione catodica di metalli e di ossidi metallici su lastre, in campo elettromagnetico e sotto vuoto; in questo caso la superficie trattata va sempre posta in opera all'interno.

Le vetrate attrezzate con vetri riflettenti presentano vantaggi di riduzione del fattore solare, di qualità estetiche dovute agli effetti cromatici e perché, se desiderato, consentono la visione dello spazio esterno dall'interno ma non viceversa. Esistono tuttavia inconvenienti di non poco conto:

- costi elevati per prestazioni termiche non eccelse, infatti non si migliora il coefficiente di perdite termiche U (ovvero le capacità isolanti), ma soltanto il fattore solare;
- in molti casi non c'è comportamento selettivo, elevata trasmissione nello spettro visibile ed elevata riflessione nell'infrarosso, ma soltanto elevata riflessione su tutto lo spettro; questo

implica scarsa luminosità degli ambienti e richiesta quasi costante di luce artificiale; in questi casi il risparmio ottenibile per ridotti carichi per il condizionamento può essere del tutto vanificato, con l'aggravante del non utilizzo della luce naturale;

- la riduzione del fattore solare non è un dato sempre positivo nel corso dell'anno;
- riflessioni verso l'interno con conseguenti fenomeni di abbagliamento.

Quindi il controllo solare non risolve efficacemente la soluzione del problema energetico e del comfort visivo dei componenti trasparenti nell'edilizia, anche se diversifica le soluzioni architettoniche, fornendo una scelta più ampia di prodotti.

Il vetro è un materiale con valori di emissività globale molto elevati (incirca 0,84), che determinano elevati scambi radiativi con l'ambiente circostante. Grazie all'applicazione di sottili film metallici o di ossidi di metalli è possibile innalzare la riflettanza nell'infrarosso, riducendo notevolmente l'emissività del vetro (valori inferiori a 0,1!), con conseguente riduzione degli scambi radiativi per effetto di un'elevata riflessione nel campo dell'infrarosso. Questo consente di avere vetri con valori di resistenza termica nettamente migliori. Inoltre il posizionamento di tali film permette al vetrocamera di funzionare a guadagno o a filtro solare. Nel caso in cui il film è messo sulla faccia interna del vetro esterno la finestra funziona come filtro solare, poiché la radiazione è assorbita in prossimità della superficie esterna e rimmessa verso l'esterno. Se il film è sulla faccia esterna del vetro interno la radiazione che attraversa il vetro esterno colpisce il vetro interno che, per la presenza del rivestimento all'esterno, non potrà che rimmetterla verso l'interno, facendo funziona-

re la finestra a guadagno solare. Materiali particolari, ad esempio l'argento, hanno elevata riflessione anche nell'infrarosso vicino, comportandosi così come dei filtri solari. Hanno, infatti, l'isolamento termico dei vetri basso emissivi ed il fattore solare dei vetri a controllo solare, pur mantenendo rispetto a questi ultimi un'elevata trasmissione luminosa, si veda la **tabella 3.7**. La **figura 3.15** riporta l'andamento della trasmittanza spettrale di un normale doppio vetro (float 5 o extra), di un basso emissivo (low e) e di un filtro solare (SF). L'andamento fa intuire come la riflettanza, speculare rispetto alla trasmissione, si innalzi in diversi punti dello spettro, con conseguente variazione del controllo solare e dell'emissività.

Le proprietà di bassa emissione di questi vetri sono da ricercare nelle caratteristiche fisiche dei materiali utilizzati, in particolare nell'esistenza di elettroni liberi, tipici di metalli nobili come argento, oro, rame. In particolare l'argento offre ottime prestazioni dovute sia al basso assorbimento nel visibile, sia all'elevata riflettanza nell'infrarosso. Viceversa oro e rame presentano bande di assorbimento nella porzione centrale del range visibile, come testimo-

niano le loro tipiche colorazioni, con riduzione della trasmissione luminosa. Questi metalli, se sufficientemente sottili, sono utilizzabili come rivestimenti per finestre, in genere con spessori tra 10 e 30 nanometri che corrispondono a 25/75 strati atomici. È evidente l'importanza della preparazione del coating, in particolare:

- continuità e omogeneità del rivestimento;
- adesione al substrato, ovvero il vetro di base, evitando fenomeni di diffusione all'interfaccia;
- deposizione di strati antiriflesso su entrambe le facce del rivestimento, al fine di evitare una rilevante riduzione della trasmittanza; va notato che lo strato posto tra argento e substrato funge da adesivo, mentre il secondo evita fenomeni di corrosione;
- recenti sviluppi hanno dimostrato l'efficacia di un doppio strato metallico, con interposto il dielettrico; è stata verificata un'ottima trasmissione della luce, insieme ad una trasmittanza nell'infrarosso vicino prossima allo zero;
- per evitare il degrado dei vari strati è necessario porre le facce trattate all'interno dei vetrocamera.

I metalli nobili non sono i soli a prestarsi a questo tipo di applicazioni, sono utilizzati anche i metalli di transizione ed ossidi conduttori trasparenti. I primi, tra i quali vanno inclusi: ferro, cromo, nickel (ed altri), sono meno efficaci sia per la trasmissione nel visibile, sia per la riflessione nell'infrarosso. Trovano un certo impiego in alcuni vetri a controllo solare, spesso associati ad altri rivestimenti.

La seconda categoria riguarda i semiconduttori a banda larga, che diventano conduttori a tutti gli effetti dopo essere stati dopati con opportuni atomi. In genere la concentrazione è di diversi punti percen-

Fig. 3.15

Trasmittanza di diversi componenti vetrati

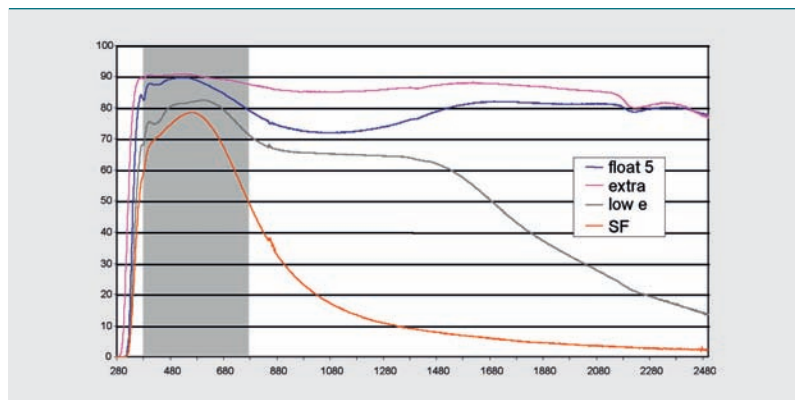


Tabella 3.6 – Trasmissione termica di componenti vetrati

Tipo	Vetrata			Gas in intercapedine (conc. gas > = 90%)				
	Vetro	Emissività normale	Dimensioni (mm)	Aria	Argon	Krypton	SF ₆	Xenon
Vetrata doppia	Vetro normale	0,89	4-6-4	3,3	3,0	2,8	3,0	2,6
			4-8-4	3,1	2,9	2,7	3,1	2,6
			4-12-4	2,8	2,7	2,6	3,1	2,6
			4-16-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
			4-20-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
	Una lastra con trattamento superficiale	≥ 0,20	4-6-4	2,7	2,3	1,9	2,3	1,6
			4-8-4	2,4	2,1	1,7	2,4	1,6
			4-12-4	2,0	1,8	1,6	2,4	1,6
			4-16-4	1,8	1,6	1,6	2,5	1,6
			4-20-4	1,8	1,7	1,6	2,5	1,7
	Una lastra con trattamento superficiale	≥ 0,15	4-6-4	2,6	2,3	1,8	2,2	1,5
			4-8-4	2,3	2,0	1,6	2,3	1,4
			4-12-4	1,9	1,6	1,5	2,3	1,5
			4-16-4	1,7	1,5	1,5	2,4	1,5
			4-20-4	1,7	1,5	1,5	2,4	1,5
	Una lastra con trattamento superficiale	≥ 0,10	4-6-4	2,6	2,2	1,7	2,1	1,4
			4-8-4	2,2	1,9	1,4	2,2	1,3
			4-12-4	1,8	1,5	1,3	2,3	1,3
			4-16-4	1,6	1,4	1,3	2,3	1,4
			4-20-4	1,6	1,4	1,4	2,3	1,4
Una lastra con trattamento superficiale	≥ 0,05	4-6-4	2,5	2,1	1,5	2,0	1,2	
		4-8-4	2,1	1,7	1,3	2,1	1,1	
		4-12-4	1,7	1,3	1,1	2,1	1,2	
		4-16-4	1,4	1,2	1,2	2,2	1,2	
		4-20-4	1,5	1,2	1,2	2,2	1,2	
Vetrata tripla	Vetro normale	0,89	4-6-4-6-4	2,3	2,1	1,8	1,9	1,7
			4-8-4-8-4	2,1	1,9	1,7	1,9	1,6
			4-12-4-2-4	1,9	1,8	1,6	2,0	1,6
	Due lastre con trattamento superficiale	≥ 0,20	4-6-4-6-4	1,8	1,5	1,1	1,3	0,9
			4-8-4-8-4	1,5	1,3	1,0	1,3	0,8
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,8	1,3	0,8
	Due lastre con trattamento superficiale	≥ 0,15	4-6-4-6-4	1,7	1,4	1,1	1,2	0,9
			4-8-4-8-4	1,5	1,2	0,9	1,2	0,8
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,7	1,3	0,7
	Due lastre con trattamento superficiale	≥ 0,10	4-6-4-6-4	1,7	1,3	1,0	1,1	0,8
			4-8-4-8-4	1,4	1,1	0,8	1,1	0,7
			4-12-4-12-4	1,1	0,9	0,6	1,2	0,6
	Due lastre con trattamento superficiale	≥ 0,05	4-6-4-6-4	1,6	1,2	0,9	1,1	0,7
			4-8-4-8-4	1,3	1,0	0,7	1,1	0,5
			4-12-4-12-4	1,0	0,8	0,5	1,1	0,5

tuali, con conseguente aumento di elettroni liberi. Anche con questi materiali è assicurata un'elevata riflessione nell'infrarosso, continuando ad avere un'elevata trasmittanza luminosa. La produzione dei rivestimenti avviene alla fine del procedimento *float*, quando il vetro è ancora caldo, mediante pirolisi. Lo strato varia tra 300 e 700 nanometri ed, essendo più spesso e duro, è più resistente al degrado e può essere posto a contatto con l'esterno.

Un'ultima classe di materiali molto promettente è quella dei rivestimenti in nitruro di titanio e zirconio. Ossidi e nitruri sono generalmente materiali isolanti, tuttavia i nitruri di metalli si comportano come veri e propri metalli con elettroni liberi, cosa che li accomuna ai metalli nobili, con il vantaggio di essere più duri e resistenti. Componenti vetrati con questo tipo di rivestimento non sono ancora in commercio, in attesa che venga perfezionata la tecnologia di produzione e verificati fenomeni di invecchiamento e durabilità.

Nella **tabella 3.6** sono presentati diversi tipi di sistemi vetrati con diverse soluzioni di gas nell'intercapedine del vetrocamera. Si tratta di gas più isolanti dell'aria e dunque in grado di fornire una maggiore resistenza alla dispersione del calore. Si

noti che i gas non alternano le caratteristiche solari del componente trasparente, come si evince dalla **tabella 3.7**, nella quale si riportano dei dati assolutamente medi, di caratteristiche solari di diversi sistemi vetrati.

Come detto precedentemente esiste la percezione di un uso alternativo di vetri basso emissivi ed a controllo solare. Questi ultimi sono vetri con moderata trasmissione luminosa (in genere sono scuri) e bassa trasmissione solare da utilizzare tipicamente in zone calde. Tuttavia in questi vetri non si interviene sull'emissività del vetro, quindi non migliorano le prestazioni termiche. Questo avviene invece nei vetri basso emissivi, i quali sono ad elevata trasmissione luminosa e bassa trasmittanza termica. Dunque considerare alternativi questo tipo di vetri non è esatto poiché non si tiene in conto che:

- un vetro a controllo solare può avere anche un rivestimento basso emissivo, essendo diversa la natura ed il posizionamento dei rivestimenti,
- i vetri basso emissivi, a differenza di quelli a controllo solare, operano un aumento della resistenza termica del componente, che è una situazione comunque auspicabile.

Rifacendosi all'ultimo punto, è, dunque, evidente che un'elevata resistenza termica è auspicabile in qualsiasi clima, caldo o freddo, perché determina un più efficace isolamento dell'involucro edilizio ed una riduzione di carichi termici e frigoriferi, mentre è il problema della radiazione, ovvero del controllo solare, che è strettamente connesso al clima. Nella **figura 3.15** sono riportati gli andamenti della trasmittanza solare per un vetro-basso emissivo standard e per uno con filtro solare, cioè con il taglio pressoché totale della trasmittanza in tutto l'infrarosso.

Tabella 3.7 – Caratteristiche solari di alcuni componenti vetrati

Tipo di vetro (4-12-4)	τ_v	g
Vetrocamera	0,81	0,76
Vetrocamera a controllo solare	0,40	0,40
Vetrocamera low-e	0,75	0,65
Vetrocamera con gas	0,81	0,76
Vetrocamera con gas low-e	0,75	0,65
Vetrocamera a filtro solare	0,70	0,40

[3.3.4]

Materiali trasparenti ad elevata innovazione

I materiali trasparenti rappresentano probabilmente il settore dell'involucro edilizio a maggior grado di innovazione. Numerosi prodotti, nati inizialmente anche per altri scopi, hanno trovato negli ultimi anni applicazione in edilizia. In alcuni casi si tratta di soluzioni mature, già sul mercato, in altri si è ancora in fase di sviluppo o precompetitiva. È comunque interessante fornire delle indicazioni di base per soluzioni tecnologiche che potrebbero essere, in tempi brevi, adottate in edifici residenziali e, soprattutto, commerciali.

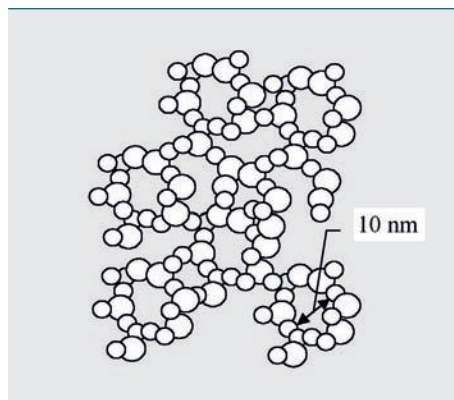
Aerogel

L'aerogel è un materiale costituito da particelle di silice, e, grazie a particolari procedimenti produttivi, è caratterizzato da una struttura porosa aperta trasparente, in grado di fornire ottime prestazioni sia ottiche sia energetiche, si veda lo schema in figura 16. L'aerogel, descritto già nel 1931 da S. S. Kistler, è stato oggetto di interesse a periodi alterni ed è ritornato di moda per le possibili applicazioni in edilizia.

L'aerogel è caratterizzato da elevata sensibilità all'umidità ed alle sollecitazioni di trazione, per tale ragione è necessario proteggerlo dall'ambiente esterno, soprattutto se utilizzato per le finestre. Essendo resistente a sollecitazioni di compressione è evidente che le applicazioni del materiale in vetro camera possono essere molto vantaggiose. La conduttività termica del materiale è circa $15-20 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a pressione atmosferica, in condizioni di pressione al di sotto dei 100 mbar è possibile ottenere un'aerogel con proprietà simili a quelle del vuoto. Questo avviene grazie alla combinazione della struttura porosa con le ridotte dimensioni dei pori stessi. Si è valutato che, alle pressioni menzionate, gli scambi termici avvengono quasi totalmente per conduzione tra lo scheletro della struttura e per radiazione. Infatti, essendo l'aerogel costituito per almeno il 95% da vuoti, è possibile ottenere un materiale dalle elevate proprietà termiche.

La caratteristica fondamentale è, come detto, la microporosità del materiale, i pori hanno 10-20 nanometri come dimensione media, essendo questi valori molto minori delle lunghezze d'onda della luce naturale ne risulta un comportamento trasparente. In realtà il comportamento non è perfettamente tale, in quanto esistono fenomeni di scattering della luce trasmessa che danno luogo ad una visione lattiginosa ed a colorazioni particolari, tendenti al blu nel caso di sfondo scuro e giallo nel caso di sfondo chiaro o luminoso. I valori di trasmittanza sono compresi tra 85 e 92%, simili a quelli del vetro chiaro. Da un lato, poiché, esiste il problema dello scattering e della distorsione dello spazio esterno per le applicazioni nelle normali finestre, dall'altro l'elevata trasmittanza consente numerosi sbocchi nel daylighting

Fig. 3.16 Schema della struttura dell'aerogel



e nei sistemi solari attivi e passivi. Per quanto concerne la caratterizzazione energetica, si sono trovati valori di conduttività termica di 15-17 mW/(m·K) per aerogel non evacuato e 10-11 per quello sotto vuoto. Va comunque ricordato che tutte le misure condotte da vari laboratori hanno evidenziato una forte dipendenza spettrale, quindi i valori riportati sono da considerare puramente indicativi. Inserire l'aerogel in un vetrocamera consente di avere un prodotto di elevate qualità energetiche, se all'interno dell'intercapedine si raggiungono pressioni inferiori ai 50 mbar. Un vetrocamera con una lastra di due centimetri di aerogel è in grado di avere un coefficiente di perdite termiche al centro della lastra di 0,5-0,6 W/(m²·K), tuttavia questi valori possono aumentare del 70% passando alle perdite termiche di tutto il componente. Test su trasmittanza solare e luminosa danno risultati superiori al 70%. Affinché ciò non accada, è necessario porre grande cura nel sigillare i bordi per garantire:

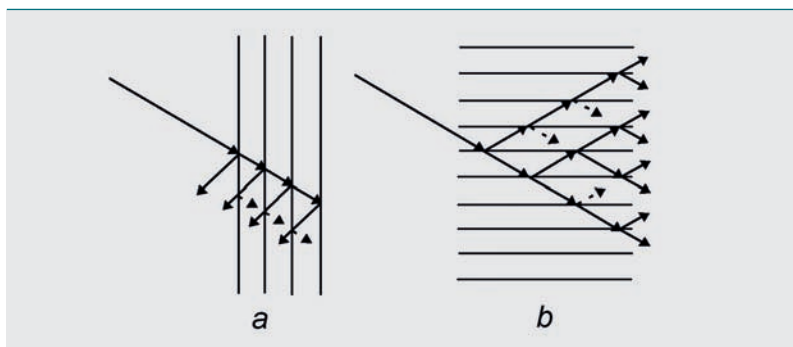
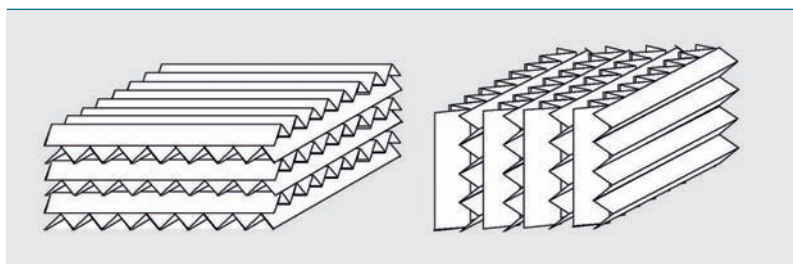
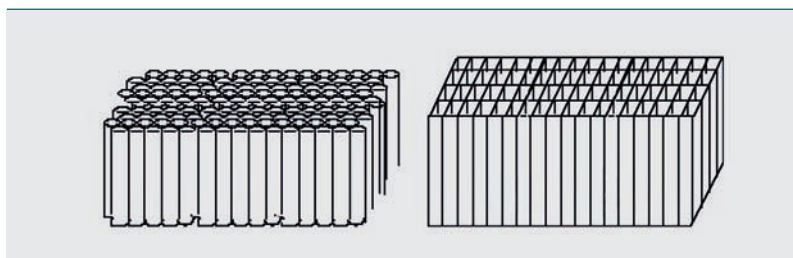
- resistenza all'acqua,
- resistenza al vapore,
- assenza di ponti termici.

L'aerogel monolitico è un materiale molto promettente perché assolve brillantemente tutte le funzioni richieste ad una finestra, con prestazioni energetiche paragonabili a quelle delle chiusure opache dell'involucro edilizio, tuttavia con costi ancora elevati. L'aerogel granulato è ormai standardizzato nella produzione e nelle prestazioni, inoltre anche se non può sostituire le normali finestre, presenta un incremento di costo limitato nei confronti di un normale vetrocamera. Per entrambi i tipi di aerogel la prevista penetrazione nel mercato lascia prevedere riduzioni dei prezzi, soprattutto per l'aerogel monolitico, ancora in piena fase evolutiva.

Materiali trasparenti isolanti (TIM)

Questi materiali sono anche chiamati geometric media, poiché utilizzano delle strutture geometriche per limitare le dispersioni termiche per convezione ed irraggiamento. In pratica con del materiale plastico (ultimamente sono in fase di sviluppo alcuni prototipi anche in vetro) trasparente nel visibile e nel vicino infrarosso, ma opaco nel lontano, si realizzano delle pareti divisorie atte a bloccare i moti convettivi dell'aria e ridurre lo scambio radiativo. Come è possibile vedere nella figura 3.17, illustrazione sinistra del disegno, se le pareti sono perpendicolari alla direzione di propagazione (come ad esempio succede nelle finestre con più lastre) ad ogni passaggio attraverso queste barriere parte della radiazione è riflessa verso l'esterno e irrimediabilmente persa. Ciò limita fortemente il numero di strati praticamente realizzabili al fine di evitare un'attenuazione drammatica della trasmittanza complessiva. È il caso dei primi TIM, schematizzati in nella parte destra della figura 3.18, i quali forniscono soddisfacenti prestazioni termiche, ma non ottiche.

Nella parte sinistra della stessa figura è riportata la tipologia di struttura utilizzata negli ultimi prodotti. In questo caso le pareti sono mantenute parallele alla direzione di propagazione. Nel caso ideale di assenza di assorbimento e diffusione durante l'attraversamento delle pareti, indipendentemente dal numero di successive riflessioni e trasmissioni, tutta la radiazione incidente raggiunge, con una traslazione più o meno grande, l'altra estremità del materiale. Inoltre lo spessore dello strato non è influente, ancora nella situazione ideale, sulle proprietà ottiche. In realtà fenomeni di assorbimento e di scattering, anche se minimi, avvengono senza peraltro pregiudicare le presta-

Fig. 3.17 Principio di funzionamento dei profili geometrici rappresentanti i TIM**Fig. 3.18** TIM honey comb, nuova (sinistra) e vecchia tessitura dei fogli di PA**Fig. 3.19** TIM capillari a sezione irregolare e quadrata**Tabella 3.8 – Proprietà termiche di TIM**

Campione	Strati [mm]	Descrizione	τ_v	g	U [W/(m ² °K)]
S1	4	vetro chiaro	0,74	0,76	1,4
	50	PC capillare			
	4	vetro chiaro			
S2	4	vetro chiaro	0,74	---	0,9
	100	PC capillare			
	4	vetro chiaro			

zioni di tali materiali che sono realizzati con spessori fino a 50 cm. A causa delle successive riflessioni dovute alle pareti il materiale non è trasparente ma traslucido e, quindi, non può essere utilizzato in sostituzione delle finestre.

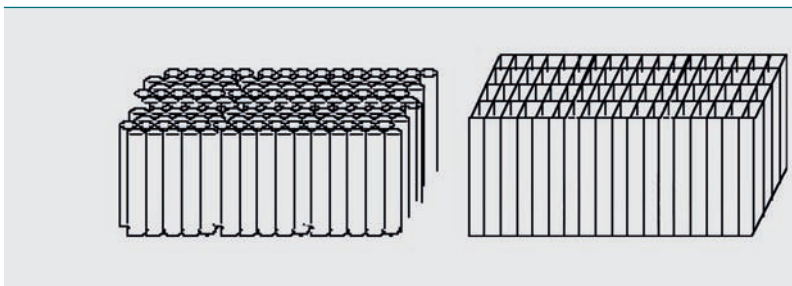
In funzione della dimensione delle celle, i TIM si distinguono in capillari ed a nido d'ape (honeycomb). Questi ultimi presentano la tipica struttura riportata nella parte destra della figura 3.18 ed hanno diametri dell'ordine di qualche centimetro. Per i TIM capillari il diametro è intorno a uno o due millimetri e la sezione può essere quadrata o irregolare, come in figura 3.19. Per render più uniforme la radiazione trasmessa, sulla faccia dei TIM sono posti dei fogli di vetro diffondenti.

I materiali con i quali si realizzano le strutture sono generalmente: polycarbonato (PC), polimetilmetacrilato (PMMA) e poliacetato (PA). La produzione avviene tramite estrusione di strutture cilindriche, a sezione rotonda o quadrata, affiancata. Gli estrusi vengono poi tagliati nello spessore richiesto. Attualmente sono anche in fase di sviluppo strutture realizzate in vetro con vantaggi dal punto di vista della resistenza al calore e con prestazioni ottiche migliori, tuttavia esistono dei problemi ancora da risolvere, dovuti alla fragilità ed alla sensibilità igroscopica del materiale.

I TIM, una volta prodotti, sono inseriti nell'intercapedine di un vetrocamera. Si realizza, così, un sistema trasparente complesso, che presenta notevoli vantaggi applicativi. Le proprietà ottiche e termiche di questo materiale sono riportate nella tabella 3.8 in cui sono descritti alcuni dei parametri ottici ed energetici, che lo caratterizzano. Senza addentrarsi sul comportamento angolare di tali materiali, si possono evincere alcuni aspetti interessanti:

- i livelli di trasmittanza normale, special-

Fig. 3.19 TIM capillari a sezione irregolare e quadrata



mente ad incidenza normale, sono molto elevati, poco inferiori ai normali vetrocamera;

- la dipendenza angolare è maggiore rispetto ai doppi vetri solo ad elevati angoli di incidenza, quando aumenta l'assorbimento della radiazione da parte del materiale; ciò è inevitabile perché ad angoli elevati aumentano i rimbalzi dei raggi tra le pareti del materiale plastico e con essi l'assorbimento e lo scattering;
- l'assorbimento dell'ossido di ferro (contenuto nel vetro) intorno ai mille nanometri, causa anche in questi componenti una diminuzione della trasmittanza solare rispetto a quella visibile; qualora si voglia una ottimizzazione dei guadagni solari è opportuno inserire i TIM tra vetri a basso contenuto ferroso, che hanno un minore assorbimento nel vicino infrarosso.

Si è detto in precedenza che i TIM sono composti polimerici organici; questi materiali sono dunque soggetti a trasformazioni fisiche e chimiche di tipo irreversibile, le quali alterano le prestazioni del componente. Comprendere come le cause esterne, e quelle climatiche in particolari, agiscono sul materiale, aiuta la scelta delle sostanze più adeguate per la produzione dei TIM.

Per quanto riguarda l'effetto foto degradante operato dalla radiazione solare, è stato verificato come il PC ingiallisca a causa delle radiazioni UV, specialmente sotto 300 nanometri; viceversa il PMMA è stabile e mantiene per periodi molto lunghi le proprietà ottiche iniziali.

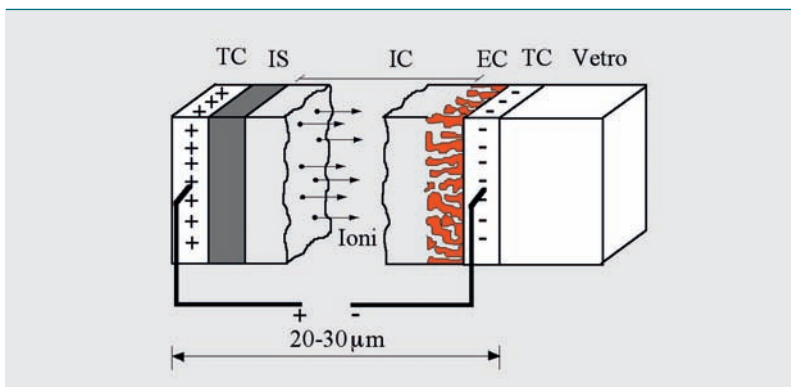
Stabilizzatori di tipo chimico e/o vetri protettivi possono essere aggiunti, anche se questo comporta dei costi aggiuntivi. Altro problema è quello degli stress igrotermici, ovviamente entrano in gioco sia le qualità del componente sia la messa in opera e l'integrazione con il resto dell'edificio. Questi ultimi possono sembrare in apparenza dei dettagli, in realtà non corrette operazioni di montaggio possono dar luogo a difetti pericolosi, come l'insorgere di stati tensionali nel vetro o l'aggressione da parte dell'umidità e di sostanze inquinanti. I TIM non consentono la visione dello spazio esterno, perciò non possono essere usati al posto delle normali finestre (esistono anche inconvenienti di natura tecnica, legati allo spessore del componente), però sono molto utili per applicazioni di daylighting, quando vi sono grandi spazi da illuminare con ampie superfici vetrate. Altre applicazioni interessanti sono quelle nei sistemi solari sia ad acqua (attivi) che ad aria (passivi). In entrambi i casi si ha un materiale molto trasparente alla radiazione solare, ma con perdite termiche molto più basse rispetto ai vetri, singoli e doppi.

Vetri elettrocromici

I vetri cromogenici sono quelli in grado di variare le proprie caratteristiche ottiche in funzione di un piccolo voltaggio. Il funzionamento è schematizzato in figura 3.20: quando una tensione, in genere tra 1,5 e 5 Volt, è applicata tra i conduttori trasparenti (TC), parte degli ioni presente nello

Fig. 3.20

Funzionamento di un vetro elettrocromico

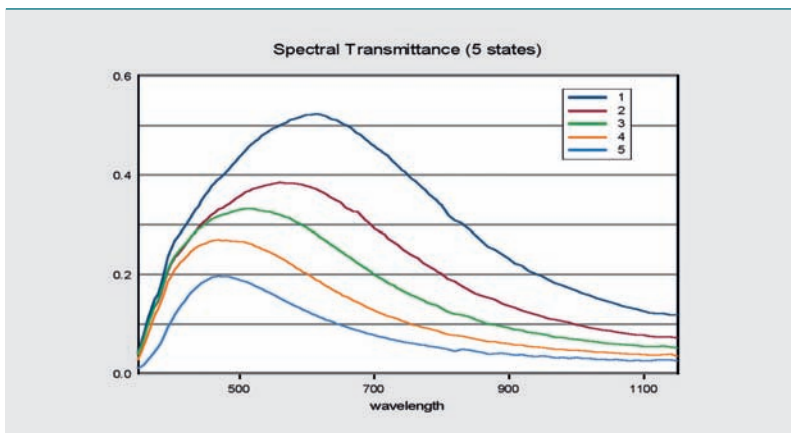


strato di accumulo (IS) attraversano la zona di separazione (IC), in grado di condurre tali ioni, per fermarsi nello strato elettrocromico effettivo (EC), con la conseguente variazione di colore del componente. Invertendo la tensione si inverte il processo. Il materiale ha memoria, quindi mantiene lo stato indotto dalla tensione. Alcuni vantaggi di questi materiali sono:

- transizione dallo stato trasparente a quello colorato, gestita dall'utente, secondo le caratteristiche del sistema di controllo;

Fig. 3.21

Trasmittanza di un vetro elettrocromico nei vari stati



- consumi energetici solo per la fase di transizione, poiché il nuovo stato è memorizzabile fino a 24 ore, senza alimentazione del dispositivo;
- possibilità di modificare gradualmente la trasmittanza ed il fattore solare delle finestre;
- mantenimento delle caratteristiche di trasparenza, ovvero è possibile vedere attraverso.

Questi materiali sono ancora in continua evoluzione, visti i notevoli problemi: durabilità del prodotto, lunghi tempi di transizione da stato colorato a stato chiaro, produzione quasi artigianale, costi elevati. La possibilità di produrre pacchetti elettrocromici a stato solido, è il primo passo per risolvere alcuni di questi problemi.

Esistono alcuni prodotti sul mercato con caratteristiche diverse ma che rappresentano il primo passo per l'introduzione dell'involucro dinamico negli edifici. Si riportano ad esempio in figura 3.21 valori di trasmittanza spettrale di un vetro commerciale in 5 diversi stati di colorazione (50% nello stato chiaro, 15% in quello più scuro nello spettro visibile). Si ricorda inoltre che questo sistema agisce solo sullo spettro solare, le prestazioni termiche andranno migliorate con le soluzioni che migliorano le prestazioni nell'infrarosso lontano, come visto precedentemente.

[3.3.5]

Gli infissi

Gli infissi rappresentano la parte opaca dei serramenti e hanno una notevole importanza per il flusso termico che hanno luogo attraverso le finestre. Fino a poco tempo fa erano ritenuti la parte termicamente più efficiente del serramento, oggi, con i grandi progressi tecnologici avvenuti nel campo dei sistemi trasparenti, gli infissi pare siano divenuti il prodotto a

più limitate potenzialità di miglioramento termico. Non a caso nei paesi più freddi, dove l'utilizzo di vetrocamera multipli con vetri basso emissivi è prassi comune, le maggiori perdite termiche sono localizzate proprio negli infissi e nella giunzione tra vetro e componente opaco. Le loro caratteristiche termiche regolano gli scambi termici dovuti alla differenza di temperatura tra ambiente esterno ed interno, dall'altro è attraverso gli infissi che avvengono le infiltrazioni d'aria, ulteriore carico termico per l'edificio specialmente nella stagione invernale. Se la scelta del materiale ha un'importanza limitata per quanto riguarda la permeabilità all'aria, viceversa è fondamentale per le prestazioni termiche, ovvero la trasmittanza termica U e la trasmittanza termica lineare α , introdotta al paragrafo successivo. Per questo motivo, nei successivi sottoparagrafi si riassumono le caratteristiche dei principali tipi di infisso.

Infissi in legno

Gli infissi in legno sono utilizzati da secoli negli edifici e rappresentano ancora oggi la maggiore quota parte di mercato

per l'edilizia residenziale. Le caratteristiche termo-fisiche sono legate al tipo di legno utilizzato ed allo spessore dell'infisso, cosa che ovviamente non ha fatto drasticamente cambiare il comportamento termico del materiale. La tecnologia ha viceversa aiutato con nuovi prodotti di finitura la stabilità e la curabilità del prodotto, così come l'utilizzo di guarnizioni sintetiche e naturali ha consentito di ridurre l'elevata permeabilità all'aria di questo tipo di infissi. I valori di trasmittanza termica U degli infissi in legno è funzione della densità del legno e dello spessore e della geometria dell'infisso, si vedano gli schemi costruttivi in figura 3.22 e il grafico in figura 3.23. Tipici valori di infissi in legno sono comunque compresi tra 1,35 ed 1,5 $W/(m^2 \cdot K)$.

Infissi in PVC

Il polivinilcloruro è utilizzato per la realizzazione dei serramenti dall'inizio degli anni cinquanta, anche se una vera e propria diffusione è iniziata dopo un ventennio, in seguito alle crisi energetiche occorse in quegli anni. Essenzialmente gli infissi in PVC sono costituiti da profilati cavi a più camere, uniti mediante saldatura e rinforzati con profilati metallici. La diffusione di questi infissi è da ricercare nelle buone caratteristiche termiche, nella bassa richiesta di manutenzione e nella molteplicità di soluzioni geometriche. I valori standard di questo tipo di infisso sono di circa 2,2 $W/(m^2 \cdot K)$ nel caso di profilo a 2 camere e di 2 $W/(m^2 \cdot K)$ per profili a 3 camere. Esistono oggi delle soluzioni ancora più avanzate con profili a 5 camere con livelli di isolamento ancora migliori. Esistono, seppure a diffusione molto limitata, infissi in poliuretano. Nel caso di spessore dell'infisso superiore a 5 millimetri, il valore di riferimento, secondo le norme EN, della trasmittanza termica è di 2,8 $W/(m^2 \cdot K)$.

Fig. 3.22 Calcolo di dello spessore in funzione della geometria

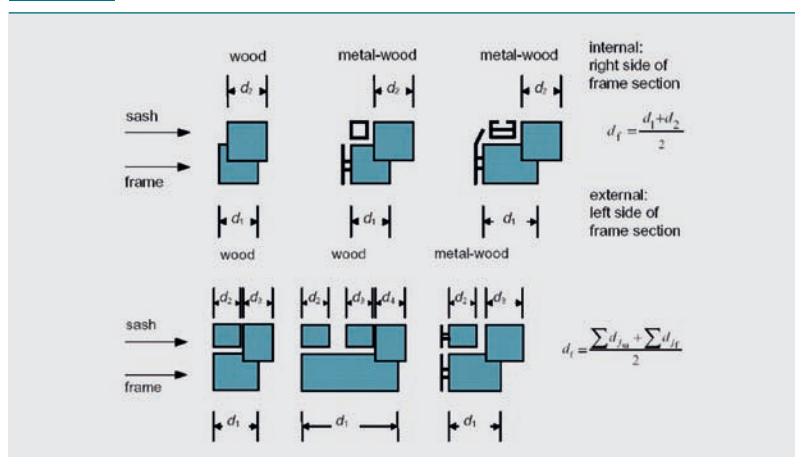
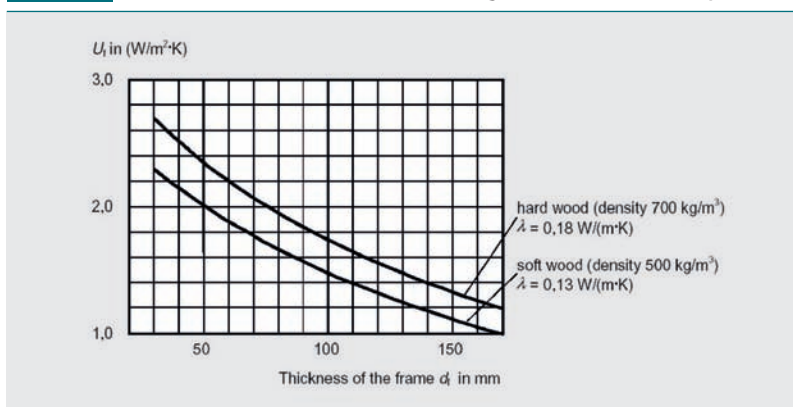


Fig. 3.23 Trasmittanza termica dell'infisso in legno in funzione dello spessore

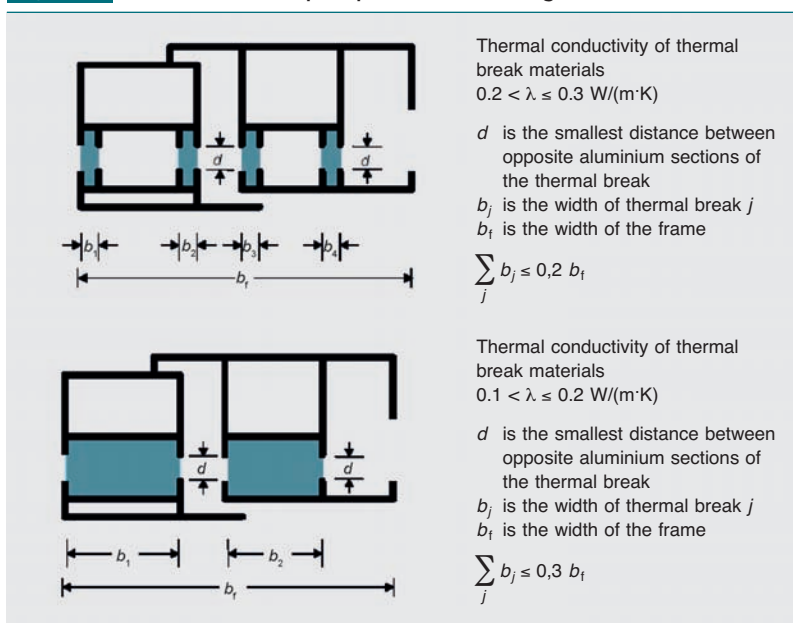
Infissi in alluminio

Gli infissi in alluminio rappresentano una notevole fetta di mercato nel settore residenziale e la maggior parte del volume di vendita nel terziario. Le caratteristiche termiche dei serramenti metallici sono piuttosto limitate per i prodotti tradizionali, mentre diventano più interessanti con le

soluzioni a taglio termico. Negli infissi tradizionali la povertà delle prestazioni dipende dalla elevata conduttività dei metalli in genere, che non offrono grossa resistenza al trasferimento del calore. Negli infissi a tagli termico, tutto ciò viene evitato realizzando dei profilati cavi per sfruttare le capacità isolanti delle camere d'aria, e spezzando la continuità del metallo con degli elementi isolanti, in genere di material plastico. Due esempi tipici sono riportati in figura 3.24, in cui il taglio termico è fatto con materiale con conduttività termica compresa tra 0,2 e 0,3 W/(m·K), nell'infisso superiore, ed inferiore a 2 W/(m·K) nell'infisso in basso.

Attualmente gli infissi in alluminio non a taglio termico sono ancora diffusi nell'edilizia residenziale ed in molti vecchi edifici per uffici. La trasmittanza termica di questi infissi dipende dalla geometria del profilo, generalmente i valori sono compresi tra 6 e 7 W/(m²·K). Valori simili si hanno anche per infissi in ferro, acciaio ed altre leghe che, però, hanno ormai una diffusione piuttosto limitata. È anche importante notare che a questo tipo di infissi si associa spesso una elevata permeabilità all'aria che riduce ulteriormente le prestazioni del serramento.

Nel caso di infissi in alluminio a taglio termico la trasmittanza dipende da: dimensione delle camere d'aria dei profili, eventuali vernici riflettenti all'interno dei profili, tipo di materiale utilizzato per il taglio termico, caratteristiche geometriche dell'infisso. Vista la dipendenza da tanti parametri, la trasmittanza termica di questi prodotti può variare sensibilmente da valori intorno ai 2.5 W/(m²·K) fino a valori prossimi a 4 W/(m²·K). Si tratta comunque di situazioni limite, l'intervallo in cui cade tipicamente la maggior parte dei prodotti è tra 3 e 3.4 W/(m²·K).

Fig. 3.24 Esempi di profili metallici a taglio termico

[3.4] Sistemi schermanti

La possibilità di schermare la radiazione solare ha una grandissima importanza nelle moderne costruzioni, dove si registra un sempre maggiore aumento dei carichi di climatizzazione estiva.

L'ombreggiamento può essere garantito dal punto di vista termico con elementi trasparenti, vetri a controllo solare o cromogenici già descritto, ma per garantire il comfort visivo è necessario prevedere ulteriori sistemi schermanti, generalmente opachi. Essi possono essere classificati in relazione a:

- gestione: fissi e orientabili;
- struttura: omogenei e non omogenei;
- posizione rispetto alla superficie vetrata;
- geometria: verticali o orizzontali;

Le norme tecniche di riferimento (UNI TS 11300 e UNI EN ISO 13790) introducono dei coefficienti correttivi per ridurre gli apporti solari dovuti alla presenza di schermi fissi e mobili. Nel caso di schermi fissi sono definite tre giaciture di ostruzione, che si classificano come segue.

- **Ostruzione esterna.** Definita attraverso l'angolo formato dal segmento verticale che congiunge la sommità dell'ostacolo con il punto di osservazione (ad esempio il centro della finestra oggetto di studio con la copertura dell'edificio prospiciente) ed il piano orizzontale passante per quest'ultimo;
- **Aggetto orizzontale.** Definito attraverso l'angolo formato dal segmento verticale che congiunge il bordo dell'aggetto con il punto di osservazione (ad esempio il centro della finestra oggetto di studio con il bordo esterno del balcone) ed il piano orizzontale passante per quest'ultimo.
- **Aggetto verticale.** Definito attraverso l'angolo formato dal segmento orizzontale che congiunge il bordo dell'aggetto con il punto di osservazione (ad esempio il centro della finestra oggetto di studio con il bordo esterno dell'incasso della finestra stessa) ed il piano verticale passante per quest'ultimo.

La norma definisce dei fattori di riduzione standard in funzione di:

- latitudine del sito,
- angolo di ostruzione,
- esposizione della facciata,
- mese dell'anno.

Gli schermi mobili hanno un contributo temporaneo al controllo della radiazione solare. La norma fornisce dei valori standard di utilizzo, riassunti nella **tabella 3.9**, in funzione dell'orientamento della facciata e del mese dell'anno. Nel periodo restante gli apporti solari saranno quelli dovuti alla superficie trasparente non ostruita.

Nella **tabella 3.10** si riportano i fattori di riduzione del fattore solare in funzione di elemento schermante accoppiato. Questi valori di riferimento sono relativi alle pro-

Tabella 3.9 – Fattore di utilizzo dello schermo mobile in funzione dell'esposizione

Mese	Nord	Est	Sud	Ovest
1	0,00	0,52	0,81	0,39
2	0,00	0,48	0,82	0,55
3	0,00	0,66	0,81	0,63
4	0,00	0,71	0,74	0,62
5	0,00	0,71	0,62	0,64
6	0,00	0,75	0,56	0,68
7	0,00	0,74	0,62	0,73
8	0,00	0,75	0,76	0,72
9	0,00	0,73	0,82	0,67
10	0,00	0,72	0,86	0,60
11	0,00	0,62	0,84	0,3
12	0,00	0,50	0,86	0,42

Tabella 3.10 – Riduzione del fattore solare per utilizzo di schermi mobili

Tenda	Proprietà ottiche della tenda		Fattori di riduzione con	
	assorbimento	trasmissione	tenda interna	tenda esterna
Veneziane bianche	0,1	0,05	0,25	0,1
		0,1	0,3	0,15
		0,3	0,45	0,35
Tende bianche	0,1	0,5	0,65	0,55
		0,7	0,8	0,75
		0,9	0,95	0,95
Tessuti colorati	0,3	0,1	0,42	0,17
		0,3	0,57	0,37
		0,5	0,77	0,57
Tessuti rivestiti alluminio	0,2	0,05	0,2	0,08

prietà ottiche della tenda ed al relativo coefficiente di riduzione degli apporti solari.

[3.4.1]

Classificazione dei sistemi schermanti

Gestione

La distinzione più importante è tra le protezioni solari fisse e quelle regolabili. I sistemi di ombreggiamento fissi devono garantire il contatto visivo tra l'utente e lo

spazio esterno. Le strategie dunque prevedono:

- posizionare il sistema ombreggiante dall'apertura in modo tale che le ombre portate siano provocate nelle ore desiderate evitando di ostruire, per quanto possibile, le visuali verso l'esterno;
- progettare un sistema ombreggiante che sia in grado di ricostruire per quanto possibile e in maniera efficace le forme esterne;
- ricorrere a materiali opachi alla radiazione infrarossa ma relativamente trasparenti alla radiazione luminosa.

Gli stessi elementi costruttivi dell'edificio come gli aggetti, i cornicioni, i brise-soleil sono esempi di protezioni solari fisse.

Sistemi di ombreggiamento a scomparsa consentono di seguire il continuo movimento del sole e sfruttare la necessità di un maggiore sfruttamento della luce naturale durante i giorni nuvolosi, questi sistemi sono in grado di lasciare completamente libera di ogni elemento la superficie vetrata. Essi possono essere: scorrevoli lateralmente o verticalmente (figura 3.25), avvolgibili, pieghevoli. Alternativamente, possono essere fissi ma con le singole lamelle orientabili, come in figura 3.26. La gestione può essere manuale o automatizzata. Nell'edilizia abitativa italiana contemporanea, la persiana avvolgibile resta uno dei sistemi in assoluto più utilizzato.

I sistemi di ombreggiamento orientabili sono una via di mezzo tra i sistemi fissi e quelli a scomparsa. Si tratta di sistemi a lamelle orizzontali o verticali, in grado di ruotare rispetto al proprio asse e impedire totalmente il passaggio dei raggi solari oppure convertirsi in sottili linee interposte tra l'osservatore e l'esterno. Una molteplicità di posizioni intermedie consente all'utente di regolare a piacere l'in-

Figura 3.25
Sistema schermante esterno mobile a tenda



Figura 3.26
Sistema schermante interno
mobile a lamelle



Figura 3.27
Schema di un doppio vetro
con lamelle riflettenti

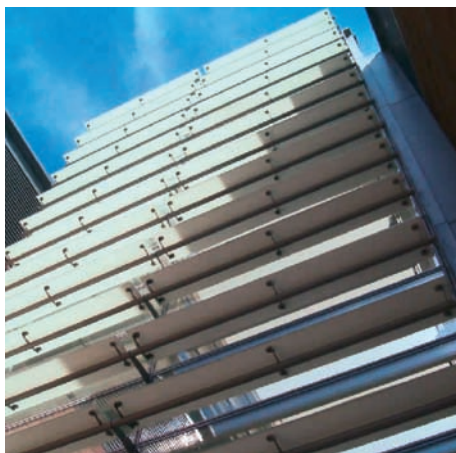
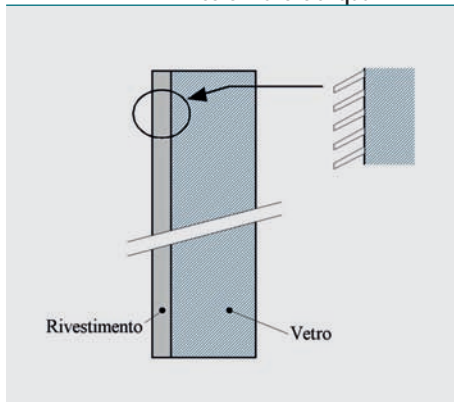


Fig. 3.28
Rivestimento con struttura
colonnare obliqua



gresso di luce nelle diverse ore del giorno e nelle diverse stagioni dell'anno.

Struttura

I sistemi a struttura omogenea sono quelli composti da intere ed uniche superfici, come le tende verticali o orizzontali, e gli aggetti, anch'essi verticali o orizzontali. Non consentono una regolazione accurata della radiazione e la loro chiusura implica l'impossibilità della percezione visiva dell'ambiente esterno.

Tra i sistemi non omogenei ricade la maggioranza dei sistemi ombreggianti, come le persiane veneziane, i brise soleil (figura 3.27), le lamelle esterne orizzontali o verticali. Un altro metodo, per ottenere un effetto analogo, è quello di realizzare una deposizione con struttura colonnare obliqua sulla superficie di un vetro (figura 3.28).

Un effetto simile è ottenibile con la produzione di un vetro stratificato in cui le lamelle, immerse in un gel con caratteristiche termo-fisiche simili al vetro, sono inserite tra due vetri chiari. Si tratta di procedimenti già visti per i vetri chiari stratificati che a quelle difficoltà ne aggiungono altre di natura geometrica. Infatti, poiché le lamelle sono fisse, l'angolo di inclinazione deve essere valutato con attenzione, in relazione alle prestazioni cercate; se il processo produttivo non è corretto, lo schiacciamento (o il raddrizzamento) delle lamelle, provoca la realizzazione di un componente non adeguato allo scopo.

L'ultimo tipo di materiali da menzionare sono i film olografici. L'effetto di redirectionamento della radiazione incidente, in questo caso, è ottenuto tramite la diffrazione di una struttura prismatica invisibile ottenuta mediante "stampa" con tecnica olografica.

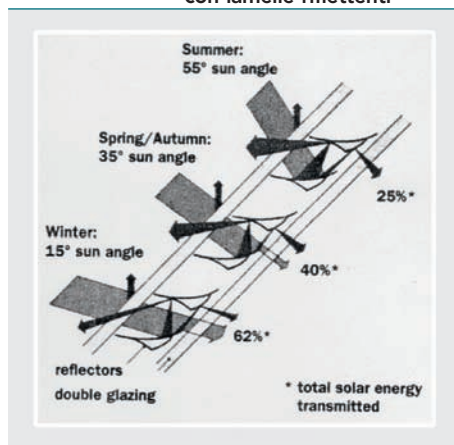
La posizione rispetto alla superficie vetrata

I sistemi di ombreggiamento interni sono sistemi molto leggeri che vengono montati sul lato interno dell'infisso. Essi consistono principalmente in tende, tende alla veneziana regolabili in alluminio, in PVC o in legno, lamelle verticali in PVC o in alluminio e tende riflettenti avvolgibili. Sono regolabili dall'utente e non interferiscono con la facciata esterna, per cui possono essere utilizzati in qualsiasi tipo di edificio. Non essendo soggetti agli agenti esterni richiedono poca manutenzione. Ma i sistemi di ombreggiamento interni hanno un'importante limitazione dal punto di vista termico per il fatto che intercettano la radiazione solare quando questa è già penetrata all'interno dell'edificio, operando così in modo energeticamente limitato.

I sistemi di ombreggiamento esterni presentano il vantaggio di bloccare la radiazione diretta prima dell'ingresso all'interno dello spazio, evitando in questo modo l'ingresso di calore; quindi si presentano come i migliori sistemi dal punto di vista

termico. Gli svantaggi, però, non sono pochi: sono di ordine estetico (se il sistema ombreggiante non è progettato contestualmente all'edificio), economico, funzionale e strutturale (problemi generalmente riconducibili agli agenti atmosferici ed al vento, in particolare). In caso di sistemi fissi, bisognerà studiare l'orientamento ottimale sia dal punto di vista termico che da quello luminoso. Se le lamelle sono invece mobili e di una certa dimensione, il sistema sarà ottimizzato applicando controlli automatici che consentano una regolazione costante secondo le condizioni esterne termiche e luminose. Se invece la regolazione avviene manualmente, le lamelle dovranno essere leggere oppure essere dotate di un meccanismo che sia di facile manipolazione. Un vantaggio delle lamelle esterne è che possono migliorare il livello luminoso interno se trattate con finiture riflettenti. Questo fa sì che la luce venga riflessa verso lo spazio interno facendola arrivare nelle zone più profonde dell'ambiente. I sistemi di ombreggiamento interclusi, di applicazione non ancora molto frequente, consistono nell'inserimento di piccole lamelle all'interno di un vetrocamera oppure tra due lastre di vetro. Il primo tipo è provvisto di una regolazione automatica attraverso un comando esterno, quindi è necessaria l'energia elettrica. Esistono anche sistemi redirezionanti fissi, ottimizzati su base annuale per lo sfruttamento dell'illuminazione naturale e del controllo solare, come il sistema in figura 3.29. Il sistema schermante è in questo modo protetto sia dall'esterno che dall'interno. Questa soluzione è molto vantaggiosa se si può controllare il passaggio dell'aria all'interno della camera d'aria dove trova luogo il sistema ombreggiante, non a caso questa soluzione trova largo impie-

Fig. 3.29 Schema di un doppio vetro con lamelle riflettenti



go nelle facciate ventilate. Il problema è soprattutto estivo, quando il sole colpisce le lamelle facendo innalzare la temperatura dell'aria della camera e dando luogo a notevoli scambi termici di natura radiativa.

Geometria

I sistemi schermanti orizzontali sono efficaci se sono progettati correttamente e sono applicati sulle facciate rivolte a sud. Le dimensioni ottimali saranno quelle calcolate in relazione al percorso solare e che impediranno la penetrazione della radiazione solare diretta, garantendo un buon illuminamento con l'ottimizzazione della luce naturale diffusa.

I sistemi schermanti verticali, invece, sono efficaci nei casi in cui la direzione dei raggi solari non sia contenuta in un piano parallelo a quello dello schermo (pareti laterali alle aperture o lamelle verticali) e formi con esso un angolo di incidenza che impedisca la penetrazione dei raggi stessi.

Una finestra incassata oppure dotata di pareti laterali, ad esempio, funziona bene

nelle aperture rivolette a S-SE e S-SO, mentre le lamelle (possibilmente ad inclinazione variabile) lavorano bene negli orientamenti SO-NO e SE-NE.

[3.4.2]

Alcune proprietà ottiche e termiche

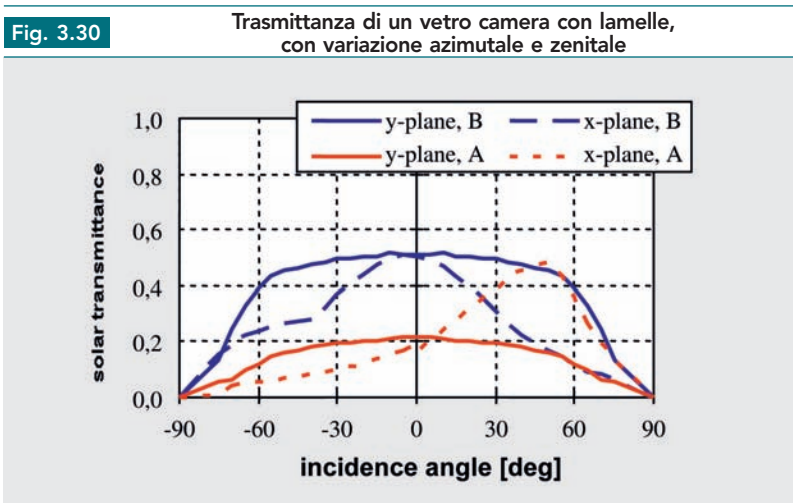
Alcuni dati interessanti sono disponibili per vetrocamera con lamelle orientabili e intercapedine riempita con gas. Le lamelle sono orientabili in funzione dell'altezza del sole sull'orizzonte, e quindi a seconda delle stagioni, controllano il passaggio della radiazione agevolandolo in inverno ed ostacolando in estate.

Le lamelle presentano una concavità verso il basso e i dati si riferiscono a misure con lamelle orizzontali ed inclinate a 45°, fungendo da schermo come in figura 3.30. Per variazioni azimutali dell'angolo di incidenza le curve di decadimento della trasmittanza sono quelle tipiche dei vetri chiari, con percentuali che dipendono dall'inclinazione delle lamelle, si vedano le curve continue nella figura.

Le variazioni zenitali danno luogo ad una curva di decadimento ben diversa, in cui la trasmittanza decresce rapidamente per angoli positivi, in modi tanto più accentuato, quanto più le lamelle sono inclinate. Nel caso di radiazione collimata ad incidenza normale, il materiale lascia passare il 50% dell'energia incidente a lamelle orizzontali ed il 20% a lamelle inclinate.

Per quanto concerne le proprietà termiche, il campione in esame ha U fortemente dipendente dall'inclinazione delle lamelle, passando da circa 2,2, a schermi orizzontali, a 1,7 a lamelle verticali.

Il fattore solare segue in modo regolare la trasmittanza solare. Il discorso si inverte per i materiali con lamelle fisse, ovviamente in questo caso U è fisso e, a meno di



ulteriori trattamenti, il valore è simile a quello di un vetro normale. Viceversa il fattore solare dipende molto dall'incidenza della radiazione, infatti le lamelle sono in genere di colore scuro per favorire l'ombreggiamento e questo comporta molta energia assorbita a grandi angoli. Quindi mentre la trasmittanza solare tende ad annullarsi, esiste un apporto di g dovuto all'assorbimento ed alla riemissione. Nel terziario è prevedibile una buona diffusione dei sistemi a lamelle orientabili

sia per le prestazioni luminose ed energetiche, sia per la loro flessibilità. L'aumento del mercato dovrebbe, poi condurre ad una riduzione dei costi. Per quanto concerne i sistemi a lamelle fisse la situazione è differente: pur con margini di diffusione, si tratta di un prodotto di nicchia; il daylighting con questi materiali deve basarsi sulla luce diffusa e, quindi, applicabile per livelli di illuminamento non molto elevati, come musei, zone di passaggio ecc.





Capitolo **Quattro**

SICULORUM GYMNASIUM

Gli impianti di riscaldamento

[4.1] Introduzione

Anche in climi moderatamente miti, come è mediamente quello italiano, più della metà degli usi finali di energia in edilizia sono dovuti al riscaldamento degli edifici nella stagione invernale. L'applicazione di strategie e tecnologie ad elevata efficienza energetica per questa tipologia di uso energetico, è dunque fondamentale per ridurre i consumi di settore.

È importante ricordare la differenza sostanziale che si ha nell'affrontare la questione energetica in edifici di nuova costruzione o esistenti. Per i primi è semplice indirizzare la scelta verso soluzioni efficienti, in accordo con la normativa vigente. Più complesso è il problema in edifici esistenti, poco prestazionali in termini di involucro e poco efficienti in termini di impianti installati. Tuttavia è proprio in questi casi che si può realizzare un notevole risparmio energetico ad impatto economico limitato, adottando tecnologie efficienti, affidabili e, spesso, poco intrusive.

L'obiettivo di questa sezione è, da questo punto di vista, duplice:

- illustrare le procedure per determinare l'efficienza energetica di un impianto di riscaldamento e di tutti i suoi sottosistemi;
- illustrare le tecnologie più efficienti, in

grado di ottimizzare la prestazione energetica ed economica del sistema edificio-impianto.

Le specifiche tecniche di riferimento sono quelle attualmente vigenti in Italia per il calcolo dei fabbisogni e rendimenti di sistemi di riscaldamento, ovvero: UNI TS 11300 parte 2, e la UNI EN 15316 nelle sue varie parti.

[4.2] I rendimenti dell'impianto termico

L'energia termica necessaria per sopperire al fabbisogno utile mensile Q_h degli ambienti da climatizzare è valutata a valle dei sistemi di produzione e distribuzione e risulta quindi, in termini progettuali, la quantità di energia che l'impianto deve garantire, per ciascuno dei mesi invernali, attraverso la fornitura di una adeguata potenza termica.

Durante le fasi di produzione e trasmissione del calore (produzione, distribuzione, emissione e regolazione), attraverso i componenti dei sistemi di climatizzazione parte dell'energia presente a monte del componente si disperde nell'ambiente. Ciascun componente (ma è più corretto parlare di sistemi componenti) dell'impianto è quindi caratterizzato da un proprio rendimento.

A monte dell'intero sistema è immessa energia primaria costituita sostanzialmente dal combustibile, cui si aggiungono eventuali recuperi termici, e dall'energia elettrica per il funzionamento degli ausiliari d'impianto (pompe di circolazione, ventilatori, ...).

Il fabbisogno di energia primaria Q_{st} del sistema edificio-impianto, valutato annualmente in regime continuo sui mesi di riscaldamento n , risulta (qui e nel seguito del capitolo il fabbisogno energetico e le altre quantità di energia si intendono tutte espresse nella medesima unità di misura, J):

$$Q_{st} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} Q_{hj}}{\eta_g}$$

dove:

Q_{hj} = fabbisogno utile mensile degli ambienti da climatizzare relativo al j^{mo} mese,

$\eta_g = \eta_e \eta_d \eta_c \eta_p$ = rendimento globale medio stagionale,

η_e = rendimento di emissione medio stagionale,

η_d = rendimento di distribuzione medio stagionale,

η_c = rendimento di regolazione medio stagionale,

η_p = rendimento di produzione medio stagionale.

Dall'analisi della formulazione del rendimento globale medio stagionale risulta quindi evidente come un valore basso anche di uno solo dei rendimenti delle componenti d'impianto abbatta pesantemente il valore del loro prodotto, anche a fronte di valori elevati degli altri rendimenti termici. Occorre porre la massima attenzione in fase progettuale, operando scelte progettuali che garantiscano alta qualità di tutti i componenti dell'impianto termico. Nel caso poi di interventi su impianti esistenti, occorre valutare i singo-

li rendimenti attraverso una diagnosi energetica approfondita ed intervenire con soluzioni migliorative per correggere laddove si individuino valori troppo bassi, indici di elevate perdite energetiche. Al fini della semplice valutazione energetica per la certificazione, nel caso di edifici esistenti si può fare riferimento a valori precalcolati, da utilizzare però rigorosamente in esercizio standard e non di diagnosi.

I rendimenti medi riferiti ad un periodo prefissato e calcolati in base alla norma UNI TS 11300 - 2 sono utilizzati unicamente per quantificare il fabbisogno energetico mensile e stagionale dei sistemi di riscaldamento in accordo con quanto previsto dalla norma stessa.

Di seguito vengono analizzati singolarmente i rendimenti termici d'impianto, procedendo idealmente dall'ambiente climatizzato posto a valle dell'impianto, fino a monte della produzione termica. Per ciascun rendimento si riportano alcune considerazioni in merito ai fattori da cui esso dipende ed alla possibilità di incrementarne il valore medio stagionale.

[4.2.1]

Il rendimento di emissione

Il rendimento di emissione è definito come rapporto tra la quantità di energia richiesta per il riscaldamento degli ambienti con un sistema di emissione ideale, in grado di fornire una temperatura costante uniformemente distribuita negli ambienti, e la quantità di energia realmente fornita dal sistema installato, nelle stesse condizioni di riferimento di temperatura ambiente (interna) ed esterna,

$$\eta_e = \frac{Q_h}{Q_{hr}}$$

dove:

η_e = rendimento di emissione,

Q_h = quantità di energia richiesta per il riscaldamento degli ambienti con un sistema di emissione ideale (calcolata in base alla norma UNI 10344),

Q_{hr} = quantità di energia fornita dal sistema reale, nelle stesse condizioni di riferimento di temperatura ambiente (interna) ed esterna.

Sostanzialmente il rendimento di emissione indica quanto lontano sia il comportamento del sistema reale da quello del sistema ideale, teorizzabile con un locale in cui siano verificate le seguenti condizioni:

- temperatura costante e uniformemente distribuita in ogni punto del locale,
- costanza dei valori di trasmittanza nelle pareti omogenee,
- costanza delle temperature superficiali nelle pareti omogenee con conseguente omogeneità del flusso termico disperso.

Molteplici sono i fenomeni che contribuiscono ad allontanare il comportamento del sistema reale da quello ideale, tra cui i principali sono riconducibili alla localizzazione, all'interno dell'ambiente, dei terminali di erogazione ed ai moti convettivi generati dai terminali stessi.

In particolare la radiazione emessa dai terminali comporta un aumento della temperatura a livello locale, in particolare nelle strutture limitrofe (ad esempio la parete posteriore al terminale), con conseguente aumento localizzato del flusso termico disperso verso l'esterno.

I moti convettivi che sono generati dai terminali internamente ai locali generano incrementi localizzati (sulle pareti lambite dai moti convettivi) dei coefficienti liminari di scambio termico, con conseguenti aumenti locali delle trasmittanze termiche e quindi dei flussi termici dispersi.

Tabella 4.1
Rendimento di emissione dei corpi scaldanti

Tipo di terminale di erogazione	Carico termico annuo (W/m^3)		
	< 4	4-10	> 10
	η_e		
Radiatori su parete esterna isolata*	0,95	0,94	0,92
Radiatori su parete interna	0,96	0,95	0,92
Ventilconvettori valori riferiti a t media acqua = 45 °C	0,96	0,95	0,94
Termoconvettori	0,94	0,93	0,92
Bocchette in sistemi ad aria calda**	0,94	0,92	0,90
Pannelli isolati annegato a pavimento	0,99	0,98	0,97
Pannelli annegati a pavimento***	0,98	0,96	0,94
Pannelli annegati a soffitto	0,97	0,95	0,93
Pannelli a parete	0,97	0,95	0,93

* Riferito ad una temperatura di mandata dell'acqua di 85 °C, ad una installazione su parete divisoria interna oppure a ridosso di parete esterna isolata e con presenza di superficie riflettente sul lato interno. In assenza di superficie riflettente il valore riportato deve essere diminuito di 0,02; in presenza di parete esterna non isolata ($U > 0,8 W/(m^2 \cdot K)$) il valore deve essere ulteriormente ridotto di 0,04; per temperatura di mandata dell'acqua di 65 °C il valore del prospetto deve essere incrementato di 0,03; le altre correzioni assumono gli stessi valori.

** Per quanto riguarda i sistemi di riscaldamento ad aria calda i valori si riferiscono a impianti con: griglie di ripresa dell'aria posizionate ad un'altezza non maggiore di 2,00 m rispetto al livello del pavimento; bocchette o diffusori correttamente dimensionati in relazione alla portata e alle caratteristiche del locale; corrette condizioni di funzionamento (generatore di taglia adeguata, corretto dimensionamento della portata di aspirazione); buona tenuta all'aria dell'involucro e della copertura.

*** I dati forniti non tengono conto delle perdite di calore non recuperate dal pavimento verso il terreno; queste perdite devono essere calcolate separatamente ed utilizzate per adeguare il valore del rendimento.

Inoltre l'effetto combinato dei moti convettivi e della naturale stratificazione termica produce un aumento delle temperature nella parte superiore del volume riscaldato; anche in questo caso la temperatura più elevata di quella teorica incrementa localmente le dispersioni termiche. Particolare attenzione è quindi da porre in presenza di edifici con elevate altezze interne dei locali (edifici industriali, edifici di vecchia concezione o storici, uffici), dove il fenomeno descritto può comportare riduzioni anche consistenti del rendimento di emissione.

La norma UNI TS 11300 ha tabulato convenzionalmente i rendimenti di emissione delle varie tipologie di corpi scaldanti, ai fini del calcolo del fabbisogno di energia. Si riporta ad esempio quello relativo a locali con altezza inferiore a 4 metri.

Il miglioramento del valore medio stagionale del rendimento di emissione si può ottenere con alcuni accorgimenti, alcuni dei quali devono essere previsti in fase di progetto dell'impianto, altri possono essere realizzati anche in fasi successive, pur richiedendo interventi sulla parte edile non sempre agevoli. Tra essi si annovera:

- bassa temperatura media di progetto del fluido termovettore (per quanto consentito dall'impianto),
- idoneo isolamento termico della parete retrostante i corpi scaldanti,
- installazione di una superficie riflettente sulla parete retrostante i corpi scaldanti,
- mensole con taglio termico atte a deviare i flussi convettivi generati verso l'interno del locale,
- installazione di destratificatori di temperatura negli ambienti di altezza elevata (industriali e del terziario).

La scelta di una bassa temperatura di progetto comporta, quando tecnicamente realizzabile, diversi vantaggi:

- migliore benessere ed igiene ambientale derivante dai più modesti moti convettivi; si riduce infatti la sensazione di freddo ed il trascinamento della polvere che può causare annerimenti delle pareti in prossimità dei corpi scaldanti e reazioni allergiche agli occupanti; per quanto riguarda la sensazione di freddo c'è tuttavia una considerazione da porre in evidenza: migliora la sensazione di temperatura all'interno dell'ambiente, mentre possono nascere delle implicazioni negative di natura psicologica nel momento in cui si va a toccare il corpo scaldante, che è oggettivamente più freddo;
- migliore rendimento di emissione; infatti la riduzione dei moti convettivi comporta una riduzione delle dispersioni termiche passive;
- migliore rendimento di distribuzione in quanto la minore temperatura del fluido termovettore comporta la riduzione delle perdite della rete di distribuzione;
- migliore rendimento di produzione a seguito della riduzione delle perdite al mantello e delle perdite al camino a bruciatore spento.

[4.2.2]

Il rendimento di regolazione

Il rendimento di regolazione è definito come rapporto tra la quantità di energia richiesta dalla zona termica in condizioni di regolazione ideali e la quantità di energia richiesta dalla zona termica in condizioni di regolazione reali,

$$\eta_c = \frac{Q_h}{Q_{hac}}$$

dove:

η_c = rendimento di regolazione,

Q_h = quantità di energia richiesta dalla zona termica in condizioni di regolazione ideali,

Q_{hac} = quantità di energia richiesta dalla zona termica in condizioni di regolazione reali (fabbisogno energetico utile reale). Lo scostamento tra le condizioni ideali e le condizioni reali dipende essenzialmente dalla capacità del sistema di adeguarsi, con risposta rapida ed accurata, alle oscillazioni di temperatura all'interno dell'ambiente. Tali oscillazioni termiche causano un aumento dell'energia termica richiesta dalle zone termiche, rispetto alla quantità di energia calcolata per il mantenimento della temperatura di progetto. Si può quindi considerare il rendimento di regolazione composizione di due fattori,

uno dipendente dalla qualità dei dispositivi di regolazione (precisione, sensibilità, ripetibilità, velocità di risposta) e l'altro dall'adeguatezza del sistema alle caratteristiche dell'edificio.

Il primo fattore si può considerare di valore unitario per dispositivi di regolazione conformi alla normativa vigente e tarati in opera da personale specializzato.

Il fattore di adeguatezza ha natura più complessa e dipende essenzialmente da quanto il progetto del sistema di regolazione tiene in considerazione le caratteristiche dell'edificio e dell'impianto. Ne deriva un'estrema specificità, una notevole varia-

Tabella 4.2 – Rendimenti di regolazione in funzione delle tipologie di regolazione e di terminali di emissione

Tipo di regolazione	Caratteristiche	Sistemi a bassa inerzia termica	Sistemi ad elevata inerzia termica (accoppiamento termico a sinistra)	
Solo climatica (compensazione con sonda esterna)		$1 - (0,6 \eta_u \gamma)$	$0,98 - (0,6 \eta_u \gamma)$	$0,94 - (0,6 \eta_u \gamma)$
Solo ambiente con regolatore	On off	0,94	0,92	0,88
	PI o PID	0,99	0,97	0,93
	P banda prop. 0,5 °C	0,98	0,96	0,92
	P banda prop. 1 °C	0,97	0,95	0,91
	P banda prop. 2 °C	0,95	0,93	0,89
Climatica + ambiente con regolatore	On off	0,97	0,95	0,93
	PI o PID	0,995	0,95	0,97
	P banda prop. 0,5 °C	0,99	0,98	0,96
	P banda prop. 1 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 2 °C	0,97	0,96	0,94
Solo zona con regolatore	On off	0,93	0,91	0,87
	PI o PID	0,995	0,99	0,97
	P banda prop. 0,5 °C	0,99	0,98	0,96
	P banda prop. 1 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 2 °C	0,94	0,92	0,88
Climatica + zona con regolatore	On off	0,96	0,94	0,92
	PI o PID	0,995	0,98	0,96
	P banda prop. 0,5 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 1 °C	0,97	0,96	0,94
	P banda prop. 2 °C	0,96	0,95	0,93

bilità e la difficoltà nel riportarsi a configurazioni standard di cui sono noti i valori.

La norma UNI TS 11300 ci soccorre con una tabella di valori convenzionali, utilizzabili ogniqualvolta non siano disponibili dati precisi sulle effettive caratteristiche del sistema di regolazione. I valori indicati nella **tabella 4.2** fanno riferimento alle tipologie di regolazione sottoindicate:

- regolazione manuale sul termostato di caldaia (regolazione manuale),
- regolazione della temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia con centralina comandata da sonda climatica esterna (regolazione climatica centralizzata),
- regolazione di ambiente e di zona senza controllo della temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia (regolazione solo per singolo ambiente o solo per zona),
- regolazione di ambiente e di zona con controllo della temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia con centralina comandata da sonda climatica esterna (regolazione climatica centralizzata + regolazione per singolo ambiente o per zona).

Nella **tabella 4.2** η_u è il fattore di utilizzo degli apporti definito nella UNI/TS 11300-1 e γ è il rapporto apporti/perdite.

[4.2.3]

Il rendimento di distribuzione

Il rendimento di distribuzione è definito come rapporto tra il fabbisogno energetico utile reale delle zone termiche e l'energia fornita dal sistema di produzione,

$$\eta_d = \frac{\sum_{j=1}^z Q_{hr,j}}{\sum_{j=1}^z Q_{hr,j} + Q_{dnr}}$$

dove:

η_d = rendimento di distribuzione,

$Q_{hr,j}$ = quantità di energia termica richiesta dalla zona termica j ,

Q_{dnr} = quantità di energia termica dispersa dalla rete di distribuzione all'esterno del fabbricato (quindi non recuperata).

L'energia termica $Q_{hr,j}$ richiesta dalla zona termica ha due componenti, l'energia Q_{rad} fornita dal corpo scaldante e l'energia Q_{dr} che arriva alla zona termica dalle tubazioni che corrono all'interno dell'involucro scaldato (si tratta sostanzialmente di un recupero termico che non richiede interventi tecnologici, se non attenzione nella progettazione e cura degli isolamenti della parte edilizia).

Per massimizzare il rendimento di distribuzione occorre quindi agire in primis riducendo la quantità di energia termica dispersa dalla rete Q_{dnr} , quindi incrementando il più possibile la componente di recupero termico Q_{dr} attraverso una attenta progettazione della rete di distribuzione.

Il calcolo dettagliato del calore disperso in base alla norma UNI TS 11300 è giustificato solo per la progettazione di nuovi edifici e con l'ausilio di supporti informatici dedicati.

Nel caso in cui lo scopo sia invece la valutazione energetica dell'edificio (e non in particolare della rete di distribuzione), è utilizzabile, con riferimento alla norma UNI TS 11300, una serie di tabelle con dati precalcolati. Si riportano a scopo esemplificativo i rendimenti di distribuzione per due tipiche soluzioni costruttive nelle **tabelle 4.3 e 4.4**.

Non è tuttavia semplice riportare alla classificazione indicata in tabella le tipologie edilizie esistenti: nel caso in cui occorra valutare in modo preciso le dispersioni termiche della rete di distribuzione occorre fare riferimento alla norma UNI 10347. Nel seguito sono riportati alcuni degli

Tabella 4.3
Rendimenti di distribuzione
convenzionali in funzione della
tipologia di impianto

IMPIANTI CENTRALIZZATI CON MONTANTI DI DISTRIBUZIONE		
Tipo di distribuzione	Altezza edificio	Isolamento distribuzione nel cantinato secondo legge 10/91, dopo il 1993
Montanti in traccia nei paramenti interni	1 piano	0,936
Isolamento secondo legge 10/91	2 piani	0,947
Periodo di costruzione: dopo il 1993	3 piani	0,958
	4 piani	0,969
	5 piani e più	0,980

Tabella 4.4
Rendimenti di distribuzione
convenzionali in funzione della
tipologia di impianto

IMPIANTI CENTRALIZZATI A DISTRIBUZIONE ORIZZONTALE					
Tipo di distribuzione	Altezza edificio	Legge 10/91 Periodo di realizzazione dopo il 1993	Discreto Periodo di realizzazione 1993-1977	Medio Periodo di realizzazione 1976-1961	Insufficiente Periodo di realizzazione del 1961
Montanti in traccia nei paramenti interni o nell'intercapedine - isolamento leggero. 1993-1977	1 piano	0,908	0,880	0,868	0,856
	2 piani	0,925	0,913	0,901	0,889
	3 piani	0,939	0,927	0,917	0,904
	4 piani	0,949	0,938	0,927	0,915
	5 piani e più	0,955	0,943	0,934	0,922

interventi che mirano al risparmio energetico attraverso il miglioramento del rendimento di distribuzione. Con riferimento alla relazione che valuta il calore disperso da una tubazione Q_d , si nota come esso sia inversamente proporzionale alla resistenza termica dello strato di isolante e direttamente proporzionale al diametro, alla lunghezza e alla differenza di temperatura tra fluido e ambiente circostante. Si propone quindi, sia in fase di progetto, sia ove possibile in fase di ristrutturazione, di seguire le seguenti indicazioni tecniche:

1. preferire schemi impiantistici che prevedano l'installazione della rete di distribuzione all'interno del fabbricato e privilegiare, tra essi, quelli che massimizzano il recupero termico del calore disperso dalle tubazioni per il riscaldamento degli ambienti;
2. limitare la lunghezza delle reti ed evitare percorsi tortuosi e non necessari;
3. qualora non sia possibile installare tutta la rete di distribuzione all'interno del fabbricato, prevedere, per la parte di rete posta all'esterno, idonei isolamenti termici, come previsto dall'allegato B al D.P.R. 412/93;
4. adottare una bassa temperatura di progetto del fluido termovettore in mandata ai terminali di emissione, al fine di contenere la differenza di temperatura tra fluido e ambiente circostante Δt_a dal cui valore dipendono, in modo direttamente proporzionale, le dispersioni;
5. prevedere, in fase di dimensionamento dei corpi scaldanti ed a parità di temperatura media di progetto del fluido termovettore, elevati salti termici tra

andata e ritorno e portate modeste, in modo da ridurre i diametri delle tubazioni e quindi proporzionalmente le dispersioni.

[4.2.4]

Il rendimento di produzione

Il rendimento di produzione relativo al sistema di generazione dell'energia termica è definito come rapporto tra l'energia termica fornita dal sistema di produzione ed immessa nella rete di distribuzione e il fabbisogno di energia primaria (comprensivo dei consumi di combustibile e di energia elettrica relativa agli ausiliari di caldaia e d'impianto).

Esso è funzione:

- della potenza della caldaia,
- del fattore di carico,
- delle perdite di combustione,
- delle perdite al mantello,
- delle perdite al camino a bruciatore spento,
- della potenza elettrica del bruciatore e delle pompe di circolazione,
- della condizione di installazione.

Il rendimento di produzione è definito relativamente ad un determinato periodo di tempo, e può quindi essere istantaneo, settimanale, mensile, stagionale,

$$\eta_p = \frac{Q_p}{Q}$$

dove:

η_p = rendimento di produzione,

Q_p = quantità di energia termica fornita dal sistema di produzione e immessa nella rete di distribuzione,

Q = fabbisogno di energia primaria = $Q_c + Q_e$,

Q_c = energia fornita sotto forma di combustibile nel periodo considerato, valutata convenzionalmente utilizzando il potere calorico inferiore (p.c.i) in quanto l'ac-

qua contenuta nei prodotti della combustione si trova in genere sotto forma di vapore,

Q_e = energia elettrica fornita per l'azionamento del bruciatore, delle pompe di circolazione e degli ausiliari d'impianto nel periodo considerato.

La precedente relazione, e con riferimento alla figura 4.1, si può esprimere anche con la seguente:

$$\eta_p = \frac{(Q_c + Q_e) - (Q_d + Q_f + Q_{fbs} + Q_{pre})}{(Q_c + Q_e)}$$

dove

Q_d = energia termica dispersa verso l'ambiente della CT attraverso l'involucro del generatore (mantello), nel periodo considerato,

Q_f = energia termica dispersa al camino attraverso i fumi a bruciatore acceso, nel periodo considerato,

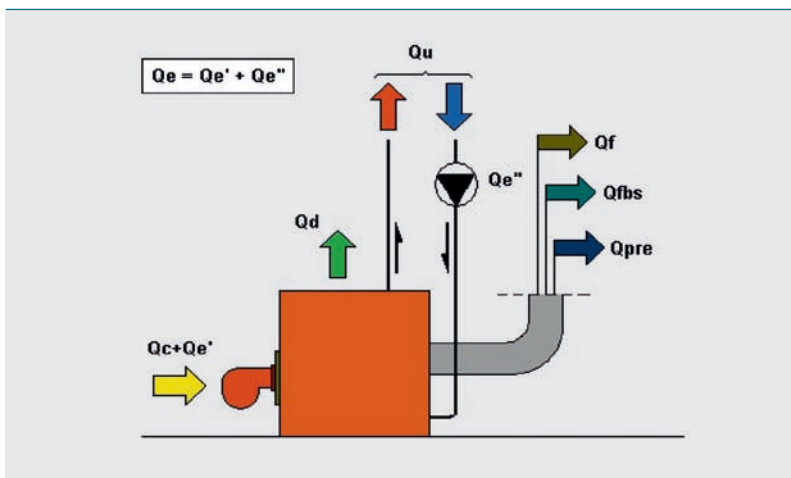
Q_{fbs} = energia termica dispersa al camino attraverso i fumi a bruciatore spento, nel periodo considerato,

Q_{pre} = energia termica dispersa attraverso il prelavaggio del circuito fumi, nel periodo considerato.

Analizzando la relazione precedente si può comprendere come dalla riduzione delle energie disperse attraverso l'involucro, i fumi (a bruciatore acceso e spento) e nel prelavaggio del circuito dei fumi, possa migliorare il rendimento di produzione; tuttavia questi fattori dipendono in modo pesante dalle caratteristiche costruttive del generatore di calore, per cui il progettista può intervenire solo attraverso un'attenta scelta del generatore, del tipo di regolazione e del modello di conduzione.

Sono riportati nel seguito alcuni degli interventi che mirano al risparmio energetico attraverso il miglioramento del rendi-

Fig. 4.1 Bilancio energetico di un generatore di calore



mento di produzione e, in particolare, attraverso la riduzione delle energie disperse.

Si propone quindi, sia in fase di progetto ex-novo dell'impianto, sia in fase di sostituzione del generatore di calore, di seguire le seguenti indicazioni tecniche.

Riduzione dell'energia termica dispersa attraverso l'involucro del generatore Q_d

1. preferire generatori dotati di efficaci isolamenti termici al mantello;
2. installare il generatore di calore in ambiente (Centrale Termica) interno all'involucro riscaldato;
3. adottare, in fase di progettazione, impianti con basse temperature del fluido termovettore in mandata ai terminali di emissione.

Riduzione dell'energia termica dispersa al camino attraverso i fumi a bruciatore acceso Q_f

1. adottare generatori con bruciatori in grado di funzionare con eccessi d'aria molto bassi (concentrazione elevata nei

fumi della CO_2) e assenza di incombusti: l'aumento della concentrazione di CO_2 riduce le perdite per calore sensibile nei gas di scarico;

2. adottare generatori con bruciatori in grado di abbassare la temperatura dei fumi (es. caldaie a condensazione) ponendo attenzione alla conseguente riduzione del tiraggio del camino che ne potrebbe inficiare il corretto funzionamento;
3. preferire, in fase di progettazione, impianti con basse temperature del fluido termovettore in mandata ai terminali di emissione e conseguente minore entalpia dei fumi in uscita dal generatore.

Riduzione dell'energia termica dispersa al camino attraverso i fumi a bruciatore spento Q_{fbs}

1. adottare bruciatori con serranda posta sull'aspirazione dell'aria comburente: la serranda si chiude durante i periodi di inattività del bruciatore annullando l'effetto di aspirazione, con conseguente asporto di calore, del tiraggio naturale;
2. inserire, per bruciatori privi di serranda, regolatori di tiraggio che consentano, attraverso una apertura regolabile posta sul tratto verticale del camino, l'ingresso di aria nel camino stesso;
3. sigillare, se e dove possibile, ogni ingresso d'aria non opportuno nel generatore;
4. preferire, in fase di progettazione, impianti con basse temperature del fluido termovettore in mandata ai terminali di emissione e conseguente minore entalpia dei fumi in uscita dal generatore e quindi minore tiraggio naturale (attenzione al mantenimento di un idoneo tiraggio "residuo").

Riduzione dell'energia termica dispersa attraverso il prelavaggio del circuito fumi Q_{pre}

1. ridurre la frequenza delle fasi di prelavaggio, necessarie e precedenti ad ogni accensione affinché non si creino miscele esplosive in camera di combustione, con l'inserimento di un apposito timer che impedisca l'accensione troppo frequente del bruciatore (la normativa fissa la durata delle fasi di prelavaggio in funzione della potenza termica del generatore e del tipo di combustibile); questo intervento deve essere eseguito con molta cautela in quanto il numero delle accensioni dipende dal corretto dimensionamento della potenza della caldaia (un eccessivo sovradimensionamento della caldaia comporta infatti un elevato numero di spegnimenti e relative riaccensioni, con conseguenti elevate perdite di prelavaggio) ed una "forzatura" del funzionamento con il timer ha evidenti implicazioni sulla capacità effettiva della caldaia di fornire correttamente l'energia richiesta dall'impianto in un dato tempo.

[4.3] Le tecnologie impiantistiche termiche efficienti

[4.3.1]

Generalità sulle caldaie

La diffusione del gas naturale in sostituzione del tradizionale gasolio come combustibile per il riscaldamento di edifici residenziali, ha rivoluzionato a partire dagli anni settanta le tecnologie costruttive dei generatori di calore ed ha rimodulato la distribuzione in base alla taglia (potenza) a favore di generatori di piccola taglia,

adatti per singole unità abitative.

Parallelamente, le esigenze di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di gas inquinanti (e climalteranti) hanno favorito lo sviluppo di tecnologie di produzione termica energeticamente efficienti.

Tuttavia, si può affermare a posteriori che parte del beneficio, in termini di riduzione dei consumi, ottenuto con la diffusione delle tecnologie efficienti, è stato vanificato dall'eccessivo ricorso alle "caldaie individuali", sia perché queste non sono controllabili per quanto riguarda il rispetto del periodo e degli orari di accensione stabiliti per legge, sia perché i loro rendimenti di produzione, pur essendo oggettivamente più che buoni, sono in genere inferiori ai rendimenti degli impianti più grandi di tipo centralizzato.

Nel corso degli ultimi 30 anni, ha prevalso sostanzialmente la logica individualistica della gestione autonoma dell'impianto, favorita anche dalla scarsa diffusione di sistemi affidabili e flessibili di contabilizzazione del calore. I sistemi di contabilizzazione sono oggi disponibili in soluzioni tecniche varie ed affidabili, ed è obbligatoria per legge la loro installazione negli impianti di nuova realizzazione.

Con riferimento al rendimento di produzione (η_p) medio stagionale si è passati da modesti valori appena superiori al 60% degli anni ottanta a valori anche superiori al 90% con moderna caldaie a condensazione, se utilizzate in idonee condizioni operative.

Per aumentare l'efficienza di un sistema di generazione occorre agire, come è ovvio, sulla riduzione delle perdite; tuttavia, occorre distinguere, sempre con riferimento al rendimento di produzione, tra:

- riduzione delle perdite (P_i) che comportano l'aumento del rendimento istantaneo;

Tabella 4.5
Evoluzione nel tempo dei
rendimenti di produzione medi
stagionali di impianti a gas di
piccola potenza

Tipologia di generatore	Decennio di riferimento	η_p medio stagionale	Perdite di produzione
Caldaia tradizionale	'80	60-65%	<ul style="list-style-type: none"> • fiamma pilota (6-7%) • ricambio dell'aria (5-6%) • perdite al camino (14-15%) • perdite per ON-OFF, prelavaggio, funzionamento a carichi parziali (5-7%) • perdite al mantello (3-5%)
Caldaia a temperatura modulante	'90	65-73%	<ul style="list-style-type: none"> • fiamma pilota (6-7%) • ricambio dell'aria (5-6%) • perdite al camino (8-10%) • perdite per ON-OFF, prelavaggio, funzionamento a carichi parziali (5-7%) • perdite al mantello (3-5%)
Caldaie ad alta efficienza	2000-2005	73-85%	<ul style="list-style-type: none"> • perdite al camino (7-10%) • perdite per ON-OFF, prelavaggio, funzionamento a carichi parziali (7-13%) • perdite al mantello (2-4%)
Caldaie a condensazione	2005-2010	85-92%	<ul style="list-style-type: none"> • perdite al camino (7-10%) • perdite per ON-OFF, prelavaggio, funzionamento a carichi parziali (1-4%) • perdite al mantello (0-1%)

* I valori riportati in tabella sono riferiti a piccoli impianti a gas e da intendersi indicativi e riscontrabili in condizioni di corretto dimensionamento dell'impianto e di esercizio standard.

■ riduzione delle perdite (P_{ms}) che comportano l'aumento del rendimento medio stagionale.

Con riferimento al bilancio energetico di un generatore (figura 4.1), la riduzione delle P_i si può ottenere:

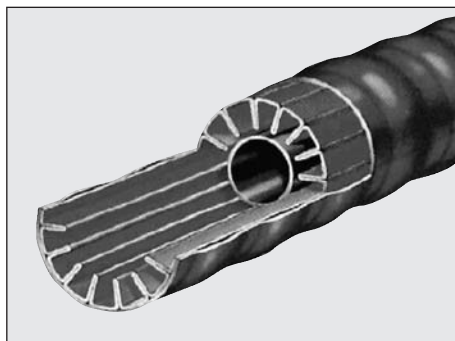
■ riducendo le perdite al camino attraverso i fumi, in particolare quelle a bruciatore acceso, attraverso l'utilizzo di più giri di fumo (2-3) in modo da abbassare la temperatura dei fumi il più possibile, compatibilmente con le necessità di garantire il tiraggio naturale del camino (se il tiraggio è forzato si può scendere anche a 80 °C) e di evitare la formazione di condensa nelle caldaie tradizionali, oppure fino al di sotto della

temperatura di rugiada, per portare il vapore contenuto nei fumi a condensazione, nelle recenti caldaie, appunto, a condensazione. Particolari accorgimenti tecnici (figura 4.2) e il corretto dimensionamento delle superfici di scambio termico contribuiscono ulteriormente alla riduzione delle perdite;

■ riducendo le perdite attraverso l'involucro del generatore (perdite al mantello) con l'utilizzo di idonei spessori isolanti (anche 10-15 cm o più);

■ riducendo ulteriormente le perdite al camino a bruciatore acceso, attraverso la riduzione dell'eccesso d'aria. Questo è stato consentito dallo sviluppo dei sistemi di premiscelazione aria/combu-

Figura 4.2
Tubo di fumo ad elevato
scambio termico
(fonte Viessmann)



stibile per combustibili gassosi (figura 4.3), e di polverizzazione spinta del combustibile liquido, tale da rendere la miscela aria-combustibile vaporizzato utilizzabile da teste di combustione a microfiamme di realizzazione simile a quelle per la miscela aria-gas (figura 4.4).

Fig. 4.3 Schemi sistemi di premiscelazione aria-combustibile gassoso per bruciatori atmosferici e pressurizzati (fonte Ecoflam)

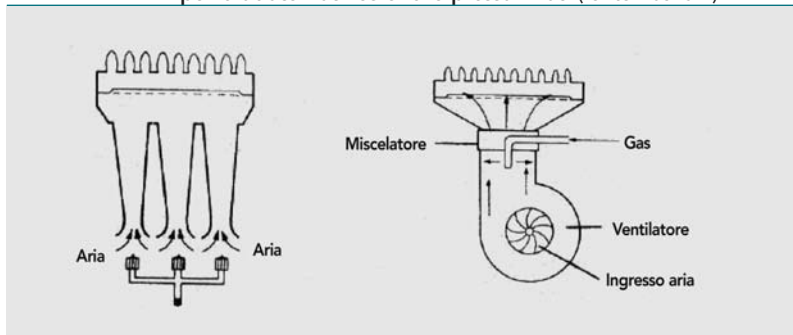
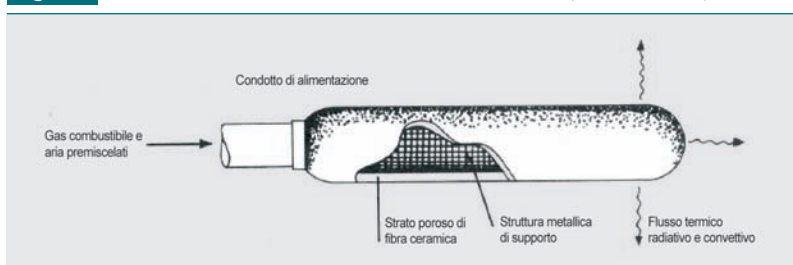
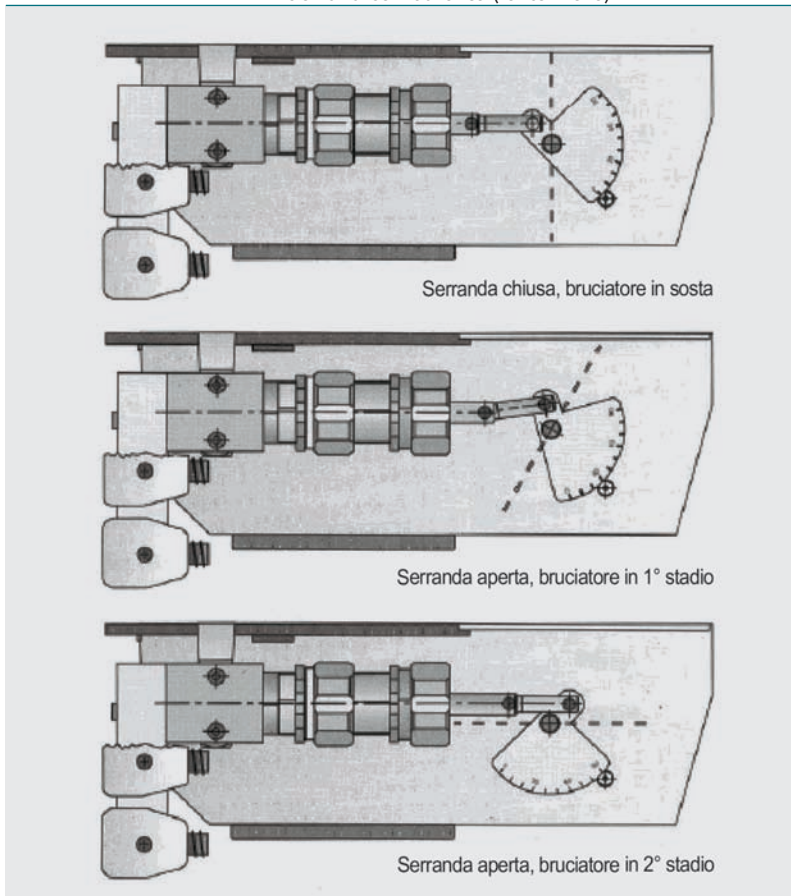
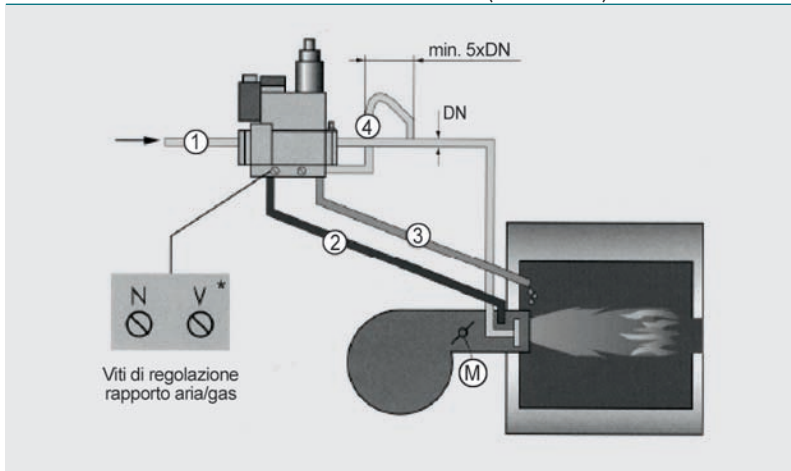


Fig. 4.4 Testa di combustione in fibra ceramica (fonte Ecoflam)



La riduzione delle perdite P_{ms} che comportano l'aumento del rendimento medio durante un certo periodo di funzionamento, e quindi del rendimento medio stagionale, si ottiene con accorgimenti che migliorano la regolazione dell'impianto. La riduzione delle P_{ms} si può ottenere:

- riducendo le perdite al camino a bruciatore spento, attraverso l'utilizzo di una serranda a chiusura automatica allo spegnimento del bruciatore; questo provvedimento è molto importante per le caldaie con elevato contenuto di acqua in temperatura e con camino a tiraggio naturale: nei periodi a bruciatore spento il tiraggio naturale raffredda velocemente le superfici di scambio della caldaia; meno critico è il caso del tiraggio forzato, dove, se il bruciatore è spento anche il ventilatore lo è, annullando conseguentemente, o quasi, il tiraggio;
- riducendo ulteriormente le perdite al camino a bruciatore spento, attraverso l'eliminazione della fiamma pilota, resa possibile con l'utilizzo di sistemi di accensione piezoelettrica o ad elettrodi;
- ricorrendo alla tecnologia della modulazione a più stadi sviluppata per le caldaie a temperatura scorrevole (vedere al successivo paragrafo 4.3.2); la necessità di adeguare il quantitativo di aria comburente al numero di stadi funzionanti in ragione del carico termico (per mantenere costante il valore di eccesso d'aria), ha richiesto lo sviluppo di meccanismi di modulazione dell'aria, ad esempio valvole a farfalla o serrande a comando meccanico (figura 4.5); il sistema meccanico presenta l'inconveniente di non poter essere regolato in funzione della temperatura dell'aria comburente; ne consegue che a parità di volume d'aria in transito, la massa può variare notevolmente, anche del

Fig. 4.5 Sistema meccanico di modulazione a gradini (2 stadi) dell'aria comburente (fonte Riello)**Fig. 4.6** Sistema di modulazione di fiamma con rapporto gas/aria costante e continuo (fonte Baltur)

7% per 20 °C di differenza di temperatura; sono stati sviluppati sistemi di modulazione continua della portata d'aria, mediante l'uso di ventilatori azionati da motori a velocità variabile (dotati di inverter); l'adeguamento della velocità del ventilatore è fatto mediante una sonda che monitora il contenuto di ossigeno nei fumi e comanda in retroazione l'inverter; nei generatori di grande potenzialità è utilizzata una sonda con cella all'ossido di zirconio che genera una differenza di potenziale fra due elettrodi in funzione della concentrazione di O_2 nei fumi;

- ricorrendo alla tecnologia della modulazione di fiamma con rapporto gas/aria costante e continuo, basata sul principio della maggiore semplicità di modulazione fine del gas rispetto alla modulazione dell'aria: l'aria è regolata da una serranda a comando elettromeccanico, mentre una valvola eroga la giusta quantità di gas in funzione del segnale di pressione alla soffiante e di quello in camera di combustione (figura 4.6).

[4.3.2]

Le caldaie a temperatura scorrevole

Le caldaie tradizionali sono caratterizzate dal fornire in mandata, fino alla valvola miscelatrice, fluido con una temperatura media praticamente costante al variare delle condizioni esterne e di carico termico: la regolazione della temperatura in mandata alle utenze è fatta mediante miscelazione dell'acqua calda proveniente dalla caldaia con l'acqua, più fredda, del ritorno dalle utenze.

Insieme alla miscelazione o in alternativa ad essa, l'adeguamento al carico termico può essere fatto con ripetute accensioni e spegnimenti del bruciatore (regolazione ON/OFF).

La temperatura in mandata prima della valvola miscelatrice è, in genere, piuttosto elevata (75-80 °C) e ciò provoca elevate dispersioni termiche al mantello del generatore Q_d e a bruciatore spento Q_{fbs} , con conseguenti limitati rendimenti di produzione.

Una evoluzione della caldaia di tipo tradizionale rivolta al risparmio energetico è la caldaia a temperatura scorrevole, detta anche a bassa temperatura o con bruciatore modulante. Il funzionamento è caratterizzato dall'adeguamento alle esigenze di carico termico della temperatura in mandata all'impianto, tenendo in considerazione le condizioni di temperatura esterna.

Si ottimizza così il funzionamento dell'impianto adattandolo all'andamento della curva di carico termico richiesto dalle utenze nelle varie condizioni climatiche stagionali e giornaliere, ottenendo per contro un migliore rendimento di produzione (minori dispersioni termiche al mantello del generatore Q_d , a bruciatore spento Q_{fbs} , al camino Q_f) e quindi un minore consumo di combustibile.

La massimizzazione del risparmio energetico si ha con impianti a bassa temperatura (impianti a pannelli radianti, ecc.), per cui è una soluzione che ben si adatta a impianti di nuova progettazione, pur consentendo buoni risultati di risparmio anche in caso di sostituzione, in impianti esistenti, della caldaia tradizionale con una a temperatura scorrevole.

[4.2.3]

Le caldaie ad alta efficienza

L'allegato II al D.P.R. 15 novembre 1996 n. 660 attribuisce alle caldaie ad acqua calda di nuova produzione, alimentate con combustibili liquidi e gassosi, le marcature di rendimento energetico in conformità con

quanto previsto dalla direttiva 92/42/CEE del 21 maggio 1992.

Il Decreto stabilisce dei requisiti minimi di rendimento energetico da rispettare contemporaneamente sia con funzionamento a potenza nominale P_n , espressa in kW, per una temperatura media dell'acqua nella caldaia di 70 °C, sia con funzionamento a carico parziale del 30%, per una temperatura dell'acqua dipendente dal tipo di caldaia.

Tali requisiti minimi di rendimento energetico sono riassunti, per i generatori con potenza nominale compresa tra 4 e 400 kW, nella **tabella 4.6**.

I generatori di calore ad acqua calda con potenza nominale superiore a 400 kW devono avere valori di rendimento termico utile pari o superiore a quelli indicati calcolati a $P_n = 400$ kW.

Le caldaie che si trovano oggi in commercio, pur differendo per principio di funzionamento e per rendimento, devono quindi rispettare i valori minimi di rendimento imposti dalla normativa vigente, il D.P.R. 15 novembre 1996 n. 660.

La recente direttiva 2005/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 6 luglio 2005 relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti che consumano energia ha di fatto abrogato l'art. 6 della direttiva 92/42/CE relativo alla marcatura energetica in base alle stelle. Manca tuttavia in Italia il provvedimento di recepimento della direttiva, e pertanto è ancora comune riferirsi alla scala a "stelle" prevista dal D.P.R. 15 novembre 1996 n. 660.

In ogni modo la recente legislazione nazionale in materia prescrive e classifica esclusivamente in base ai valori di rendimento. Per informazione, ed in attesa del provvedimento di recepimento della direttiva

Tabella 4.6 – Requisiti di rendimento da rispettare, contemporaneamente, a potenza nominale e a carico parziale del 30% (0,3 Pn)

Tipo di caldaia	Intervalli di potenza nominale (kW)	Rendimento a potenza nominale		Rendimento a carico parziale	
		Temperatura media dell'acqua nella caldaia (°C)	Espressione del requisito di rendimento (%)	Temperatura media dell'acqua nella caldaia (°C)	Espressione del requisito di rendimento (%)
Caldaie standard	4 - 400	70	$\geq 84 + 2 \log P_n$	≥ 50	$\geq 80 + 3 \log P_n$
Caldaie a bassa temperatura (*)	4 - 400	70	$\geq 87,5 + 1,5 \log P_n$	40	$\geq 87,5 + 1,5 \log P_n$
Caldaie a gas a condensazione	4 - 400	70	$\geq 91 + 1 \log P_n$	30 (**)	$\geq 97 + 1 \log P_n$

* Compresa le caldaie a condensazione che utilizzano i combustibili liquidi

** Temperatura dell'acqua di alimentazione della caldaia

Tabella 4.7 – Requisiti di rendimento da rispettare ai fini della marcatura di efficienza energetica (N.B.: la classificazione in funzione delle stelle è stata di fatto abrogata dalla direttiva 2005/32/CE che rimane tuttavia priva del provvedimento di recepimento nazionale)

Marcatura	Requisito di rendimento alla potenza nominale P _n e ad una temperatura media dell'acqua della caldaia di 70 °C	Requisito di rendimento a carico parziale di 0,3 P _n e ad una temperatura media dell'acqua della caldaia di 50 °C
★	$\geq 84 + 2 \log P_n$	$\geq 80 + 3 \log P_n$
★★	$\geq 87 + 2 \log P_n$	$\geq 83 + 3 \log P_n$
★★★	$\geq 90 + 2 \log P_n$	$\geq 86 + 3 \log P_n$
★★★★	$\geq 93 + 2 \log P_n$	$\geq 89 + 3 \log P_n$

2005/32/CE, riportiamo i vecchi criteri alla base della classificazione dell'efficienza energetica delle caldaie e della relativa marcatura in base alla scala a "stelle": un numero di stelle (a cinque punte, come riportato in Gazzetta Ufficiale) compreso tra uno e quattro, crescente in funzione del rendimento energetico.

Sono da ritenersi caldaie ad alta efficienza le caldaie che rispettano i requisiti di rendimento che erano previsti per la marcatura 4 stelle come da allegato II al DPR n. 660/96.

La tabella 4.7 evidenzia l'assegnazione delle stelle in funzione dei rendimenti.

Dal provvedimento sono esclusi:

- le caldaie ad acqua calda che possono essere alimentate anche con combustibili solidi;

- gli impianti di erogazione istantanea di acqua calda per usi igienici;
- le caldaie progettate per essere alimentate con combustibili diversi da quelli liquidi o gassosi, quali: gas residui industriali, biogas e residui di origine vegetale come da art. 8 comma 1 del D.P.C.M. n. 276 del 25.11.1995;
- le termocucine e gli apparecchi progettati per riscaldare principalmente il vano in cui sono installati e che forniscono anche, ma a titolo accessorio, acqua calda per il riscaldamento centrale e usi igienici;
- gli apparecchi di potenza utile inferiore a 6 kW progettati unicamente per alimentare un impianto di accumulazione di acqua calda per usi igienici circolante a gravità;

■ caldaie prodotte in unico esemplare. È importante sottolineare che nei casi di caldaie con doppia funzione (climatizzazione invernale e produzione di acqua calda per usi igienico sanitari), i requisiti di rendimento energetico si riferiscono unicamente alla funzione di riscaldamento ambientale.

[4.3.4]

Le caldaie a condensazione

Per caldaia a condensazione si intende un generatore di calore progettato per sfruttare, in condizioni di funzionamento a regime ed a qualsiasi condizione di carico, il principio della condensazione del vapore acqueo presente nei fumi, recuperando così il calore latente di vaporizzazione/condensazione a vantaggio del rendimento del generatore.

Ciò si ottiene inserendo uno scambiatore di calore fumi-acqua in grado di far abbassare la temperatura dei fumi fino a valori di poco superiori alla temperatura dell'acqua di ritorno. La temperatura dei fumi rilasciati in atmosfera è così in genere compresa tra 40 e 65 °C, contro temperature di rilascio fumi maggiori di 150 °C per le caldaie convenzionali.

Il fenomeno della condensazione del vapore presente nei fumi si ottiene allorché la temperatura dei fumi stessi si abbassa a valori inferiori alla temperatura di rugiada. Il recupero energetico derivante è costituito dal calore latente di condensazione del vapore d'acqua ceduto dai fumi al fluido termovettore ed è tanto più spinto quanto più bassa, al di sotto della temperatura di rugiada, è la temperatura dell'acqua nel circuito di ritorno. La figura 4.8 fornisce la curva che consente la quantificazione dell'acqua di condensa in funzione della temperatura di ritorno dell'acqua.

Il grafico di figura 4.8 mostra inoltre l'andamento del rendimento di produzione in funzione della temperatura dell'acqua di ritorno: si può vedere come il rendimento venga ad assumere valori superiori all'unità, essendo preso convenzionalmente a riferimento per il calcolo il potere calorifico inferiore (p.c.i.). Il grafico in figura 4.9 mostra il confronto dei rendimenti orientativi delle caldaie a gas in funzione della temperatura di ritorno.

È interessante confrontare gli andamenti qualitativi dei rendimenti di alcune tipologie di generatori in funzione del fattore di carico (rapporto % tra la potenza del generatore a carico parziale e potenza a carico nominale); come su può vedere le tipologie di caldaia a temperatura scorrevole ed a condensazione consentono rendimenti di produzione migliori rispetto

Fig. 4.7 Confronto tra i flussi energetici nei casi di condensazione o di non condensazione in caldaia

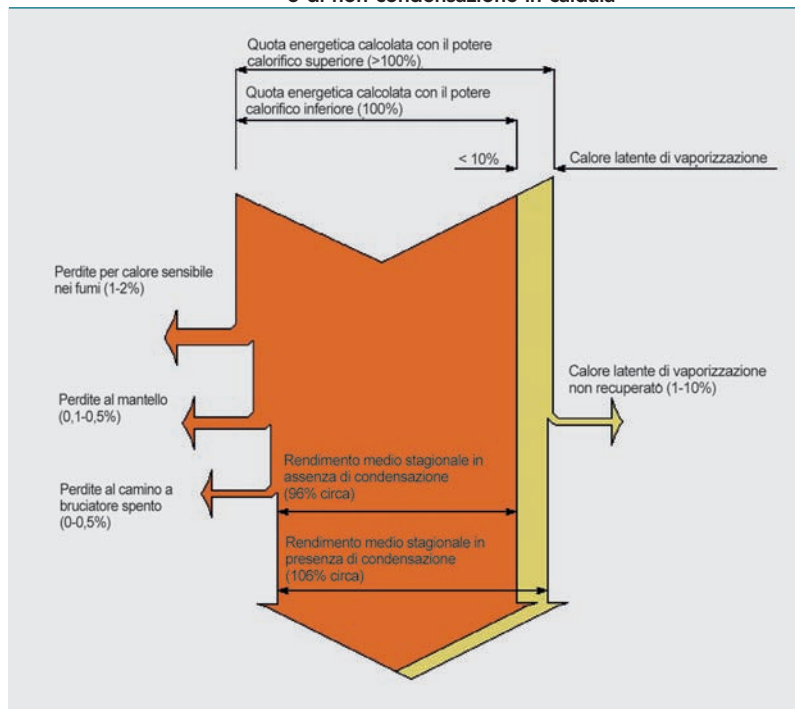
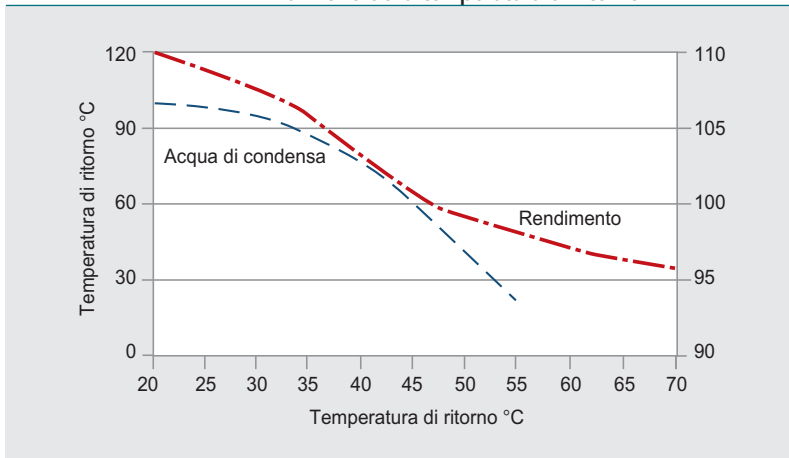


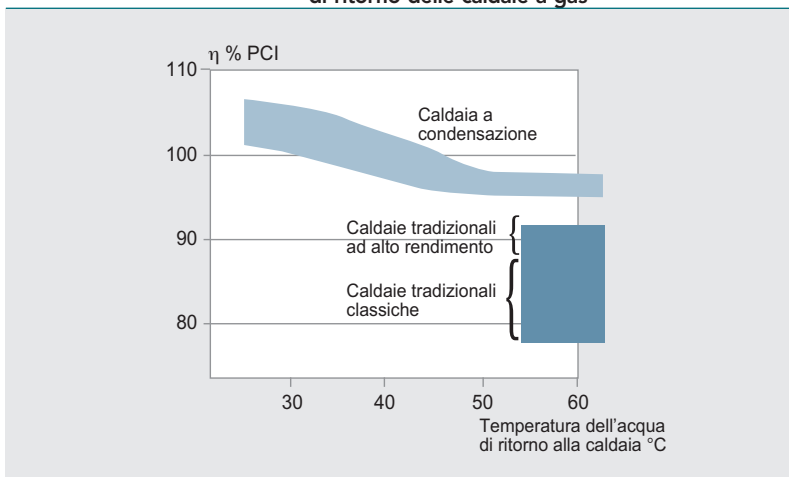
Fig. 4.8 Curva di rendimento percentuale in funzione della temperatura di ritorno



alle tipologie a temperatura costante, in qualsiasi condizione di carico, con ottimi rendimenti (addirittura maggiori) ai carichi parziali, anche minimi.

Esistono tuttavia alcuni vincoli di natura tecnica per cui non è possibile spingere il processo di sfruttamento della condensazione oltre una certa quota di recupero energetico o per cui necessitano particolari accorgimenti impiantistici che posso-

Fig. 4.9 Rendimenti indicativi in funzione della temperatura di ritorno delle caldaie a gas



no risultare difficile o costosa esecuzione; esistono altri vincoli di natura economica per cui l'adozione di una caldaia a condensazione può risultare non così conveniente.

Tra i primi troviamo:

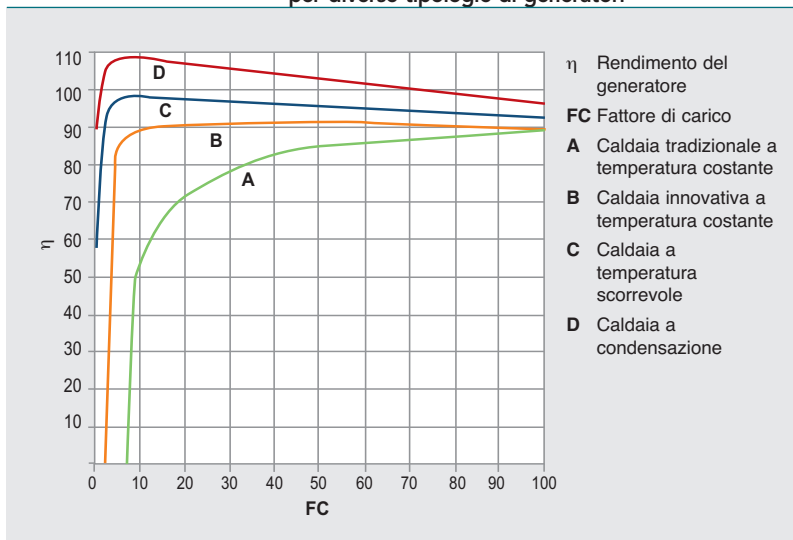
- la temperatura di ritorno dell'acqua dell'impianto: tanto minore è questa temperatura, tanto maggiore è la percentuale di funzionamento annuo della caldaia in regime di condensazione; se la temperatura di ritorno è troppo elevata, ad esempio perché non è possibile ridurre la temperatura di mandata per non incidere sul rendimento e non si può aumentare la caduta termica sul circuito incrementando la capacità scambiante degli elementi riscaldanti, è possibile abbassarla riducendo la portata della pompa di circolazione;
- la necessaria adozione di canne fumarie in pressione, in quanto il tiraggio naturale è ridotto a causa di temperature dei fumi spesso inferiori a 70 °C (per le caldaie di tipo tradizionale il tiraggio è garantito dall'elevata temperatura dei fumi) e resistenti alla corrosione dovuta alla presenza di condensate acide; la pressione necessaria è garantita in genere dal ventilatore di caldaia oppure può essere fornita da un ventilatore supplementare inserito direttamente nella canna, dove tecnicamente possibile.

Tra i secondi:

- costo marginale rispetto ad una caldaia di tipo tradizionale elevato, recuperabile in un tempo dipendente dalla percentuale di funzionamento annuo della caldaia in regime di condensazione;
- in caso di sostituzione del generatore di calore tradizionale con uno a condensazione in centrali termiche esistenti è necessario eseguire delle opere accessorie, quali l'adeguamento dimensio-

Fig. 4.10

Curve di rendimento utile in funzione del carico termico per diverse tipologie di generatori



nale della Centrale Termica, ove sia modificabili le parti edili, l'esecuzione dell'apposta nicchia per la raccolta condense, l'adeguamento della canna fumaria alle nuove esigenze anticorrosione (in genere eseguito inserendo, ove possibile, una nuova canna di caratteristiche idonee all'interno della canna esistente).

Il maggiore costo di una caldaia a condensazione rispetto ad una convenzionale è sostanzialmente imputabile ai maggiori costi dei materiali e della progettazione necessari per resistere agli agenti corrosivi presenti nella condensa. È richiesta quindi una particolare cura nella progettazione e nella realizzazione delle parti terminali dello scambiatore e del condotto fumi di raccordo alla canna fumaria.

L'acidità della condensa è imputabile sostanzialmente alla presenza di prodotti acidi di combustione, quali l'acido nitrico (ottenuto per reazione tra l'ossido di azoto ed il vapore d'acqua), l'acido cloridrico (alla temperatura di fiamma i composti

clorati dell'aria liberano ioni Cl^- che reagiscono con il vapore d'acqua) e l'acido solforico (anidridi solforosa SO_2 e solforica SO_3 derivanti dai composti solforosi presenti nel combustibile gas naturale che reagiscono con il vapore d'acqua).

Esistono due tipologie costruttive di caldaie a condensazione:

- caldaie a lavaggio dei fumi: sono costruite in acciaio inossidabile ed i fumi sono a contatto con l'acqua; il recupero energetico è buono, ma la quantità di condensa ottenuta è elevata;
- caldaie a scambiatore: si inserisce uno scambiatore di calore acqua-fumi nel percorso fumi tra caldaia e camino, così da sottrarre il calore latente di condensazione ai fumi e cederlo all'acqua prima dell'ingresso in caldaia (preriscaldamento dell'acqua di ritorno); lo scambiatore deve essere costruito in materiale resistente alle condense acide.

Tra le due soluzioni tecniche PRO e CONTRO

Alcuni costruttori di caldaie hanno a catalogo scambiatori di calore modulari adattabili a caldaie convenzionali che permettono di portare così i fumi a condensazione. Dal punto di vista tecnico si ricostruisce in CT ciò che i costruttori integrano nella caldaia in officina. È una soluzione tuttavia non priva di aspetti critici o perlomeno da valutare con attenzione: se dal punto di vista tecnico, previo un corretto dimensionamento dello scambiatore, risulta essere un'operazione semplice, da un punto di vista operativo occorre porre attenzione al sistema di regolazione dell'impianto, che richiederà una riprogrammazione che tenga conto delle nuove condizioni operative dell'impianto. Vi sono poi delle ragioni puramente pratiche da tenere in considerazione, quali la veri-

fica degli spazi presenti in CT idonei all'inserimento dello scambiatore spesso voluminoso e l'opportunità di intervenire nelle logiche di programmazione del sistema di controllo dell'impianto, azione che deve essere eseguita da tecnici competenti e che comunque non è esente da costi.

[4.4]

Le tecnologie innovative a bassa temperatura lato utilizzazione

[4.4.1]

Le valvole termostatiche

I sistemi impiantistici che prevedono la regolazione della temperatura a livello locale, di singolo ambiente o di zona, necessitano di azionamenti che possano ridurre gli apporti termici all'ambiente riducendo la portata del fluido termovettore caldo agli elementi radianti.

Installate sulla mandata del radiatore al posto della normale valvola di intercettazione, le valvole dotate di testa termostatica intercettano il flusso del fluido caldo in funzione della temperatura presente nell'ambiente in cui è posizionata la testa termostatica, con un tempo di risposta che è dipendente dal materiale di costruzione della testa termostatica. La capacità della valvola di adeguare il funzionamento alle variazioni termiche dell'ambiente in cui è immersa è indicata dalla caratteristica di risposta in banda proporzionale: i prodotti migliori hanno banda proporzionale a 0,5 °C, buone sono le valvole con banda proporzionale a 1 °C.

Con il termine valvola termostatica si intende l'insieme di tre elementi aventi le seguenti caratteristiche:

A. un elemento idraulico costituito da una valvola da installarsi al posto della nor-

male valvola di intercettazione del radiatore;

B. l'azionamento della valvola che, su comando, modula l'apertura dell'otturatore in modo che l'emissione termica del radiatore (che dipende in modo diretto dalla sua temperatura) vada ad equilibrare le dispersioni del locale dove il radiatore è situato; la parte esterna della testa termostatica è in genere dotata di una scala graduata che permette la visualizzazione della temperatura impostata;

C. una sonda termometrica per misurare la temperatura dell'ambiente in cui è situato il radiatore e che costituisce il comando per l'azionamento della valvola.

Una valida alternativa, di costo leggermente superiore, è data dalle valvole elettrotermiche; esse montano in sostituzione della testa termostatica un attuatore elettrotermico comandato da un sensore di temperatura, che può essere posto anche a distanza (termostato).

L'inserimento di una valvola termostatica, come tuttavia qualsiasi altro elemento d'impianto, richiede attenzione nelle fasi di progettazione e di bilanciamento dell'impianto.

A questo proposito possono essere utili le Norme Tecniche dell'Associazione Tedesca fra le Industrie Meccaniche per la progettazione e il bilanciamento di impianti di riscaldamento con radiatori corredati da valvole termostatiche (VDMA Merkblatt über Planung und hydraulischen Abgleich von Heizungsanlagen mit thermostatischen Heizörperventilen).

Dal punto di vista pratico occorre porre attenzione a:

- l'inserimento di valvole termostatiche in impianti centralizzati serventi più unità immobiliari consente risparmi energetici consistenti se l'adozione

delle stesse è estesa a tutti gli elementi radianti dell'impianto che il progettista ritiene opportuno termostatare: particolare attenzione deve essere posta dal progettista nella fase di ribilanciamento dell'impianto;

- in presenza di acque particolarmente dure, è bene inserire un sistema di addolcimento, onde ridurre le incrostazioni di calcare che inevitabilmente, in assenza di addolcitore, finirebbero per rendere difficoltoso il funzionamento della valvola fino a bloccarla.

[4.4.2]

I sistemi radianti innovativi

I sistemi di emissione tradizionali (radiatori e convettori) concentrano la cessione di calore all'ambiente in pochi punti che spesso sono localizzati, a seguito di altre esigenze impiantistiche, sacrificando l'ottimale distribuzione spaziale ai fini del benessere.

La concentrazione dell'emissione in pochi punti ha come conseguenza una minore omogeneità delle sensazioni di benessere che l'individuo riesce a percepire nei vari punti dell'ambiente: in altri termini, nei punti dell'ambiente lontani dai corpi scaldanti si ha una maggiore sensazione di "freddo", pur in presenza di una temperatura ambientale omogenea (misurata con termometro schermato), in quanto il corpo umano, in distanza, non riesce a percepire la componente radiante diretta del calore emesso.

Si hanno inoltre fenomeni convettivi localizzati di maggiore entità, che possono ridurre localmente la sensazione di benessere, causare il trasporto di pulviscolo e polveri e favorire la stratificazione del calore nell'ambiente.

Alcune soluzioni tecnologiche consentono di distribuire l'emissione di calore su una

maggiore superficie radiante riducendo così gli effetti negativi dovuti alla concentrazione nell'emissione di potenza termica. Tali soluzioni impiantistiche prevedono l'installazione di:

- battiscopa radianti,
- pannelli radianti (sia per ambienti abitativi che industriali),
- tubi radianti a soffitto (adatti per ambienti industriali).

Per queste tipologie di corpi scaldanti occorre, in fase di progettazione, fare molta attenzione alle temperature di mandata del fluido termovettore ed alla differenza di temperatura tra fluido ed ambiente (Δt) affinché non si instaurino eccessivi moti convettivi che vanificherebbero l'adozione di tali tecnologie. La **tabella 4.8** riporta, a titolo di esempio, le temperature di mandata e le Δt massime in funzione della soluzione impiantistica.

I battiscopa radianti

I ridotti moti convettivi ottenuti con impianti a battiscopa radianti causano una riduzione dello scambio termico sia con le pareti disperdenti, con conseguente riduzione delle perdite per trasmissione verso l'esterno ed una minore stratificazione del calore a soffitto, sia tra il corpo umano e l'ambiente, con conseguente miglioramento della sensazione di benessere: tutto questo consente di mantenere una temperatura dell'ambiente più bassa, con un risparmio energetico valutabile in 10-15%. A tal fine è opportuno prevedere l'installazione di valvole termostatiche con sensore a distanza in ciascuno degli ambienti riscaldati.

Altri pregi riguardano la riduzione degli effetti imputabili ai ponti termici, sia quelli lineari nelle pareti rivolte all'esterno, sia quelli d'angolo nelle pareti perimetrali, e la bassa invasività degli interventi sulle

Tabella 4.8 – Temperature di mandata massime in funzione della soluzione impiantistica

Soluzione impiantistica	Temperatura massima fluido termovettore	Δt massima tra fluido e ambiente
Battiscopa radianti	60-65 °C	40-45 °C
Pannelli radianti	40 °C (45 °C in fase di riscaldamento)	15 °C (*)

* Funzione della conducibilità termica del manufatto in cui è annessa la serpentina scaldante e dello strato di finitura superficiale del pavimento.

opere murarie, che rendono questa soluzione impiantistica particolarmente adatta per interventi di tipo conservativo in edifici di pregio storico ed artistico.

Una forte limitazione di questa soluzione impiantistica consiste nell'inutilizzabilità, ai fini del posizionamento di mobili ed arredi, delle pareti (o porzioni di esse) sedi di battiscopa radianti; in presenza di fabbisogni termici elevati, tipici dei climi rigidi, può risultare dalla progettazione che gran parte del perimetro del vano da riscaldare debba essere sede del battiscopa radiante: soluzione inaccettabile proprio per le citate esigenze arredative. Ne consegue una particolare idoneità di questa soluzione impiantistica per i climi miti, con ridotti fabbisogni termici e conseguente ridotta dimensione, in lunghezza, del battiscopa radiante. È da ricordare comunque che, anche in questo caso, permangono i vincoli nella disposizione degli arredi che limitano la completa fruibilità dei vani.

Il progettista che intenda adottare questa soluzione deve prevedere un idoneo sistema di regolazione al fine di attutire gli effetti, in termini di variazioni repentine della temperatura operante, dovuti alla limitata inerzia termica di questa soluzione impiantistica.

I pannelli radianti

L'impianto a pannelli radianti rappresenta

una soluzione impiantistica che attualmente sta vivendo una discreta fase di sviluppo e diffusione, anche grazie alla sua duplice utilizzabilità, sia per il riscaldamento invernale, sia per il raffrescamento estivo, in particolare per gli ambienti abitativi, gli alberghi e gli uffici.

Concettualmente l'impianto consiste in una serpentina di tubi o di pannelli preformati (concettualmente analoghi ai battiscopa radianti ma con differenti caratteristiche tecniche) alloggiati nel pavimento, nelle pareti o nel soffitto dei locali da climatizzare, al cui interno circola un fluido termovettore (in genere acqua), caldo nella stagione invernale e relativamente freddo nella stagione estiva.

La trasmissione del calore dal fluido all'ambiente da climatizzare avviene principalmente per irraggiamento (il manufatto stesso in cui è annessa la serpentina diventa un pannello radiante); c'è anche una componente convettiva non trascurabile, ma comunque contenuta dalla bassa Δt tra fluido ed ambiente. Per conduzione, infine, avviene la trasmissione del calore all'interno del manufatto in cui è posta la serpentina.

Gli impianti a pannelli radianti presentano, nei confronti dei sistemi ad emissione concentrata (radiatori e convettori) vantaggi analoghi a quelli già individuati per i battiscopa radianti, essendo questi ultimi una variante dei primi con caratteristiche tecniche idonee ad un utilizzo nelle limitate superfici perimetrali dei battiscopa. Inoltre, le basse temperature delle superfici radianti, non consentono il fenomeno della carbonizzazione del pulviscolo atmosferico che, negli impianti a radiatori con temperatura di mandata dell'ordine di 80 °C o superiore, causano annerimenti locali delle pareti.

Nel funzionamento invernale la tempera-

tura dell'acqua di mandata alle serpentine deve essere tale da garantire una temperatura della superficie radiante (che coincide con il pavimento) in genere di 25-27 °C (massimo di 29 °C); in queste condizioni è garantito il comfort termico degli occupanti ed un limitato rimescolamento delle polveri, visti i limitati moti convettivi innescati.

La temperatura dell'acqua di mandata deve essere attentamente valutata in funzione delle caratteristiche di trasmissione del calore del manufatto in cui è annegata la serpentina, e comunque è ragionevolmente indicabile in 40 °C, con un massimo di 50 °C nelle fasi di transitorio di riscaldamento dell'impianto. In presenza di manufatti con elevata resistenza termica, per raggiungere e mantenere le temperature di progetto, è richiesta una elevata temperatura media dell'acqua in mandata; ne consegue che il salto termico tra mandata e ritorno deve essere contenuto (5-10 °C massimo). L'utilizzo di tubi in rame (alta conducibilità termica) consentono temperature di mandata ulteriormente ridotte e/o lunghezze inferiori delle serpentine, con risparmi intermini di materiali e di manodopera per la posa.

Con temperature dell'acqua in mandata di 35-45 °C (basse temperature) è sicuramente conveniente l'utilizzo di generatori di calore con rendimenti elevati con queste condizioni di lavoro: risultano essere particolarmente idonei generatori quali caldaie a condensazione e pompe di calore, e soluzioni che integrano calore di

recupero o pannelli solari termici.

Per il funzionamento estivo (raffrescamento) è preferibile la soluzione impiantistica con pannello a soffitto in quanto tale posizionamento risulta più idoneo per la sottrazione del calore (in genere maggiormente stratificato in alto) rispetto al pavimento in genere più freddo; dal punto di vista del comfort è inoltre meglio evitare che gli occupanti siano a diretto contatto o comunque troppo vicini a superfici fredde. Vi è poi un problema non trascurabile dovuto alla formazione di condensa se la superficie fredda si trova ad una temperatura inferiore alla temperatura di rugiada dell'aria nell'ambiente; ne consegue un limite molto stringente nella temperatura di mandata del fluido freddo alle serpentine.

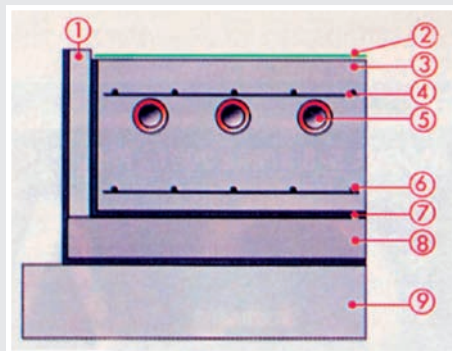
La **tabella 4.9** riporta, a titolo di esempio, la temperatura di rugiada relativa alla temperatura ambiente in diverse condizioni di umidità relativa dell'aria: si avrà formazione di condensa quando la temperatura della superficie del pannello freddo rivolta verso l'ambiente (importante per il calcolo di essa è la resistenza termica del manufatto in cui è inserita la serpentina) sarà inferiore alle temperature di rugiada indicate.

Tra i pregi della tecnologia a pannelli radianti vi è sicuramente una più omogenea distribuzione della temperatura, anche a livello di sensazione fisica in quanto è percepibile dal corpo umano la componente radiante diretta in tutto (o quasi) il locale. Ciò consente di mantenere la

Tabella 4.9 – Valori della temperatura di rugiada in funzione della temperatura ambiente e dell'umidità

Temperatura aria umida	18 °C				20 °C				22 °C			
Umidità relativa dell'aria	50%	60%	70%	80%	50%	60%	70%	80%	50%	60%	70%	80%
Temperatura di rugiada °C	7,4	10,1	12,5	14,5	9,3	12,0	14,4	16,4	11,1	13,9	16,3	18,4

Fig. 4.11 Schema di posa delle serpentine radianti in pavimentazione industriale



1. Giunto di dilatazione perimetrale
2. Strato di finitura
3. Soletta armata in calcestruzzo
4. Rete elettrosaldata superiore
5. Serpentina riscaldante
6. Rete elettrosaldata inferiore
7. Barriera al vapore (es. foglio polietilene spessore 0,2 mm)
8. Isolante termico (eventuale)
9. Sottofondo in calcestruzzo

temperatura più bassa, con conseguenti minori dispersioni termiche verso l'esterno e quindi un risparmio energetico valutabile dal 10 al 20%.

Contrariamente alla soluzione impiantistica a battiscopa radianti, che è come già più volte ricordato concettualmente analoga, la soluzione a pannelli radianti ha una non trascurabile inerzia termica, con conseguente scarsa prontezza di adeguamento della temperatura dell'ambiente a repentine variazioni delle condizioni al contorno (temperatura esterna e carichi interni).

Tutti gli impianti di riscaldamento presentano l'inconveniente di "seccare l'aria", ossia creano, a seguito di periodi relativamente lunghi di riscaldamento, condizioni termo-igrometriche di discomfort, in quanto riducono drasticamente l'umidità relativa lasciando inalterato il contenuto assoluto di acqua (sotto forma di vapore) nell'aria. Questo fenomeno può risultare un limite non accettabile in particolare negli ambienti in cui sono prevedibili lunghe quotidiane permanenze (uffici, alberghi, ecc.).

Con sistemi a pannelli radianti, una solu-

zione frequentemente adottata consiste nell'abbinare al primo un impianto di distribuzione di aria primaria che assolve principalmente la funzione di apportare il contenuto igrometrico idoneo al mantenimento delle condizioni di benessere e secondariamente, ma non in ordine di importanza, di contribuire alla fornitura degli apporti termici, fino a sostituire in questa funzione i pannelli radianti, nelle condizioni di bassi carichi termici, tipiche delle "mezze stagioni" e, per gli uffici, dei giorni non lavorativi (v. nel seguito *I pannelli e tubi radianti a soffitto*).

Per quanto riguarda la posa in opera molteplici sono le soluzioni sviluppate.

Per la posa a pavimento, la soluzione più utilizzata è la disposizione manuale delle serpentine sottotraccia (i tubi, in genere in materiale plastico polimerico – es. polietilene reticolato con barriera all'ossigeno – sono forniti in rotoli) raccolte nei collettori di distribuzione posti in appositi armadietti ad incasso.

Per la posa a parete si hanno in genere due soluzioni:

- la prima prevede la posa sottotraccia (si copre con l'intonaco o con un pannello sottile in cartongesso) di "rastrelliere" prefabbricate in rame o polimeri quali polipropilene random (PPR), PE-X, polibutilene, costituite da moduli di due collettori orizzontali, uno posto in lato ed uno in basso, collegati tra loro con tubi di piccolo diametro (in genere 10 mm di diametro); le "rastrelliere" possono anche essere costituite in opera in maniera analoga alla posa a pavimento;
- la seconda prevede pannelli modulari già precostituiti con serpentine interne da addossare alle pareti e collegare in serie e/o parallelo in modo analogo ai radiatori tradizionali; le serpentine (in

polibutene con barriera all'ossigeno) sono inserite in pannelli in polistirene, che costituisce l'isolamento termico verso la muratura e quindi verso l'esterno, e collegate tra loro ed ai collettori di mandata e ritorno con sistemi ad attacco rapido; il pannello, una volta addossato a parete, può essere rivestito con cartongesso, intonaco, colla e piastrelle.

Esistono in commercio pannelli radianti a vista che, in caso di ristrutturazioni, si possono utilizzare in sostituzione dei radiatori (ove le dimensioni lo consentono) e costituiscono un elemento di arredo; una variante, a metà strada tra il radiatore tradizionale ed i pannelli radianti, sono i così detti radiatori d'arredo, o "scaldasalviette", particolarmente adatti per particolari esigenze estetiche ed architettoniche.

La posa del sistema radiante a soffitto può prevedere sia serpentine poste nella controsoffittatura (in genere strutture modulari da comporre in opera), sia placche radianti (in genere in alluminio passivato, perché leggero e verniciabile), anch'esse

prefabbricate modulari da assemblare in opera.

I costi degli impianti a pannelli radianti dipendono molto dal tipo di isolamento termico applicato; questo, a sua volta, condiziona in modo pesante il funzionamento e l'economia di gestione dell'impianto.

Se si confronta con un tradizionale impianto a radiatori in ghisa, il maggiore costo di un impianto a pannelli radianti è valutabile in un 15-25%, ma visti i risparmi energetici da esso consentiti, il recupero dell'investimento avviene nel giro di pochissimi anni.

I pannelli e tubi radianti a soffitto

Gli impianti a tubi radianti a soffitto comprendono in realtà due differenti tecnologie:

- pannelli radianti contenenti liquido (acqua) in temperatura: adatti ad ambienti lavorativi quali uffici e terziario;
- tubi e nastri radianti contenenti gas (fumi di combustione) in temperatura: adatti ad ambienti lavorativi di tipo industriale.

I primi sono costituiti da serpentine radianti installate nella controsoffittatura con la superficie radiante schermata alla vista e rivolta verso il basso. Tale soluzione ben si presta, oltre che al riscaldamento invernale, anche al raffreddamento estivo, ed è integrabile con un impianto di aria primaria, consentendo così una climatizzazione con controllo dei ricambi d'aria e dell'umidità.

In particolare nel regime invernale (riscaldamento), l'aria primaria assicurerà il controllo dell'umidità ambientale e l'eventuale bilanciamento del carico sensibile in ambienti con forti dispersioni termiche. Nel regime estivo (raffrescamento) l'aria primaria serve ad integrare gli effetti delle

Fig. 4.12 Schema realizzativo di impianto a pannelli radianti a soffitto, integrato con impianto di aria primaria

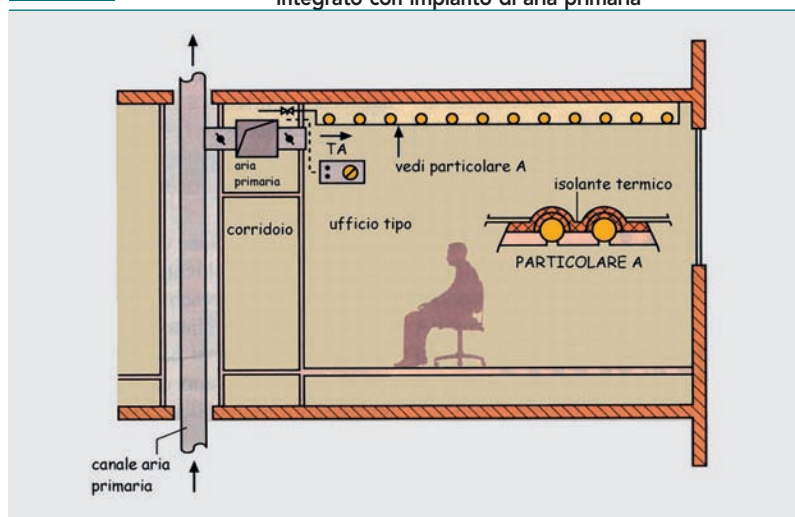
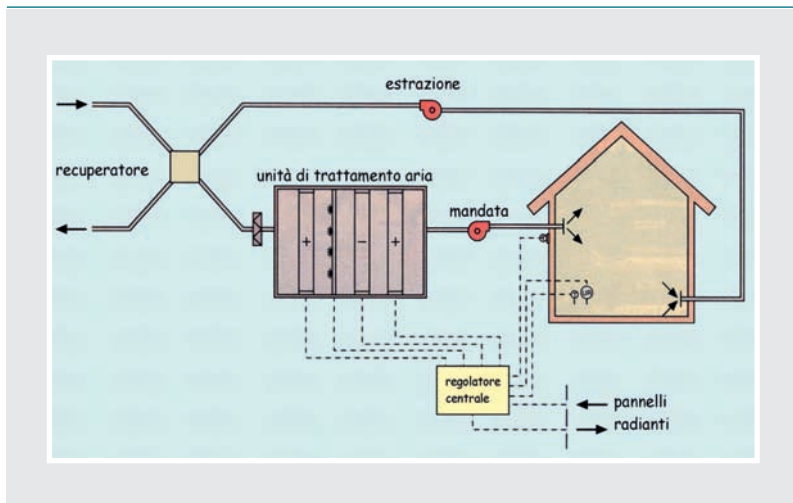


Fig. 4.13 Schema di impianto combinato, con pannelli radianti a soffitto e impianto ad aria primaria portata nelle condizioni termo-fisiche idonee nell'apposta unità di trattamento (UTA)



serpentine, i cui limiti prestazionali impu-
tabili alla temperatura di rugiada dell'aria
ambiente non consentono di far fronte ai
carichi termici sensibili e a repentine varia-
zioni dei carichi interni. Anche nel funzio-
namento estivo l'utilizzo dell'aria primaria
consente di fornire i necessari ricambi
d'aria e di correggere il contenuto idro-
metrico dell'aria nell'ambiente.
I secondi sono in genere costituiti da
moduli assemblabili in opera e da sospen-
dere al soffitto del capannone industriale
mediante appositi tiranti. L'alimentazione
del circuito radiante è costituita dai fumi
caldi di combustione generati da un
generatore di aria calda e sospinti nel cir-
cuito mediante un apposito ventilatore.

□□□



Capitolo **Cinque**

La ventilazione negli edifici

[5.1] Introduzione

L'aria esterna che entra in un edificio sia intenzionalmente (ventilazione) che spontaneamente (infiltrazioni ed esfiltrazioni) è importante per due ragioni. L'aria esterna viene spesso usata per diluire gli inquinanti dell'aria interna, e l'energia utilizzata per riscaldare o raffreddare questa aria esterna ha un peso non trascurabile nei carichi per il condizionamento degli spazi confinati.

Le dimensioni di questi ricambi d'aria devono essere conosciuti sia nei valori massimi (per dimensionare l'impianto, sia nei valori medi per prevedere correttamente i consumi stagionali. Per assicurare un corretto controllo del livello degli inquinanti interni, si deve conoscere la minima portata di ricambi d'aria. Nei grandi spazi devono essere determinati gli effetti delle infiltrazioni e della ventilazione sulla distribuzione dell'aria e dei percorsi interni.

Gli scambi d'aria fra interno ed esterno si dividono in ventilazione (intenzionale e controllata) ed infiltrazione (non intenzionale e non controllata). La ventilazione può essere naturale o forzata. Nella ventilazione naturale l'aria non viene mossa da alcun dispositivo, e si muove liberamente attraverso finestre, porte e altre aperture ricavate nell'involucro dell'edificio.

Circa il 30% (con variazioni tra il 20 e il 40%) dell'energia usata negli edifici è usata per la ventilazione e dissipata per esfiltrazioni. La quantità di energia dipende dalle portate di aria di ventilazione e da quelle necessarie per raggiungere il comfort termico. Inoltre altra energia è necessaria per l'azionamento dei ventilatori (tipicamente da 1 W/l/s se si tratta di una buona progettazione, fino a 3 W/l/s per quella più energivora), per raffreddare l'aria per refrigerazione o evaporazione e mantenere accettabili livelli di umidità.

Il capitolo focalizza gli aspetti relativi alla ventilazione degli edifici ed al raffrescamento passivo. L'obiettivo è quello di indicare tecnologie e strategie di ventilazione che, adeguatamente progettate, possono ridurre notevolmente i consumi per climatizzazione estiva, garantendo adeguate condizioni di comfort termico. Contestualmente, non sono specificatamente trattati quegli aspetti relativi agli impianti di condizionamento dell'aria che introdurrebbero un approccio decisamente impiantistico al tema e per i quali si rimanda a specifica bibliografia.

[5.2] Definizioni

Il proposito primario della ventilazione è quello di fornire agli occupanti di un

ambiente una accettabile qualità dell'aria o IAQ ed un adeguato comfort termico. Le definizioni relative alla ventilazione ed al flusso di aria comprendono:

- **ventilazione intenzionale:** processo per mezzo del quale aria "pulita" (normalmente aria esterna) viene immessa intenzionalmente in un ambiente rimuovendo aria viziata;
- **infiltrazioni ed esfiltrazioni:** l'aria può entrare in un edificio attraverso le "infiltrazioni". Si caratterizzano così scambi incontrollati e non intenzionali di masse di aria attraverso discontinuità o fratture dell'involucro (infissi, crepe ecc.); Questo fenomeno dipende dalle caratteristiche dell'involucro (porosità) e dalla grandezza delle altre forze motrici, quali il vento e le differenze di temperatura; anche altre aperture per la ventilazione possono diventare vie di flusso non intenzionale; gli agenti naturali dando luogo alle infiltrazioni-esfiltrazioni possono sensibilmente influenzare con le loro fluttuazioni i moti dell'aria attraverso l'involucro; le prestazioni degli impianti possono risultare gravemente perturbate ed allontanare dall'optimum le condizioni di benessere e comfort in ambiente; questa forma di ventilazione spesso è anche poco conosciuta da progettisti e tecnici e ciò può far sfociare in eccessivi consumi energetici, richiesta di eccessive prestazioni dagli impianti, discomfort ecc.;
- **aria di ricircolo:** questa forma è frequentemente usata in edifici commerciali per la climatizzazione; dal momento che l'aria è filtrata per via del particolato ma i gas non vengono rimossi, di solito non si tiene conto di questo processo nel calcolo dell'aria di ventilazione somministrata agli occupanti, aria che invece viene prelevata dal-

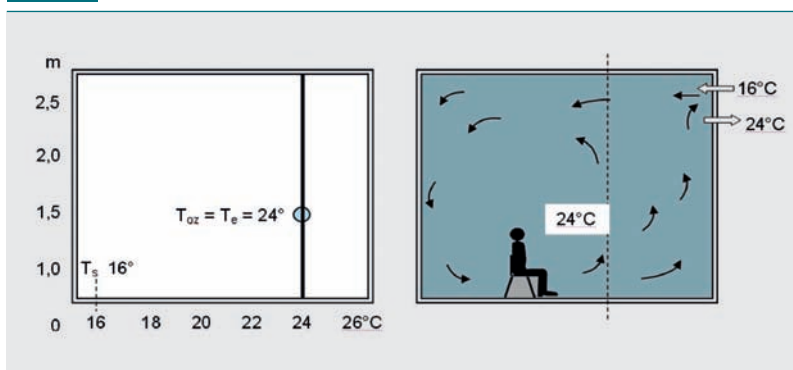
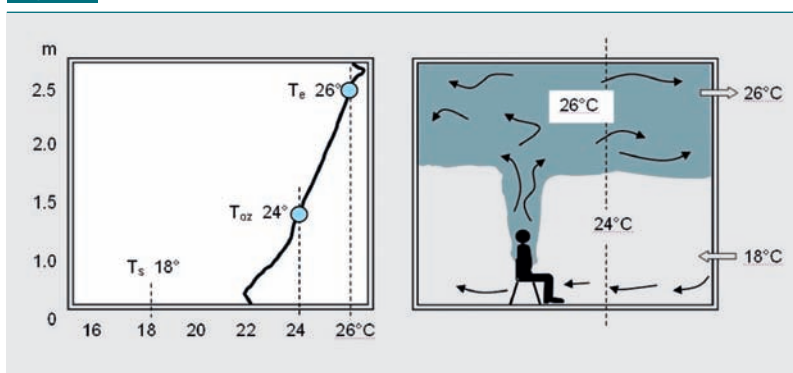
l'esterno per la diluizione degli inquinanti.

[5.3]

Modalità di funzionamento della ventilazione

Si effettua introducendo aria "pulita" (abbiamo già incontrato la più appropriata notazione di "aria esterna") in un volume. Questa aria o è mescolata con l'aria già presente in ambiente dando luogo a "ventilazione a mescolamento" o è usata per "spostare" aria nel volume dando luogo alla "ventilazione a dislocamento".

- **Ventilazione a mescolamento:** il mescolamento è stimolato dalla naturale turbolenza dell'aria (figura 5.1). Questa modalità è importante quando l'aria di circolazione è usata per climatizzare anche dal punto di vista termico. Qualora il mescolamento fosse perfetto, la concentrazione degli inquinanti sarebbe costante all'interno dell'ambiente.
- **Ventilazione a dislocamento:** forma di ventilazione che sta diventando sempre più diffusa ed adottata per uffici ed altri edifici non domestici. In questa forma, l'estrazione dell'aria calda e contaminata, spinta verso l'alto dall'azione delle sorgenti termiche (occupanti, computer ecc.) ha luogo al livello del soffitto (figura 5.2). L'aria fresca di ventilazione viene immessa al livello del pavimento, quindi direttamente nella zona occupata, ad una temperatura più bassa ($\Delta T = 1-8$ °C) di quella dell'ambiente ed a una velocità molto bassa (tipicamente da 0,1 a 0,3 m/s). Affinché un sistema di ventilazione a dislocamento funzioni perfettamente, la portata di aria immessa (Q_v) deve essere pari

Fig. 5.1 Ventilazione a mescolamento**Fig. 5.2** Ventilazione a dislocamento

alla somma dei flussi convettivi generati dalle sorgenti termiche valutati all'interfaccia tra la zona inferiore della stanza, contenente aria fresca e pulita e quella superiore, con aria contaminata ($Q_s = Q_{p,1} + Q_{p,2} \dots + Q_{p,n}$). L'aria calda che sale dal pavimento si diffonde "spalmandosi" lungo il soffitto, cosicché l'ubicazione delle bocchette di estrazione non è critica a patto che sia nella parte più alta. Un grosso vantaggio della ventilazione a dislocamento è il miglioramento della qualità dell'aria in ambiente. Per contro, è necessaria una buona progettazione per separare gli occupanti (propriamente la zona cosid-

detta di "respirazione") dalla zona ad aria contaminata. Mentre la scelta fra sistemi a miscelazione e a dislocamento è opinabile per altezze di ambiente di 2,5-3 m, quest'ultimo è sempre preferibile per locali di elevata altezza. Come regola generale, questo sistema non dovrebbe essere usato per il riscaldamento, effettuato invece con radiatori sotto finestra.

- **Ventilazione interzonale:** adottata specialmente in edifici civili, in cui è comune estrarre aria dai servizi quali cucine e bagni. L'aria esterna viene immessa nelle zone ove gli occupanti soggiornano per le varie attività ed estratta meccanicamente in questa tipologia di locali di servizio.

5.4 Modalità di somministrazione della ventilazione

Come anticipato nell'introduzione diverse sono le modalità di somministrazione di aria esterna all'interno dell'edificio.

In particolare si ha:

- **Ventilazione forzata:** la ventilazione forzata è generalmente obbligatoria negli edifici di grandi dimensioni, dove è richiesta una portata minima di aria esterna, per salvaguardare la salute e il comfort degli occupanti, e dove un sistema meccanico di estrazione è consigliabile e necessario. Gli infissi moderni hanno una tenuta molto elevata ($7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ di superficie a 100 Pa, contro 20 degli infissi tradizionali); questo riduce la possibilità di infiltrazioni naturali e richiede la presenza di impianti di ventilazione forzata per mantenere un adeguato standard di qualità dell'aria interna.

- **Ventilazione naturale:** la ventilazione naturale attraverso l'apertura intenzionale di finestre, porte ecc. è causata dalla differenza di pressione dovuta al vento e alla differenza di temperatura fra interno ed esterno. Il flusso di aria esterna attraverso finestre, porte ed altre aperture specificamente progettate, può essere usato per fornire un'adeguata ventilazione per la diluizione di contaminanti e per il controllo delle temperature. L'apertura non intenzionale di porte e finestre può interferire con i percorsi d'aria previsti in sede di progetto, e provocare carichi termici maggiori di quelli previsti. Talvolta per ventilazione naturale si intendono anche le infiltrazioni, in questo caso le due cose vengono tenute distinte.
- **Infiltrazioni:** le infiltrazioni sono costituite da un flusso d'aria incontrollato attraverso aperture non previste (fessure, infissi non chiusi o difettosi ecc.), provocato da differenze di pressione dovute al vento, alle differenze di temperatura, e agli apparecchi di ventilazione forzata installati. Le infiltrazioni sono meno affidabili per garantire un adeguato ricambio d'aria, poiché dipendono dalle condizioni atmosferiche, e dalla localizzazione delle aperture. Comunque le infiltrazioni possono costituire la maggior parte dell'ammontare dei ricambi d'aria negli edifici con una forma caratterizzata da elevati valori di S/V.

[5.5]

Carichi termici per ventilazione e qualità dell'aria

L'aria esterna introdotta negli edifici costituisce una parte importante dei carichi

termici di un edificio, questa è la ragione per cui è importante limitare la portata dei ricambi d'aria al minimo indispensabile. I ricambi d'aria incrementano i carichi termici di un edificio in tre modi.

L'aria esterna deve essere riscaldata o raffreddata dalla temperatura esterna a quella interna. L'energia per ottenere questo risultato è la seguente:

$$q_s = Q \rho c_p \Delta t$$

dove:

q_s = calore sensibile (W),

Q = portata d'aria (m^3/s),

ρ = densità dell'aria (kg/m^3), circa 1,2,

c_p = calore specifico dell'aria ($kJ/(kg \cdot ^\circ C)$), circa 1.000,

Δt = differenza di temperatura fra interno ed esterno.

Il ricambio d'aria aumenta il contenuto di umidità, in particolare in estate in alcune aree, quando l'aria deve essere deumidificata. La quantità di energia associata a questo scopo è data da:

$$q_l = Q h_{fg} \Delta W$$

dove:

q_l = calore latente (W),

h_{fg} = calore latente del vapor d'acqua alla temperatura di trattamento (J/kg), circa $2,34 \times 10^6$,

ΔW = umidità assoluta dell'aria esterna meno umidità assoluta dell'aria interna.

Infine i ricambi d'aria possono aumentare i carichi termici dell'edificio diminuendo le prestazioni dell'isolamento dell'involucro dell'edificio.

L'aria che fluisce attorno alle pareti può aumentare il coefficiente di scambio convettivo. Questo ultimo effetto è difficile da quantificare, ma andrebbe considerato.

La necessità del ricambio di aria è stato argomento di dibattito per oltre un seco-

lo e diverse logiche di indagine hanno prodotto standard completamente differenti, tuttavia lo scopo di cambiare l'aria è quello di rimuovere l'aria viziata e controllare l'umidità interna, la CO₂ e gli odori.

Il mantenimento di valori accettabili di CO₂ è il criterio più comune di valutazione delle portate di aria esterna. Un valore rappresentativo di produzione di CO₂ per una persona con un livello di attività sedentario è di circa 5,3 ml/s (19 litri/ora). Quando si ottiene una situazione stazionaria in uno spazio confinato, la concentrazione di CO₂ è data da:

$$C_i = C_o + F/Q$$

dove:

C_i = concentrazione di CO₂ all'interno

C_o = concentrazione di CO₂ all'esterno

F = generazione di CO₂, l/s

Q = ricambio d'aria esterna, l/s.

La portata di ventilazione richiesta a persona, per mantenere una concentrazione di CO₂ al limite prescritto C_L è data da:

$$Q \text{ (l/s)} = (0,0053 \cdot 100) / [C_L \text{ (\%)} - C_o \text{ (\%)}]$$

Un valore tipico di C_o è 0,03%. L'ASHRAE Standard 62 specifica i valori di concentrazione di CO₂ da mantenere per diverse tipologie di uso degli spazi. Lo standard contiene una richiesta base di 7,5 l/s di aria esterna a persona, basata su una concentrazione di aria interna di 0,1%, men-

Tabella 5.1
Alcuni inquinanti tipici

Esterno	
Aria	SO ₂ , NO, NO ₂ , O ₃ , idrocarburi, CO, particolato
Veicoli	CO, Pb, idrocarburi, particolato
Suolo	Radon
Interno	
<i>Materiali da costruzione</i>	
Cls, pietra	Radon
Legno truciolare	Formaldeide
Isolamenti	Formaldeide, fibra di vetro
Materiale ignifugo	Amianto
Adesivi	Composti organici
Pitture	Mercurio, composti organici
<i>Materiali contenuti</i>	
Apparecchi per la cottura e il riscaldamento	CO, NO, NO ₂ , formaldeide, particolato
Arredamenti	Composti organici
Occupanti	
Attività metabolica	H ₂ O, CO ₂ , NH ₃ , odori
Attività umane	
Fumo	CO, NO ₂ , composti organici, particolato, odori
Apparecchi spray	Fluorocarburi, cloruro di vinile
Prodotti per la pulizia	Composti organici, NH ₃ , odori

tre la maggior parte delle persone è in grado di sopportare concentrazioni fino a 0,5% senza avere particolari disagi. Il livello dello 0,1% fornisce un grado di sicurezza nei confronti di eventi come un maggiore affollamento, un più alto livello di attività, una ventilazione ridotta e il controllo degli odori.

Alternativamente lo Standard 62 può essere soddisfatto mantenendo le concentrazioni di alcuni inquinanti all'interno dei limiti prescritti, mediante la combinazione di: controllo delle sorgenti, trattamento dell'aria, e ventilazione. La **tabella 5.1** riporta la lista di alcuni inquinanti classificati secondo la sorgente che li produce. Il controllo alla sorgente e la rimozione, contrariamente alla diluizione con aria esterna, è la strategia adottata negli ambienti industriali.

[5.6] La ventilazione naturale

La ventilazione naturale e le infiltrazioni sono generate da differenze di pressione causate dal vento, dalla differenza di temperatura fra interno ed esterno (effetto camino) e dall'azione di apparecchiature, come sistemi di combustione e sistemi di ventilazione meccanica.

Quando il vento colpisce un edificio, crea una distribuzione di pressioni statiche sulla faccia esterna dell'edificio, che dipende dalla direzione del vento relativamente all'orientamento della superficie esterna dell'edificio. Questa distribuzione delle pressioni è indipendente dalla pressione interna dell'edificio p_i . Se sull'edificio non agiscono altre forze, se non c'è differenza di temperatura fra interno ed esterno, se non vi sono apparecchi di ventilazione in funzione, la differenza di pressione fra

interno ed esterno, ad una certa altezza, è data da:

$$\Delta p = p_o + p_w - p_i$$

dove:

Δp = differenza di pressione fra interno ed esterno

p_o = pressione statica nel flusso indisturbato

p_w = pressione del vento

p_i = pressione interna.

La pressione interna diminuisce linearmente con l'altezza con un andamento che dipende dalla temperatura interna.

Quando si verifica una differenza di temperatura fra interno ed esterno, si verifica un gradiente della differenza di pressione Δp_s e la relazione precedente diventa:

$$\Delta p = p_o + p_w - p_i + \Delta p_s$$

[5.6.1]

Effetto del vento

Le pressioni dovute all'azione del vento sono generalmente positive rispetto alla pressione statica nel flusso indisturbato, sulla faccia sopravvento dell'edificio, e negative sulla faccia sottovento. Le pressioni sulle altre facce sono positive o negative a seconda della direzione del vento e della forma dell'edificio.

La pressione del vento è data da:

$$p_v = C_p \rho v^2 / 2$$

dove:

p_v = pressione superficiale relativa alla pressione statica nel flusso indisturbato, Pa

ρ = densità dell'aria (kg/m^3), circa 1,2,

v = velocità del vento (m/s)

C_p = coefficiente di pressione superficiale, dipende dalla forma dell'edificio e dalla direzione relativa del vento.

I valori di C_p sono stati calcolati per diver-

se forme di edificio e per diverse direzioni del vento.

[5.6.2]

Effetto camino

Le differenze di temperatura fra interno ed esterno provocano differenze di densità e perciò differenze di pressione, che provocano le infiltrazioni. Durante la stagione del riscaldamento, l'aria più calda all'interno, risale l'edificio ed esce dall'edificio in prossimità della sua sommità. Quest'aria viene rimpiazzata da aria fredda esterna che penetra in prossimità della base. Nella stagione di raffreddamento, il flusso si inverte e generalmente diminuisce di intensità, poiché le differenze fra interno ed esterno sono più piccole. Qualitativamente la distribuzione delle pressioni negli edifici prende la forma riportata in figura 5.3.

L'altezza a cui le pressioni interna ed esterna sono uguali viene chiamata Piano di Pressione Neutra (NPL). Al di sopra di questo punto (nella stagione di riscaldamento), la pressione interna è maggiore che all'esterno; al di sotto di questo punto, la maggior pressione esterna causa un ingresso di aria dall'esterno. La diffe-

renza di pressione dovuta all'effetto camino all'altezza h è data da:

$$\Delta p_s = \rho_i g (h - h_{NPL}) (T_i - T_o)/T_o$$

dove:

Δp_s = differenza di pressione dovuta all'effetto camino, Pa,

ρ_i = densità dell'aria interna, $1,2 \text{ kg/m}^3$,

g = accelerazione di gravità, $9,81 \text{ m/s}^2$,

h = altezza del punto, m,

h_{NPL} = altezza del piano neutro, m,

T = temperatura assoluta, K,

i = interno,

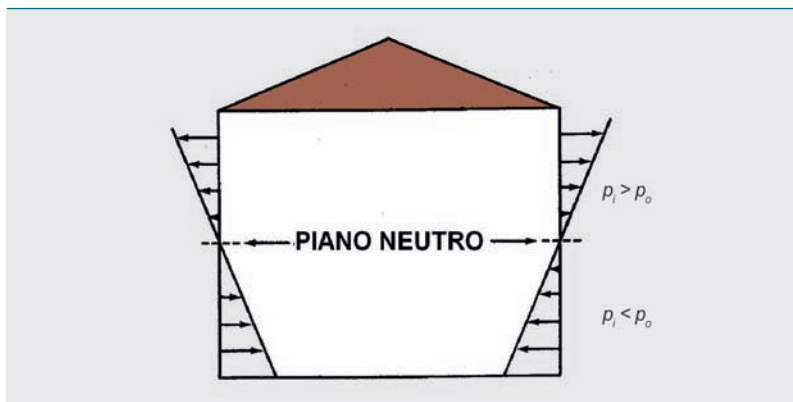
o = esterno.

Una stima utile delle dimensioni dell'effetto camino su un edificio mostra che la differenza di pressione è circa $0,4 \text{ Pa/(K}\cdot\text{m)}$. Questa stima trascura qualsiasi resistenza all'aria all'interno della struttura. Perciò, in un edificio ad un piano, con il soffitto a circa $2,70 \text{ m}$, una altezza del piano neutro a circa la metà, e una differenza di temperatura di circa 25 K , l'effetto camino provoca una differenza di pressione di circa $1,3 \text{ Pa}$, in un edificio di 20 piani, di circa 4 metri ciascuno, l'effetto camino provoca, nelle stesse condizioni una differenza di 40 Pa .

La collocazione del piano neutro (NPL), a velocità del vento nulla, dipende dalla distribuzione verticale delle aperture nell'involucro dell'edificio, la resistenza delle aperture al flusso dell'aria, e dalla resistenza al flusso d'aria interna all'edificio. Se le aperture sono uniformemente distribuite e non vi è resistenza interna, il piano neutro è localizzato a metà altezza. Se vi è una sola apertura, o un'apertura molto grande rispetto alle altre, il piano neutro (NPL) è in corrispondenza, o molto vicino, al centro di questa apertura.

La presenza di partizioni orizzontali, corpi scala, condotti, complica l'analisi della collocazione del NPL. La presenza di camini,

Fig. 5.3 La distribuzione delle pressioni in un edificio in situazione invernale



aperture sul tetto, sistemi di estrazione, innalza la posizione del NPL, l'accensione di un dispositivo di riscaldamento, in presenza di camini, innalza il NPL a volte oltre il tetto.

[5.6.3]

Combinazione delle diverse forze

Le differenze di pressione appena discusse vanno considerate in combinazione tra loro, sommandole e determinando il flusso totale attraverso ciascuna apertura dovuto all'azione della pressione totale. Poiché il flusso attraverso queste aperture non è linearmente correlato alle differenze di pressione, le forze agenti devono essere combinate e poi calcolata la portata totale; non è invece corretto sommare i flussi che risultano separatamente dalle diverse correlazioni.

La figura 5.3 mostra qualitativamente la somma delle forze agenti su un edificio con aperture uniformemente distribuite sull'altezza e senza particolari ostacoli al movimento interno dell'aria.

Nella figura 5.4.a, con l'aria interna più

calda di quella esterna, e le differenze di pressione causate solamente dalle forze termiche, il NPL è a circa metà altezza, con un ingresso attraverso le aperture più basse e le uscite attraverso le aperture più alte. Un camino o un sistema di estrazione meccanica sposta la linea della pressione interna verso sinistra, innalzando il NPL. Un eccesso di ingresso di aria esterna a confronto di quella che esce lo sposterebbe verso il basso.

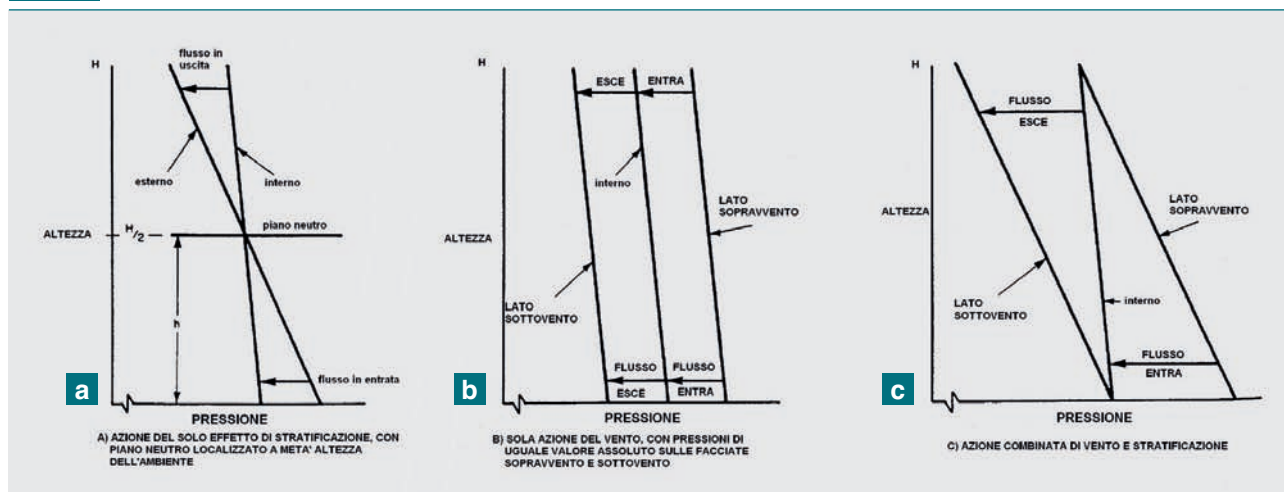
La figura 5.4.b mostra un andamento qualitativo delle differenze di pressione causate solo dal vento, con effetti sulla faccia sopravvento e sottovento uguali ma con segno opposto.

Quando entrambe le forze agiscono contemporaneamente le pressioni dovute ad entrambi gli effetti si sommano, determinando la pressione totale attraverso l'involucro dell'edificio.

La figura 5.4.c mostra la combinazione degli effetti, da cui si nota come la forza del vento ha solo bilanciato le forze termiche, causando una differenza di pressione nulla all'estremo superiore della fac-

Fig. 5.4

Effetto combinato di diverse forze



ciata sopravvento e all'estremo inferiore della facciata sottovento.

Sono state proposte diverse regole per combinare le portate dovute alle diverse componenti delle forze di pressione, un modello proposto è riportato nella formula seguente:

$$Q_{ws} = (Q_w^2 + Q_s^2)^{0,5}$$

dove:

Q_{ws} = portata totale,

Q_w = portata dovuta al vento,

Q_s = portata dovuta all'effetto camino.

[5.6.4]

Flussi d'aria attraverso le aperture

L'equazione principale per il calcolo della portata d'aria attraverso un'apertura è la seguente:

$$Q = C_D A (2\Delta p / \rho)^{1/2}$$

dove:

Q = portata d'aria (m^3/s),

C_D = coefficiente di perdita di carico della apertura,

A = area dell'apertura (m^2),

ρ = densità dell'aria (kg/m^3), circa 1,2,

Δp = differenza di pressione attraverso l'apertura (Pa).

Il coefficiente di perdita di carico C_D è un numero (variabile tra 0 e 1) adimensionale che dipende essenzialmente dalla geometria e dalle dimensioni dell'apertura e dalla velocità del flusso.

[5.6.5]

Portate d'aria per ventilazione naturale

La ventilazione naturale può efficacemente controllare sia la temperatura che la concentrazione di inquinanti, particolarmente nei climi temperati. Il controllo della temperatura mediante ventilazione naturale è spesso l'unico sistema di raffre-

scamento quando non esistono sistemi di condizionamento meccanico.

La localizzazione, la sistemazione e il controllo delle aperture per la ventilazione dovrebbero sfruttare le forze dovute al vento e alle differenze di temperatura per ottenere le condizioni di ventilazione desiderate in tutto l'edificio.

Le aperture per la ventilazione naturale includono: finestre, ventilatori a soffitto, camini dotati di regolazione.

[5.6.6]

Portata d'aria dovuta al vento

Il flusso d'aria in ingresso attraverso queste aperture, provocato dal vento, può essere espresso mediante la seguente equazione:

$$Q = C_v A V$$

dove:

Q = portata d'aria (m^3/s),

A = area dell'apertura,

C_v = efficacia dell'apertura (0,5-0,6 per venti perpendicolari all'apertura, 0,25-0,35 per venti diagonali),

V = velocità del vento.

Le aperture per l'ingresso dell'aria andrebbero localizzate perpendicolarmente alla direzione dei venti prevalenti.

Le localizzazioni più opportune delle aperture di uscita dell'aria invece sono:

1. sulla facciata sottovento,
2. sul soffitto, in una zona di depressione,
3. su una faccia adiacente alla faccia sopravvento, in una zona di depressione,
4. con un ventilatore a soffitto,
5. con dei camini.

5.6.7

Portata d'aria dovuta ad effetti termici

Il flusso dovuto all'effetto camino può essere calcolato come segue:

$$Q = KA [2g \Delta h_{NPL} (T_i - T_o)/T_i]^{1/2}$$

dove:

Q = portata d'aria m³/s,

A = area dell'apertura,

K = coefficiente di perdita di carico dell'apertura,

Δh_{NPL} = altezza dall'apertura più bassa al NPL.

Questa equazione si applica quando $T_i > T_o$. Se $T_i < T_o$ l'equazione diventa:

$$Q = KA [2g \Delta h_{NPL} (T_o - T_i)/T_o]^{1/2}$$

Se l'edificio ha più di un'apertura, le aree di ingresso e di uscita sono considerate uguali. Calcolare Δh_{NPL} è difficile: se una sola finestra o una sola porta rappresentano il 90% delle aperture di un ambiente, il NPL è a circa la metà della loro altezza, e Δh_{NPL} è pari a alla metà dell'altezza. Per questa condizione il flusso è bidirezionale, nella metà inferiore entra nell'ambiente, nella metà superiore esce. In questo caso K può essere calcolato con la seguente formula:

$$K = 0,40 + 0,0045 \cdot |T_i - T_o|$$

Se invece vi sono diverse aperture il flusso si può considerare unidirezionale, e K

vale 0,65. I maggiori flussi per unità di area si ottengono quando l'area di ingresso è uguale a quella di uscita. Aumentare l'area di ingresso o quella di uscita aumenta il flusso, ma non in proporzione all'area aggiunta. Quando le aree di ingresso e uscita sono diverse, usare l'area minore nelle equazioni, e aggiungere un aumento percentuale secondo quanto indicato in figura 5.5.

[5.6.8]

Linee guida per la ventilazione naturale

Alcune linee guida generali andrebbero osservate per progettare la ventilazione naturale. Alcune di queste possono essere in contrasto con altre strategie di controllo climatico, come l'orientamento e l'adozione dei sistemi di ombreggiamento per minimizzare i guadagni solari, o altre considerazioni di progetto.

1. Nei climi caldi e umidi, massimizzare la velocità dell'aria nelle zone occupate. Nei climi caldi asciutti massimizzare il flusso d'aria attraverso l'edificio per raffreddare le strutture, particolarmente di notte, quando le temperature sono basse.
2. Sfruttare la topografia e la conformazione del terreno nei dintorni dell'edificio per aumentare l'effetto delle brezze e per evitare barriere al vento.
3. La forma dell'edificio deve permettere un'esposizione ottimale alle brezze.
4. Usare elementi architettonici, come aggetti, parapetti, quinte, per aumentare il flusso d'aria entrante nell'edificio.
5. La facciata più lunga dell'edificio e la maggior parte delle aperture andrebbero orientate verso le brezze estive prevalenti. Se non c'è una direzione prevalente le aperture devono suffi-

Fig. 5.5 Aumento del flusso d'aria in relazione alle aree di apertura in ingresso ed uscita



cienti a garantire ventilazione a prescindere dalla direzione del vento.

6. Le finestre devono essere posizionate in zone con pressioni opposte. Due aperture su facce opposte aumentano la ventilazione. Aperture su facce adiacenti costringono l'aria a cambiare direzione, fornendo ventilazione ad un'area maggiore. I benefici del posizionamento delle aperture dipendono dalla localizzazione relativa delle uscite rispetto alla direzione del flusso in entrata nell'edificio.
7. Se una stanza ha un solo muro esterno, una migliore ventilazione si ottiene con due finestre a grande distanza fra loro.
8. Se le aperture sono alla stessa altezza e vicino al soffitto, molto del flusso può non attraversare la zona occupata e non contribuire alla diluizione dei contaminanti in quella zona.
9. L'effetto camino richiede il distanziamento verticale delle aperture: maggiore è la distanza fra le aperture, maggiore è la ventilazione ottenuta.
10. Aperture in prossimità del NPL sono poco efficaci per la ventilazione indotta da fenomeni termici. Se l'edificio ha solo un'apertura, il NPL tende a spostarsi verso quel livello, questo fatto riduce le pressioni sulla sezione dell'apertura.
11. A parità di area delle aperture, si ottengono flussi maggiori quando le sezioni di ingresso e di uscita hanno la stessa area. Una sezione di ingresso minore di una di uscita aumenta la velocità di ingresso, Una sezione di uscita più piccola dell'ingresso crea una velocità più bassa ma più uniforme in tutto l'edificio.
12. Aperture di dimensioni maggiori di quelle che risultano dai calcoli sono da consigliare quando si prevedono forti affollamenti o quando il clima è molto caldo.
13. Finestre orizzontali sono generalmente preferibili a finestre quadrate o verticali, infatti producono un maggior flusso d'aria su un più largo spettro di direzioni del vento, e sono più efficaci nelle zone in cui il vento cambia spesso di direzione.
14. Le finestre devono essere apribili e raggiungibili dagli occupanti.
15. Le aperture di ingresso non andrebbero ostruite da oggetti o partizioni. Tramezzature possono essere utilizzate per distribuire il flusso o per reindirizzarlo, ma non dovrebbero restringere la sezione utile fra ingresso ed uscita.
16. Camini o corpi scala aperti possono essere utilizzati per aumentare l'effetto camino.

Alternativamente lo Standard 62 può essere soddisfatto mantenendo le concentrazioni di alcuni inquinanti all'interno dei limiti prescritti, mediante la combinazione di: controllo delle sorgenti, trattamento dell'aria, e ventilazione.

[5.7] **La ventilazione ibrida**

La ventilazione naturale e i sistemi di raffrescamento passivo sono tecnologie sostenibili, energeticamente efficienti, pulite e, a patto che siano ben controllate, sono in genere ben accette dagli utenti e dovrebbero essere quindi incoraggiate ogni qualvolta questo sia possibile. Sfortunatamente la progettazione di un sistema efficiente di ventilazione si trova spesso davanti ad un bivio: usare un sistema di ventilazione naturale o un sistema di ventilazione meccanico? Questo fatto ha ostacolato un più largo

uso di tecnologie sostenibili poiché in alcuni casi non si riesce a garantire un adeguato standard di funzionamento in tutte le condizioni, facendo affidamento solo sui sistemi di ventilazione naturale. Nella maggioranza dei casi, infatti, si otterrebbero migliori prestazioni con una combinazione di sistemi, da utilizzare in alternativa o in contemporanea, a seconda delle condizioni ambientali, del tipo di edificio e dell'uso e dalla funzione richiesta al sistema di ventilazione.

Lo scopo principale di un sistema di ventilazione è garantire una qualità dell'aria accettabile e una gradevole temperatura dell'aria. I sistemi di ventilazione ibrida possono essere definiti come sistemi che garantiscono condizioni ambientali confortevoli utilizzando sia sistemi naturali che quelli meccanici, ma utilizzando le diverse caratteristiche dei due sistemi in tempi diversi del giorno, della stagione o dell'anno. Si tratta di sistemi nei quali le forze naturali e meccaniche sono combinate in un sistema bimodale e dove il modo di operare varia secondo la stagione e anche nell'arco della giornata. Il modo di funzionamento viene prescelto di volta in volta in base alle condizioni esterne e tende a massimizzare i vantaggi che queste possono fornire.

La differenza principale tra un sistema ibrido ed un sistema tradizionale sta nel fatto che il primo è un sistema intelligente che è in grado di passare dal sistema naturale a quello meccanico automaticamente al fine di minimizzare i consumi energetici.

Indicazioni progettuali

Gli edifici con sistemi di ventilazione ibrida sono spesso dotati di altre tecnologie sostenibili: daylighting, raffrescamento passivo e naturale, riscaldamento solare passivo ecc., e una ottimizzazione energe-

tica richiede un approccio integrato nella progettazione dell'edificio e dei suoi sistemi naturali e meccanici. L'approccio integrato alla progettazione richiede la formazione di squadre di architetti ed ingegneri, il processo progettuale diventa iterativo, dallo stadio di sviluppo concettuale fino alla progettazione esecutiva. L'uso dell'energia nell'edificio e le dimensioni delle apparecchiature meccaniche possono quindi venire ridotte senza l'impiego di tecnologie particolarmente sofisticate, ma anche solo attraverso una integrazione efficace della progettazione architettonica e dei sistemi meccanici.

La ventilazione ibrida è strettamente dipendente dalle condizioni climatiche esterne, dal microclima attorno all'edificio e dal comportamento termico dell'edificio stesso. È perciò necessario tenere in considerazione questi fattori fin dall'inizio della progettazione. È anche importante che aspetti quali il potenziale raffrescamento notturno ottenibile, il rumore e l'inquinamento presenti nei dintorni dell'edificio, la sicurezza e la prevenzione degli incendi, vengano presi in considerazione. La progettazione della localizzazione e del dimensionamento delle aperture, così come i dispositivi necessari per migliorare le caratteristiche della ventilazione, quali camini solari o torrioni, devono tener conto delle strategie di ventilazione individuate sia per le ore diurne che per quelle notturne. Sistemi passivi di riscaldamento o raffrescamento possono essere integrati, così come i sistemi di filtraggio e di recupero del calore.

È necessario prevedere delle strategie di controllo adeguate, che consentano il giusto grado di interazione dell'utente. Infine, è necessario progettare i sistemi meccanici che consentano di ottenere il giusto grado di comfort. Questi dispositivi pos-

sono andare dal semplice ventilatore per l'estrazione dell'aria viziata, fino a sistemi di ventilazione bilanciati o a sistemi di condizionamento veri e propri. Le strategie di controllo dell'intero sistema devono garantire condizioni di comfort ottimale con consumi energetici ottimali.

La ventilazione ibrida è basata su una filosofia di progettazione non convenzionale e l'aspettativa riguardo alle *performance* ottenibili non possono essere comparabili a quelle ottenibili con impianti meccanici. Le analisi dei costi andrebbero fatte sulla base del ciclo di vita del sistema e non sulla base del costo iniziale.

[5.8] Sistemi per il raffrescamento passivo

Le strategie di raffrescamento passivo evidenziate sul diagramma bioclimatico di Givoni si possono ottenere con diversi sistemi. È importante ricordare alcune considerazioni che Givoni fa rispetto alla relazione di interdipendenza fra l'ampiezza dell'escursione di temperatura e la pressione di vapor d'acqua per una migliore comprensione delle strategie da utilizzare in funzione delle condizioni climatiche esterne.

La possibilità di abbassare la temperatura interna di un edificio al di sotto della temperatura esterna aumenta con l'ampiezza dell'escursione della temperatura esterna, l'entità della escursione di temperatura esterna è comunque inversamente proporzionale alla pressione di vapore. Ciò significa che zone con elevati valori di pressione di vapore avranno escursioni termiche minori, e una maggiore difficoltà nell'applicazione di sistemi di raffrescamento passivo. L'interrelazione

fra le due variabili si approssima quantitativamente con la seguente relazione

$$DT \text{ (}^\circ\text{C)} = 26 - 0,83 \text{ pv (mm Hg)}$$

Per elevati valori di umidità è necessario utilizzare sistemi di ventilazione, questo permette di migliorare la sensazione termica dell'individuo, anche se in genere si ottiene una riduzione delle temperature interne molto limitata, poiché come detto ad elevate umidità corrispondono ridotte escursioni di temperatura.

[5.8.1]

Il reirraggiamento notturno

Il raffrescamento per reirraggiamento è basato sul principio fondamentale che ogni corpo caldo emette energia termica sotto forma di radiazione elettromagnetica verso corpi più freddi verso i quali si affaccia.

Il sole irradia calore (in forma di radiazioni a corta lunghezza d'onda) verso la terra durante il giorno, e la terra reirraggia (in forma di radiazioni a lunghezza maggiore) verso il cielo. Le dispersioni per effetto radiante avvengono sia di giorno che di notte, soprattutto nell'emisfero nord, gli strati più alti dell'atmosfera sono abbastanza freddi durante il giorno, da fornire un efficace pozzo di calore.

Durante il giorno la radiazione solare assorbita contrasta l'effetto raffreddante del reirraggiamento.

Ogni corpo emette energia sotto forma di energia radiante, questo fenomeno è regolato dalla legge di Stefan-Boltzmann

$$W = \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

ove σ (costante di Stefan-Boltzmann) è pari a $5,68 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4\text{)}$. Per questo fenomeno la superficie terrestre disperde calore verso la volta celeste, quando la sua temperatura superficiale è inferiore

alla temperatura apparente della volta del cielo.

Il raffrescamento per reirraggiamento è più forte nelle notti con cielo sereno, ma viene ridotto dalla presenza di particelle, come vapor d'acqua, anidride carbonica e polvere, nell'atmosfera. Poiché queste particelle assorbono e riemettono le radiazioni a lunga lunghezza d'onda, il flusso netto di calore radiante uscente da ogni oggetto sulla terra è uguale alla radiazione emessa da esso verso il cielo, meno quella riemessa dall'atmosfera.

Questa differenza nelle quantità di radiazione determina il potenziale massimo di raffrescamento radiativo. La radianza proveniente dal cielo sereno tende ad essere bassa nella regione spettrale compresa fra 8 e 13 μm . Questa grande trasparenza alla radiazione è nota come "finestra atmosferica" infrarossa.

L'involucro di un edificio, che assorbe calore durante il giorno, emette questo calore verso il cielo durante la notte. Siccome una superficie orizzontale è il miglior radiatore verso il cielo, il tetto di un edificio costituisce il radiatore più efficace.

In una notte senza nuvole la terra e qualsiasi oggetto caldo possono quindi raffreddarsi per dissipazione di radiazione infrarossa verso lo spazio: è quindi possibile raffreddare una massa d'acqua o un qualsiasi oggetto, fino a temperature anche considerevolmente inferiori alla temperatura ambiente, semplicemente lasciandolo esposto al cielo notturno e isolandolo opportunamente dagli altri corpi con cui si trovi a contatto. Il processo di raffreddamento di questi corpi è comunque ostacolato dal continuo scambio convettivo con l'aria ambiente, che tende a riequilibrare le condizioni termiche allorché la temperatura dell'oggetto da raffreddare scende al di sotto della temperatura dell'aria.

Esperienze condotte da Givoni hanno mostrato la possibilità di raggiungere temperature da 4 a 7 °C inferiori alla temperatura ambiente con sistemi di reirraggiamento notturno. La variabilità dei risultati dipende dalla velocità del vento, in quanto per velocità del vento maggiori, si hanno maggiori scambi convettivi fra aria ambiente e superficie radiante, con conseguente innalzamento della temperatura di quest'ultima.

Di tutte le superfici di un edificio, il tetto è quella maggiormente esposta alla possibilità di scambiare energia radiante con il cielo.

La copertura del cielo da parte delle nubi ostacola la dispersione di energia radiante verso lo spazio, riducendosi fino al 15% nel caso di cielo completamente coperto. I sistemi di raffrescamento per reirraggiamento notturno utilizzano generalmente delle vasche o dei recipienti pieni d'acqua, posizionati sul tetto degli edifici. Le vasche durante il giorno vengono coperte da pannelli isolanti e durante la notte vengono scoperte per permettere il raffreddamento dell'acqua per scambio radiativo.

Il tetto dell'edificio in questo modo, raffreddandosi di notte, e restando isolato di giorno dall'ambiente esterno, può assorbire il calore in eccesso proveniente dall'interno dell'edificio durante il giorno (Sistema Skytherm, Sistema Living System).

Givoni ha sperimentato anche un sistema di raffrescamento che si comporta inversamente ad un collettore ad aria: l'aria viene fatta passare attraverso una intercapedine sotto una lastra sottile di metallo ondulato esposta all'azione della volta celeste. L'aria in tal modo si raffredda e quindi viene fatta passare all'interno di un letto di rocce che accumula il freddo.

[5.8.2]

Il raffrescamento evaporativo

Il principio di raffrescamento per evaporazione era già noto molti secoli fa, presso i popoli delle regioni calde e secche del Medio Oriente. La limitazione del suo uso era data fundamentalmente dall'insufficienza d'acqua in quei climi aridi.

Sono molti i casi in cui questo principio di climatizzazione in ambienti esterni è stato applicato, per esempio nei giardini dell'Alhambra, a Granada (Spagna), dove fonti d'acqua servivano per raffrescare l'aria evaporativamente.

Nel diagramma psicrometrico che segue è riportata la zona di valori di T e UR in cui è possibile applicare questo principio. Il limite massimo di applicabilità è costituito dalla pressione di vapore pari a 17 mmHg.

Quando si fa scorrere una corrente d'aria secca e calda sulla superficie di uno specchio d'acqua o attraverso un materiale inumidito, l'acqua evapora, sottraendo all'aria la quantità di energia necessaria (2.256

kJ/kg). In questo modo si produce una riduzione della temperatura dell'aria e un aumento del suo contenuto di umidità.

A seconda della quantità di umidità assorbita il raffrescamento evaporativo viene classificato in:

- **Raffrescamento evaporativo diretto** dell'aria di ventilazione. L'aria di ventilazione passa su una superficie umida (per esempio uno specchio d'acqua o una fontana) e si raffredda per evaporazione. La diminuzione della temperatura di bulbo secco (DBT) è accompagnata da un aumento del contenuto di umidità. Sul diagramma psicrometrico la evaporazione diretta è caratterizzata da una traslazione lungo una curva a temperatura di bulbo umido (WBT) costante (linea AB in figura 5.6).

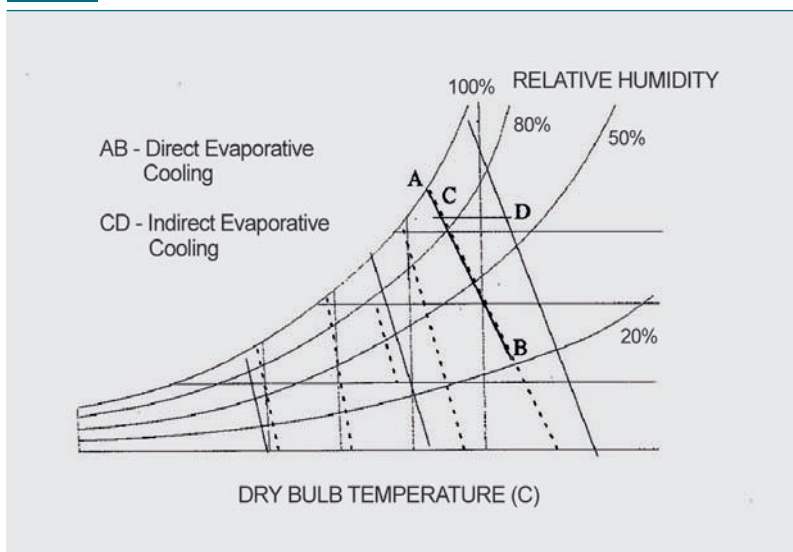
- **Raffrescamento evaporativo indiretto.** L'evaporazione avviene su di una superficie che viene raffreddata durante questo processo. L'aria che viene in contatto con la superficie fredda è quindi raffrescata senza aumentare il suo contenuto di umidità. La sua rappresentazione sul diagramma psicrometrico è data dalla linea a umidità assoluta costante (CD).

L'efficacia del processo di evaporazione dipende dalla temperatura dell'aria e della superficie umida, dal contenuto di umidità dell'aria, e dalla velocità dell'aria sulla superficie umida.

Il raffrescamento evaporativo è efficace soprattutto nei climi aridi. Il raffrescamento evaporativo diretto è considerato efficace in località con temperatura di bulbo umido massime fra 22 e 24 °C (corrispondenti a DBT fra 42 e 44 °C).

Si consiglia di adottare sistemi di raffrescamento evaporativo indiretto nei climi con WBT di 25 °C e con DBT massima di 46 °C.

Fig. 5.6 Raffrescamento evaporativo sul diagramma psicrometrico



[5.8.3]

Il raffrescamento di spazi esterni

Gli spazi esterni possono essere classificati in diversi modi dal punto di vista delle scelte da compiere per il raffrescamento e dell'interazione con le condizioni all'interno di edifici adiacenti allo spazio oggetto di studio.

Una prima distinzione andrebbe fatta fra spazi esterni "liberi" che non sono annessi ad edifici e spazi esterni che sono adiacenti a edifici.

Gli spazi esterni adiacenti possono interagire con l'edificio stesso, sia modificandone le condizioni climatiche esterne, che utilizzando il sistema di condizionamento dell'edificio stesso per modificare le proprie condizioni.

Fra gli spazi adiacenti ad edifici va fatta una distinzione, dal punto di vista del controllo climatico: fra spazi non circondati da barriere fisiche (per esempio muri), e quelli circondati da muri alti almeno due metri. Nel primo caso la penetrazione del vento ridurrà il potenziale di abbassamento della temperatura, se confrontato con uno spazio confinato.

Fra gli spazi "liberi" si può fare un'altra distinzione:

- aree estese, con la dimensione minore di circa 8 metri, che chiameremo zone di riposo
- zone strette e lunghe, che chiameremo sentieri.

Il grado di modificazione del clima che si può ottenere in queste due tipologie è abbastanza differente, e alcuni dei sistemi che si possono applicare alle zone di riposo non sono applicabili ai sentieri.

Quando si considera il progetto di uno spazio esterno in una regione calda, la prima decisione da prendere è se limitarsi all'ombreggiamento dell'area e perciò ridurre il carico da calore radiante, oppu-

re abbassare anche il livello di temperatura dell'aria al di sotto del livello della temperatura ambiente. Abbassare il livello della temperatura in uno spazio esterno comporta sempre l'utilizzo di alcune forme di raffrescamento evaporativo, per cui è necessario procurarsi una sorgente d'acqua.

Un prerequisito per abbassare la temperatura dell'aria in uno spazio aperto è ridurre al minimo il passaggio del vento all'interno della zona interessata. Una volta che uno spazio esterno è parzialmente isolato dagli spazi circostanti, si possono applicare alcune strategie di raffrescamento per abbassare la temperatura in quell'area.

L'ombra come prerequisito per il raffrescamento di uno spazio esterno

Prima di considerare qualsiasi mezzo per abbassare sia la temperatura dell'aria che la temperatura radiante di uno spazio esterno, bisogna prevedere che lo spazio in oggetto possa essere protetto dal sole. Ci sono due ragioni per la considerare importante l'ombreggiamento: la prima è che la protezione dalla radiazione solare ha un maggiore effetto fisiologico nel ridurre lo stress termico, rispetto al ridurre le temperature in uno spazio esterno. La seconda ragione è che l'ombreggiamento non implica consumi energetici o idrici, come invece comportano quasi tutti i sistemi che possono abbassare la temperatura in uno spazio esterno.

Anche nel caso in cui l'intera area trattata sia coperta da elementi schermanti, la radiazione solare può entrare lateralmente specialmente nelle ore mattutine e pomeridiane. tanto più stretta è la zona ombreggiata, tanto maggiore è l'effetto di questa penetrazione laterale della

radiazione solare in estate, specialmente se l'area trattata si estende in direzione N-S.

Relazioni fra il raffrescamento fisiologico per ventilazione e il raffrescamento dell'aria esterna

Occupandoci della questione del raffrescamento di spazi esterni può insorgere un conflitto fra due approcci progettuali:

- a. ottenere il comfort per mezzo dell'effetto raffrescante del vento,
- b. abbassare la temperatura in uno spazio esterno.

Qualsiasi abbassamento diurno della temperatura in uno spazio esterno richiede che sia minimizzata la penetrazione del vento (più caldo). Il conflitto fra i due approcci esiste poiché la riduzione della penetrazione del vento in uno spazio aperto si ottiene generalmente mediante l'uso di schermi fissi, siano essi siepi o pannelli solidi.

Il blocco del vento non può essere rimosso quando si rendesse necessario, come si può fare in un edificio aprendo o chiudendo le finestre. Perciò una volta che uno spazio viene semi chiuso mediante muri, arbusti, terrapieni ecc., l'effetto fisiologico raffrescante del vento viene a mancare anche quando sarebbe desiderabile. In regioni umide l'approccio migliore è quello di sfruttare la ventilazione, mentre nelle zone aride la scelta tra le due opzioni dipende dalla temperatura massima che si può verificare. In luoghi in cui la temperatura massima è inferiore a 30 °C, il vento può essere molto efficace come elemento di comfort.

In queste regioni, ombreggiare lo spazio, lasciandolo aperto al vento, può essere l'approccio migliore per minimizzare lo stress termico. In posti in cui le temperature diurne sono maggiori, l'umidità è

bassa (inferiore al 50%) e vi è disponibilità di acqua, può essere preferibile abbassare la temperatura e bloccare il vento.

Come abbassare le temperature superficiali in aree ombreggiate esterne

Si possono adottare due trattamenti per abbassare le temperature medie delle superfici in un ambiente esterno. Essi sono basati, direttamente o indirettamente, sull'effetto evaporativo:

- abbassare le temperature di elementi che circondano l'area,
- raffrescare il pavimento dell'area.

Per minimizzare il carico dovuto a calore radiante, proveniente dalla radiazione solare riflessa, o riemessa sotto forma di radiazione infrarossa, dal terreno circostante, l'area raffrescata andrebbe circondata da superfici che possano essere mantenute a temperature vicine o inferiori a quelle dell'area trattata.

Questi elementi possono essere muri, alte siepi o terrapieni.

Allorché gli elementi che circondano l'area trattata sono piante o terrapieni ricoperti di vegetazione, le loro temperature superficiali seguono strettamente la temperatura dell'aria, e l'eccesso di calore radiante è minimizzato. In ogni caso, se le superfici che circondano l'area trattata, poste in ombra, possono essere mantenute umide, le loro temperature superficiali saranno molto vicine alla temperatura di bulbo umido corrispondente alla temperatura esterna, che, se l'umidità relativa è bassa, può risultare significativamente inferiore alla temperatura dell'aria. In pratica, se gli elementi circostanti consistono in muri, è possibile prevedere un film d'acqua che scorra sulla loro superficie, ottenendo delle superfici che si raffrescano per evaporazione.

Raffrescamento del pavimento nelle zone di attesa

Anche se una zona è efficacemente ombreggiata, la temperatura del terreno potrebbe talvolta risultare più elevata della temperatura esterna a causa della penetrazione parziale di radiazione solare.

Raffrescare il pavimento di una zona ombreggiata relativamente larga, può perciò abbassare la temperatura radiante cui le persone sono esposte in quello spazio, sebbene l'effetto sulla temperatura dell'aria nella zona occupata sia piuttosto ridotto.

Raffrescare il pavimento di una certa zona ha effetto solo se le dimensioni dell'area sono abbastanza larghe da permettere una modifica significativa della temperatura media radiante. Ciò significa che la dimensione minore (la larghezza) dell'area non deve essere inferiore ad un minimo fissato, cioè circa 8 o 10 metri. Di conseguenza non ha senso abbassare la temperatura superficiale del pavimento in sentieri stretti, laddove l'effetto sulla temperatura media radiante sarebbe minimo.

[5.8.4]

Raffrescamento con il terreno

Il concetto di raffrescamento con il terreno, o Ground Cooling, è basato sulla dissipazione del calore in eccesso da un edificio verso il terreno, che durante le stagioni calde ha una temperatura inferiore a quella dell'aria. Questa dissipazione può essere ottenuta sia per diretto contatto di una porzione importante dell'involucro dell'edificio con il terreno, sia immettendo nell'edificio aria che sia stata fatta circolare preventivamente sotto terra, per mezzo di scambiatori di calore Aria-Terra.

Scambiatori di calore Aria-Terra

Uno scambiatore di calore Aria-Terra è costituito da un tubo interrato ad una certa

profondità, attraverso il quale l'aria circola per mezzo di ventilatori elettrici o mediante sistemi di tiraggio naturali. Questa tecnica è stata sviluppata recentemente, basandosi su concetti simili sfruttati dai persiani e dai Greci nell'era pre-cristiana. L'aria viene aspirata dall'esterno e immessa nell'edificio attraverso un tubo interrato. In estate, poiché la temperatura del suolo è più bassa di quella dell'aria esterna, la temperatura dell'aria all'uscita dal tubo è più bassa che all'ingresso. Il contrario avviene in inverno.

Gli scambiatori Aria-Terra possono essere applicati sia in un circuito aperto che in un circuito chiuso. In un circuito chiuso, sia l'ingresso che l'uscita dell'aria sono localizzati nell'edificio. Nelle moderne applicazioni si usano tubi di plastica, di cemento e di metallo; l'aria esterna, o quella interna nel caso dei circuiti chiusi, si raffresca prima di essere immessa nell'edificio.

La diminuzione di temperatura osservabile dipende dalla temperatura d'ingresso, dalla temperatura del terreno alla profondità dello scambiatore, dalla conduttività termica del tubo e dalla diffusività termica del suolo, così come dalla velocità dell'aria e dalle dimensioni del tubo. Per ottimizzare questi sistemi sono necessari calcoli dettagliati. Come valore limite per l'applicazione di questi sistemi, la temperatura del terreno attorno al tubo deve essere di almeno 5-6 °C inferiore a quella dell'aria.

Principi teorici

Il principio del ground cooling è direttamente correlato alle proprietà termiche del terreno. Il terreno ha delle proprietà termiche che gli conferiscono una notevole inerzia termica. I meccanismi del trasferimento del calore nel suolo sono, in ordine d'importanza: conduzione, convezione

e irraggiamento. La conduzione avviene attraverso il suolo, ma la gran parte del flusso di calore avviene attraverso i costituenti solidi e liquidi. La convezione è di solito trascurabile, con l'eccezione di rapida infiltrazione d'acqua a seguito di irrigazione del terreno o di forti piogge.

L'irraggiamento è importante solo nei terreni molto secchi, con larghi pori, quando la temperatura è alta. Perciò il parametro principale che influenza il comportamento termico del terreno sono la conduttività termica e la capacità termica. La capacità termica e la conducibilità termica possono essere espresse congiuntamente per mezzo della diffusività termica:

$$\alpha = \lambda / \rho c$$

dove λ è la conduttività termica, ρ la densità e c il calore specifico del suolo. La diffusività termica (α) determina il comportamento termico del suolo.

Dalla definizione di diffusività e dal comportamento del mezzo in questione si conclude che il calore tende ad immagazzinarsi nel terreno piuttosto che a propagarsi in esso; le escursioni giornaliere della temperatura esterna hanno piccole profondità di estinzione e perciò, al di sotto di 1 m di profondità, la temperatura del terreno non è influenzata. Per le variazioni annuali questi valori sono circa 20 volte maggiori. Questo è il principio fisico su cui si basa il *ground cooling*.

[5.8.5]

La ventilazione notturna

La ventilazione diurna introduce nell'edificio aria fresca esterna, che è necessaria per mantenere accettabile la qualità dell'aria interna. In aggiunta alla quantità richiesta per questo scopo, la ventilazione può garantire un sistema di raffrescamento allorché la temperatura dell'aria

esterna è più bassa di quella interna.

In alternativa la ventilazione può continuare anche di notte, con risultati positivi nella riduzione dei carichi per raffrescamento dell'edificio.

Durante la notte le temperature esterne sono in genere più basse di quelle interne, questo fatto può essere sfruttato per rimuovere una certa quantità di calore accumulata nelle strutture durante il giorno. Il movimento dell'aria aumenta la dissipazione di questa energia dalle strutture e dai materiali che costituiscono l'edificio, l'aria calda che esce dall'edificio si diffonde nell'aria esterna più fredda.

Questo processo continua durante tutta la notte e il risultato è una temperatura inferiore dell'ambiente e delle strutture interne la mattina seguente, allorché ricomincia il ciclo di aumento della temperatura. Di conseguenza, la mattina, gli occupanti entrano in un ambiente più freddo, ciò si traduce in un minor dispendio di energia negli edifici climatizzati e ventilati meccanicamente.

Il successo della ventilazione notturna dipende dalla differenza di temperatura fra interno ed esterno. Quanto più bassa è la temperatura esterna, tanto più efficiente è la ventilazione notturna. È anche necessario ottenere una distribuzione efficace dell'aria esterna negli spazi interni. Il calore estratto per convezione dalla massa dell'edificio aumenta con la velocità dell'aria che lambisce le strutture.

Questo processo può essere facilitato con l'uso di ventilatori da soffitto, che aumentano la velocità dell'aria interna aumentando di conseguenza i coefficienti di scambio convettivo tra le pareti e l'aria. Questa tecnica può essere usata per aumentare le portate d'aria fino a 1,5 m³/min/m². La ventilazione notturna può essere sfruttata con successo negli edifici con struttura

pesante, nei climi con elevate escursioni giornaliere, in edifici con elevate capacità termiche la temperatura dell'aria interna può risultare molto vicina alla media delle temperature esterne. Edifici in cui si applica la ventilazione notturna sono spesso dotati di particolari finestre con aperture nella parte alta della finestra. Per ragioni di sicurezza e di privacy, le finestre al piano terra rimangono chiuse.

In un caso studio, un edificio situato ad Atene è stato ventilato dalle 21:00 alle 7:00 con portate variabili da 2 a 8 ricambi/ora a passi di 2 ricambi/ora. I risultati hanno mostrato che la riduzione di temperatura interna massima è stata di 1 K. La diminuzione della temperatura interna è stata più significativa in giugno e agosto che non in luglio, poiché la temperatura esterna è più alta in quel periodo. Più interessante, accanto ai dati sulle temperature massime raggiunte negli edifici, è però l'analisi sui potenziali risparmi energetici. Uno studio ha in particolare evidenziato che la ventilazione notturna può ridurre i carichi termici totali per raffrescamento in un edificio per uffici, fino al 30%.

Alcune simulazioni hanno mostrato che l'uso della ventilazione notturna può soddisfare parte dei carichi da raffrescamento, ma è spesso inevitabile ricorrere a sistemi di condizionamento per mantenere un accettabile livello di temperatura per tutto l'arco della giornata

[5.9]

La ventilazione meccanica

È la forma principale per immettere aria negli ambienti, usata in combinazione con il riscaldamento, raffrescamento e la filtrazione. Sistemi meccanici ben dimensionati

consentono di non tenere conto delle variazioni climatiche esterne (vento, temperatura esterna ecc.). Un approccio integrato edificio-impianto consente una scelta ottimale del tipo di sistema, un ammontare dei costi di investimento e di gestione compatibili con il massimo dell'efficienza delle prestazioni. Nel caso di ventilazione meccanica l'aria può essere somministrata all'interno dello spazio costruito nelle condizioni esterne o può essere trattata in opportune unità di trattamento dell'aria (UTA), fungendo anche come vettore per il riscaldamento ed il raffrescamento degli ambienti.

Ponendo attenzione agli aspetti relativi alla sola ventilazione, i principali componenti di impianto sono:

- **ventilatori:** essi conferiscono la forza motrice ai fluidi coinvolti. Funzionano usando energia elettrica. Di seguito, in un capitolo a parte ne verrà data una ampia descrizione. Possiamo però dire che l'energia spesa per la ventilazione può arrivare a più della metà del consumo energetico dell'intero sistema. Il consumo energetico di ventilatori dipende dalla portata, dalla differenza di pressione attraverso il ventilatore, dal rendimento della girante e dal motore;
- **canali:** sono usati per trasferire le portate di aria dalle UTA agli ambienti. Le canalizzazioni provocano una resistenza al moto dell'aria, influenzando le prestazioni e la richiesta energetica. Questa resistenza al moto si chiama perdita di carico e dipende da: portata, sezione, lunghezza delle canalizzazioni, numero ed angolazione delle curve, rugosità superficiale. Infatti si osserva che se si mantiene un fluido reale (acqua, aria) in moto stazionario in un condotto orizzontale di sezione costan-

te, si osserva che la pressione nel fluido (che secondo il teorema di Bernouilli dovrebbe essere la stessa in ogni sezione) diminuisce a mano a mano che si procede nel verso di avanzamento del fluido. La caduta di pressione che si osserva fra due sezioni di un condotto orizzontale è diretta conseguenza della viscosità;

- **diffusori:** costituiscono unità finali di distribuzione dell'aria in ambiente. La geometria di questi terminali deve assicurare una mandata senza fastidiose correnti d'aria. Le specifiche forniscono la portata, la velocità di mandata e l'intensità della turbolenza. Oggi ve ne

sono di forme variegata, si va da quelli a coni fissi, elicoidali o lineari che sono molto usati per arredamento di negozi, uffici ecc. I diffusori elicoidali permettono un getto che può geometricamente assimilarsi ad una "rigata", per aumentare la turbolenza e quindi l'efficienza del mescolamenti. Alcuni esempi di diffusori sono riportati nelle figure 5.7, 5.8 e 5.9.

Nella scelta fra le diverse tipologie di terminali, tra i tanti fattori di cui tenere conto, non ultimo il costo di investimento, bisogna rimarcare che varia da una tipologia all'altra la "efficienza di ventilazione". In tabella 5.2 è indicata l'efficienza di riscal-

Figura 5.7
Diffusore elicoidale

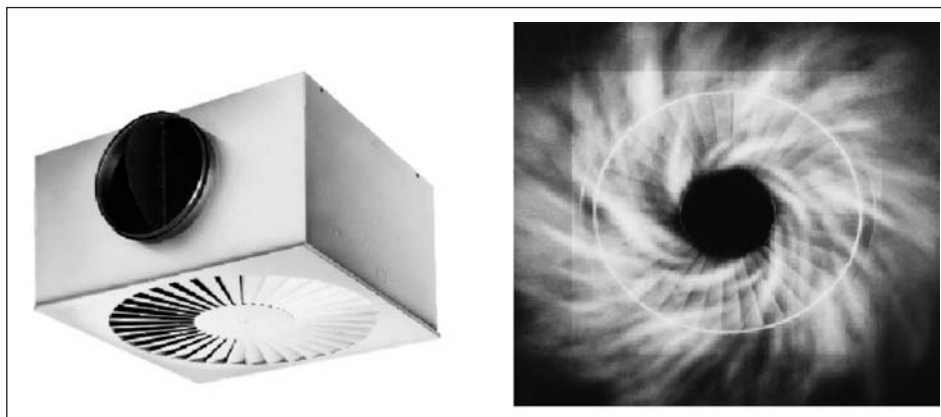
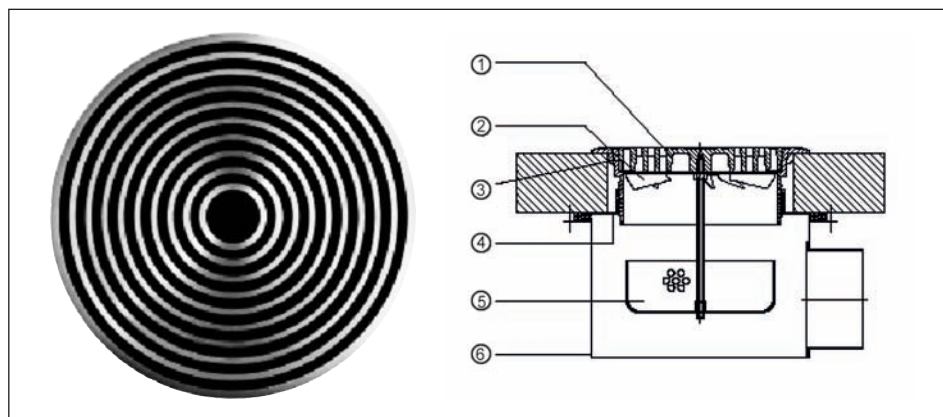


Figura 5.8
Diffusore lineare



Figura 5.9
Diffusore a pavimento



damento e raffrescamento utilizzando diverse tipologie di diffusori. Si può evincere come il rendimento possa variare sensibilmente in funzione della tecnologia adottata.

In particolare, l'ottenimento di un'accettabile qualità dell'aria nel volume convenzionale occupato dipende non solo dalla portata di aria esterna immessa ma anche dalle caratteristiche del sistema di diffusione dell'aria adottato in relazione alla conformazione dei locali e alle sorgenti di contaminazione presenti.

Le diverse soluzioni utilizzabili per la dif-

fusione dell'aria comportano, a parità di portata di aria immessa, differenti capacità di asportazione sia dei carichi termici sia dei carichi di contaminazione.

Nella scelta quindi dell'impianto e delle unità terminali si dovrà tassativamente tenere conto della differenza di prestazioni fra le varie tipologie.

Ad esempio, arrivare a somministrare 10 l/s alla zona dove respirano le persone con una bocchetta, vuol dire prevedere una capacità della stessa di $10/0,70 = 14,28$ l/s, mentre con un diffusore elicoidale la portata rimane inalterata $10/1 = 10$.

Tabella 5.2
Le efficienze di ventilazione
dei terminali

Tipologia di diffusore	Efficienza convenzionale di raffreddamento	Efficienza convenzionale di riscaldamento
Diffusore ad effetto elicoidale (DAE)	1,0	1,0
Diffusore a coni fissi (DCF)	0,90	0,75
Diffusore lineare a feritoia (DLFC)	0,80	0,60
Diffusore lineare a feritoia, posto in adiacenza della parete esterna (DLFP)	0,85	0,75
Diffusore lineare ad ugelli posto in adiacenza della parete esterna (DLUP)	0,85	
Diffusore lineare ad ugelli posto al centro del locale (DLUC)	0,80	
Bocchetta a doppio filare di alette (BDF)	0,70	0,60

[5.9.1]

Configurazioni della ventilazione meccanica

Gli impianti di ventilazione possono essere progettati e realizzati secondo diverse configurazioni, le più comuni sono:

- **solo estrazione:** per mezzo di un ventilatore si estrae l'aria dal volume considerato. La depressione indotta localmente produce il moto di reintegro delle masse d'aria. L'estrazione può essere centralizzata, attraverso canalizzazioni oppure locale (cappe, servizi ecc.), effettuata nei locali cosiddetti "umidi", cucine bagni ecc.;
- **solo mandata:** l'aria trattata è introdotta nell'edificio dove si mescola con l'aria esistente. Questo processo provoca una pressurizzazione dell'edificio (cioè pressione superiore a quella atmosferica). L'aria è spostata attraverso aperture apposite o anche discontinuità dell'involucro. L'effetto più importante è l'inibizione dell'ingresso di aria di infiltrazione (con tutto il suo incontrollato contenuto) dall'esterno (es. sale operatorie, camere per lavorazioni particolari ecc.);
- **bilanciata a mescolamento:** l'estrazione e la mandata hanno due canalizzazioni separate. L'aria viene immessa e mescolata nelle zone dove soggiornano le persone ed estratta dalle zone contaminate. Tra le correnti di aria di estrazione e di mandata si può effettuare un recupero termico con uno scambiatore chiamato anche recuperatore. Sbilanci nelle correnti possono indurre pressurizzazioni o depressurizzazioni sempre dell'ordine di qualche Pascal. Questa forma di ventilazione è ormai diffusissima, ma anche essa presenta vantaggi e svantaggi che riportiamo data la sua importanza;

vantaggi:

- possibilità di recupero di calore e preriscaldamento dell'aria di mandata;
- possibilità effettiva di somministrazione dell'aria alle zone occupate e di estrazione dalle zone contaminate;
- assenza di pressurizzazioni o depressurizzazioni consistenti impedisce aspirazioni di radon o altri gas dannosi dal sottosuolo;
- possibilità di efficace filtrazione;

svantaggi:

- presenza di sistema raddoppiato, extracosti di investimento e conduzione;
- necessità di manutenzione periodica;
- corretta scelta e funzionamento dei ventilatori, necessità di installazione in involucri a tenuta, con criticità di corretto funzionamento;

- **bilanciata a dislocamento:** l'aria di mandata "sposta" piuttosto che mescolarsi con l'aria ambiente. L'aria trattata si immette a 2 o 3 °C al di sotto della temperatura ambiente ed a bassa velocità (tipicamente da 0,1 a 0,3 m/s). L'effetto desiderato è legato alle differenze di densità delle portate d'aria;

vantaggi:

- sistema potenzialmente efficiente;
- controllo del fumo, i volumi vicini al pavimento possono risultare liberi dal fumo;

svantaggi:

- l'interposizione di ostacoli pregiudica l'effetto;
- necessità di precisione nel controllo della temperatura e portata;
- l'aria prima della somministrazione alle zone di stazionamento deve essere accuratamente depurata, per via del ridotto effetto di mescolamento;
- la limitata possibilità di riscaldamento;

to e raffreddamento, può portare a considerare anche l'introduzione di ulteriori sistemi di riscaldamento e raffrescamento (questo sistema è spesso usato in coppia con un sistema a radiatori o pannelli radianti).

[5.9.2]

Sistemi a tutt'aria

I sistemi a tutt'aria conseguono un raffreddamento sensibile e latente, preriscaldamento e umidificazione. L'aria esterna, miscelata con quella di ricircolo, è opportunamente trattata affinché siano garantiti, non solo i necessari ricambi d'aria richiesti alla semplice ventilazione, ma anche l'abbattimento dei carichi termici ed il controllo dell'umidità relativa, al fine di garantire le condizioni di comfort termigrometrico.

Le portate di aria possono essere scaldate refrigerate e deumidificate, passando attraverso batterie alettate, e umidificate, con diverse soluzioni impiantistiche. Le unità di trattamento aria provvedono ad assolvere questi compiti.

Gli impianti a tutt'aria sono adatti ad edifici in cui sia richiesto un controllo preciso delle grandezze termigrometriche (umidità e temperatura) e in cui siano ben parzializzate le portate di aria e possono essere a semplice o a doppio condotto. Nel sistema a doppio condotto, possono viaggiare in parallelo, ossia in due canalizzazioni separate, la corrente calda e quella fredda, il mescolamento può essere fatto localmente ai terminali di mandata in ambiente oppure i condotti di mandata caldo e freddo possono essere separati ed il mescolamento può essere fatto in prossimità dell'unità centrale.

Questi sistemi presentano i seguenti vantaggi:

- la centrale di condizionamento è ubicata in un apposito locale tecnico, il che facilita le operazioni di controllo, manutenzione e controllo del rumore;
- è possibile effettuare l'accurata filtrazione dell'aria somministrata agli ambienti;
- sono adattabili al funzionamento del *free-cooling* (raffrescamento notturno estivo da forze motrici naturali);
- sono di facile commutazione stagionale;
- consentono un buon controllo di temperatura locale, umidità, possibilità di efficienti recuperi di calore;
- è possibile pressurizzare e depressurizzare l'ambiente climatizzato;
- comportano impatto minimo sugli arredamenti interni (solo terminali di mandata e di ritorno).

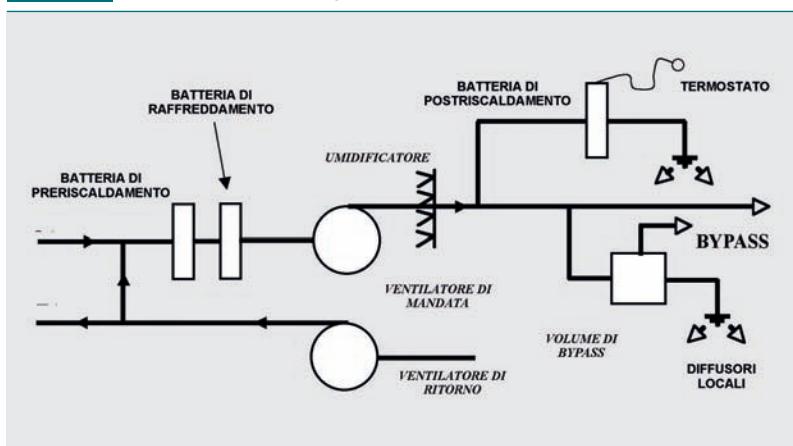
Peraltro, determinano anche i seguenti vantaggi:

- predisposizione di locali tecnici attrezzati;
- predisposizione di cavedi anche di dimensioni rimarchevoli per canali verticali;
- superfici elevate di controsoffitti;
- bilanciamento e taratura nel caso di impianti estesi;

Gli edifici in cui questo sistema è più usato sono i seguenti:

- uffici,
- scuole,
- ospedali,
- centri commerciali,
- cinema, teatri,
- centri sportivi.

È intuitivo come queste macchine così centralizzate, al cui interno devono essere allocate batterie di deumidificazione e riscaldamento e contengano componenti in rotazione, debbano essere alimenta-

Fig. 5.10 Schema di impianto a tutt'aria ad un solo condotto

te con i fluidi termovettori (acqua calda alle batterie adibite al riscaldamento invernale, acqua refrigerata per la climatizzazione estiva). Questi fluidi sono sovente prodotti altrove, in altri locali tecnici e con altre macchine che richiedono alti standard di sicurezza e personale qualificato. Si pensi al locale caldaie per la produzione di acqua calda o vapore, o all'acqua refrigerata prodotta con macchine frigorifere anche di considerevole potenza dette chillers.

Queste tubazioni, sia calde che fredde, al fine di non disperdere il calore durante i percorsi che possono essere anche molto lunghi (impianti ad anello per complessi con molti edifici), sono rivestite di spessi strati di materiale isolante forniti in rotoli o coppelle. La sezione delle tubazioni può quindi accrescersi considerevolmente.

In tutti questi casi, è fondamentale la coordinazione, la circolazione delle informazioni e dei disegni aggiornati fra gli specialisti coinvolti nel progetto, i quali per natura tendono a procedere per proprio conto, prestando attenzione al proprio lavoro e tendendo ad ignorare quello delle altre maestranze. È quindi veramente importante la qualità della direzione di progetto. Si veda lo schema progettuale di un sistema di unità di trattamento aria in figura 5.10.

Da notare in figura 5.11 gli attacchi per i canali dell'aria e per mandata e ritorno dei fluidi termovettori, in genere acqua calda o refrigerata, e oltre a questi sono da tener presenti quelli per condense, drenaggi ecc.

Al fine di non incorrere in errori o peggio di omissioni sottodimensionando passag-

Figura 5.11
Unità di Trattamento Aria
(UTA), vista d'insieme



Tabella 5.3
Evoluzione delle unità
di generazione

Periodo	Tipo di compressore	COP	COP
		gruppi ad aria	gruppi ad acqua
1965-1980	Alternativi-aperti centrifughi	2,2	3
		-	4 ÷ 4,5
1980-1990	Alternativi-Semierm centrifughi	2,5	3,5
		-	4,5 ÷ 5
1990-2004	Vite semiermetici scroll centrifughi	2,6 ÷ 3,4	3,8 ÷ 6
		2,5 ÷ 3,2	3,5 ÷ 4,5
		-	5 ÷ 6,5

gi e cavedi, sarà bene che lo specialista di interni consulti il documento di progetto apposito chiamato *l'elenco linee*, ove sono specificate tutte le caratteristiche geometriche e costruttive delle linee in questione.

Unità di generazione dei fluidi termovettori

Si fa principalmente riferimento alle macchine per generazione dei fluidi a bassa temperatura per il raffrescamento giacché le macchine per la generazione di fluidi a temperatura più alta (caldaie) sono trattate in un altro capitolo.

Durante questa fase, è peculiare l'efficienza d'uso dell'energia elettrica ai fini delle trasformazioni fisiche che tendono alla generazione (di solito) di acqua refrigerata. L'evoluzione di tali macchine negli ultimi decenni può essere riassunta nella **tabella 3**.

L'evoluzione è stata anche indotta ed accelerata dalle sempre più stringenti normative ambientali relativamente alle emissioni acustiche, alla immissione di fluidi frigoriferi ecologici ed all'aumento dell'importanza della impiantistica tecnologica nell'edilizia, in quello che oggi è comunemente chiamato edificio-impianto.

Dal punto di vista tecnico la pietra miliare della evoluzione è stata la progressiva sostituzione della compressione alternativa a pistoni con compressori a vite (potenzialità media ed alta 300-1.500 kW) ed ultimamente *scroll*, ossia compressione ottenuta facendo passare il gas attraverso due profili coniugati (uno sul rotore e l'altro sullo statore) spiraliformi, in moto relativo orbitale.

La compressione è ottenuta costringendo il gas aspirato in volumi via via decrescenti per via del moto relativo rotore-statore. Il moto del fluido è radiale, dalla periferia verso il centro della spirale.

I compressori a vite ovviamente non possiedono parti in moto alternativo, sottoposte quindi ad azioni dinamiche per via della loro inerzia, non hanno volumi nocivi ove il gas staziona senza partecipare alle trasformazioni penalizzando il rendimento volumetrico, non hanno valvole di aspirazione e mandata che assorbono energia per la loro operazione.

Inoltre si deve registrare un altro miglioramento costruttivo negli scambiatori di calore, evaporatore, condensatore, con utilizzo di tubi alettati internamente ed esternamente, unitamente ad altri accorgimenti che migliorano i coefficienti di

scambio, quindi la potenza termica scambiata per unità di superficie e di temperatura.

Un impulso determinante ed ormai consolidato è l'adozione degli *inverter*, ossia di convertitori statici di frequenza.

Esso è essenzialmente un dispositivo elettronico che converte l'alimentazione di rete in tensione e frequenza variabili in modo da poter controllare e regolare la velocità di motori asincroni standard man-

tenendo costante la coppia del motore. La variazione di velocità di ventilatori, pompe ecc. permette di variare la portata senza interventi fisici di strozzature, bypass ecc. che impoveriscono il patrimonio di energia meccanica dei fluidi, mantenendo sensibile il dispendio di energia elettrica, diminuendo inoltre il periodo di vita utile dei singoli componenti per via dell'insorgere di vibrazioni, dissipazioni di calore ecc.





Capitolo Sei

om̄ia NATIVITATIS DOMINI IN ORIENTE. Titu

Illuminazione artificiale

[6.1] Introduzione

Le condizioni di illuminazione degli spazi dove si svolgono le attività dell'uomo ne influenzano il comportamento ed il benessere: la corretta illuminazione degli spazi migliora la qualità della vita ed è l'obiettivo di tutti gli studi e di tutte le norme e regole di progettazione elaborate nel campo delle tecniche di illuminazione sia naturale che artificiale.

La progettazione dell'illuminazione è parte integrante del progetto generale dello spazio costruito. La progettazione dell'illuminazione agisce, infatti, ad un livello complesso nella vita dell'edificio: oltre a garantire gli standard di illuminazione richiesti, interagisce con la progettazione delle facciate e con la distribuzione degli spazi interni, provvede a garantire la positiva interazione tra l'uomo, lo spazio costruito e l'ambiente esterno, determina, oltre che i carichi elettrici, anche i carichi termici per la climatizzazione estiva ed invernale.

Progettare una buona illuminazione, sia naturale che artificiale, richiede la conoscenza di diverse nozioni che riguardano, da una parte la conoscenza del movimento apparente del sole sulla sfera celeste e di alcune caratteristiche proprie della luce, dall'altra alcuni dati e prestazioni propri delle lampade e degli

apparecchi illuminanti. A questi aspetti vanno poi sommate altre esigenze dettate dal carattere funzionale del progetto e dai fattori di stile, di gestione degli spazi, di impatto ambientale, di sicurezza e non meno importante dal fattore economico.

L'importanza dell'illuminazione nello spazio costruito è condizionante, quindi, tanto per i consumi energetici che per il benessere visivo e la salute per gli utenti. Una progettazione consapevole dell'illuminazione naturale e di quella artificiale, la scelta dei componenti, il dimensionamento e la gestione dell'impianto consente risparmi di energia elettrica e, contemporaneamente, garantisce le condizioni di benessere visivo per l'utente.

Pur non esistendo dati certi sui consumi energetici negli edifici per illuminazione, stime ragionevoli portano però a concludere che il consumo energetico per l'illuminazione domestica è valutabile tra il 15 e il 20% dei consumi elettrici domestici complessivi. La voce energetica corrispondente all'illuminazione domestica costituirebbe il 4,5% dei consumi finali di energia elettrica nazionali.

Dati ancora più incerti sono disponibili sul costo energetico nel terziario: alcuni studi internazionali, tuttavia, fissano intorno al 25% l'influenza dei consumi elettrici dovuta all'illuminazione artificiale rispetto a quelli elettrici complessivi del settore.

[6.2] La fotometria e la visione. Luce e spettro visibile

Alcuni cenni sul meccanismo della visione sono necessari per affrontare il problema tecnico del progetto illuminotecnica e della sua eventuale verifica.

Si definisce come luce l'energia elettromagnetica che l'occhio umano è in grado di percepire ricevendone una sensazione visiva. Il trasferimento e la propagazione dell'energia elettromagnetica avviene per mezzo di onde elettromagnetiche caratterizzate da una frequenza e da una lunghezza d'onda, tra loro inversamente proporzionali; la costante di proporzionalità è data dalla velocità di propagazione dell'onda.

Mentre la radiometria studia tutti i fenomeni di propagazione dell'energia tramite radiazioni elettromagnetiche, la fotometria si interessa in maniera particolare di quelle radiazioni responsabili dei fenomeni della visione umana. La fotometria studia quindi il legame tra la sensazione visiva (soggettiva) e le proprietà fisiche (oggettive) delle radiazioni luminose.

La luce e lo spettro visibile

La prima e più importante sorgente di luce naturale è il sole. In prima approssimazione il sole può essere considerato un corpo nero (radiatore perfetto) che irradia energia secondo la legge di Stefan-Boltzmann: la potenza irradiata dipende dalla quarta potenza della temperatura del corpo nero. Nel caso del sole tale temperatura è di circa 5.800 K; questa energia non viene irradiata in una sola lunghezza d'onda, ma, secondo la legge di Planck, segue l'andamento riportato in figura 6.1.

Il sistema di visione dell'uomo è in grado di interpretare solo una limitata parte delle frequenze dello spettro di radiazioni emesse dal sole e, in aggiunta, a ogni frequenza esso associa una sensazione cromatica differente. La corrispondenza tra lunghezza d'onda della radiazione luminosa e relativo colore percepito dall'occhio umano è rappresentata in figura 6.2.

A 380 nm si ha la sensazione di luce viola (a sinistra della quale si hanno i raggi ultravioletti, non visibili) e a 780 nm si ha il rosso (a destra del quale si hanno i raggi infrarossi, non visibili).

La sensazione visiva non dipende dalla quantità di energia raggiante incidente, ma dalla potenza incidente sulla retina. La risposta dell'occhio umano agli stimoli luminosi di differente colore a parità di potenza raggiante è rappresentata dalle Curve spettrali del fattore di visibilità relativa dell'occhio medio, riportata in figura 6.3. Tale risposta varia, tra l'altro, a testimonianza della complessità nel definire grandezze legate a sensazioni soggettive, dall'intensità della luce percepita.

Quello che viene indicato comunemente con il termine "luce" non è quindi da intendere come un puro fenomeno elet-

Fig. 6.1 Spettro di emissione del sole (T = 5.800 K)

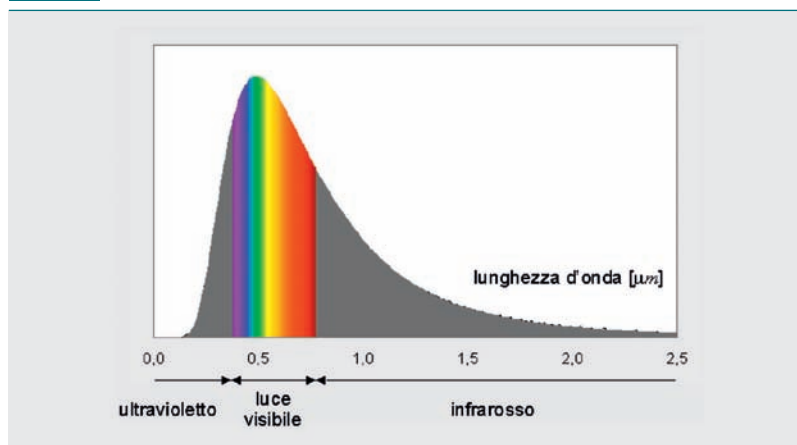


Fig. 6.2

Ripartizione spettrale della radiazione visibile

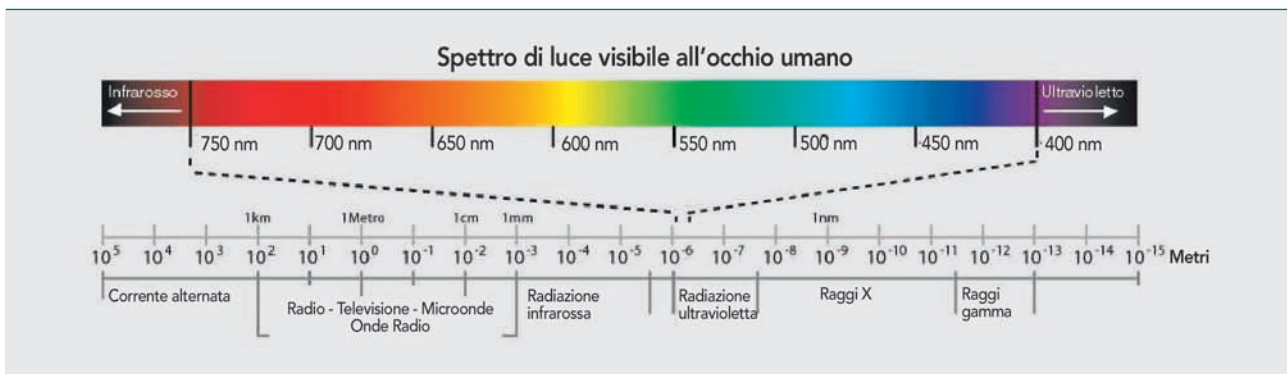
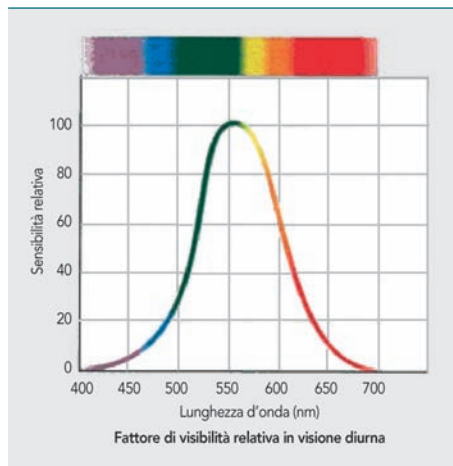


Fig. 6.3 Curva di visibilità relativa



tromagnetico, bensì il risultato “sensoriale” che una ristretta gamma di radiazioni produce sull’apparato visivo.

[6.3]**Le grandezze fotometriche****Quantità di luce convenzionale (Q)**

È la sola parte di energia della radiazione luminosa che è in grado di dare sensazioni visive all’uomo: risulta quindi dalla integrazione, rispetto alla lunghezza d’onda,

dello spettro di energia della radiazione globale pesato con la curva di sensibilità dell’occhio medio umano; è una grandezza dimensionalmente omogenea con una energia, solo che invece di misurarla in Joule, per esempio, per le ragioni anzidette, viene misurata in *lumen*-s.

Flusso luminoso (Φ)

Esprime la quantità di energia emessa da una sorgente luminosa (Q) nell’unità di tempo. Il flusso luminoso viene misurato in *lumen* (lm). Poiché il flusso luminoso si riferisce ad una energia emessa da una sorgente nell’unità di tempo corrisponde dimensionalmente ad una potenza (energia/ unità di tempo).

Intensità luminosa (I)

Esprime la quantità di energia luminosa emessa in una specifica direzione. Si definisce intensità luminosa (I) il rapporto tra il flusso luminoso emesso da una sorgente entro un angolo solido e lo stesso angolo solido. È dimensionalmente omogeneo ad una potenza per unità di angolo solido (steradiante, sr) ed è quindi una densità di potenza angolare. La sua unità di misura è la candela (cd) pari al *lm/sr*.

Illuminamento (E)

Esprime l'entità del flusso luminoso che investe una certa superficie.

Si definisce illuminamento (E) il rapporto tra il flusso luminoso che incide su di una superficie e l'area della superficie presa in esame. È dimensionalmente omogeneo ad una densità superficiale di potenza. L'unità di misura dell'illuminamento è il *lux* pari a lm/m^2 . L'illuminamento diminuisce con il quadrato della distanza dalla sorgente luminosa (legge fotometrica della distanza). È la grandezza fondamentale per lo svolgimento di un compito visivo, esistono norme che ne suggeriscono o prescrivono i livelli minimi. In prima istanza si può far riferimento ai valori seguenti che associano a un compito visivo degli illuminamenti di riferimento:

50-150	zone di passaggio o sosta temporanea,
200-500	prestazione visiva semplice,
300-750	prestazione visiva media,
500-1000	prestazione visiva elevata,
750-1500	prestazione visiva elevata per compiti difficili,
2000	prestazione visiva elevata per compiti di qualità.

Luminanza (L)

Esprime l'entità della luce emessa da una sorgente di dimensioni estese (sorgente primaria o secondaria, cioè superficie illuminata) nella direzione dell'osservatore. Si definisce luminanza (L) il rapporto tra l'intensità luminosa di una sorgente in una certa direzione e la superficie emittente o illuminata vista in tale direzione. Si riportano alcuni valori tipici di luminanza, espressi nell'unità di misura cd/m^2 :

Sole	2.300.000.000
Neve al sole	25.000
Lampada fluorescente	6.000 – 8.000
Foglio di carta con normale illuminazione da studio	120

Efficienza luminosa di una sorgente (ϵ)

Non tutta la potenza della sorgente luminosa si trasforma in flusso luminoso (potenza luminosa) in quanto la sorgente emette radiazioni fuori dal campo del visibile o con energia al di sotto della curva di sensibilità dell'occhio.

Per efficienza luminosa si intende quindi il rapporto del flusso luminoso emesso dalla sorgente e la potenza della sorgente. Il rapporto è dimensionalmente omogeneo ad un numero puro, ma per quanto detto, lo si esprime come *lumen/Watt*.

[6.4]

Le sorgenti luminose artificiali

In questo paragrafo sono presentati i componenti principali del sistema di illuminazione artificiale e di alcuni relativi modi di classificazione.

[6.4.1]

Tipi di lampade

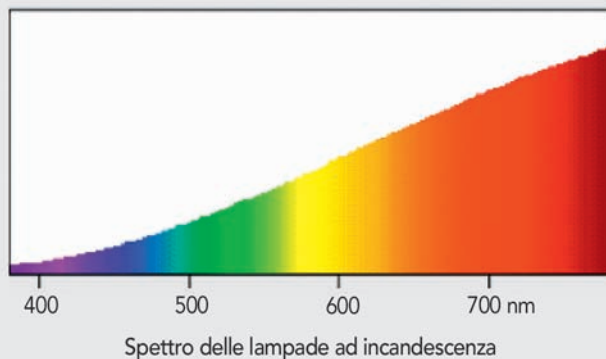
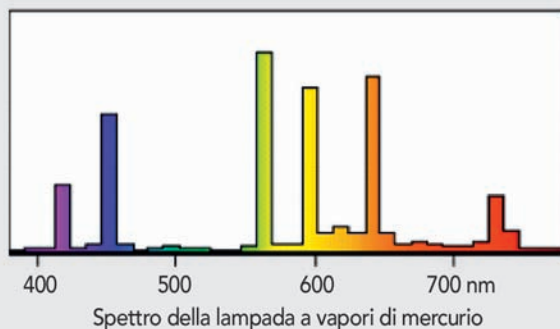
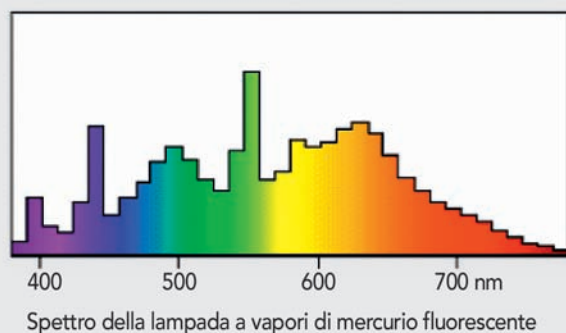
Le lampade usate nella pratica comune e sono suddivisibili in due classi principali:

- lampade ad incandescenza
- lampade a scarica

Le lampade a incandescenza

La più semplice sorgente di luce artificiale è la classica lampada ad incandescenza; in essa un filamento di tungsteno percorso da corrente elettrica raggiunge (per effetto Joule) temperature di circa 3.000 K, diventa incandescente ed emette radiazione elettromagnetica.

Data la minore temperatura rispetto al sole, il massimo d'intensità si sposta verso lunghezze d'onda più lunghe. La parte dell'emissione nel visibile risulta perciò poca cosa rispetto al tutto. Questo deter-

Fig. 6.4 Spettro delle lampade ad incandescenza**Fig. 6.5** Spettro delle lampade a scarica**Fig. 6.6** Spettro delle lampade a vapori di mercurio

mina la scarsa efficienza delle lampade ad incandescenza nelle quali la maggior parte dell'energia è emessa sotto forma di radiazione infrarossa. Solitamente si usa rappresentare solo la parte visibile dello spettro di una lampada ad incandescenza, come in figura 6.4.

Le lampade a scarica

Il secondo tipo di sorgenti di luce artificiale sono le così dette lampade a scarica, fra le quali le lampade a fluorescenza sono le più usate negli ambienti domestici.

Il funzionamento di questo tipo di sorgenti di luce artificiale è in principio molto semplice: il gas (o la miscela di gas) contenuto nel tubo o nel bulbo viene eccitato da una corrente elettrica che lo percorre, così che gli elettroni esterni di ciascun atomo o molecola si spostano verso livelli energetici superiori; quando ricadono al loro livello "naturale" o comunque inferiore avviene l'emissione di un quanto di luce la cui frequenza è associata al salto energetico fra i livelli.

Dato che i livelli energetici sono quantizzati, cioè solo alcuni valori dell'energia sono possibili, lo spettro di una lampada a scarica non è continuo ma è discreto, vale a dire solo particolari lunghezze d'onda vengono emesse, figura 6.5.

Per migliorare la qualità della luce si usa cospargere la parete interna dei tubi o dei bulbi di sostanze fluorescenti che assorbono la componente ultravioletta dell'emissione dei vapori di mercurio e in seguito riemettono parte dell'energia assorbita nel visibile così che lo spettro presenta, oltre alle linee spettrali del mercurio, anche una componente continua dovuta alla fluorescenza.

In figura 6.6 si presenta la distribuzione spettrale che si ottiene con questi accorgimenti.

[6.4.2]

Caratteristiche fotometriche delle sorgenti di luce artificiale

Allo scopo di stimare convenientemente la qualità della luce si definiscono alcune grandezze fotometriche che rendono conto del contenuto cromatico complessivo della luce.

Temperatura di colore

La temperatura di colore di una sorgente di luce artificiale a spettro continuo è quel valore di temperatura del corpo nero il quale emette una luce della stessa tonalità di colore. Dire che una lampada ha una temperatura di colore di 3.000 K significa che la luce da essa prodotta ha la stessa tonalità di quella generata dal corpo nero portato alla temperatura di riferimento di 3.000 K.

Quando si esamina la tonalità di una lampada a scarica che ha uno spettro discontinuo, o comunque con marcate disuniformità tra le lunghezze d'onda, il paragone col corpo nero perde di legittimità. È consuetudine, tuttavia, parlare ancora di temperatura di colore, o meglio di temperatura di colore *correlata* T_{cp} , riferendosi alla temperatura del corpo nero che produce un risultato cromatico quanto più vicino a quello della sorgente a scarica.

Si definiscono tre classi principali di apparenza di colore o tonalità:

- $T_{cp} > 5.300$ K

fredda (tonalità analoga alla luce solare)

- 3.300 K < T_{cp} < 5.300 K
intermedia (tonalità bianco neutra)
- $T_{cp} < 3.300$ K
calda (tonalità bianco calda).

Si deve quindi sempre tenere presente che la temperatura di colore descrive unicamente e in modo sommario la tonalità di colore dell'emissione luminosa e non la sua resa cromatica, cioè la proprietà di restituire fedelmente, per riflessione, i colori degli oggetti illuminati.

Indice di resa cromatica RA

L'Indice di resa cromatica indica la capacità di una sorgente luminosa a non deformare la colorazione naturale delle superfici e degli oggetti illuminati, rispetto ad una sorgente campione della stessa temperatura di colore (luce naturale emessa da corpo nero: valore di riferimento RA = 100). Se la resa di un certo colore della sorgente considerata è pari a quella del corpo nero si assegna alla sorgente il valore 100, altrimenti un valore proporzionalmente minore. L'RA è pari a 100 per tutti i radiatori termici a spettro continuo, ossia per tutte le lampade a filamento incandescente, siano esse ad alogeni o normali, che hanno un'emissione sostanzialmente simile a quella del corpo nero. Per tutte le sorgenti a scarica nel gas, cioè con spettro a bande, l'indice è sempre minore di 100. Si faccia riferimento alla **tabella 6.1**.

Tabella 6.1
Indice di resa cromatica per tipo di impiego

Qualità resa	Indice CIE	RA	Impiego tipico
Ottima	1A	100-90	Ambienti dove l'apprezzamento del colore è importante
Buona	1B	89-80	Ambienti ordinari di soggiorno e lavoro
Discreta	2	79-60	Ambienti non impegnativi
Sufficiente	3	59-40	Luoghi di solo transito
Accettabile	4	39-20	Ambienti dove la presenza è saltuaria
Inaccettabile	N.C	<20	

[6.4.3]
Efficienza e classificazione delle lampade

L'efficienza luminosa ϵ (lumen/W) è la grandezza più importante per il consumo energetico; essa dipende da due fattori:

- la distribuzione spettrale della radiazione in relazione alla curva di sensibilità spettrale dell'occhio umano,
- la percentuale di potenza elettrica realmente convertita in radiazione visibile.

L'efficienza delle sorgenti luminose è una grandezza funzione non lineare della temperatura (declassamento alle alte e alle basse temperature) e muta nel corso della loro vita: ciò significa che pur assorbendo la stessa potenza elettrica non viene più emessa la quantità nominale di flusso luminoso. Valori tipici di efficienza luminosa sono i seguenti: *sorgenti che emettono radiazioni distribuite in buona parte nella gamma del visibile*: da 8 a 19 lm/W lampade ad incandescenza, fino a 100 lm/W lampade a vapori di alogenuri; *per le sorgenti luminose con emissione monocromatica*: lampade al sodio a bassa pressione 170 lm/W.

Conformemente alla direttiva 98/11/CE e alla disposizione che regola l'identifi-

cazione dei consumi di energia (Primo decreto del 26/11/1999 per la modifica della disposizione relativa all'identificazione dei consumi energetici del 30/10/1997), le lampade per uso domestico devono essere corredate di Energy Label (figura 6.7).

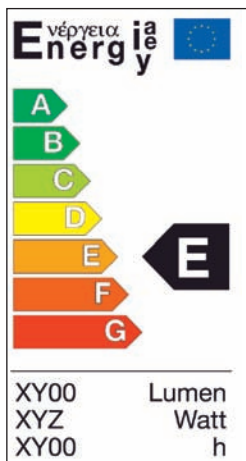
La classificazione prevede sette classi di efficienza alle quali vengono assegnate le lampade ad uso domestico. La classe A sta per "Altamente efficiente" e G per "Poco efficiente". Ecco alcuni esempi di classificazione:

- lampade fluorescenti e lampade a risparmio di energia: classi A e B
- lampade ad alogeni: prevalentemente classe D
- lampade ad incandescenza: soprattutto classi E e F.

Il calcolo delle classi di efficienza avviene secondo quanto specificato dalla direttiva e prende in considerazione i valori misurati di flusso luminoso e potenza della lampada.

I costruttori e fornitori di lampade che consentono un risparmio energetico, classificano la loro produzione sulla base del flusso luminoso equivalente emesso, come da figura 6.8. Ricordiamo che altri dati necessari per classificare la sorgente luminosa sono l'indice di resa cromatica e la temperatura di colore.

Figura 6.7
 Etichetta energetica







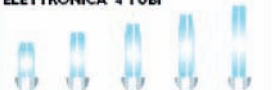







[6.4.4]
Apparecchi di illuminazione

Le sorgenti di luce artificiali vengono generalmente impiegate in apparecchi di illuminazione di forma e materiali vari che servono a modificare sia la distribuzione che il valore del flusso luminoso prodotto dalla sorgente. Gli apparecchi di illuminazione agiscono per:

- assorbimento,
- rifrazione,

Figura 6.8
Equivalenza tra lampade

EQUIVALENZA TRA LAMPADE FLUORESCENTI COMPATTE E LAMPADE AD INCANDESCENZA			
FLUORESCENTI COMPATTE CON ATTACCO E 14 ED E 27		INCANDESCENZA	
CONVENZIONALE OPALINA 	9W 13W 18W 25W	40W 60W 75W 100W	
CONVENZIONALE PRISMATICA 	9W 13W 18W 25W	40W 60W 75W 100W	
ELETTRONICA 4 TUBI 	15W 20W 23W	75W 100W 2X60W	
ELETTRONICA 4 TUBI 	5W 11W 15W 20W	25W 60W 75W 100W	
CONVENZIONALE GLOBO 	9W 13W 18W	40W 60W 75W	
ELETTRONICA GLOBO 	15W 20W 23W	75W 100W 2X60W	

- riflessione,
- diffusione.

Il moderno design degli apparecchi per l'illuminazione ne ha aumentato notevolmente l'efficienza, rispetto alle vecchie versioni; infatti i vecchi riflettori smaltati in bianco, hanno una riflessione del 70%, mentre per in nuovi apparecchi in alluminio, si ha un aumento della riflessione fino al 95%.

L'uso di nuove apparecchiature può creare dei notevoli miglioramenti in termini economici: a parità di illuminazione, si ha un minor numero di lampade utilizzate. D'altra parte l'utilizzo di nuovi tipi di lampade in vecchi apparecchi di illuminazione può inficiare la maggiore efficienza luminosa delle lampade.

[6.4.5]

Sistemi di illuminazione

Gli impianti di illuminazione artificiale per interni possono essere classificati in base al rapporto percentuale (ξ) tra il flusso luminoso emesso dalle sorgenti che raggiunge *direttamente* (senza subire riflessioni) il piano di lavoro Φ_{dir} ed il flusso totale emesso dalle sorgenti Φ_{tot} :

$$\xi = 100 \Phi_{dir} / \Phi_{tot}$$

Illuminazione diretta $\xi > 90\%$

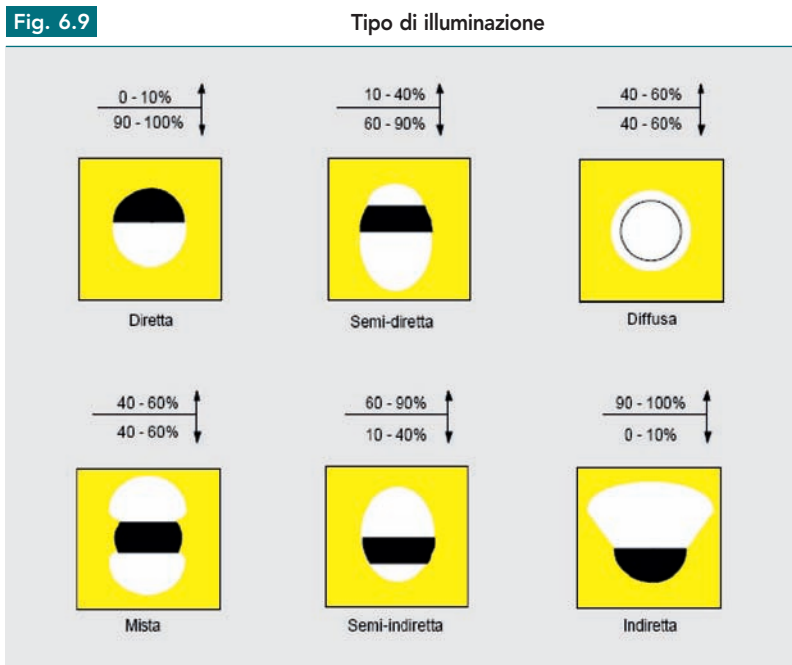
Illuminazione semi-diretta $\xi = 60\% - 90\%$

Illuminazione mista o diffusa $\xi = 40\% - 60\%$

Illuminazione semi-indiretta $\xi = 10\% - 40\%$

Illuminazione indiretta $\xi < 10\%$.

In figura 6.9 si riportano alcune tipologie



di impianto di illuminazione in funzione del modo di illuminazione.

[6.4.6] Sistemi di controllo

I sistemi di controllo sono dispositivi che regolano il funzionamento del sistema d'illuminazione in risposta ad un segnale esterno (controllo manuale, presenza di persone, timer, luminosità esterna). I sistemi di controllo possono essere basati su:

- interruttori manuali localizzati,
- sensori di presenza,
- timer,
- sensori di illuminazione diurna,
- regolatori di luminosità.

Adottando un sistema di controllo per un'illuminazione ottimale si può ottenere un considerevole risparmio economico, riducendo così la quantità di energia usata per l'illuminazione.

L'installazione di un sistema di controllo automatico dell'illuminazione richiederà

un certo costo iniziale, però porterà alla riduzione dei costi di esercizio. Un sistema di illuminazione tradizionale non tiene conto infatti del risparmio che si otterrebbe dallo sfruttamento della luce naturale, andando a modulare la quantità d'illuminazione artificiale in funzione di quella naturale.

[6.5] Elementi di progettazione illuminotecnica

Si riportano in questo paragrafo dei suggerimenti per approcciare in modo funzionale il progetto dell'illuminazione artificiale. Lo scopo non è evidentemente quello di trattare in modo esaustivo la progettazione, ma indicare gli strumenti più idonei per affrontarla.

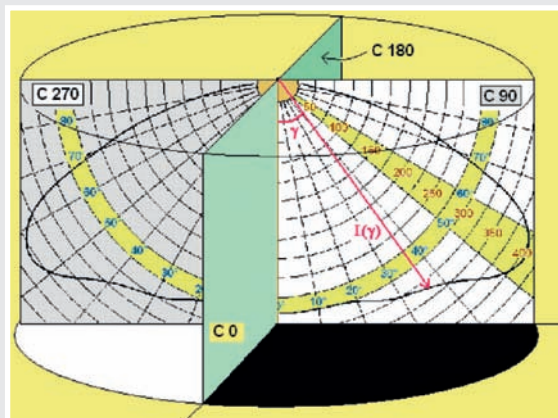
[6.5.1] Curve fotometriche

Il flusso luminoso Φ emesso da una sorgente luminosa (lampada) o da una sorgente luminosa inserita in un apparecchio di illuminazione non è uniformemente distribuito nello spazio circostante.

Ogni complesso illuminante è caratterizzato da un diagramma polare della intensità luminosa I che specifica tale grandezza in funzione della direzione a partire da un polo che corrisponde al punto nel quale la sorgente luminosa viene idealmente ridotta. Tale diagramma è disegnato per piani passanti per il polo (piani C) e per l'asse ottico della sorgente, secondo lo schema di figura 6.10.

In generale se la sorgente è dotata di simmetria intorno a tale asse, come succede generalmente per le lampade, è sufficiente la descrizione della curva fotometrica in un solo piano; per un apparecchio di illuminazione questa simmetria in generale

Fig. 6.10 Esempi di curva fotometrica



non esiste e la descrizione completa della distribuzione spaziale di I richiederà più piani di rappresentazione.

Le curve fotometriche sono in genere fornite per un valore di flusso di riferimento pari a 1.000 lumen: se la sorgente luminosa, a parità di tipologia e forma, ha un valore di flusso differente, dovuto per esempio ad una potenza elettrica differente, l'intensità luminosa varia in proporzione.

Per mezzo delle curve fotometriche dell'apparecchio di illuminazione è possibile stabilire l'entità dell'illuminamento E indotto in una prefissata direzione, su una superficie ortogonale alla direzione stessa, a una distanza r dalla sorgente, per mezzo della relazione: $E = I/r^2$.

Fig. 6.11 Rendimenti di alcuni apparecchi illuminanti

TIPO	APPARECCHI ILLUMINANTI	INDICATRICE FOTOMETRICA	η	TIPO	APPARECCHI ILLUMINANTI	INDICATRICE FOTOMETRICA	η
DIRETTA			0,90	DIFFUSA			0,75
			0,70				0,80
			0,75				0,75
SEMI-DIRETTA			0,85	SEMI-INDIRETTA			0,88
			0,80				0,75
			0,68	INDIRETTA			0,45
			0,90				0,40

[6.5.2]

Rendimento di un apparecchio di illuminazione

Una stessa sorgente luminosa (lampada) inserita in un apparecchio di illuminazione, può dare origine a curve fotometriche differenti e a differenti valori di flusso luminoso a causa delle azioni di assorbimento, rifrazione e riflessione operate dallo stesso. Il rendimento di un apparecchio di illuminazione η_{ill} è dato dal rapporto tra il flusso luminoso della sorgente (lampada) inserita e quello emesso dall'apparecchio di illuminazione. La figura 6.11 rappresenta alcune situazioni tipiche non esaustive, certamente, delle situazioni che si possono trovare nella pratica per più svariati apparecchi di illuminazione oggi in commercio.

[6.5.3]

Calcolo illuminotecnico elementare. Metodo del flusso totale

Lo svolgimento di un compito visivo (attività da svolgere sotto illuminazione artifi-

ziale) in condizioni di massimo confort, richiede un prefissato livello minimo di illuminamento E (lux) sulla superficie dove l'attività si deve svolgere.

Altri parametri sono determinanti a definire il confort visivo, quali la luminanza degli oggetti illuminati, la uniformità di illuminamento, le caratteristiche cromatiche della luce artificiale usata, le condizioni di abbagliamento.

Il progetto illuminotecnico è quindi un compito che deve essere svolto da esperti nel settore, ma si ritiene utile fornire gli elementi di base di un calcolo illuminotecnico per consentire alcune valutazioni sulla scelta o sostituzione del tipo di sorgente luminosa e di apparecchi di illuminazione impiegati nell'illuminazione degli ambienti. Nei casi più comuni è possibile, infatti, eseguire dei calcoli attraverso dei metodi semplificati riconosciuti oppure attraverso codici di calcolo. Questi ultimi sono sempre più diffusi, anche per motivi promozionali: sono spesso le stesse case produttrici a metterli a disposizione gratuitamente attraverso Internet.

La determinazione della potenza elettrica o del flusso luminoso necessario per ottenere il desiderato livello di illuminazione medio E (lux) su una superficie di area A in un locale di forma e dimensione assegnate si può basare sul cosiddetto "metodo del flusso totale".

Metodo del flusso totale

Il metodo prescinde dalla esatta disposizione delle sorgenti luminose, così come non è in grado di tenere conto del loro numero e della loro distribuzione di potenza; costituisce però un metodo di stima della potenza globale necessaria per ottenere un illuminamento medio la cui realizzazione pratica dipenderà poi dalla effettiva sistemazione di impianto.

La superficie di area A individua il cosiddetto piano di lavoro che è il piano ritenuto significativo per le condizioni di illuminamento.

Si definiscono i seguenti parametri:

- i_L *indice del locale*

$$i_L = \frac{ab}{h(a+b)} \quad \text{dove } a \text{ e } b \text{ sono le}$$

dimensioni in piante del locale e h è la differenza di altezza tra l'apparecchio di illuminazione ed il piano di lavoro di riferimento; l'indice tiene conto quindi delle dimensioni del locale, immaginato avente forma di parallelepipedo retto, e del rapporto tra tali dimensioni oltre che dal tipo di illuminazione desiderato (diretta, indiretta, diffusa);

- $K (<1)$ *fattore di utilizzazione*

la tabella dei fattori di utilizzazione è relativa ad uno specifico apparecchio di illuminazione, quindi deve essere fornita dal costruttore; essa tiene conto dell'indice del locale i_L e delle condizioni di riflessione/assorbimento del soffitto e delle pareti del locale;

- $M (<1)$ *fattore di manutenzione*

tiene conto della diminuzione nel tempo delle caratteristiche fotometriche dell'apparecchio di illuminazione per sporcamento e dell'inevchiamento delle lampade che si traduce nel decadimento della loro efficienza luminosa;

- $\eta_{ill} (<1)$ *rendimento dell'apparecchio di illuminazione.*

Il metodo del flusso globale riposa sulle seguenti considerazioni: il flusso luminoso necessario sulla superficie A che deve essere illuminata con l'illuminamento medio E sarà dato da:

$$\Phi_A = A \cdot E$$

detto Φ_L il flusso luminoso della sorgente

te impiegata (lampada), il flusso uscente dall'apparecchio di illuminazione sarà:

$$\Phi_{APP} = \Phi_L \cdot \eta_{ill}$$

Non tutto il flusso uscente dall'apparecchio di illuminazione è utile per ottenere l'illuminamento medio E sulla superficie A ; parte del flusso sarà infatti riflesso o assorbito dalle superfici circostanti (fattore K). Occorre, inoltre, tenere in conto la diminuzione delle prestazioni col tempo dell'apparecchio di illuminazione (fattore M). Il flusso utile sarà quindi:

$$\Phi_u = M \cdot K \cdot \Phi_{APP} = M \cdot K \cdot \Phi_L \cdot \eta_{ill}$$

dovrà, manifestamente, essere verificata l'uguaglianza:

$$\Phi_u = \Phi_A \text{ e quindi}$$

$$\Phi_u = M \cdot K \cdot \Phi_{APP} = M \cdot K \cdot \Phi_L \cdot \eta_{ill} = \Phi_A = A \cdot E$$

La sorgente o l'insieme delle sorgenti luminose necessarie dovranno quindi avere un flusso luminoso totale pari a:

$$\Phi_L = \frac{A \cdot E}{M \cdot K \cdot \eta_{ill}} \text{ lumen}$$

se si utilizzano apparecchi di illuminazione diversi o differenti sistemi di illuminazione (diretta, diffusa, indiretta) si otterranno risultati differenti a causa di differenti valori di i_L e η_{ill} .

Se, d'altra parte, pur mantenendo lo stesso sistema di illuminazione, si utilizzano lampade con differente curva fotometrica nello stesso apparecchio o lampade non idonee per uno stesso apparecchio, il rendimento dell'apparecchio di illuminazione η_{ill} può essere differente e, in genere può portare alla necessità di un flusso luminoso della sorgente più elevato per ottenere lo stesso livello di illuminamento.

Ricordando la definizione di efficienza ϵ di

una sorgente luminosa, espressa in lumen/Watt, si ottiene la potenza elettrica delle lampade da installare:

$$P = \frac{\Phi_L}{\eta} \text{ Watt}$$

[6.5.4]

Controllo della luminanza della sorgente luminosa

Ogni apparecchi di illuminazione presenta una curva caratteristica di luminanza che rappresenta l'andamento della luminanza della fonte luminosa in funzione dell'angolo di osservazione della stessa da parte di un soggetto che svolge un compito visivo. Il controllo della luminanza degli apparecchi di illuminazione si opera attraverso opportune schermature sia di tipo assorbente che di tipo riflettente.

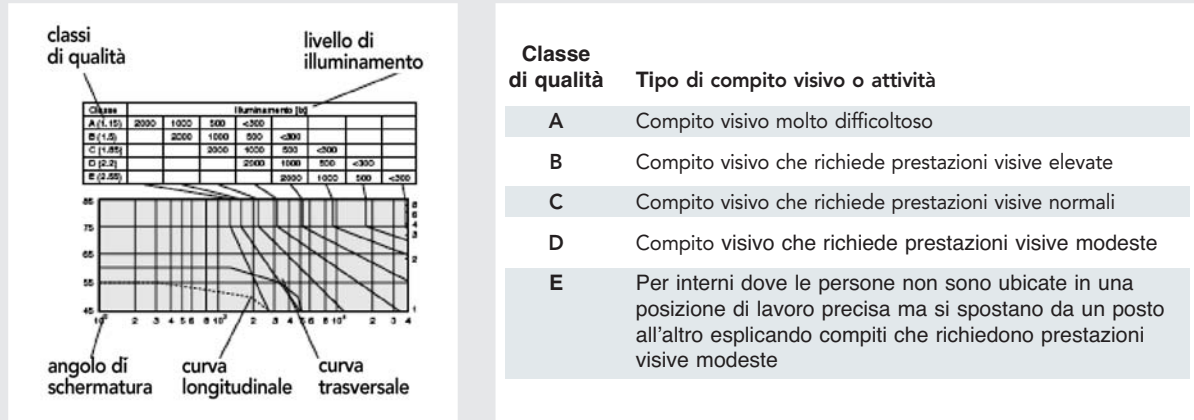
I valori di luminanza delle due curve caratteristiche, trasversale e longitudinale, sono tracciati considerando un osservatore rivolto verso l'apparecchio in un angolo tra 45° e 85° rispetto alla direzione verticale. Questo angolo identifica la zona critica per l'abbagliamento.

La curva di luminanza (longitudinale e trasversale) deve essere confrontata con le curve limite definite dal CIE che delimitano l'area entro la quale la luminanza dell'apparecchio non costituisce un abbagliamento diretto.

Ognuna di queste curve si riferisce ad un livello di illuminamento medio sul piano utile che varia in funzione di 5 classi di qualità dell'impianto stabilite dalle CIE: se la curva delle luminanze dell'apparecchio si trova a sinistra delle curve limite la condizione visiva per quanto riguarda l'abbagliamento diretto è da considerare accettabile. Si vedano gli schemi di figura 6.12 come riferimento.

Fig. 6.12

Curve limite di luminanza e compito visivo



[6.5.5] **Controllo della luminanza globale di un ambiente ai fini dell'abbagliamento**

Il CIE (117-95) ha unificato il metodo di verifica dell'abbagliamento globale diretto in un ambiente mediante l'indice UGR (Unified Glare Rating).

A differenza delle curve limiti di luminanza, che valutano l'abbagliamento dei singoli apparecchi, l'indice UGR consente di calcolare l'abbagliamento di un impianto di illuminazione nel suo complesso. Il valore di questo indice, che è compreso tra 10 e 30, è funzione della disposizione degli apparecchi illuminanti, delle caratteristiche dell'ambiente (dimensioni, riflessioni) e della posizione degli osservatori:

$$UGR = 8 \log \left(\frac{0,25}{L_b} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right)$$

L_b = luminanza del campo visivo (cd m^{-2})

L = luminanza delle parti luminose di ciascun apparecchio nella direzione di osservazione (cd m^{-2})

ω = angolo solido delle superfici luminose di ciascun apparecchio viste dalla direzione di osservazione (sr)

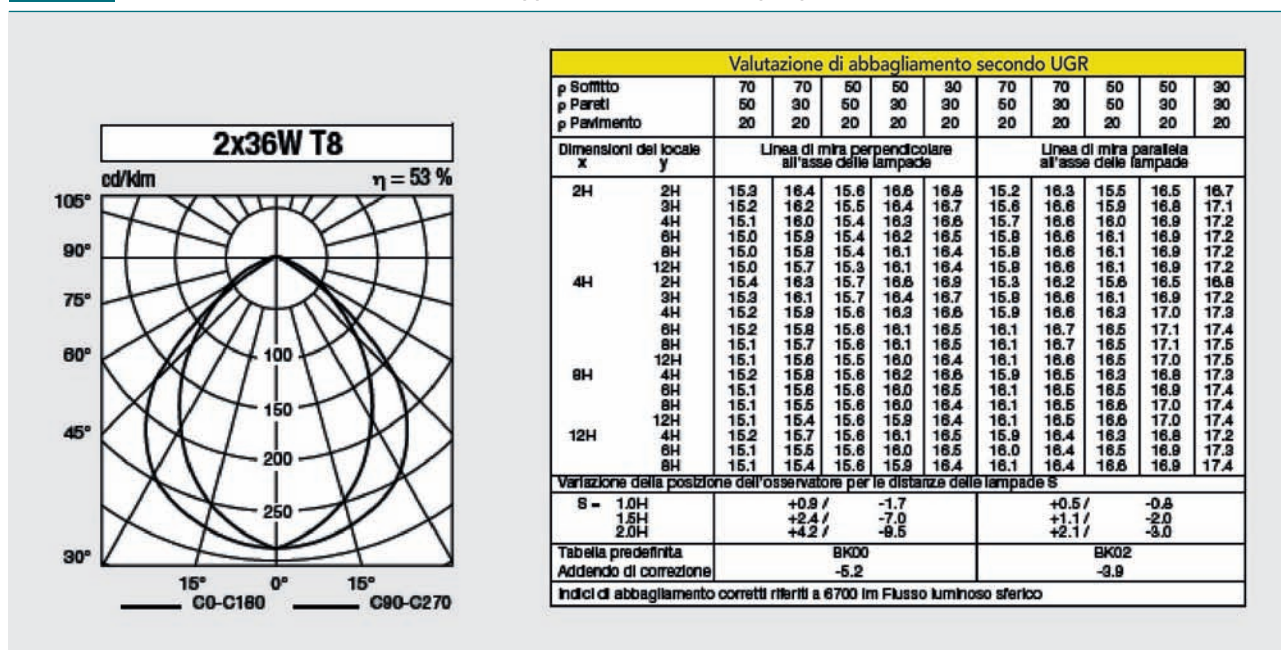
p = indice di posizione di Guth (funzione della distanza longitudinale tra occhio e piano trasversale della sorgente e della distanza trasversale tra occhio e piano longitudinale della sorgente).

L'uso di questa formula permette di compilare delle tabelle di riferimento, dette prospetti, che consentono la determinazione rapida dell'indice UGR per ambienti di forma regolare. I valori che si ricavano dalle tabelle, attraverso una serie di correzioni successive, sono generalmente poco difforni da quelli ricavabili dalla formula. Una scheda è presentata in figura 6.13.

I costruttori forniscono per ciascuna tipologia di apparecchi illuminanti un prospetto specifico che può essere di tipo completo o di tipo ridotto; la differenza sostanziale tra i due tipi di prospetti sta nel numero di fattori correttivi da considerare per il calcolo dell'indice UGR.

Fig. 6.13

Apparecchio illuminante e prospetto UGR



Il prospetto completo fornisce, per un locale standard di dimensioni x e y multiple di H (con H altezza utile tra l'occhio dell'osservatore e il centro dell'apparecchio illuminante), e per coefficienti di riflessione definiti, i valori di UGR nella direzione longitudinale e trasversale dell'apparecchio, riferiti al flusso nominale delle lampade installate. Le correzioni da apportare riguardano le interdistanze fra gli apparecchi e le eventuali differenti potenze delle lampade.

Il prospetto ridotto si differenzia dal precedente per il fatto che i valori di UGR, nella direzione longitudinale e trasversale dell'apparecchio, vengono forniti indipendentemente dalle caratteristiche dell'ambiente; questo comporta che, accanto ai

fattori correttivi per le interdistanze e per le diverse potenze, bisogna considerare un ulteriore fattore correttivo, funzione dell'indice del locale i_L , che tiene conto dei coefficienti di riflessione.

[6.6] Schede GreenLight: tipologie e specifiche delle lampade

Sono presentate, nel seguito, le schede relative alle lampade di più comune impiego nell'illuminazione degli ambienti domestici. Le schede sono tratte dalla documentazione esistente sul sito web del Programma Europeo GreenLight (www.eu-greenlight.org).

LAMPADE COMUNI AD INCANDESCENZA



Sono le comuni lampade al Tungsteno, sono disponibili con vetro di vario tipo (trasparente, glassato, opaco, colorato, ecc.). La maggior parte sono le lampade opache, nella gamma che va dai 25 ai 100 Watt, presentano un attacco a vite o a baionetta. Alcune presentano un design che le rende decorative, avendo la possibilità di essere costruite in forme particolari.

Prestazioni Sono inefficienti, presentano un'efficienza luminosa intorno ai 12 lm/W, hanno una durata di vita relativamente corta, circa 1.000 ore, hanno un basso costo di acquisto.

Usi Con le nuove tecnologie di lampade compatte al tungsteno e fluorescenti, l'uso di lampade ad incandescenza comuni, non è più giustificabile.

Alimentazione 15-1.000 Watt

Temp. di colore 2.700 Kelvin

IRC 100

Eff. luminosa 11-19 lm/W

Durata 1.000 ore

LAMPADE ALOGENE A TENSIONE DIRETTA

Sono lampade alogene al tungsteno ad incandescenza, simmetriche o doppie, che per il loro funzionamento, non hanno bisogno di convertitori di tensione.

Prestazioni Essendo lampade incandescenti, hanno un'efficacia molto più bassa di rispetto ad altre famiglie di lampade (come per esempio le lampade fluorescenti, lampade a luminescenza di alta intensità). Comunque, grazie alla presenza di alogeni, hanno un'efficienza maggiore del 20% rispetto alle normali lampade ad incandescenza ed hanno anche efficienza luminosa maggiore. Inoltre le nuove tecnologie ad infrarosso, ne aumentano l'efficienza del 25-30%. Confrontate con le lampade fluorescenti compatte, hanno un'efficienza molto più bassa, però presentano un fascio di luce che può essere orientato anche a distanze notevoli, inoltre hanno una ottima resa cromatica.

Usi L'illuminazione per gli espositori e vetrine, normalmente è realizzata utilizzando lampade con riflettori alogeni e sono particolarmente usate laddove serve un fascio di luce direzionato. Esiste una vasta gamma di lampade di questo tipo. In alcuni casi queste lampade, possono essere usate direttamente per sostituire le normali lampade ad incandescenza. In ogni caso, prima di utilizzare questo tipo di lampade, bisognerebbe studiare bene, l'uso di lampade fluorescenti compatte, che presentano un'efficienza migliore.

Alimentazione 25-250 Watt (asimmetriche)
60-2.000 Watt (doppie)

Temp. di colore 3.000 Kelvin

IRC 100

Eff. luminosa 1-17 lm/W (asimmetriche)
14-23 lm/W (doppie)

Durata 2.000 ore (asimmetriche)
3.000 ore (doppie)

LAMPADE ALOGENE A TENSIONE MOLTO-BASSA



Sono lampade incandescenti alogene al tungsteno che funzionano a tensioni molto basse per mezzo di un trasformatore di tensione.

Prestazioni Essendo lampade incandescenti, hanno un'efficacia molto più bassa delle altre famiglie delle lampade (come ad esempio lampade fluorescenti). Tuttavia, grazie alla presenza di alogeni, la loro efficacia è superiore del 20% rispetto alle lampade standard al tungsteno e le loro proprietà luminose sono più costanti con il passare del tempo. Inoltre, le più nuove lampade alogene sono disponibili con un rivestimento ad infrarosso che ne aumenta l'efficienza luminosa del 25-30%, rispetto alle lampade alogene convenzionali. Confrontate con le lampade fluorescenti compatte, la loro efficacia è molto più bassa ma d'altra parte le loro prestazioni sono indipendenti dal riscaldamento e dall'orientamento. Inoltre proiettano efficientemente anche a lunga distanza il fascio luminoso e non danno problemi per la qualità ed il tipo di alimentazione. In più, presentano un'ottima resa cromatica. Sono presenti sul mercato, lampade molto piccole e resistenti che ne permettono l'uso in apparecchi di illuminazione di dimensioni ridotte, con prezzi non eccessivamente costosi.

Usi Per illuminare vetrine e per esposizione si usano riflettori con lampade di questo tipo. È presente sul mercato una vasta gamma di lampade alogene utilizzabili per questi usi, in particolare dove è necessario un fascio concentrato di luce. Bisogna considerare che queste lampade devono essere usate con parsimonia in sale con il soffitto basso, dove si potrebbero avrebbero problemi di abbagliamento. Prima di usare le lampade alogene al tungsteno, bisogna considerare bene l'uso delle lampade fluorescenti compatte che presentano un'efficienza migliore. Poiché queste lampade richiedono un trasformatore di tensione per il funzionamento, il loro uso per sostituire direttamente le lampade standard al tungsteno non è possibile.

Alimentazione	5-150 Watt
Temp. di colore	3.000 Kelvin
IRC	100
Eff. luminosa	12-22 lm/W (tipica: 18 lm/W)
Durata	2.000-4.000 ore

LAMPADE FLUORESCENTI TUBOLARI CON DIAMETRO DI 26 MM (DETTE ANCHE T8)

Sono le lampade fluorescenti più diffuse in Europa. Presentano un tubo con la sezione con diametro di 26 mm. Hanno sostituito completamente quelle con tubo di sezione con diametro 38 mm (T12) vecchio tipo.

Prestazioni

Le lampade T8 sono le fonti di luce fluorescente più efficienti. Inoltre il loro costo è inferiore alle lampade T12.

Le lampade T8 sono disponibili con tre tipi diversi di rivestimento in fosforo:

- Rivestite con monofosfati: gli alofosfati sono stati usati per vari anni, ma presentano lo svantaggio che la buona resa cromatica, va a scapito dell'efficienza. L'Indice di Resa Cromatica varia tra 50 e 75.
- Rivestite con trifosforo: con questo tipo di fosfati, si ha una buona resa cromatica, legata ad un'alta efficienza; tuttavia, sono più costose di quelle ad alofosfati. L'Indice di Resa Cromatica varia tra 80 e 85.
- Rivestite di fosforo polivalenti: hanno un'ottima resa cromatica, ma a scapito di una diminuzione dell'efficienza, rispetto alle lampade a trifosforo. L'Indice di Resa Cromatica è maggiore a 90.

Nel periodo di vita delle lampade fluorescenti, i fosfati invecchiano e si ha una diminuzione della quantità di luce emessa. I fosfati polivalenti invecchiano più lentamente dei monofosfati; queste lampade hanno quindi una migliore efficienza luminosa. Le lampade a monofosfati con diametro di 26 mm emettono la stessa quantità di luce delle lampade con diametro di 38 mm, e la stessa resa cromatica, ma presentano un consumo energetico minore dell'8%. Il tipo a trifosfori, oltre a consumare l'8% in meno di energia elettrica, hanno un'efficienza luminosa maggiore del 10% ed un più alto Indice di Resa Cromatica. Quindi questa versione è più conveniente di quella con diametro di 38 mm.

Usi

Le lampade fluorescenti tubolari con diametro di 26 mm, hanno sostituito quelle con diametro di 38 mm, nelle nuove installazioni. Le lampade a trifosforo T8 sono adatte in zone dove è richiesta una buona resa cromatica (per esempio uffici). Le lampade a polifosfati, ad alto indice di resa cromatica, sono adatte per gallerie d'arte, musei, negozi, ecc. ed in tutte le applicazioni dove è richiesta un'alta resa cromatica.

Alimentazione

10 - 58 Watt

Temp. di colore

2.700 – 6.500 Kelvin

IRC

50 - 98

Eff. luminosa

100 lm/W (trifosforo con alimentatore elettrico)
97 lm/W (trifosforo con alimentatore elettromagnetico)
77 lm/W (polifosfati con alimentatore elettromagnetico)

Durata

8.000 ore

LAMPADE FLUORESCENTI TUBOLARI CON DIAMETRO DI 16 MM (DETTE ANCHE T5)

Introdotta nel 1995, sono la nuova generazione di lampade fluorescenti tubolari con la sezione di diametro di solo 16 mm.

Prestazioni Queste lampade, sono più sottili e presentano un'efficienza luminosa maggiore del 7% rispetto alle lampade fluorescenti T8 con diametro 26 mm (efficienza di 95 lm/W per le T5 contro 89 lm/W per le T8).
Inoltre le lampade T5, possono essere dotate di riflettori che ne aumentano l'efficienza e diminuiscono i consumi, e questo sistema è migliore delle T8 dotate di riflettori.

Usi Queste lampade richiedono un dispositivo di starter e di un reattore. Per questo motivo è meglio utilizzarle nei nuovi impianti.

Alimentazione 14 - 80 Watt

Temp. di colore 3.000 – 6.000 Kelvin

IRC 85

Eff. luminosa 80 - 100 lm/W

Durata 8.000 ore

LAMPADE FLUORESCENTI COMPATTE INTEGRATE CFL

Le lampade fluorescenti compatte integrate, sono lampade fluorescenti con il reattore incorporato, l'attacco di queste lampade può essere a baionetta o a vite, come le normali lampade ad incandescenza.

Prestazioni Paragonando questo tipo di lampade, alle normali lampada al tungsteno, si può produrre la stessa intensità luminosa con una potenza di alimentazione di circa il 20-30%; inoltre queste lampade hanno una durata in vita di 8 volte maggiore. Si hanno, quindi, dei costi di manutenzione ridotti, anche se presentano un costo iniziale più alto.

La resa cromatica di queste nuove lampade fluorescenti compatte integrate è migliorata notevolmente, rispetto alle vecchie tecnologie e non vengono più considerate lampade per un'illuminazione grezza. La loro temperatura di colore va da 2.700 K (simile al bianco caldo dell'illuminazione ad incandescenza) a 4.000 K (luce bianca fredda).

Usi Le lampade con circuito integrato, sono state progettate, per essere montate direttamente, sui portalampade usati per le normali lampade ad incandescenza di uso comune. Il loro prezzo è calato notevolmente negli ultimi anni, rendendo queste lampade ancora più vantaggiose. Per le nuove installazioni è preferito l'uso di queste lampade.

Alimentazione 3 - 23 Watt

Temp. di colore 2.700 – 4.000 Kelvin

IRC 85

Eff. luminosa 30 - 65 lm/W

Durata 10.000 ore

LAMPAD E FLUORESCENTI COMPATTE CONVENZIONALI



Le lampade fluorescenti compatte, presentano l'apparecchiatura ausiliaria per il funzionamento, integrata nel circuito.

Prestazioni Paragonando questo tipo di lampade, alle normali lampada al tungsteno, si può produrre la stessa intensità luminosa con una potenza di alimentazione di circa il 20-30%; inoltre queste lampade hanno una durata in vita di 8 volte maggiore. Si hanno, quindi, dei costi di manutenzione ridotti, anche se presentano un costo iniziale più alto. Con l'introduzione dei nuovi tipi di rivestimento in fosforo, la resa cromatica di queste lampade è aumentata notevolmente, quindi non sono utilizzabili solo per un'illuminazione grezza. La temperatura di colore di queste lampade va da 2.700 K (simile al bianco caldo dell'illuminazione ad incandescenza) a 6.000 K (simile al bianco freddo dell'illuminazione diurna). Inoltre l'indice di resa del colore può raggiungere un valore di 98 (il valore massimo della scala è di 100). L'apparecchiatura ausiliare delle lampade fluorescenti è generalmente più lunga della lampada stessa, ma poiché l'apparecchiatura e la lampada sono separate, si può sostituire all'occasione solo la lampada, mentre l'apparecchiatura ausiliaria può servire varie lampade. Il loro prezzo è calato in modo sostanziale negli ultimi anni e questa è la tendenza del mercato.

Usi Per quanto detto, vanno sempre utilizzate lampade con apparecchiatura ausiliare separata. Le lampade fluorescenti compatte, hanno un'ampia gamma di applicazioni; possono essere usate per illuminazioni esterne, decorative, ecc. Con la riduzione delle dimensioni di queste lampade, si possono usare per esposizioni, ecc. Bisogna inoltre considerare che queste lampade non emettono calore, e per questo, si usano nei luoghi dove non si deve avere variazione di temperatura.

Sul mercato è disponibile una vasta gamma di apparecchiature di illuminazione di questo tipo; l'uso di alimentatori elettromagnetici, permette l'uso di lampade a voltaggio differente, quindi si possono usare lampade differenti con lo stesso alimentatore; quindi si può sostituire la vecchia lampada con una anche a voltaggio differente.

Gli attuali alimentatori di lampade fluorescenti, si possono inserire nei normali attacchi a vite delle lampade ad incandescenza. La durata di vita dell'alimentatore elettronico è di circa 5 volte superiore a quello delle lampade, quindi l'apparecchiatura ausiliare, può essere usata per 5 sostituzioni delle lampade.

Alimentazione	5 - 55 Watt
Temp. di colore	2.700 – 6.000 Kelvin
IRC	85 - 98
Eff. luminosa	45 - 87 lm/W (70 per lampade al trifosforo)
Durata	10.000 ore



Capitolo Sette

Sistemi di controllo degli edifici e domotica

[7.1]

I sistemi di controllo

Una delle caratteristiche principali degli edifici sostenibili è costituita dalla loro efficienza energetica, ottenuta in genere per mezzo del ricorso a tipologie impiantistiche avanzate e alla loro integrazione con sistemi che sfruttano le fonti energetiche rinnovabili e/o i fenomeni naturali, quali, per esempio, la ventilazione o l'illuminazione naturale.

Questa tipologia di impianti prevede, molto spesso, una forte integrazione dell'impianto nell'involucro stesso dell'edificio. Ciò richiede che la progettazione del sistema edificio-impianto-sistema di controllo avvenga non per passi successivi, come spesso avviene negli edifici tradizionali, ma con stretta e frequente collaborazione tra i diversi protagonisti coinvolti: architetti, impiantisti, esperti del sistema di controllo.

Un efficiente sistema di controllo dell'impianto di climatizzazione e dell'ambiente interno di un edificio è spesso prerequisito essenziale per ottenerne l'efficienza energetica e di conseguenza la sostenibilità: un edificio non convenzionale deve essere dotato di un sistema di gestione e controllo (BEMS, *Building Energy Management System*) esemplare, in grado cioè di gestire funzioni complesse che, come vedremo, possono portare a requisiti

diversi e talvolta addirittura contrapposti. Uno degli aspetti più complessi nella progettazione di un BEMS di un edificio è consentire l'interazione da parte dell'utente con i sistemi di climatizzazione, senza compromettere il buon funzionamento generale dei sistemi energetici.

L'impossibilità di modificare le condizioni ambientali è spesso percepito come una limitazione della libertà personale, influenza l'accettazione da parte degli utenti e ingenera la maggior parte delle lamentele. Ricerche recenti hanno mostrato che gli utenti sono più tolleranti verso condizioni ambientali non perfette, se queste possono essere in qualche modo controllate da loro stessi, aprendo una finestra, azionando un ventilatore, cambiando un setpoint di un termostato o modificando la posizione di uno schermo frangisole.

Sebbene agli utenti debba quindi essere concesso un elevato grado di controllo del proprio ambiente, il ricorso ad un sistema di controllo automatico rimane tuttavia necessario, sia per suggerire all'utente il corretto mix di regolazioni, sia per gestire l'edificio nelle ore in cui non è utilizzato (per esempio di notte o nei weekend, nel caso degli uffici), onde ridurre i consumi energetici e preparare le condizioni ottimali per quando l'edificio torni ad essere occupato.

La semplicità e la trasparenza dell'interfaccia fra l'utente e il sistema è di grande

importanza: una delle richieste principali da parte degli utenti è che il sistema di controllo corrisponda alle loro necessità e consenta di modificare, con una risposta rapida, le condizioni ambientali qualora ritenute non soddisfacenti.

Sistemi di controllo collegati a sistemi di visualizzazione giocano un ruolo importante nel fornire all'utente una misura oggettiva delle condizioni ambientali, sia in termini di campo termico che di consumi energetici in atto che di qualità dell'aria. I parametri misurati (temperatura, consumo, qualità dell'aria) dovrebbero essere continuamente esposti e confrontati con valori di riferimento ottimali: in questo modo questi sistemi potrebbero risultare molto efficaci nello scoraggiare l'uso improprio dei sistemi di climatizzazione e ventilazione.

[7.1.1]

Funzioni di un sistema di controllo

L'integrazione di tutti i controlli in un unico sistema (Building Energy Management System, BEMS) dà alcuni vantaggi: facilita il lavoro degli operatori, coordina il controllo di diversi sistemi, reduce il numero di sensori.

I nuovi standard sviluppati per l'interfaciamento dei dati a livello dei singoli componenti, denominato LON (Local Operating Network), favorisce l'integrazione di componenti di diversi produttori, eliminando la necessità di ricorrere a protocolli di traduzione. Una LON consiste di un insieme di apparati intelligenti, o nodi programmati in modo da poter scambiarsi messaggi in risposta alle modifiche delle condizioni ambientali e agire in conseguenza delle informazioni ricevute. I nodi di una LON possono esser pensati come oggetti che rispondono a vari input producendo gli output desiderati.

Collegando opportunamente input e output, la rete viene messa in grado di operare: mentre il singolo nodo opera funzioni semplici, l'interazione fra nodi diversi da luogo a funzioni anche complesse. Uno dei vantaggi delle LON è che un piccolo numero di tipologie di nodi possono essere configurati in modo da ottenere un largo spettro di funzioni, a seconda di come i nodi sono interconnessi nella rete. Nel caso di un edificio, il sistema controlla sia le condizioni ambientali interne che il funzionamento dei sistemi energetici. Una delle caratteristiche peculiari di un sistema edificio-impianto sostenibile è la sua attitudine ad adattarsi alle esigenze degli utenti, avendo lo scopo di garantire ad un tempo le migliori condizioni in termini di comfort termico e visivo, qualità dell'aria e consumi energetici. Tutte queste funzioni possono essere ottenute solo se il sistema è dotato dell'hardware necessario a fornire tutte le informazioni necessarie. In generale un edificio con sistemi di climatizzazione, ventilazione ed illuminazione efficienti richiede di avere un sistema il più distribuito possibile sul campo: ogni livello viene dotato della necessaria autonomia ed abilità.

Tutti i nodi vengono collegati "peer to peer" in una rete di tipo BACnet/IP, la cui caratteristica principale è di consentire l'accesso a qualsiasi nodo per mezzo di un indirizzo internet.

Accanto ai controllori locali vi è un supervisore a livello centralizzato che gestisce le strategie di controllo a livello più elevato. Il tutto è in genere completato da un'interfaccia operatore implementata su PC. Le funzioni di un sistema di controllo di un edificio sostenibile sono quindi quelle di monitorare:

- le condizioni climatiche esterne
- le condizioni climatiche interne

- lo stato di funzionamento dei vari impianti
 - sistema di riscaldamento
 - sistema di condizionamento
 - sistema di trattamento aria e ventilazione
 - accensione delle luci
 - sistema di schermatura delle superfici vetrate
 - ecc.

A seguito delle condizioni rilevate il sistema di controllo deve essere in grado di scegliere il mix di regolazioni dei diversi sistemi che consentano di ottenere il risultato di garantire condizioni di comfort termico e visivo al prezzo del minor consumo energetico possibile.

Monitoraggio del clima esterno

Per il monitoraggio del clima esterno è opportuno dotare l'edificio di una stazione meteorologica in grado di acquisire tutte le grandezze che caratterizzano il clima, sulle quali impostare i sistemi di controllo.

Nell'elenco è opportuno prevedere anche una serie di sensori di radiazione solare o illuminamento da collocare sulle superfici verticali dell'edificio, possibilmente ad altezze diverse, onde valutare l'intensità della radiazione solare incidente e controllare di conseguenza la posizione degli schermi mobili esterni:

- temperatura dell'aria,
- umidità relativa,
- radiazione solare sull'orizzontale,
- radiazione solare sulle superfici verticali dell'edificio,
- illuminamento globale sull'orizzontale,
- illuminamento diffuso sull'orizzontale,
- illuminamento globale sulle superfici verticali dell'edificio,
- velocità del vento,
- direzione del vento.

Gestione degli impianti

Ciascuna unità di impianto deve essere controllata indipendentemente da una unità di controllo: in molti casi questa è costituita da un sistema di controllo interno, inerente all'impianto stesso. L'unità di controllo deve comunque poter essere connessa con il supervisore centrale per mezzo di una rete BACnet/IP. L'unità di controllo deve poter spedire dati sul funzionamento del componente e ricevere gli input decisi dal supervisore centrale, che fissa i setup di funzionamento dei vari sistemi in conseguenza delle informazioni ricevute.

Un modulo di manutenzione, installato nel supervisore centrale, gestisce la manutenzione di tutti gli impianti collegati al BEMS. Questo modulo riceve informazioni dai sensori sul campo, gestisce le scadenze di manutenzione, notificando e controllando l'avvenuta manutenzione per mezzo di sistemi di conferma (protetti da password) attivati dagli operatori a manutenzione avvenuta.

Gestione dell'edificio

La gestione delle condizioni ambientali di un edificio sostenibile, dotato di sistemi di climatizzazione, ventilazione, illuminazione non convenzionali e che sfruttino fenomeni naturali, deve essere attentamente progettato, in particolare vanno definite le diverse tipologie di ambienti classificandole in base all'esposizione alla radiazione solare, alla presenza di sistemi di schermatura e alla funzione svolta dagli ambienti stessi. In linea di principio ogni ambiente necessita di una strategia di controllo dedicata, questo può essere ottenuto, sfruttando le caratteristiche tecniche dei controllori attualmente sul mercato, con la seguente filosofia:

- pochi controllori di ambiente,

- molte stanze collegate ad un singolo controllore,

- una strategia diversa per ogni stanza.

In linea di principio ciascun controllore di ambiente dovrebbe gestire stanze con il medesimo orientamento. Ogni controllore locale viene connesso con il supervisore centrale mediante un BUS locale e una rete BACnet/IP. Il supervisore monitora le richieste di ciascun ambiente ed elabora i setup più appropriati sia per la stanza stessa che per gli impianti.

In generale, negli edifici di tipo terziario, si possono distinguere diverse tipologie di ambienti, ognuna delle quali ha esigenze diverse, di conseguenza i parametri da controllare e le funzioni controllate risultano essere diverse da tipologia a tipologia.

Tipologie di ambienti

Gli ambienti di un edificio terziario possono essere distinti in:

- ambienti dove è possibile prevedere una presenza continua e dove gli utenti interagiscono con il sistema di controllo:

- uffici,
- laboratori;

- ambienti dove può essere prevista una presenza discontinua e in cui gli utenti non possono interagire con i sistemi di controllo:

- spazi comuni,
- sale riunioni,
- sale conferenza, auditorium.

Entrambe le tipologie sopra indicate richiedono di essere controllate accuratamente, tutti i più importanti parametri ambientali devono essere tenuti sotto controllo e di conseguenza le funzioni controllate devono essere continuamente modificate. Ad ogni modo, come detto, ogni ambiente deve esse-

re controllato singolarmente, coerentemente con il tipo di uso. La differenza sostanziale tra le due tipologie di ambienti è data dalla possibilità di interazione che deve essere garantita agli ambienti del primo tipo e che non è possibile fornire a quelli del secondo tipo. Questo fatto ha importanti risvolti sia sulla gestione delle funzioni controllate che sulla progettazione del software delle strategie di controllo. In generale l'utente ha la possibilità di modificare le condizioni ambientali locali all'interno di un range prefissato. In ogni caso le azioni degli utenti è bene che siano registrate dal BEMS, il quale ne terrà conto nella elaborazione delle strategie di controllo;

- ambienti in cui le persone transitano solo per brevi periodi:

- spazi di transito (corridoi),
- toilette.

In questi spazi è possibile avere un livello di controllo inferiore: è sufficiente un semplice controllo dell'accensione delle luci per mezzo di sensori di rilevamento della presenza. Negli spazi di transito è anche possibile prevedere un funzionamento continuo dei sistemi di climatizzazione negli orari di utilizzo dell'edificio;

- ambienti con una bassissima probabilità di presenza di persone:

- magazzini,
- spazi tecnici.

Questi ambienti richiedono il semplice impiego di sistemi di rilevamento presenza al fine di assicurare il giusto livello di illuminamento nel caso di presenza di persone.

Parametri di controllo

Temperatura

Nel caso si impieghino sistemi di riscaldamento e/o condizionamento radianti, la

misura della temperatura è un elemento critico del sistema di controllo. La classica misura della temperatura dell'aria non è sufficiente a determinare le condizioni di comfort, è quindi necessario monitorare sia la temperatura dell'aria che la temperatura radiante in tutti gli ambienti dotati di sistemi di riscaldamento a pannelli radianti. La misura della temperatura dell'aria va effettuata a 1,2-1,5 m di altezza. Questo parametro serve anche per il controllo della ventilazione notturna. La temperatura media radiante va misurata per mezzo di globo-termometri, la cui localizzazione dipende dalla disposizione interna delle stanze. Una considerazione a parte va fatta per quanto riguarda i sistemi di controllo montati sui sistemi di pannelli radianti: in questi casi i suddetti controlli devono essere collegati al sistema di controllo centrale al fine di permettere un controllo remoto ed un monitoraggio del sistema.

Umidità relativa

Questo parametro va monitorato solo negli ambienti nei quali possa esser prevista una anormale produzione di vapore acqueo (cucine, laboratori ecc.).

Concentrazione di CO₂

Questo parametro serve a controllare la Qualità dell'Aria Interna (IAQ), e la conseguente portata richiesta dell'aria di ricambio. Nel caso di edifici nei quali si adottino sistemi di ventilazione a dislocazione, la misura andrebbe fatta nella cosiddetta "zona di respirazione" (altezza 1,1 m), tuttavia in ambienti molto grandi questa misura potrebbe essere influenzata da situazioni locali e di conseguenza sarebbe richiesto un gran numero di sensori. In questi casi è opportuno prevedere la misura nel condotto di ripresa. Questo parametro in questo caso viene assunto come un valor medio della qualità dell'aria, poiché i sistemi di ventilazione a

dislocamento hanno una efficienza maggiore, in questo caso verranno considerati accettabili valori più elevati di CO₂ rilevati nel condotto di estrazione. Essendo questi sensori piuttosto costosi, è possibile sostituire il sensore di CO₂ con sistemi di rilevamento presenza, per esempio negli uffici con numero di presenze più o meno costante.

Illuminamento

Questo parametro deve essere misurato negli ambienti caratterizzati da presenza continua di persone. Al fine di garantire il massimo comfort visivo i sensori vanno posizionati a livello del piano di lavoro. La misura di illuminamento influenza il funzionamento delle luci artificiali e il posizionamento degli schermi solari.

Controllo dell'apertura delle finestre

Questo è un parametro molto importante nel caso dell'impiego di pannelli radianti per la climatizzazione estiva. L'apertura di una finestra in questi casi può provocare condizioni di formazione di condensa sui suddetti pannelli. In questi casi il sistema procede sia alla disattivazione dei pannelli radianti che alla chiusura delle bocchette dell'aria di mandata.

Rilevamento presenza

Questo parametro, misurato per mezzo di sensori ad infrarosso o ad ultrasuoni, viene utilizzato principalmente con la funzione di comandare l'accensione o lo spegnimento automatico di impianti. In particolare il sistema viene utilizzato in genere per l'accensione automatica delle luci, ma è possibile impiegarlo anche per la gestione degli impianti di ventilazione, di riscaldamento e condizionamento, nel caso questi siano basati su sistemi a bassa inerzia (pannelli radianti a soffitto) con tempi di risposta molto rapidi: in questo modo è possibile climatizzare solo gli ambienti occupati e solo nel periodo di

occupazione, con evidente risparmio di energia. In alcuni casi gli edifici sono dotati di sistemi di sicurezza che consentono l'accesso ad alcune stanze solo previa lettura di badge: in questi casi il sistema di sicurezza, collegato al BEMS, può fare le veci dei rilevatori di presenza e anche dei sensori di CO₂.

Funzioni controllate

Controllo dei pannelli radianti

I pannelli radianti a bassa inerzia hanno la caratteristica di attivarsi in pochi minuti, producendo le condizioni di benessere pressoché istantaneamente. Per questo motivo possono essere controllati per mezzo di sistemi di rilevamento della presenza. La regolazione della quantità di energia fornita è demandata a sensori di temperatura radiante e dell'aria. Per evitare malfunzionamenti del sistema (formazione di condensa) il sistema provvede a disattivare i pannelli radianti allorché i sensori delle finestre ne rilevano l'apertura. La regolazione può avvenire per singola stanza o per singola zona negli ambienti di grandi dimensioni: si interviene su delle valvole di regolazione del flusso di mandata ai pannelli, una per ogni stanza o per ogni zona. In linea di principio è possibile ottenere setup diversi per ciascuna zona. Agli utenti può essere lasciata la facoltà di modificare la regolazione locale entro un range limitato (± 2 °C) nell'intorno del valore prefissato dal supervisore centrale. Tale modifica può essere fatta mediante un'interfaccia utente (per esempio un *touch screen*) collocata negli ambienti o mediante un software installato nelle postazioni PC degli uffici, in grado di colloquiare con il sistema centrale di supervisione.

Controllo della ventilazione

Questa funzione viene controllata per mezzo di saracinesche comandate in base

a quanto misurato dai sensori di CO₂ o dai rilevatori di presenza. Una ventilazione minima viene comunque immessa onde mantenere una buona qualità dell'aria anche nelle ore di non occupazione.

Illuminazione

L'accensione e lo spegnimento delle luci viene normalmente controllata per mezzo di rilevatori di presenza. L'intensità della illuminazione viene controllata per mezzo di misure di illuminamento. Anche in questo caso è lasciata agli utenti la possibilità di intervenire, entro un range prefissato, sui valori fissati dal sistema di supervisione.

Schermi solari

Il corretto orientamento degli schermi solari è il risultato di un'ottimizzazione fra le richieste di illuminamento, e la necessità di riduzione dei carichi termici per condizionamento. Questa funzione viene ottenuta da specifici controllori che raccolgono le informazioni relative alla richiesta energetica dell'edificio (sia per illuminazione che per climatizzazione). È opportuno, al riguardo, che stanze con lo stesso orientamento siano collegate allo stesso controllore.

[7.1.2]

Schema del Building Energy Management System

Lo schema di un BEMS moderno è costituito da una rete principale basata su tecnologia BACnet/IP. Nel caso di un sistema complesso, che debba gestire anche il funzionamento di impianti, per esempio, di micro-cogenerazione, lo schema può diventare quello rappresentato in figura. Gli impianti vengono gestiti per mezzo di sottoreti gestite da un BBMD (BACnet Broadcast Management Device). Questa struttura consente di identificare ciascun impianto con un indirizzo IP. L'edificio viene controllato per mezzo di sottoreti

(BUS) con protocolli proprietari sviluppati a livello di ciascun piano dell'edificio. In genere si ricorre a protocolli ben documentati e affidabili (Konnex, Lonworks ecc.). È necessario che questi BUS locali siano messi in grado di comunicare con il supervisore centrale, inviando informazioni e ricevendo input. Ogni BUS di piano viene connesso con la rete BACnet/IP per mezzo di un BACnet router.

[7.2] Strategie di controllo

Una gestione energeticamente efficiente dei controlli descritti nei paragrafi precedenti difficilmente può essere ottenuta per mezzo di strategie di controllo tradizionali basate su regole fisse, questo perché i diversi sistemi possono portare a condizioni talvolta contraddittorie: l'ottimizzazione dei setpoint in questi casi può risultare un impegno estremamente diffi-

cile da realizzare.

D'altra parte tecniche avanzate di controllo trovano una naturale applicazione in questo contesto tecnologico costituito dalle reti di sensori, consentendo di controllare diversi parametri contemporaneamente attraverso strategie di ottimizzazione. Le strategie di controllo avanzate possono essere distinte in:

- predittive,
- assistite da simulazione,
- basate su reti neurali,
- basate su logiche fuzzy,
- adattive basate su tecniche di vita artificiale.

Un sistema di controllo può in genere essere distinto in tre componenti principali, la qualità dei quali determina la qualità di tutto il processo di controllo.

I sensori forniscono al sistema di controllo le informazioni che riguardano sia i sistemi controllati (sistemi chiusi), che le variabili esterne al sistema (sistemi aperti). La figura 7.1 mostra i principi base di

Fig. 7.1

Sistemi di controllo aperti (sinistra) e chiusi

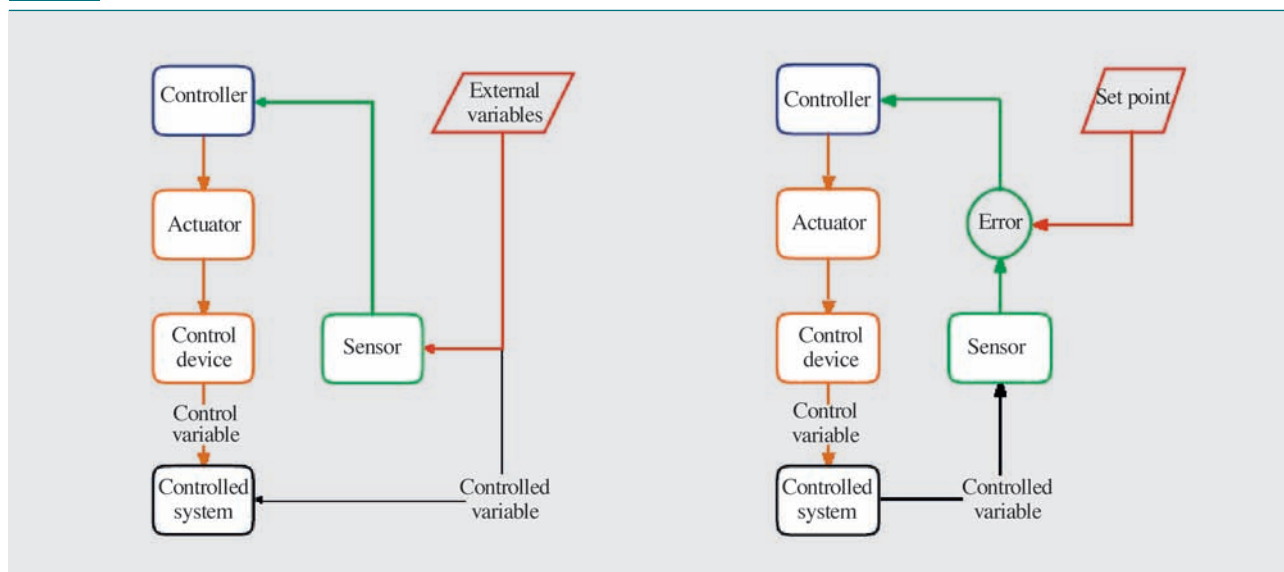
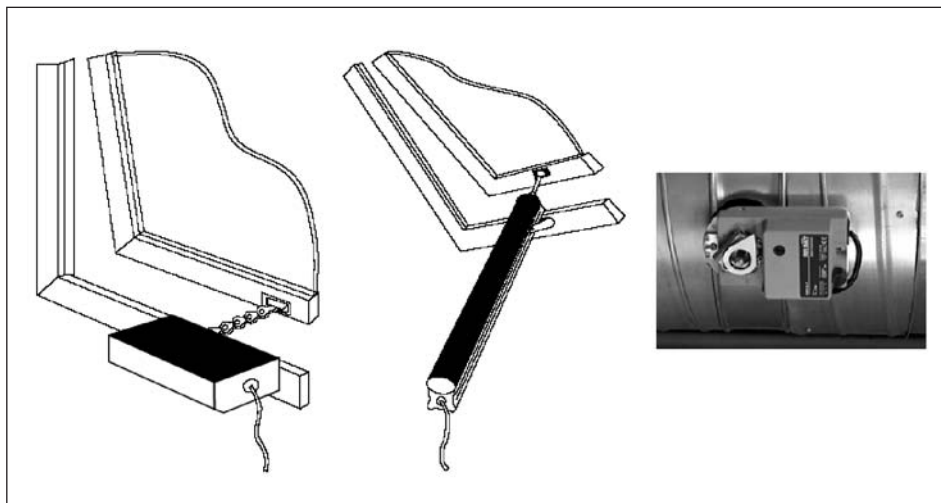


Figura 7.2
Attuatori per finestre
motorizzate



un sistema aperto (a sinistra) e di un sistema chiuso (a destra).

Gli attuatori (motori, saracinesche ecc.) controllano le apparecchiature (aperture, ventilatori ecc.) per mezzo di variabili di controllo il valore delle quali è definito dalle strategie di controllo implementate nei controllori.

La figura 7.2 mostra, da sinistra a destra, esempi di attuatori per la ventilazione naturale (catene e pistoni per apertura finestre) a per sistemi di ventilazione meccanica (saracinesche motorizzate).

La prestazione di una strategia di controllo è particolarmente sensibile a:

- qualità di informazioni fornite dai sensori,
- efficienza degli attuatori,
- adeguatezza della strategia di controllo al sistema controllato e agli obiettivi da raggiungere;. un controllo On-Off può essere efficiente se ben registrato: nella figura a sinistra è riportato uno schema con una banda morta e un minimo valore di servizio della variabile di controllo (per esempio una portata di ventilazione minima).

La strategia di controllo deve anche esse-

re testata in base le variabili inerenti i sistemi di automazione: i tempi morti e la costante di tempo (figura 7.3).

Molti edifici sostenibili fanno ricorso a tecniche di ventilazione ibrida. Trattandosi di una combinazione di ventilazione naturale e meccanica, la ventilazione ibrida implica il controllo di:

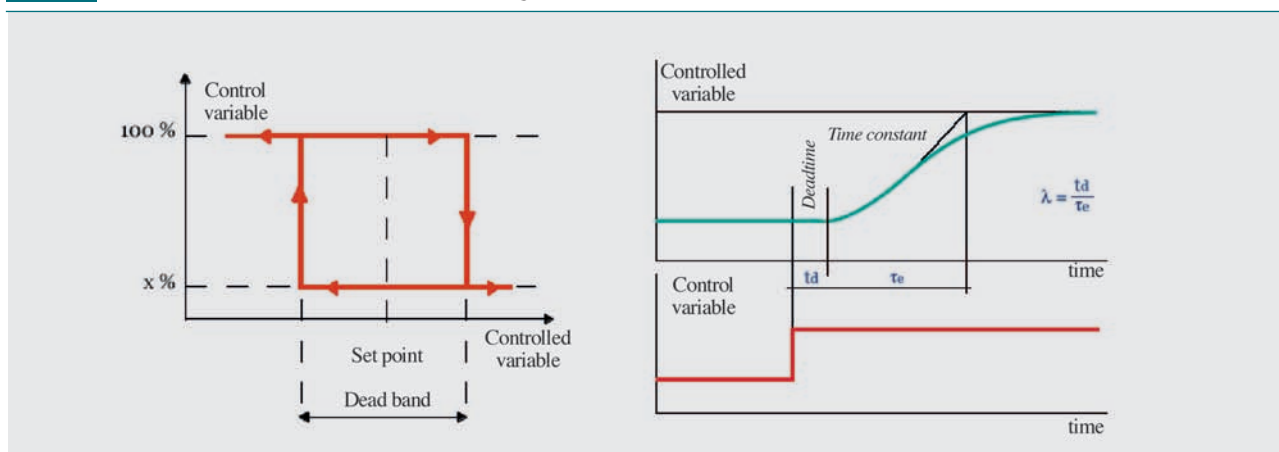
- ventilazione naturale,
- ventilazione meccanica,
- passaggio da naturale a meccanica,
- ventilazione naturale assistita da ventilatori,
- ventilazione notturna per mezzo di sistemi naturali o meccanici.

Tecniche di controllo essenziali possono essere implementate in serie per la gestione di: qualità dell'aria interna, temperatura interna, consumi energetici ecc.

Queste tecniche controllano solo un parametro e possono portare a strategie contraddittorie. Al contrario, strategie avanzate possono controllare alcuni parametri contemporaneamente, mediante una strategia "ottimizzata". Queste tecniche richiedono numerosi sensori ed attuatori e devono essere messi a punto accuratamente.

Fig. 7.3

Strategie di controllo on-off (sinistra) e dinamiche



[7.2.1]

Strategie a regole fisse

Attualmente, la maggioranza degli impianti fa uso di strategie di controllo basate su regole operative prefissate che l'operatore, oppure un controllore automatico, eseguono per perseguire il miglioramento di determinate condizioni operative e quindi raggiungere un'ottimizzazione dell'impianto stesso in relazione a determinati parametri di funzionamento. Il controllo manuale (così come un certo tipo di controllo centralizzato) considera solamente lo stato corrente del processo, ed è inadeguato per ottenere una predizione conseguente ad una qualsiasi azione di controllo. Esso dipende troppo dal conduttore di impianto e dalla sua esperienza, e rimane vincolato ad una bassissima efficienza complessiva.

Le strategie di controllo più utilizzate nel campo degli impianti tecnici degli edifici sono basate su regole fisse. La struttura di queste regole è in genere piuttosto semplice e gli aggiustamenti in corso di messa a punto del sistema sono in genere operabili solo sulla definizione dei setpoint. La struttura di queste regole è:

SE [CONDIZIONE] allora [AZIONE]

L'elemento [CONDIZIONE] può assumere solo due valori (Vero o Falso). Nella costruzione della regola si impiegano operatori Booleani or di confronto (AND, OR, =, >...). Questo elemento può essere:

Semplice:

If (T ≥ T0) Then ...

Composto:

If (T ≥ T0) And (HR < HRMAX) Then ...

Questo tipo di regole viene frequentemente implementato sui BEMS; è in grado di esplorare e controllare diversi parametri. Il problema principale è quindi la definizione delle regole, che non può essere fatta con procedure automatiche, ma che richiede una conoscenza esperta del sistema da gestire. Questa tecnica è comunque una buona risorsa per la gestione combinata dei sistemi di climatizzazione e dei componenti passivi dell'involucro dell'edificio. Volendo comprendere il funzionamento con un semplice esempio: fissato il range di comfort termi-

co della temperatura dell'aria interna, può accadere che in un dato istante e per diverse ragioni la temperatura sia più alta o più bassa dei valori accettabili. In queste condizioni il controllore cercherà di (nell'ordine):

- evitare le condizioni di discomfort (e di consumo ingiustificato) imputabili al sistema di climatizzazione: spegne il riscaldamento ($T_{air} > T_{max}$) o il condizionamento ($T_{air} < T_{min}$);
- impiega la massa termica dell'edificio controllando le aperture, i sistemi di schermatura e di ventilazione (per il riscaldamento e la ventilazione);
- impiega i sistemi di climatizzazione (attivi) per riportare l'edificio alle condizioni di comfort.

In questo tipo di strategia, che controlla un solo parametro, sono implementate solo regole semplici. Strategie più complesse, ma simili, possono per esempio controllare sia la temperatura interna che la concentrazione di CO_2 , introducendo altri parametri di controllo (velocità del vento, inquinamento esterno ecc.).

[7.2.2]

Strategie a regole fuzzy

La logica fuzzy offre molte caratteristiche che la rendono uno strumento idoneo per svariati problemi di controllo; due su tutte

sono la sua intrinseca robustezza, in quanto non richiede ingressi netti e non affetti da rumore e la sua capacità di modellizzazione di sistemi non lineari.

I controlli di tipo fuzzy sono simili, in principio, a quelli basati su regole; sono infatti basati su regole fuzzy del tipo:

If [LA CONCENTRAZIONE DI CO_2 È
MOLTO ALTA]
Then [IMPOSTA MOLTO ALTA LA
VELOCITÀ DEI VENTILATORI]

Il concetto semantico "MOLTO ALTA" fa riferimento a serie fuzzy, rappresentate come triangoli, trapezi o curve gaussiane, esempi di questo tipo sono rappresentati in figura 7.4. L'appartenenza di una variabile a una determinata serie fuzzy non è binaria (ON, OFF) ma è quantificata mediante una funzione di membership, che varia continuamente tra 0 e 1.

[7.2.3]

Sistemi esperti

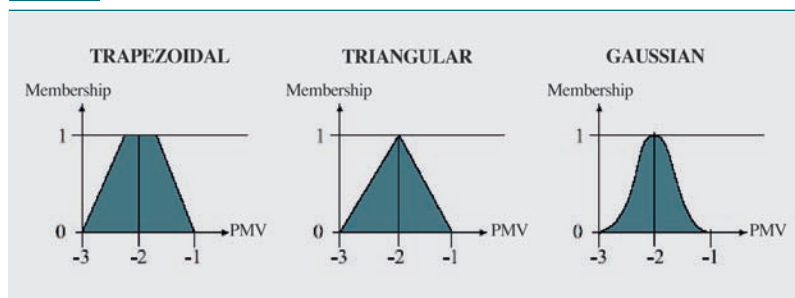
I vantaggi dei sistemi esperti possono essere riassunti nei seguenti punti:

- disponibilità, il sistema di controllo può operare a ciclo continuo nello stesso momento in posti differenti;
- consistenza, funziona sempre in modo corretto;
- competenza, può assorbire la conoscenza di più di un esperto e tende ad essere molto efficace.

D'altro canto nei sistemi esperti la base della conoscenza è trasferita da uno o più operatori allo stesso sistema, ma, durante l'evoluzione del processo, l'insieme di regole non muta, o, quantomeno, non sono apprese nuove regole direttamente dall'impianto. In questo modo il corretto andamento del controllo dipende dall'esperienza a priori trasferita dall'opera-

Fig. 7.4

Serie di riferimento fuzzy



tore alla macchina. Inoltre questa operazione, che coinvolge più persone, non è sempre agevole con conseguente difficoltà di comporre l'intero insieme di regole effettivamente utilizzate. Le regole che costituiscono la base di conoscenza (knowledge based) sono spesso stabilite con logica fuzzy.

[7.2.4]

Reti neurali

Per quanto riguarda l'approccio neurale, un primo problema risiede nella scelta dell'insieme di addestramento (training set): il criterio di dimensionamento del training set costituisce argomento di molto interesse da parte della comunità scientifica e la conclusione comune sembra essere quella di imporre una dimensione di tale insieme decisamente superiore a quella di cui abitualmente si dispone negli esperimenti su sistemi reali.

Altro elemento peculiare è la scelta della topologia. Una rete troppo piccola non è, in generale, in grado di costituire un buon modello di sistemi il cui grado di complessità sia significativo (spesso si usano nella pratica dei modelli neurali costituiti da un solo strato nascosto: questo tipo di semplificazione non induce nessuna perdita di generalità, in quanto teoricamente è sufficiente aumentare il numero di unità nell'unico strato nascosto).

Dall'altro lato una rete troppo grande può implementare numerose soluzioni consistenti con i dati di allenamento del problema, che però non le conferiscono una sufficiente capacità di generalizzazione, limitandosi ad una semplice associazione ingresso-uscita sui dati di training.

Quanto detto evidenzia la presenza di problematiche aperte sulla gestione di processi dinamici in cui l'obiettivo del

controllo sia variabile nel tempo, in seguito ad una conoscenza incompleta del modello del processo stesso. Per affrontare questo tipo di problemi si deve pensare ad un aggiornamento in linea del modello del processo stesso (continuous learning).

Una soluzione che presenta l'aggiornamento on-line di un modello provvisorio del sistema da controllare è offerta da reti neurali in grado di riaddestrarsi continuamente quando si presentino nuove misure di processo. Il problema in tali approcci è che comunque si programmi l'addestramento, esso deve comunque essere supervisionato e non può essere condotto in modo autonomo dal sistema. Un approccio innovativo all'addestramento delle reti neurali è ancora in fase di studio e prevede la determinazione dei pesi delle reti attraverso algoritmi basati sull'evoluzione naturale (reti neurali evolutive). In questo modo non si avrebbe più necessità di supervisionare il procedimento di apprendimento, in quanto l'algoritmo stesso sarebbe in grado di seguire l'evoluzione del processo.

Le tecniche più avanzate, quali quelle basate sulla vita artificiale, possono essere dotate di sistemi di autoapprendimento, garantendo quindi un notevole progresso della potenzialità dei sistemi di controllo.

Nonostante tutti questi vantaggi e sebbene queste tecniche siano conosciute da molti anni e siano state applicate con successo in processi industriali, non sono molto applicate nei sistemi di controllo degli edifici. La ragione di questa situazione risiede principalmente nelle difficoltà di implementazione, in particolare modo per quanto riguarda il processo di messa a punto: in genere lungo e laborioso.

[7.3] Il concetto di "Casa Intelligente" e le sue funzionalità

Il significato di casa intelligente e di domotica, la disciplina che ne studia tutti gli aspetti teorici ed applicativi, si è evoluto in questi ultimi anni alla luce dello sviluppo tecnologico e delle esigenze di una utenza eterogenea e con specifiche richieste.

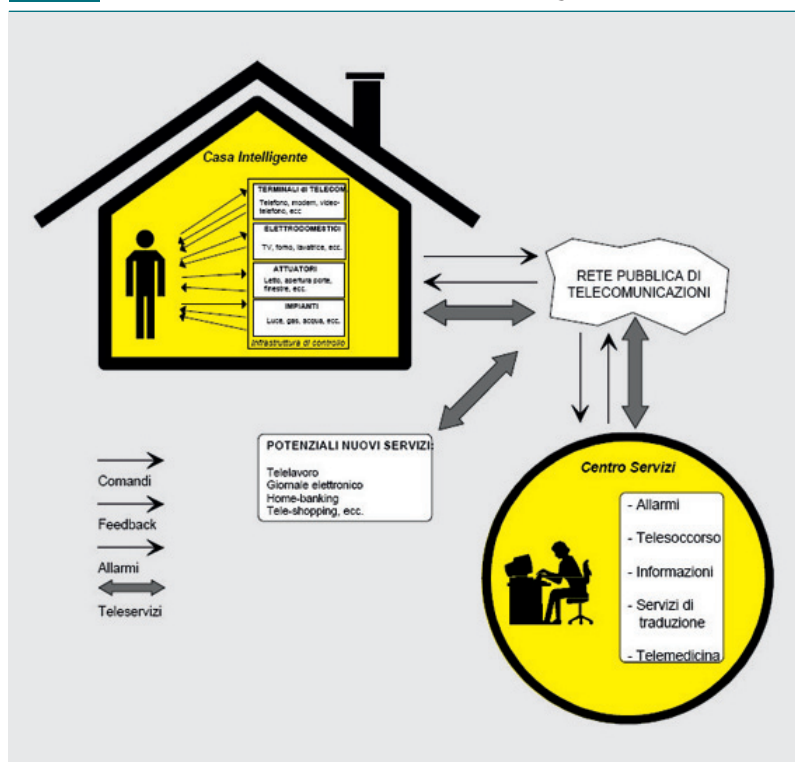
Possiamo intendere con il termine "Casa Intelligente" un sistema dell'Information Technology che integri diversi sottosistemi e dispositivi per il controllo automatico di apparati domestici (es. gestione microclima, attuatori per il movimento di porte e finestre, attivazione di elettrodo-

mestici, controllo dell'illuminazione ecc.), di sensori dello stato dell'ambiente (es. rilevatori di fumo, di gas, di perdite idriche, sensori di calore, sensori di movimento, allarmi tecnici ecc.), di funzioni intelligenti di supporto (es. agenda domestica, guida per la preparazione dei cibi, avviso per gli orari di assunzione medicine ecc.) e di sistemi di telecomunicazione per la connessione con centri servizi per l'assistenza a distanza (es. tele-soccorso, tele-assistenza, tele-monitoraggio ecc.).

In termini gerarchici la domotica si pone quindi come contenitore, all'interno del quale operano i sistemi di controllo presentati nei paragrafi precedenti. Dal punto di vista applicativo però la domotica è una disciplina molto giovane e con un campo di applicazione molto limitato rispetto ai BEMS. È per questa la ragione che la casa intelligente è introdotta solo successivamente in questa sezione.

L'ambiente domestico, figura 7.5, così attrezzato ed integrato può essere gestito e controllato dall'utente tramite una opportuna interfaccia utente (es. telecomando, video tastiera, interfaccia vocale ecc.), che realizza il colloquio (invio comandi e ricezione messaggi) con un sistema intelligente di controllo, basato in genere su di un microcomputer. I vari componenti della "casa intelligente" sono connessi con il sistema di controllo tramite un sistema di interconnessione di vari tipo (es. rete locale domestica, onde convogliate su rete elettrica, onde radio ecc.). Il sistema di controllo provvede ad interpretare ed eseguire i comandi dell'utente (es. apertura porta), a monitorare continuamente lo stato dell'ambiente (es. presenza di gas), a gestire automaticamente delle operazioni di controllo (es. regolazione temperatura) e ad attivare gli eventuali messaggi nei confronti dell'utente e dei

Fig. 7.5 L'ambiente della Casa Intelligente



servizi di assistenza remoti (es. allarme incendio). Alla attivazione di ogni comando, l'infrastruttura di controllo della "Casa Intelligente" può fare giungere all'utente un segnale di avviso/conferma dell'operazione effettuata. Tale segnale può essere utile per fare comprendere all'utente l'attuale stato dei dispositivi domestici, in quanto egli potrebbe non averne la percezione diretta (ad esempio, un utente non vedente, attivata l'accensione delle luci non avrebbe la certezza di avere attivato il comando giusto e neanche che le luci funzionino).

[7.3.1]

I servizi integrabili con la "Casa Intelligente"

L'integrazione di un ambiente di "Casa Intelligente" con i sistemi di telecomunicazioni consente la realizzazione di funzionalità avanzate di tele-soccorso, tele-assistenza e tele-monitoraggio. Per maggior informazione diamo una sintetica descrizione ad alcuni termini.

Tele-soccorso

Il tele-soccorso è genericamente un servizio che può essere attivato direttamente dall'utente (premendo pulsanti situati in posizioni fisse o tramite un trasmettitore portatile) per segnalare l'insorgere di un malore o la necessità di un intervento di assistenza. La chiamata di tele-soccorso viene inoltrata direttamente dal sistema a una sequenza di numeri telefonici preimpostati (es. parenti, Centro Servizi, 113). Appena un numero risponde può essere previsto l'invio di un messaggio vocale preregistrato e/o di un identificativo elettronico dell'utente riconoscibile automaticamente dal Centro Servizi. Occorre che il telefono dell'utente sia commutato direttamente in viva-voce dopo la chiama-

ta, per consentire al chiamato di verificare direttamente e immediatamente la situazione del chiamante. L'integrazione del tele-soccorso con le funzionalità della "Casa Intelligente" può consentire di ampliare notevolmente le potenzialità del tele-soccorso. Infatti, possono essere inviate in modo automatico dal sistema delle chiamate di emergenza anche in caso di allarmi rilevati dai sensori all'interno della casa (es. sensori di fumo, anti incendio ecc.). Il sistema sarà anche in grado di chiamare automaticamente gli appropriati servizi di soccorso (es. pompieri, polizia ecc.).

Tele-assistenza

Il servizio di tele-assistenza consente genericamente di contattare l'utente periodicamente per verificarne lo stato di salute e fornire un supporto di tipo sociale e/o psicologico.

L'integrazione della tele-assistenza con le funzionalità della "Casa Intelligente" può consentire ad un Centro Servizi di controllare direttamente lo stato della Casa e di effettuare remotamente delle operazioni di assistenza (es. attivazione elettrodomestici, regolazione temperatura, preparazione di messaggi temporizzati per ricordare all'utente di eseguire particolari attività ecc.).

Ovviamente occorrerà tenere conto accuratamente delle implicazioni etiche e legali poste dalla possibilità di controllo remoto della casa date dalla tele-assistenza: le funzioni di tele-assistenza dovranno potere essere inibite dall'utente e non dovranno potere essere attivate senza il suo consenso; potranno essere consentite in modo automatico solo a fronte di un allarme o sempre abilitate solo nel caso di particolari utenti a rischio. Dovrà inoltre essere garantito un adeguato livello di

sicurezza affinché le funzioni di controllo remoto non possano essere attivate per errore da persone non autorizzate o in modo doloso da malintenzionati.

Tele-monitoraggio

Il servizio di tele-monitoraggio consente genericamente l'invio di messaggi diagnostici sullo stato di funzionalità degli apparati della casa, consentendo di attivare prontamente le operazioni di manutenzione necessarie.

L'integrazione del tele-monitoraggio con le funzionalità della "Casa Intelligente" può consentire ad un Centro Servizi di effettuare, per quanto possibile, delle operazioni remote di test e controllo degli apparati, riconfigurare opportunamente il sistema oppure aggiornare i programmi del sistema di controllo. Anche in questo caso è essenziale che siano garantite delle funzioni di sicurezza affinché non sia possibile operare sulla Casa senza il consenso dell'utente e sia garantita una protezione contro l'accesso al sistema di persone non autorizzate.

La diffusione della "Casa Intelligente" potrebbe anche fornire nuove possibilità per i servizi di *Protezione Civile* che potrebbero inviare messaggi di allarme e istruzione agli utenti tramite i Centri Servizi. Le attuali procedure di allarme possono infatti essere inadeguate per alcune persone anziane; si pensi ad esempio agli anziani con problemi di udito che potrebbero essere informati di un pericolo tramite gli avvisatori luminosi e/o tattili (es. cuscino vibratore orologio vibratore) della "Casa Intelligente".

Tele-servizi

L'ambiente di "Casa Intelligente" può favorire la realizzazione e la diffusione di altri tele-servizi di tipo generale, che pos-

sono usufruire della stessa infrastruttura telematica (in particolare se questa è basata su rete ISDN). Alcuni di questi tele-servizi potrebbero essere di particolare interesse per gli utenti anziani.

Tele-shopping

Il "tele-shopping" può consentire la gestione remota di ordinazioni di prodotti, consentendo l'eventuale consultazione di cataloghi elettronici o utilizzando cataloghi dotati di codici a barre per facilitare la scelta dei prodotti. L'integrazione di funzionalità di tele-shopping con l'ambiente della "Casa Intelligente" può consentire di mantenere un controllo sulla disponibilità di prodotti essenziali e fornire la possibilità di effettuare gli ordini automaticamente.

La diffusione di servizi di "home-banking" consente l'effettuazione remota di procedure bancarie con vantaggi anche sui problemi della mobilità diretti ed indotti. Risulta anche possibile realizzare dei servizi di accesso remoto agli uffici pubblici, per la richiesta di documenti o l'espletamento di pratiche. Le tecnologie di lavoro cooperativo attualmente disponibili possono anche consentire la realizzazione di servizi pubblici per l'aiuto interattivo agli anziani nella compilazione di moduli e pratiche. Chiaramente il territorio ed i servizi pubblici dovranno essere attrezzati e configurati per poter rispondere a questo tipo di servizio.

Il sistema di comunicazione della "Casa Intelligente" può inoltre essere integrato con servizi informativi e banche dati di vario tipo.

La diffusione e consultazione di giornali e libri in forma elettronica è facilmente realizzabile, con l'attuale tecnologia, e può rendere disponibili nuove modalità di informazione per gli anziani, quali ad

esempio la lettura automatica dei testi tramite dispositivi di sintesi vocale.

Tele-medicina

I servizi di tele-medicina possono consentire un monitoraggio a distanza di alcuni parametri fisici, consentendo ad esempio il controllo remoto di un elettrocardiogramma, della pressione sanguinea o del livello di glucosio nei pazienti diabetici. Infine la realizzazione di servizi di "tele-training" (insegnamento a distanza), può aprire nuove possibilità per l'aggiornamento continuo degli utenti e per l'esecuzione di programmi di riabilitazione.

L'integrazione nella "Casa Intelligente" di alcuni nuovi servizi di telecomunicazione può aprire ulteriori possibilità. Ad esempio la disponibilità di un videotelefono (installabile già da oggi sulla rete pubblica ISDN) potrà consentire agli utenti una migliore interazione con i servizi sociali e con gli altri utenti, contribuendo a rendere più "personali" le comunicazioni e a ridurre l'isolamento. Il videotelefono può consentire inoltre una maggiore efficacia dei servizi sociali di assistenza, che potranno garantire un colloquio più frequente con gli anziani ed un controllo visivo delle loro condizioni. L'introduzione dei servizi di "video-on-demand" e la televisione interattiva potranno aggiungere delle nuove dimensioni anche per quanto riguarda le attività di intrattenimento.

Per il terziario il discorso presenta maggiori applicazioni per quanto investe la efficienza energetico-ambientale dei sistemi tecnologici, a supporto dell'edificio, l'Office Automation, la logistica, la sicurezza, la fornitura di teleservizi la possibilità di controlli remoti ed interventi a distanza da parte dell'utenza o del soggetto

preposto alla gestione e manutenzione del sistema edificio impianto.

[7.3.2]

I componenti di un sistema domotico

Indipendentemente dalla topologia del sistema, la domotica prevede una serie di componenti comunque da installare. Questi sono:

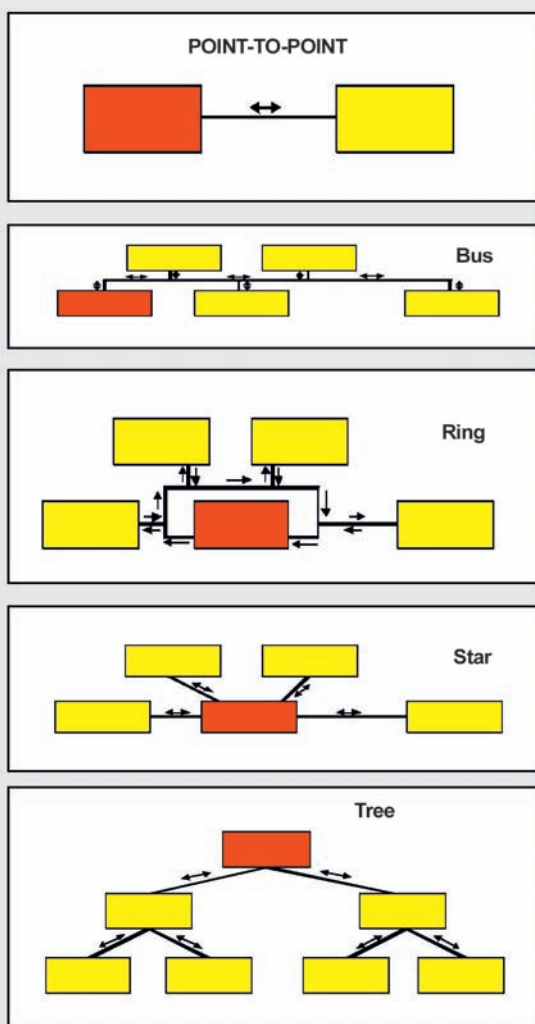
- **unità centrale:** è il cuore del sistema, ha la funzione di elaborare i segnali provenienti in input dai sensori e dalle interfacce utente, e gestisce i dispositivi periferici in funzione delle strategie di controllo. Dal punto di vista fisico l'unità centrale può essere un personal computer dedicato o una centralina domotica dotata di un proprio sistema operativo;
- **interfaccia utente:** sono gli elementi che consentono l'interazione tra l'utente ed il sistema domotico, per questo motivo rivestono una fondamentale importanza nella gestione efficiente di tutto il sistema domotico, ed è necessario che siano semplici e di facile utilizzo;
- **attuatori:** sono i componenti di potenza in grado di inserire/disinserire un carico elettrico alimentato a tensione di rete. Nelle applicazioni domotiche è necessario prevedere l'alimentazione di rete e della linea bus. Dal punto di vista pratico l'attuatore è il componente che esegue la gestione di un apparecchio dell'abitazione, ad esempio la chiusura delle tapparelle in caso di eccesso di radiazione solare in ingresso;
- **sensori:** componenti che raccolgono i segnali dall'ambiente e sono in grado di impartire la funzione voluta ai dispositivi che realizzano l'interfaccia di

potenza con i carichi (attuatori, regolatori, ecc). Ad esempio, un solarimetro rileva il livello di radiazione solare che, se ricade nell'algoritmo di controllo, determinerà l'abbassamento delle tapparelle.

- gateway residenziale: unità per la connessione con la rete di comunicazione esterna.

Fig. 7.6

Topologie di un sistema domotico.
Flussi unità centrale (rosso) e periferiche (giallo)



[7.3.3]

Topologia del sistema domotico

Il sistema domotico è costituito essenzialmente da una unità centrale e più unità periferiche (nel caso banale una sola unità periferica). La topologia del sistema è fondamentale poiché definisce il collegamento tra le varie unità, la scelta topologica dipende da una serie di parametri legati alla complessità, alle gerarchie ed tipologia di controllo del sistema. In figura 7.6 si riportano le topologie domotiche più comuni, essendo indicata in rosso l'unità centrale ed in giallo quelle periferiche. Le topologie sono:

- punto a punto,
- bus, ovvero unità periferiche in serie su una linea aperta,
- anello, ovvero unità periferiche in serie su una linea aperta,
- stella, ovvero ogni unità periferica ha un collegamento individuale con l'unità centrale,
- albero, ovvero sono disposte delle unità periferiche di livello intermedio che ricordano le più esterne con l'unità centrale.

Queste topologie fanno riferimento ad una logica di funzionamento per cui ogni punto del sistema è in grado di gestire, controllare e regolare l'ambiente (detto campo) in maniera autonoma senza la necessità di un supervisore di gestione, ma facendo riferimento al proprio algoritmo di funzionamento.

[7.3.4]

La trasmissione dei dati

Il mezzo trasmissivo utilizzato assume un ruolo fondamentale all'interno di un sistema domotico, in quanto lo rende adeguato ad un'eventuale e semplice ampliamento e quindi scalabile. Al contrario, in

alcuni casi la soluzione adottata può essere scarsamente flessibile e difficilmente adattabile a nuove configurazioni. I mezzi trasmissivi possibili per la rete di interconnessione sono:

- **onde convogliate:** è il sistema di trasmissione dati che utilizza i conduttori di distribuzione dell'energia elettrica 50-60 Hz. Tutti i componenti del sistema sono collegati in parallelo e comunicano tra loro attraverso la rete elettrica grazie ad opportuni dispositivi. Il vantaggio nell'utilizzare le onde convogliate risiede nel fatto che viene sfruttata la linea elettrica esistente, evitando il problema dell'installazione di nuovi cavi e di opere murarie accessorie. I comandi vengono inviati sulla rete elettrica e raccolti dalle utenze interessate attraverso un codice di indirizzamento univoco. Possibili problemi con questa tecnologia sono quelli relativi alle interferenze, che possono essere superati con l'adozione del cosiddetto filtro di linea. Una limitazione è la bassa velocità di trasmissione;
- **infrarossi:** si tratta di un metodo di comunicazione senza fili, limitato principalmente dal vincolo di direzionalità del segnale e dalla forte attenuazione in presenza di ostacoli tra il trasmettitore e il ricevitore;
- **radiofrequenza:** metodo di trasmissione basato su onde radio. Questa soluzione ha impatto di installazione molto basso e consente di realizzare semplici controlli. È possibile coprire l'intera casa senza bisogno di ripetitori, ma occorre evitare di trasmettere segnali non desiderati agli impianti delle abitazioni vicine.
- **BUS di linea (Doppino ritorto):** è un sistema di trasmissione di segnali che

utilizza una coppia di conduttori dedicati. Il doppino twistato (doppino telefonico intrecciato) è il mezzo di trasmissione più semplice, ma richiede un maggiore lavoro di installazione per la posa dei cavi, quindi decisamente più invasivo dal punto di vista costruttivo. Questa tecnica di trasmissione è molto flessibile e si presta bene soprattutto in abitazioni molto grandi con un gran numero di componenti e, di conseguenza, con molti punti da raggiungere;

- **fibra ottica:** mezzo di trasmissione che permette il trasferimento dati tramite segnali luminosi che viaggiano all'interno di una guida d'onda. Altissime velocità di trasferimento dati e immunità dai disturbi elettromagnetici i punti forti.

[7.3.5]

Gli standard domotici

Lo standard, o protocollo, è sostanzialmente il linguaggio del sistema domotico cui di devono uniformare i componenti che ne vengono integrati. Il proliferare di standard ha reso critico il problema fondamentale della domotica: l'integrazione. Gli standard attualmente sul mercato sono numerosi e si rimanda alla bibliografia di settore. Si vuole in questa sede invece presentare un sistema, la cui comparsa ha ed avrà dei risvolti fondamentali sulla dissezione delle tecnologie intelligenti negli edifici.

Il processo di convergenza dello standard Konnex nella normativa europea CENELEC EN50090 "Home and Building Electronic Systems (HBES)" consiste nella definizione di uno standard unico Europeo per l'automazione della casa e dell'edificio basato sullo standard Konnex. In concreto ciò significa che tutti i sistemi e dispo-

sitivi certificati KNX (Konnex), e quindi anche quelli EIB, sono già conformi e compatibili con la normativa europea CENELEC EN50090. Questo ha rappresentato un grosso passo avanti per la promozione di questa tecnologia in quanto ha reso possibile l'utilizzazione di diversi componenti prodotti da ditte produttrici diverse. L'associazione Konnex è la realtà che ha dato vita allo standard KNX, la tecnologia bus per tutte le applicazioni dedicate alla Home & Building Automation.

Nata sulla spinta delle tre associazioni europee BatiBUS, EIB ed EHS – che hanno ritenuto di condividere le rispettive decennali esperienze in tale mercato – l'Associazione Konnex ha integrato i tre differenti meccanismi di configurazione dei sistemi ed i diversi mezzi fisici nell'unico protocollo KNX, al fine di assicurare un rapporto costo/prestazione adeguato per tutti i tipi di edificio ed applicazioni.

Di recente è stato annunciato che tutte le compagnie associate che hanno contribuito allo sviluppo e al riconoscimento della tecnologia KNX, hanno concordato di rilasciare i 61 brevetti necessari per l'implementazione di prodotti basati sulla tecnologia KNX, versione 1.0. Inoltre, i comitati tecnici nazionali, sotto l'egida del TC 205 del CENELEC, hanno accettato la tecnologia KNX come lo standard per la Home e la Building Automation (registrato secondo le norme EN: 50090-3-1, 50090-4-1, 50090-4-2, 50090-5-2 e 50090-7-1). In tal modo la tecnologia KNX è divenuta di fatto il primo standard mondiale nel settore della domotica e l'automazione degli edifici, garantendo i seguenti vantaggi:

- è totalmente privo di royalty aggiuntive per i membri della associazione Konnex,

- è totalmente indipendente da qualunque specifica applicazione tecnologica hardware/software,
- i profili applicativi sono incorporati come parte integrale dello standard,
- si caratterizza per una procedura di certificazione obbligatoria dei prodotti, che conduce al rilascio del marchio KNX per i dispositivi, a garanzia dell'interoperabilità nativa tra prodotti di costruttori diversi,
- dispone di un tool software unico e integrato per l'installazione, progettazione, engineering e messa in servizio.

L'applicazione dello standard e delle tecnologie di domotica fanno riferimento a diverse strutture topologiche tramite il quale il sistema viene installato e gestito in funzione delle esigenze dell'utenza.

Il sistema Konnex è un protocollo che supporta un sistema decentralizzato ad intelligenza distribuita, dove l'intelligenza risiede in ogni singolo dispositivo, ciò è un buon vantaggio, ad esempio se un dispositivo non funziona correttamente è possibile con maggior tempestività agire sul guasto o sostituire direttamente il dispositivo senza tempi di attesa troppo lunghi.

I media supportati da Konnex sono: twisted pair (type 1 e 0), powerline 110 kHz, powerline 132 kHz, radio frequenza, infrarossi. Sul bus konnex-EIB è possibile collegare massimo circa 12.000 dispositivi, ogni apparato collegato al bus viene identificato dal numero di campo (insieme di 12 linee bus), numero di linea di campo, numero di apparato della linea. Per quanto riguarda la configurazione sono disponibili 3 modalità:

- S-mode (System mode), ad uso di installatori esperti, modalità che mette a disposizione l'utilizzo di tutte le fun-

zioni disponibili, dunque permette di rispondere ad ogni tipo di esigenza;

- E-mode (Easy mode), ad uso di installatori con competenze medie, mette a disposizione meno funzioni rispetto al S-mode, visto che i componenti sono già preconfigurati con parametri standard;
- A-mode (Automatic mode), modalità che permette di agevolare la configurazione da parte dell'utente finale; i tipi di componenti A-mode dispongono di meccanismi di configurazione automatica che permettono di collegare i

dispositivi ad altri dispositivi di tipo A-mode presenti nella propria rete domestica.

Tutti gli elementi della rete vengono configurati mediante l'ausilio di un unico tool software, denominato ETS (Engineering tool software), che è composto da due parti principali: gestione progetti e prodotti e messa in servizio test.

Sicuramente un limite di questa tecnologia è la lentezza, dunque poco adattabile alla gestione video, comunque a vantaggio dell'affidabilità del sistema.



Capitolo Otto



Le pompe di calore

[8.1] Introduzione

La pompa di calore è una macchina che, utilizzando energia meccanica o termica, trasporta calore da un corpo più freddo ad un corpo più caldo. Si parla in generale di frigorifero o raffrescatore quando l'effetto mirato è la sottrazione di calore da fluidi o da ambienti "freddi", e di pompa di calore quando l'effetto mirato è il riscaldamento di fluidi o di ambienti "caldi". In realtà si parla della stessa macchina, che basa il suo principio di funzionamento sul ciclo di Rankine inverso, che può operare quindi come un raffrescatore o come una pompa di calore, oppure simultaneamente in entrambi i modi. In base alla modalità di funzionamento, le pompe di calore possono essere suddivise in due gruppi principali:

- a compressione di vapore saturo,
- ad assorbimento.

Le pompe di calore si distinguono in funzione delle tipologie di sorgenti che vengono utilizzate. I principali accoppiamenti sono: aria – acqua; aria – aria; acqua – acqua; acqua – aria.

L'aria come sorgente fredda ha il vantaggio di essere disponibile ovunque, tuttavia la potenza resa dalla pompa di calore diminuisce con la temperatura della sorgente. Nel caso si utilizzi l'aria esterna, è necessario (intorno a 0 °C) un sistema di sbrinamento che comporta un ulteriore

consumo di energia. Diverso e più vantaggioso è l'impiego come sorgente fredda dell'aria interna viziata (aria estratta), che deve essere comunque rinnovata.

L'acqua come sorgente fredda garantisce le prestazioni della pompa di calore senza risentire delle condizioni climatiche esterne, tuttavia richiede un costo addizionale dovuto al sistema di adduzione.

Il terreno come sorgente fredda garantisce ottime prestazioni alla pompa di calore. Infatti alla profondità di 10 metri circa il terreno presenta una temperatura costante tutto l'anno, che oscilla dai 12 ai 14 gradi centigradi; infatti a queste profondità le condizioni climatiche esterne non influiscono sulle condizioni termiche del sottosuolo. In questo contesto tecnologico risulta essere importante l'analisi del sottosuolo in riferimento alle diverse stratigrafie presenti e della presenza o meno di falde acquifere, per il giusto dimensionamento delle sonde geotermiche e della pompa di calore che gestirà termicamente gli spazi dell'edificio.

8.2 Pompa di calore a compressione

La pompa di calore opera in un circuito chiuso in cui scorre un fluido detto frigorifero. A diverse condizioni di pressione

e di temperatura il fluido si può trovare sia sotto forma di liquido che di vapore. Il circuito chiuso percorso in modo orario, figura 8.1, è costituito da:

- un compressore alimentato elettricamente,
- un condensatore (Ambiente interno con temperatura T_C),
- una valvola di espansione o di laminazione V_1 ,
- un evaporatore (Ambiente esterno con T_E).

Il condensatore e l'evaporatore sono costituiti da scambiatori di calore, cioè tubi posti a contatto con un fluido di servizio (che può essere acqua o aria) nei quali scorre il fluido frigorifero. Questo cede calore al condensatore e lo sottrae all'evaporatore. I componenti del circuito possono essere sia raggruppati in un unico blocco, sia divisi in due parti (sistemi "SPLIT") raccordate dai tubi nei quali circola il fluido frigorifero. Nel funzionamento il fluido frigorifero, all'interno del circuito, subisce le seguenti trasformazioni:

- **compressione:** il fluido frigorifero allo stato gassoso e a bassa pressione, proveniente dall'evaporatore, viene portato ad alta pressione; nella compressione si riscalda per assorbimento di energia meccanica del compressore;
- **condensazione (T_C):** il fluido frigorifero, proveniente dal compressore, passa dallo stato gassoso a quello liquido cedendo calore all'esterno;
- **espansione:** passando attraverso la valvola di espansione il fluido frigorifero liquido si trasforma parzialmente in vapore e si raffredda;
- **evaporazione (T_E):** il fluido frigorifero assorbe calore dall'esterno ed evapora completamente.

L'insieme di queste trasformazioni costituisce il ciclo della pompa di calore: nell'evaporatore il fluido frigorifero assorbe calore dal mezzo circostante, tramite il compressore riceve un ulteriore apporto di energia, infine, tramite il condensatore, cede calore al mezzo da riscaldare.

Il relativo ciclo termodinamico è presentato in figura 8.2. Nel funzionamento, la pompa di calore consuma energia elettrica nel compressore, assorbe calore nell'evaporatore dal mezzo circostante, che può essere aria o acqua, e cede calore al mezzo da riscaldare nel condensatore (aria o acqua). In questo tipo di ciclo, quindi, spendendo energia pregiata nel motore elettrico, trasformata in energia meccanica nel compressore, si riesce a prelevare calore a bassa temperatura da una sorgente fredda, normalmente gratuita, cedendo contemporaneamente calore a più alta temperatura in un pozzo caldo opportuno.

Per esempio, nel comune frigorifero di casa, che utilizza questo ciclo, la sorgente fredda è rappresentata dal cibo che deve essere raffreddato, mentre il pozzo

Fig. 8.1 Schema della pompa di calore a compressione

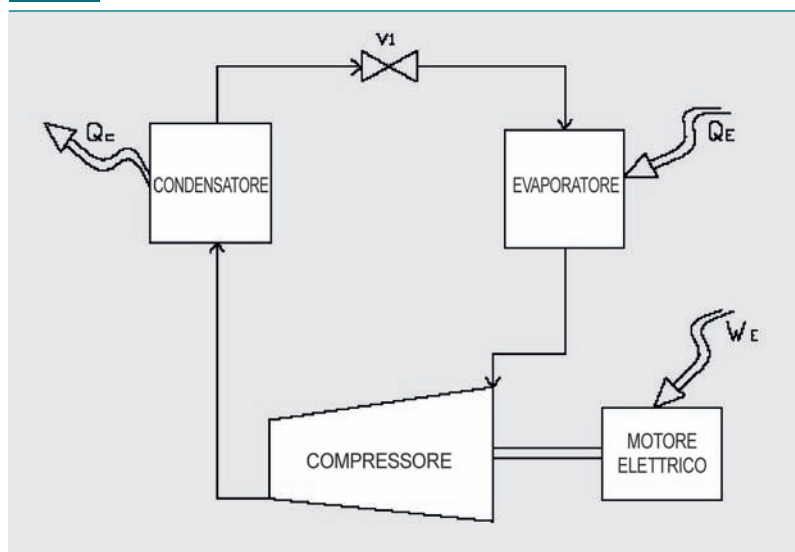
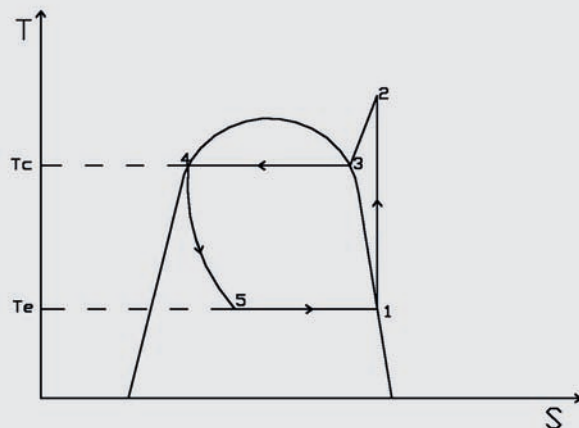


Fig. 8.2 | Rappresentazione del ciclo a compressione sul piano TS



caldo è l'aria dell'ambiente dove è collocato il frigorifero stesso. Analogamente, in una pompa di calore, la sorgente fredda è di solito l'aria esterna che cede calore gratuito all'evaporatore della macchina, mentre il pozzo caldo è l'ambiente dell'edificio da riscaldare.

A temperature esterne basse, già pochi gradi sopra lo zero, le prestazioni della pompa di calore decrescono notevolmente, per questi motivi è consigliabile indirizzare l'installazione di questi apparecchi nei luoghi dove le condizioni climatiche sia più favorevoli per il loro funzionamento. Va tenuto conto inoltre che la potenza termica resa dalla pompa di calore dipende dalla temperatura a cui la stessa assorbe calore. Poiché una pompa di calore assorbe calore da una sorgente fredda e lo cede ad una calda le applicazioni civili sono due: nel periodo invernale può essere usata come sistema di riscaldamento (assumendo come sorgente calda l'ambiente da riscaldare) e nei mesi estivi come sistema di raffrescamento.

Per il riscaldamento la sorgente fredda

dalla quale si estrae calore può essere l'aria esterna oppure l'acqua (di falda, di fiume, di lago) quando essa è presente nelle immediate vicinanze degli ambienti da trattare, oppure si può sfruttare l'energia termica costante del terreno, oltre i 10 m, tramite le sonde geotermiche (pompe di calore geotermiche). Per il raffrescamento la pompa di calore funziona a ciclo inverso assumendo come sorgente fredda lo stesso ambiente interno.

Fluidi impiegati

La storia dei fluidi impiegati nei cicli delle macchine a compressione è lunga e complicata, dal momento che alcuni di questi sono stati oggetto di particolare attenzione da parte delle autorità internazionali poiché corresponsabili dell'attacco alla fascia di ozono. Inizialmente sono stati utilizzati i Cloro-Fluoro-Carburi (detti CFC e il cui gas di riferimento era il Freon 11, la cui sigla commerciale è F11 o, con riferimento alla simbologia internazionale, R11) che si sono dimostrati i più aggressivi e duraturi nell'atmosfera. Essi sono stati banditi dall'utilizzo negli impianti frigoriferi e sono oggi stati sostituiti dagli Hydro-Cloro-Fluoro-Carburi (detti HCFC, come, ad esempio, R22) che presentano molecole meno stabili per la presenza dell'idrogeno non sostituito dal cloro o dal fluoro. Anche questi fluidi sono a vita limitata poiché entro il prossimo decennio dovranno essere totalmente sostituiti da fluidi frigorigeni che non presentano pericolo di attacco all'ozono. Gli HCFC sono in genere costosi e non sempre innocui per l'uomo quindi il loro uso è sempre confinato all'interno di circuiti sigillati e con finalità limitate all'impiantistica frigorifera.

Oggi si utilizzano HCFC a molecola complessa (R113, R114, R125, R134a, R143) caratterizzati da più atomi di carbonio e

dalla presenza di un maggior numero di molecole di idrogeno non sostituite.

Tra i nuovi fluidi impiegati nelle pompe di calore domestiche, oggi in commercio, si trova l'R410A che risulta costituito da una miscela di R32 (50%) e di R125 (50%), e l'R407C costituito da una miscela di R32 (23%), R125 (25%) e R134a (52%). In alcuni casi si sta ritornando ad utilizzare anche l'ammoniaca (NH_3 o R717) che, pur aggressiva e olfattivamente molesta, presenta notevoli vantaggi impiantistici (ha, infatti, il maggior calore latente di vaporizzazione dopo l'acqua) e non attacca l'ozono. Vari laboratori internazionali stanno studiando molecole complesse per i fluidi frigorigeni di domani.

[8.3] Pompa di calore ad assorbimento

Con riferimento alla figura 8.1, lo schema semplificato di una macchina ad assorbi-

mento può essere compreso paragonandolo a quello già visto per una macchina a compressione, sostituendo il gruppo motore-compressore con un "compressore termico" (figura 8.3) composto da due scambiatori di calore, generatore ed assorbitore, una seconda valvola di strozzamento V2 ed una pompa. In questo ciclo, il vapore di refrigerante ad alta pressione che deve seguire il percorso condensatore-valvola V1-evaporatore per creare l'effetto utile frigorifero ($-10 \sim +5 \text{ }^\circ\text{C}$), viene creato da una caldaia dove bolle una soluzione di refrigerante e di sostanza assorbente. Tale operazione viene condotta per mezzo di energia termica Q_G ad alta temperatura ($90 \sim 180 \text{ }^\circ\text{C}$) ceduta da un bruciatore a gas oppure da un serpentino percorso da vapore od acqua calda. Il vapore a bassa temperatura prodotto dall'evaporatore viene invece inviato nell'assorbitore, dove viene ceduto calore Q_A al pozzo caldo al pari del condensatore ($40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$), per miscelarsi con la corrente di *soluzione povera* di refrigerante che proviene dal fondo del generatore.

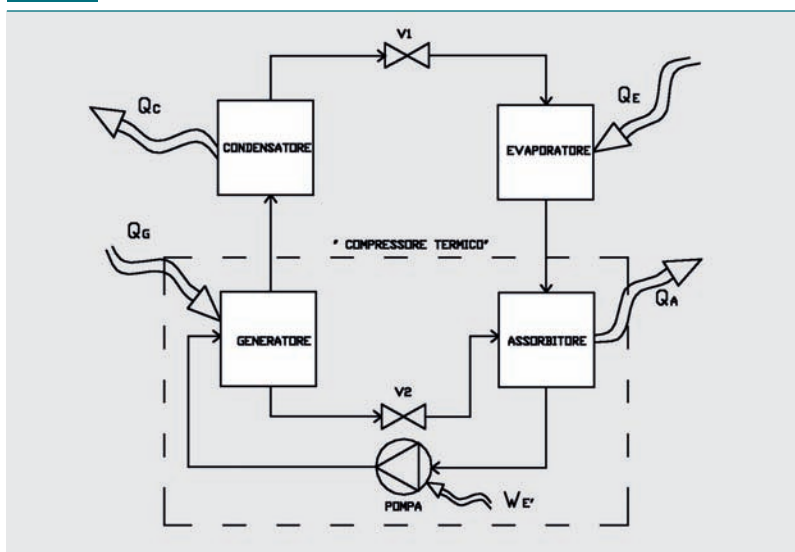
La *soluzione ricca* di refrigerante così ricostituita viene inviata al generatore per mezzo di una pompa elettrica a basso consumo. Quindi in questo secondo ciclo, con una coppia di fluidi opportunamente scelti, è possibile ottenere un effetto utile frigorifero utilizzando energia termica ad alta temperatura.

Fluidi impiegati

Nonostante i numerosi tentativi di scienziati di tutto il mondo, per trovare fluidi con caratteristiche migliori, le uniche due coppie assorbente-refrigerante attualmente utilizzate sono quella *acqua-ammoniaca* ($\text{H}_2\text{O}-\text{NH}_3$) e quella *acqua-bromuro di litio* ($\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$). Dal punto di

Fig. 8.3

Schema ad assorbimento semplificato



vista ambientale entrambe le coppie di fluidi presentano effetti nulli sia sullo strato di ozono (ODP=0), sia sull'effetto serra (GWP=0), rendendoli quindi particolarmente adatti al mantenimento in buono stato del clima globale. Dal punto di vista funzionale invece, entrambe presentano vantaggi e svantaggi, legati alle proprietà chimico-fisiche dei costituenti di base, e che si possono così elencare:

- L'acqua-ammoniaca ha il pregio di utilizzare un refrigerante (ammoniaca) il cui punto di solidificazione è molto al di sotto dello 0 °C, questo comporta la possibilità di utilizzare il ciclo ad assorbimento come pompa di calore con sorgenti fredde sotto zero come nel caso dell'aria esterna invernale. Nel funzionamento come raffrescatori estivi, la possibilità di utilizzare facilmente pozzi caldi a temperatura elevata permette di evitare le torri evaporative a favore di semplici batterie alettate a ventilazione forzata. Per contro, le due sostanze presentano un punto di ebollizione non molto differente, per cui per avere refrigerante sufficientemente puro in uscita dal generatore è necessario impiegare una colonna di distillazione aggiuntiva. Inoltre l'elevata tensione di vapore dell'ammoniaca costringe a lavorare a pressioni elevate (18~22 atm, corrispondenti a $18\sim 22 \cdot 10^5$ Pa) con tutte le conseguenze progettuali del caso. Infine l'ammoniaca, pur non essendo un veleno in senso stretto (è sintetizzato dagli organismi animali) è comunque una sostanza tossica, asfissiante e potenzialmente esplosiva. Per questi ultimi motivi le macchine che adottano questa miscela vengono costruite con criteri di sigillatura e di sicurezza molto avanzati.
- L'acqua-bromuro di litio, invece, utilizza l'acqua come refrigerante, per cui

non è possibile attingere calore da sorgenti fredde che si trovino a meno di circa 5~7 °C pena il congelamento interno all'evaporatore, per cui, salvo rari casi, queste macchine vengono usate esclusivamente per il raffrescamento. Dato che l'assorbente è un sale non volatile, non c'è necessità di distillare in quanto il refrigerante evapora già puro per ebollizione semplice nel generatore. La tensione di vapore dell'acqua costringe le macchine a lavorare sotto vuoto, con il duplice problema dell'evacuazione periodica delle infiltrazioni di gas incondensabili e del notevole ingombro delle varie apparecchiature causato dal grande volume specifico del vapore acqueo alle temperature di lavoro tipiche. La soluzione salina tende a cristallizzare facilmente in presenza di incondensabili, alle alte temperature del pozzo caldo ed alle basse temperature ambientali. Questo comporta una costruzione accurata e l'uso saltuario di pompe da vuoto, l'obbligo di utilizzare torri evaporative e della termostatazione invernale del locale macchina.

[8.4] **Efficienza del ciclo termodinamico e unità di misura**

La prestazione delle macchine frigorifere per il condizionamento ambientale viene indicata dal parametro COP (Coefficient Of Performance): vale a dire il rapporto tra l'energia ottenuta per lo specifico utilizzo e quella primaria spesa. Tuttavia per le macchine con compressore elettrico tale parametro viene indicato soltanto per l'uso come pompa di calore, con riferi-

mento alla figura 8.1, includendo in W_E anche tutti gli altri carichi elettrici della macchina, abbiamo:

$$COP = Q_C/W_E$$

Mentre l'analogo per il raffrescamento viene chiamato EER (*Energy Efficiency Ratio*):

$$EER = Q_E/W_E$$

Per le macchine ad assorbimento a fiamma diretta, tali parametri vengono sostituiti dal GUE (*Gas Utilization Efficiency*), che si calcola con il rapporto tra l'energia contenuta nel combustibile fossile impiegato al bruciatore (Q_{bruc}) e l'effetto termico o frigorifero utile.

Trascurando i contributi W_E relativi alla pompa della soluzione ricca e altri consumi relativi al funzionamento della macchina (ventilatori, quadro elettrico) si ha, in modalità pompa di calore:

$$GUE = (Q_C + Q_A)/Q_{bruc}$$

oppure

$$GUE = (Q_C + Q_A)/(Q_G/\eta_b)$$

essendo η_b è il rendimento di combustione del generatore.

Il GUE però può essere calcolato in due modi a seconda che si usi il potere calorifico inferiore (Europa, Standard EN 12309-2) o superiore (USA) del gas combustibile utilizzato. Per rendere ancor più le cose complicate, negli USA il GUE viene di nuovo indicato come COP.

Un altro parametro utilizzabile per i confronti tra apparecchiature con diverse fonti di alimentazione è il PER (*Primary Energy Ratio*) che rappresenta il rapporto tra l'energia fornita dalla macchina e quella complessivamente spesa per il suo funzionamento, riportata però ad energia primaria da combustibile fossile.

Sfortunatamente il PER di una stessa macchina può variare secondo l'efficienza di produzione dell'elettricità del paese considerato, per cui non può essere considerato un parametro assoluto.

Anche in questo caso è necessario specificare quale potere calorifico viene utilizzato per i calcoli: il rapporto tra potere calorifico superiore ed inferiore del metano è circa 1,1.

Da notare che specialmente nel caso del riscaldamento, sia COP che EER, GUE e PER sono numeri superiori all'unità, infatti si riferiscono a macchine in cui la sorgente energetica è doppia e non unica, pertanto non devono essere confusi col rendimento.

Per esempio se consideriamo una pompa di calore a compressione elettrica con COP nominale pari a 3, assumendo per l'Italia un'efficienza elettrica media del 36% sul consumo di combustibile primario in centrale, avremo che il PER della stessa macchina varrà $3 \times 0,36$ cioè 1,08.

Se consideriamo una pompa di calore ad assorbimento con GUE pari a 1,5 avremo invece che il suo PER sarà praticamente coincidente se consideriamo trascurabili i consumi elettrici della macchina.

Per evitare equivoci, in molti cataloghi di costruttori di macchine condizionatrici sono semplicemente riportate delle tabelle che mostrano l'energia fornita e quella richiesta dalla macchina nelle varie modalità di funzionamento.

Nonostante l'entrata in vigore del Sistema Internazionale, la potenza frigorifera e termica delle macchine condizionatrici viene ancora comunemente indicata in Btu/h (British thermal unit per ora) ovvero in RT (Refrigeration Ton). Per comodità si rammenta che 1 kW corrisponde a 3.412 Btu/h mentre 1 RT equivale a 12.000 Btu/h ovvero 3,52 kW. Le potenze e le prestazioni

Tabella 8.1
Condizioni standard
per unità aria-acqua
ed acqua-acqua

Tipo	Raffrescamento		Riscaldamento	
	Evap.	Cond.	Evap.	Cond.
Aria/Acqua	12/7	35	7	40/45
Acqua/Acqua	12/7	30/35	10	40/45

Tabella 8.2
Condizioni standard
per unità aria-aria

	Unità interna		Unità esterna	
	Bulbo secco (°C)	Bulbo umido (°C)	Bulbo secco (°C)	Bulbo umido (°C)
Riscaldamento	20	15 max	7	6
Raffrescamento	27	19	35	24

indicate nelle specifiche dei costruttori vengono riferite a *condizioni standardizzate di funzionamento*. In Europa si usa la norma pr EN 14511 che fissa temperature molto simili (tabelle 8.1 e 8.2).

Negli USA si adotta lo standard ARI (*Air conditioning and Refrigeration Institute*), i due standard non differiscono troppo fra loro considerando anche le tolleranze ammesse per le misure.

Per esempio nel caso dei chillers aria-acqua, l'ARI fissa la temperatura dell'aria esterna a 35 °C mentre mandata e ritorno dell'acqua refrigerata sono rispettivamente a 7,2 e 12,8 °C, nel caso del riscaldamento invece, per l'aria esterna si usano 8,3 °C.

La **tabella 8.3** consente di confrontare le prestazioni nominali delle varie tecnologie utilizzate per il condizionamento.

Tabella 8.3 – Efficienze energetiche comparate

Tipologia di macchina	COP/GUE caldo	EER	GUE freddo	PER caldo (***)	PER freddo (***)
Caldaia	0,9	-	-	0,9	-
Caldaia a condensazione	1,1	-	-	1,1	-
Macchina a compressore elettrico					
• aria(**)-aria					
• split (cl.A-D)	3,6-2,8	3,2-2,6	-	1,26-1,0	1,15-0,93
Macchina a compressore elettrico					
• aria-acqua(**)	4,7-3,8	4,4-3,5	-	1,49-1,20	1,39-1,10
• monoblocco (cl. A-D)					
Macchina ad assorbimento					
• H ₂ O-NH ₃	1,6-1,4	-	0,95-0,67	1,43-1,25	0,85-0,59
• aria(**)-acqua					
Macchina ad assorbimento					
• H ₂ O-LiBr	2,1-1,7 (*)	-	1,1-0,7	1,86-1,52 (*)	0,98-0,62
• acqua(**)-acqua					

(*) riscaldamento a bassa temperatura (40 °C) sorgente fredda acqua (12 °C)

(**) lato caldo

(***) stimato

[8.5] Schemi impiantistici e applicazioni

In questo paragrafo si presentano alcune soluzioni impiantistiche ricorrenti o in pieno sviluppo, con possibilità di migliorare sensibilmente le prestazioni energetiche degli edifici, attraverso soluzioni di generazione energetica ad elevata efficienza.

[8.5.1] Sistemi split a espansione diretta

Il nome di questi sistemi (figura 8.5) deriva dall'inglese "to split" che significa dividere, sezionare; infatti l'impianto completo è diviso in due sezioni, più precisamente è composto da un'unità esterna (chiamata anche motocondensante nei vecchi modelli per solo raffrescamento) e da una o più unità interne (dette evaporanti), a seconda che sia monosplit (ad una motocondensante è accoppiata una sola evaporante) o multisplit (ad una sola unità esterna sono accoppiate più unità interne in numero variabile in base alla capacità

della motocondensante), e dalle tubazioni di collegamento tra le unità stesse in cui avviene il trasferimento del refrigerante. Nel caso dei portatili la sezione esterna è rappresentata dal solo condensatore, collegata al climatizzatore tramite tubi flessibili. I climatizzatori split possono fornire solo raffrescamento e deumidificazione dell'aria, o sia raffrescamento che riscaldamento se dotati di pompa di calore. Alcune soluzioni di macchine split sono presentate in figura 8.6.

Tale macchina può funzionare come:

- **refrigeratore:** macchina frigorifera utilizzata per estrarre calore da un ambiente (l'evaporatore è lo scambiatore utilizzato);
- **pompa di calore:** macchina frigorifera utilizzata per apportare calore ad un ambiente (il condensatore è lo scambiatore utilizzato).

Il ciclo termodinamico della macchina è sempre lo stesso in entrambi gli utilizzi, ciò che cambia è solo lo scambiatore utilizzato.

Nel caso la stessa macchina debba essere utilizzata alternativamente come refrigeratore e pompa di calore, essendo poco pratico spostare fisicamente la motocondensante all'interno e la evaporante all'esterno, nel funzionamento invernale si ricorre alla inserzione, nel circuito frigorifero, di una valvola a 4 vie che inverte il senso di percorrenza del refrigerante nel circuito, quindi le funzioni condensatore/evaporatore. Con il refrigerante che circola in un senso lo scambiatore interno funge da condensatore (funzionamento a pompa di calore), con la circolazione in senso opposto funge da evaporatore (funzionamento come condizionatore).

Questa è la tipologia più adatta alle soluzioni individuali, per le abitazioni di massimo 300 m², poiché, sebbene applicabi-

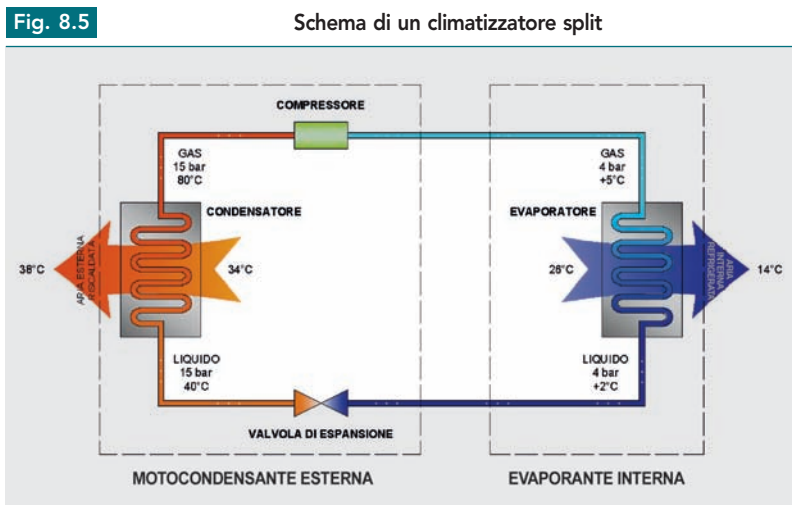
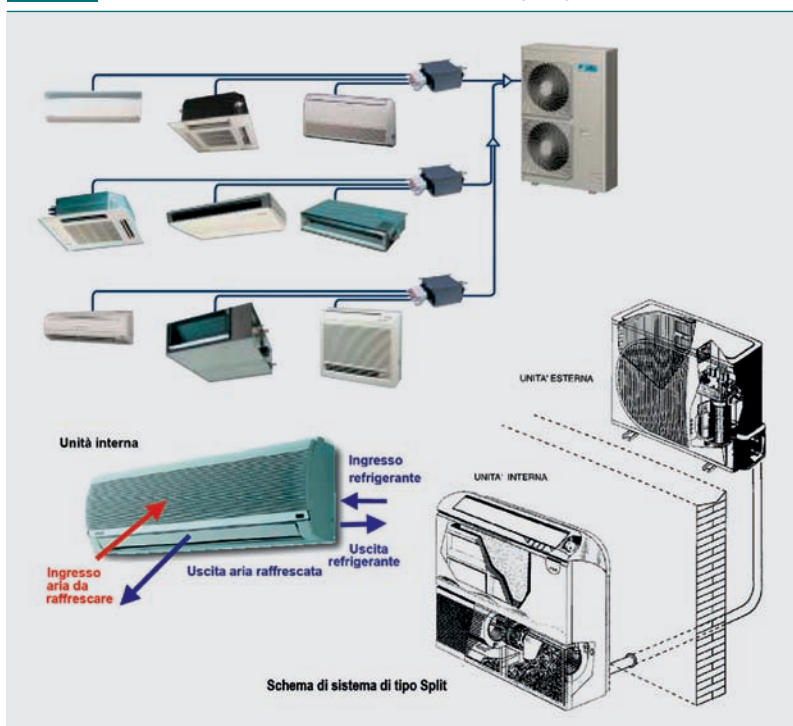


Fig. 8.6

Schema di sistema di tipo Split



le anche a tutte le altre tipologie residenziali, non sarebbe affatto una soluzione economicamente vantaggiosa.

Si possono applicare al preesistente senza bisogno di opere murarie eccessivamente invasive data la dimensione ridotta delle tubazioni di collegamento e la distanza limitata possibile tra le unità esterne ed interne. Grazie all'ampia possibilità di scelta dei terminali (a parete, a pavimento, a soffitto, in controsoffitto, canalizzabili), permettono agevolmente l'attrezzabilità degli spazi abitativi.

In refrigerazione la macchina produce un effetto frigorifero tanto minore quanto più sono distanti le due temperature del ciclo: evaporazione e condensazione. La temperatura all'evaporatore è pressochè costante, quindi all'aumentare della temperatura di condensazione (dell'aria esterna)

diminuisce la resa frigorifera, ed aumenta anche la corrente assorbita.

Ma anche se la temperatura al condensatore dovesse essere troppo bassa ci sarebbero degli inconvenienti, poiché l'evaporatore non riuscirebbe più a far evaporare tutto il refrigerante che tornerebbe sotto forma di liquido al compressore causando inevitabilmente la rottura.

Per il funzionamento come pompa di calore al diminuire della temperatura esterna aumenta la differenza tra le due temperature del ciclo e diminuisce di conseguenza la quantità di calore erogata al condensatore, quindi all'aria interna.

Inoltre, nel caso che l'evaporatore debba evaporare a temperature inferiori allo zero, è inevitabile che si formi della brina sulla sua superficie; la brina, essendo un pessimo conduttore di calore, causa una perdita di efficienza dello scambio termico. Per ovviare a questo problema è indispensabile effettuare un periodico sbrinamento dello scambiatore, che può essere agevolmente ottenuto invertendo il flusso di refrigerante, cioè inviando all'evaporatore il gas caldo prodotto dal compressore per il tempo necessario a sciogliere la brina accumulata; oppure prevedendo delle serpentine elettriche. Comunque nulla impedisce che una pompa di calore funzioni correttamente a temperature molto basse, vi è soltanto un limite di convenienza economica.

Se dotati di pompa di calore, questi sistemi possono sopperire anche alla richiesta di riscaldamento invernale nelle zone a clima mite; mentre in quelle a clima rigido possono essere solo di supporto nelle mezze stagioni, perché il rendimento del sistema decade all'aumentare della differenza di temperatura tra l'aria interna ed esterna.

Limiti di lunghezza e di dislivello delle

tubazioni sono imposte dalla necessità di mantenere costante la differenza di pressione nelle tubazioni.

Gli split possono funzionare a frequenza fissa, del tipo *ON/OFF*, in cui l'impianto si attiva o disattiva in base ad un margine di ± 2 °C rispetto alla temperatura impostata; oppure possono essere dotati di un compressore a numero di giri variabile (che modula la portata di refrigerante) pilotato da un *INVERTER*, che permette di mantenere la temperatura impostata con un margine di $\pm 0,5$ °C che comporta, soprattutto nella versione "multi", molteplici vantaggi:

- il consumo è sempre strettamente correlato alla quantità di freddo o caldo (in pompa di calore) prodotta, quindi la possibilità di modulare la frequenza del compressore rispetto alle effettive esigenze dell'utenza comporta un minor assorbimento di energia elettrica, quindi un risparmio sia in termini economici che ambientali;
- il rendimento della macchina, a condizioni di carico parziale, cioè la gran parte del tempo di funzionamento, è più elevato di quello nominale, in quanto gli scambiatori, evaporatore e condensatore, sono calcolati per una prestazione più elevata. Quando uno scambiatore si trova a lavorare con una quantità di calore inferiore a quella per cui è stato calcolato diminuisce il ΔT , come conseguenza, a parità di altre condizioni, la temperatura di condensazione sarà per esempio inferiore e quella di evaporazione superiore. Ricordando che il rendimento di una macchina frigorifera aumenta al diminuire della differenza tra le due temperature operative del ciclo (due scambiatori), si comprende come vi sia in questo caso un incremento di rendimento;

- il fatto di avere pochi cicli accensione/spegnimento e comunque una partenza graduale, contribuisce ad elevare il comfort acustico dalla macchina e la sua affidabilità.

[8.5.2]

Sistemi VRV-VRF a espansione diretta

Le sigle con cui si identificano questi impianti possono essere diverse, ma indicano comunque che si tratta di sistemi a portata di refrigerante variabile (VRV - *Variable Refrigerant Volume*; VRF - *Variable Refrigerant Flow*).

Sono composti da gruppi frigoriferi che, invece di raffreddare l'acqua che scorre nel circuito idronico, mandano direttamente in circolazione, nelle tubazioni che attraversano l'edificio, il refrigerante che, una volta raggiunti i terminali, evapora; quindi raffredda direttamente l'aria (analogamente ai sistemi split, ma con un controllo elettronico più sofisticato).

Sono sistemi modulari ad espansione diretta di gas refrigerante, disponibili anche come pompa di calore, costituiti da più unità terminali, a servizio dei locali da condizionare, alimentati da una motocondensante esterna con condensatore raffreddato ad aria o ad acqua (meno diffusi).

Ogni sistema è modulare nel senso che può lavorare in combinazione con "n" altri gruppi dello stesso tipo, indipendenti tra loro dal punto di vista frigorifero, ma controllati da un unico circuito elettrico, ed in grado di raggiungere la potenzialità desiderata. Ciascuna unità terminale, sebbene collegata allo stesso circuito frigorifero è indipendente da tutte le altre sia per funzionamento che per regolazione.

Nei sistemi a pompa di calore ciascuna unità terminale può gestire condizioni

diverse rimanendo in ambito dello stesso ciclo (raffreddamento-riscaldamento). La definizione del ciclo di funzionamento avviene sulla motocondensante ed interessa l'intero sistema.

Nella versione a recupero di calore, le unità terminali sono indipendenti anche dal punto di vista della commutazione caldo-freddo. In questo caso esse sono in grado di passare, singolarmente, dalla fase di riscaldamento, a quella di raffreddamento (e viceversa) al fine di mantenere le condizioni climatiche ambientali richieste. Questa soluzione, consente il massimo risparmio energetico nella misura in cui provvede a trasferire il calore dalle zone che devono essere raffreddate a quelle che devono essere riscaldate, senza la necessità di dover spendere altra energia sotto forma di lavoro di compressione.

La gestione centralizzata dell'impianto consente un contenimento notevole dei costi di energia elettrica. Rispetto agli impianti tradizionali è stato stimato un risparmio di energia elettrica pari a circa il 25-30%, assicurando un rendimento energetico sempre alto. Inoltre tale sistema può essere controllato in tempo reale tramite un sistema remoto, in modo tale da configurarlo per le condizioni di comfort ambientale migliori con carichi termici giusti.

Il sistema a Flusso di Refrigerante Variabile ha le caratteristiche adatte a sviluppare le migliori prestazioni proprio durante il suo funzionamento parzializzato. L'efficienza energetica è chiaramente desumibile dall'analisi dei COP di questi sistemi, in funzione del grado di parzializzazione degli stessi. È subito evidente che, ai carichi parziali, e precisamente tra il 40% e il 70% della capacità dell'impianto, il rapporto resa/assorbimento elettrico è molto favo-

revole. Ne consegue che questi sistemi sono molto efficienti proprio nelle condizioni di esercizio più frequenti.

Una caratteristica interessante per questi sistemi, risulta essere la modularità dell'impianto: gli impianti VRF consentono facilmente di modificare e ampliare un impianto VRF già realizzato senza dover fare nessun intervento sull'installazione già esistente. Per collegare nuove unità interne è sufficiente allacciarsi direttamente sull'unità interna più vicina già esistente. Per affiancare una nuova unità esterna alle preesistenti è sufficiente installarla e collegarla alle unità esterne già esistenti, il tutto realizzato con una facilità di installazione, che permette la flessibilità di funzionamento.

Le tubazioni che servono tali sistemi presentano diametri inferiori di un terzo rispetto ai sistemi idronici, ciò comporta minori oneri per le opere murarie. Inoltre è possibile avere un'elevata lunghezza delle tubazioni tra le unità interne e le unità esterne, senza perdere di molto le prestazioni (le unità esterne possono essere collocate fino a 125 metri di distanza dalle unità interne per un dislivello massimo di 50 metri).

Il calcolo del consumo energetico risulta essere individuale: il sistema è in grado di calcolare il consumo energetico di ciascuna unità interna in base al flusso di refrigerante.

Il costi di funzionamento possono essere ridotti di circa il 30% rispetto ai sistemi tradizionali: i costi del sistema sono bassi, dato che permette di controllare ogni singolo ambiente.

Il sistema opererà in riscaldamento o raffreddamento solo nell'area in cui la climatizzazione è necessaria, lasciando spente le altre zone, in questo modo si evitano gli sprechi che si verificano con altri

impianti con sistemi di climatizzazione tradizionali.

Importante risulta essere il controllo intelligente, che si può attivare tramite il sistema remoto: infatti si può monitorare e mantenere la temperatura dell'ambiente a livelli confortevoli e ad un livello costante, senza quelle variazioni tipiche dei sistemi a controllo tipo *ON-OFF*. In caso di malfunzionamento il sistema garantisce una funzione di back-up pari al 50%. Il sistema utilizza una *logica proporzionale* integrale per il controllo dei compressori Inverter.

[8.5.3]

Pompe di calore con sonde geotermiche

Il terreno risulta essere una risorsa naturale disponibile che, se ben sfruttata, permette la riduzione dei consumi energetici negli usi standard di un edificio quali il riscaldamento, la climatizzazione e la produzione di acqua calda.

L'impianto tecnologico che consente di sfruttare questa fonte risulta essere quello alimentato da una pompa di calore, dispositivo che funzionando sulla base di un normale ciclo frigorifero, comunemente a compressione con alimentazione elettrica, trasferisce il calore assorbito da una sorgente a più bassa temperatura, il terreno, verso una sorgente a più alta temperatura, ovvero lo spazio interno di un edificio.

I sistemi costituiti da pompe di calore geotermiche (GSHP – *Ground Source Heat Pump*) sono convenienti non solo da un punto di vista energetico per l'utenza finale, ma risultano convenienti anche per il sistema energetico globale: infatti per produrre 1 kWh di energia elettrica sono necessari mediamente 2,7 kWh di energia primaria (dati Autorità per

l'Energia Elettrica e il Gas, dati statistici 1999, rendimento calcolato considerando un consumo specifico medio per impianti termoelettrici pari a 2.174 kcal/kWh e perdite di rete pari al 6,5%). Utilizzando un sistema GSHP si possono produrre circa 4 kWh di energia termica a fronte di un consumo di energia elettrica pari a 1 kWh, quindi una quantità di energia superiore rispetto a quella che si è spesa.

Essendo tale sistema energetico costituito da una pompa di calore, attraverso una valvola a quattro vie è possibile invertire il ciclo termodinamico e quindi far funzionare il sistema GSHP anche come refrigeratore nel periodo estivo. In tali condizioni operative il terreno viene utilizzato per raffrescare gli spazi interni dell'edificio attraverso gli stessi scambiatori di calore, sostituendo di fatto le torri evaporative o gli scambiatori fluido-aria, che altrimenti sarebbero necessarie. Le prestazioni di tale sistema sono migliori anche nel periodo estivo in quanto lo scambio termico con il terreno è efficace, essendo la temperatura del terreno più bassa e costante rispetto a quella dell'aria, date le profondità della sorgente a più alta temperatura (condensatore).

La sorgente a bassa temperatura: il terreno

In riferimento alla sorgente a bassa temperatura, l'aria è termodinamicamente poco efficiente in quanto il carico termico da soddisfare cresce proprio quando la temperatura esterna diminuisce, se ci si riferisce al funzionamento del sistema GSHP come pompa di calore.

Un'alternativa efficace all'aria come sorgente a bassa temperatura è rappresentata dall'impiego del terreno, il quale presenta alcune caratteristiche molto favorevoli: detiene una moderata inerzia termi-

ca, già a basse profondità, che permette, al terreno, di risentire poco delle fluttuazioni termiche giornaliere e stagionali esterne, al punto che la sua temperatura può essere considerata costante per tutto l'anno.

L'interazione della radiazione solare con l'energia geotermica si rispecchia in una fluttuazione della temperatura con i ritmi giornalieri e stagionali che diminuisce all'aumentare della profondità fino a raggiungere valori di stabilizzazione, per una profondità superiore ai 10 m, corrispondenti all'incirca alla temperatura media esterna dell'aria valutata per un interno anno solare. In linea generale dai 10 m fino ai 20, la temperatura dovrebbe essere pari a 14 °C, con fluttuazioni di 2 °C in più o in meno. Una volta superata questa zona neutra la temperatura aumenta di circa 3 °C ogni 100 m.

Mediante l'ausilio di semplici modelli di calcolo è possibile determinare la fluttuazione stagionale della temperatura del terreno alle diverse profondità. Per esempio, da elaborazioni eseguite mediante l'equazione di Hadvig, risulta che per una località avente temperatura media esterna annua pari a 15 °C e un'escursione annua pari a 15 °C, già ad una profondità di 4-5 m la temperatura del sottosuolo tende a stabilizzarsi su valori di 11-13 °C, nel periodo invernale.

Tecnologie per lo sfruttamento termico del terreno

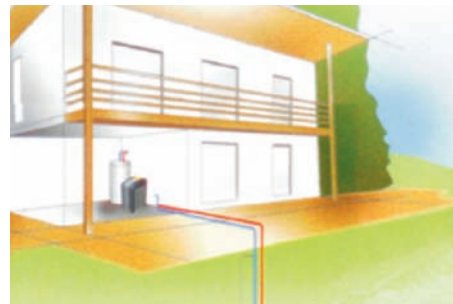
Per l'acquisizione di energia termica dal terreno vengono utilizzate diverse tecnologie, costituite da sonde geotermiche (figura 8.7). Considerando che tali soluzioni tecnologiche devono permettere l'interfacciamento delle pompe di calore con circuiti idraulici chiusi (scambiatori di calore), le soluzioni possibili sono essenzialmente tre:

- le sonde geotermiche verticali (SGV), ovvero scambiatori di calore verticali caratterizzati da lunghezze che vanno dai 50 a oltre 350 m;
- le serpentine nel terreno, ovvero scambiatori di calore disposti orizzontalmente a profondità di circa 1-2 m, in terreni sciolti;
- i pali energetici, ovvero scambiatori di calore integrati negli elementi di fondazione di costruzioni palificate che hanno una profondità tipica di alcuni metri.

Le sonde geotermiche verticali vengono realizzate mediante una perforazione di profondità che generalmente è compresa tra gli 80 e 100 m, e il diametro di tale foro risulta avere valori di 0,10-0,15 m.

Terminata la perforazione c'è la fase dell'inserimento di una tubazione in polietilene avente forma di U con contrappeso finale, nello spazio ricavato, mentre lo

Figura 8.7
A sinistra, posizionamento orizzontale delle sonde geotermiche.
A destra, posizionamento delle sonde geotermiche in modo verticale



spazio vuoto restante viene riempito con una miscela di "bentonite" e cemento per garantire un buon contatto termico tra il tubo e la parete della perforazione. È evidente che per arrivare alle potenze termiche desiderate si debbano realizzare diverse perforazioni, inserendo per ciascuno foro le tubazioni in polietilene.

La configurazione del tubo ad U risulta essere la soluzione più utilizzata, ma oltre a tale configurazione ne esistono altre:

- quella a doppio tubo ad U, realizzata come la precedente, con la differenza che nella perforazione si inseriscono quattro tubi collegati a due a due sul fondo;
- quella a tubi coassiali nella quale il tubo di ritorno viene posizionato all'interno del tubo di mandata, il quale occupa tutta la sezione della perforazione: se il diametro del tubo esterno (mandata) è uguale o di poco inferiore rispetto a quello della perforazione, non è necessario il getto di riempimento.

L'utilizzo delle sonde geotermiche verticali esclusivamente come sorgente a più bassa temperatura (funzionamento invernale) può portare a una diminuzione della temperatura nel sottosuolo, con un conseguente decadimento delle prestazioni negli anni. In questi casi risulta opportuno nella fase progettuale, prevedere un sovradimensionamento dell'impianto.

Tale problema non si presenta se l'impianto viene utilizzato anche per il raffrescamento nel periodo estivo. Infatti, attraverso l'inversione del ciclo, gli scambiatori raffreddando il condensatore della pompa di calore, permettono alla macchina di funzionare come refrigeratore. In questo modo le sonde lavorano come condensatore restituendo al terreno il calore assorbito nella stagione invernale.

Le **serpentine nel terreno** non rappresentano delle vere e proprie soluzioni per l'acquisizione dell'energia geotermica, ma indicano quell'applicazione tecnologica atta allo sfruttamento l'energia solare che riscalda il terreno in superficie, fino a pochi metri di profondità. Infatti le serpentine vengono posizionate ad una profondità di circa 1-2 m e vengono disposte nel terreno secondo diverse geometrie, utilizzando normali tubazioni di polietilene reticolato ad alta densità. Negli edifici nuovi i costi possono essere notevolmente ridotti, se tale posizionamento viene previsto al momento dello scavo.

I **pali energetici** rappresentano invece una soluzione a metà strada tra le sonde geotermiche verticali e le serpentine nel terreno. I pali energetici, generalmente in calcestruzzo armato, vengono realizzati con un diametro di 0,4-1,5 m e con lunghezze che possono variare da qualche metro fino a più di 30 m. All'interno di questi pali è installato un tubo o un fascio di tubi in polietilene, spesso con la configurazione ad U, doppi o quadrupli, in base al diametro dei pali. Questi tubi vengono poi immersi nel calcestruzzo per assicurare un buon contatto termico con le parti strutturali confinanti col terreno. I pali energetici rappresentano un esempio di integrazione tra edificio e impianto: le tubazioni, in questo caso, vengono introdotte nelle strutture di fondazione in costruzione.

Il fluido termovettore generalmente usato nelle serpentine e nei pali energetici, risulta essere l'acqua, che circola in un circuito chiuso tra la serpentina (o pali) e la pompa di calore, al fine di poter scambiare calore o freddo con il terreno, mentre per le sonde verticali risulta essere una miscela di acqua ed antigelo (liquido glicolato, non tossico).

[8.5.4]

Pompe di calore ad assorbimento**Macchine ad acqua-ammoniaca**

Non sono molte le aziende nel mondo che producono macchine ad acqua-ammoniaca a causa delle difficoltà tecnologiche insite in tale tipo di produzione industriale.

Una solamente è italiana, la ROBUR, che ha acquisito nel 1991 la vecchia produzione dell'ARKLA-SERVEL.

Le macchine ROBUR sono disponibili in varie tipologie, solo chiller, solo pompa di calore e da pochissimo anche reversibili. L'efficienza (GUE) delle macchine ROBUR reversibili aria-acqua è pari a 0,67 in raffreddamento e 1,4 in riscaldamento, mentre per quelle non reversibili è leggermente più elevata (solo freddo 0,7; solo caldo 1,44).

La produzione è basata su moduli a gas diretto da circa 17 kW frigoriferi o 35 kW in riscaldamento, con possibilità di con-

nessione multipla in parallelo fino a coprire potenze di alcune centinaia di kW frigoriferi o caldi, con regolazione On-Off sui singoli moduli. Esistono anche gruppi ibridi composti da un gruppo ad assorbimento ed una o più caldaie tradizionali montate in parallelo per massimizzare il rapporto prestazioni/costo.

Lo schema circuitale di queste macchine ne evidenzia la complessità realizzativi (figure 8.8 e 8.9), e spiega sia la difficoltà della produzione di eventuali taglie inferiori per uso residenziale che la scarsità di soggetti industriali che si cimentino in questo settore produttivo nel mondo.

Altri produttori sono reperibili negli USA: Energy Concepts Company e Cooling Technologies Inc. La Energy Concepts Company produce la macchina "Hi-Sorber" con bruciatore a gas della capacità di circa 28 kW in raffreddamento e 48 kW in riscaldamento (figura 8.10).

Le prestazioni dichiarate in condizioni ARI sono molto elevate, COP ~0,95 in raffre-

Fig. 8.8

Schema circuitale solo freddo, Robur

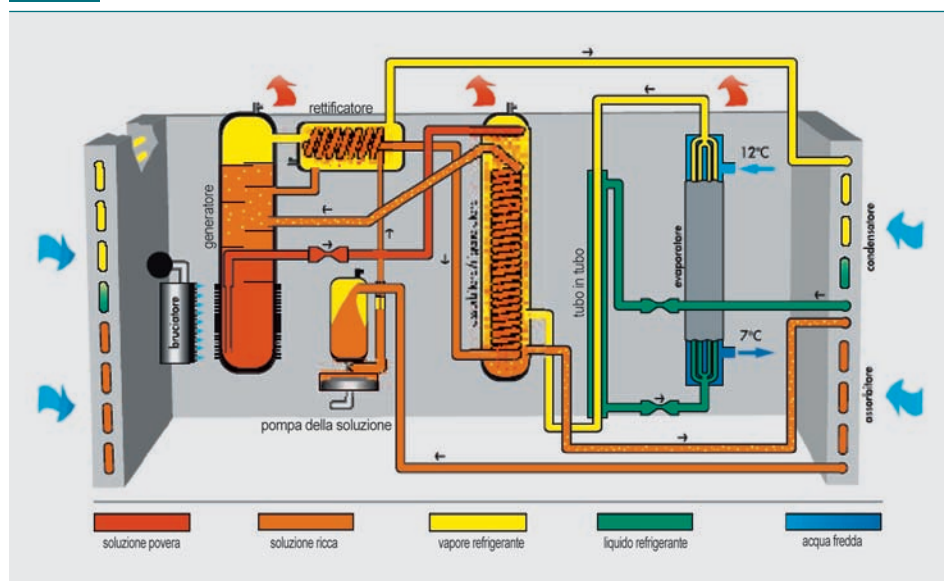


Fig. 8.9

Schema circuitale reversibile, Robur

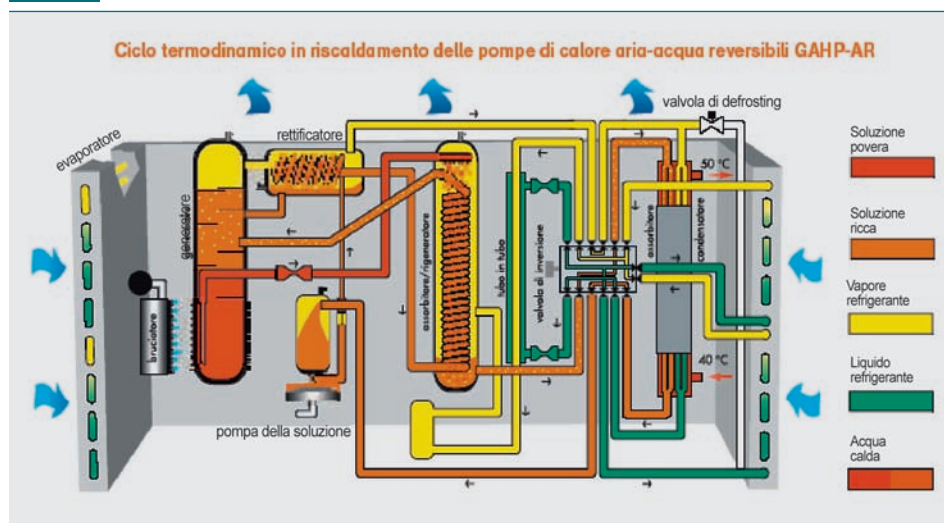


Figura 8.10
 Prototipo Hi-Sorber,
 Energy Concepts Company



scamento (35 °C) e COP ~1,6 in riscaldamento (8,5 °C), Il COP in riscaldamento scende al valore di 1,3 a -23,3 °C.

Macchine ad acqua-bromuro di litio

Per l'acqua-bromuro di litio esistono numerosi costruttori concentrati negli USA

(Trane, York, Carrier), in Giappone (Yazaki, Sanyo, Ebara, Hitachi) ed ultimamente anche in Cina (BROAD). Le unità sono normalmente di potenza frigorifera molto grande, a partire da 150 kW frigoriferi sino a diversi MW (figura 8.11).

Queste macchine vengono vendute con diversi tipi di alimentazione, vapore, acqua calda, fiamma diretta, fumi di scarico (*Exhaust*), anche in combinazione tra di loro. I modelli possono essere sia del tipo a singolo sia a doppio effetto (figure 8.11 e 8.12), con prestazioni notevoli: COP ~0,7 per quelle a singolo e ~1,1 per quelle a doppio effetto.

La sola ditta che produce macchine di taglia medio/piccola è la Yazaki (figura 8.12), che produce macchine modulari da 35 kW frigoriferi, montabili in batteria per coprire potenze maggiori.

Le macchine ad assorbimento, per la loro caratteristica di funzionamento trovano impiego nel settore del condizionamento ambientale (figura 8.13), nel recupero di calore in genere, nella trigenerazione (cogenerazione + produzione di freddo)

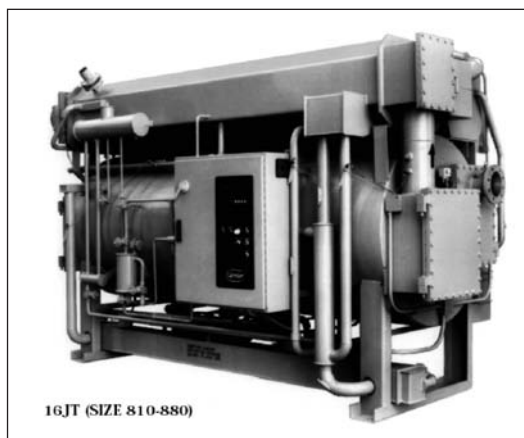


Figura 8.11
Macchina ad H₂O-LiBr
di grande potenza,
Carrier

nel "solar cooling" (produzione di freddo tramite pannelli solari, figura 8.14).

Nel caso del condizionamento ambientale, nonostante il migliore rendimento di queste macchine per fare il caldo, il mercato italiano è di gran lunga orientato per il raffrescamento estivo ad H₂O-NH₃: le motivazioni sono da cercarsi nella facilità di installazione, data la capillarità della distribuzione del metano in Italia, e nella difficoltà in certe località di ottenere un contratto elettrico per una potenza adeguata al funzionamento di una macchina equivalente a compressore elettrico.

Contrariamente ad altri paesi esteri (Giappone USA), le grandi macchine ad H₂O-LiBr sono poco utilizzate perché le tariffe di gas ed elettricità non permettono un *pay-back* soddisfacente per l'ingente investimento iniziale.

Per il recupero termico si trovano applicazioni quando è disponibile energia da recuperare sia ad alta temperatura (fumi di inceneritori) per il funzionamento primario delle macchine, oppure a bassa temperatura in effluenti liquidi (acqua di depuratori, piscine) come sorgente fredda per pompe di calore. In questi casi, diversissimi tra loro, va sempre fatta un'attenta analisi in sede di progettazione di impianto per valutare la reale convenienza dell'applicazione.

Nel caso della rigenerazione, le macchine più impiegate sono di gran lunga quelle a singolo effetto ad H₂O-LiBr ad acqua calda che, nonostante il più basso rendimento rispetto a quelle a doppio effetto, permettono l'impiego con l'acqua del circuito di raffreddamento dei comuni gruppi elettrogeni con motore a combustione interna.

Il "solar cooling", che permette di avere praticamente il freddo gratuitamente per mezzo dei pannelli solari, vede una pre-

Fig. 8.12

Schema a singolo effetto, Yazaki

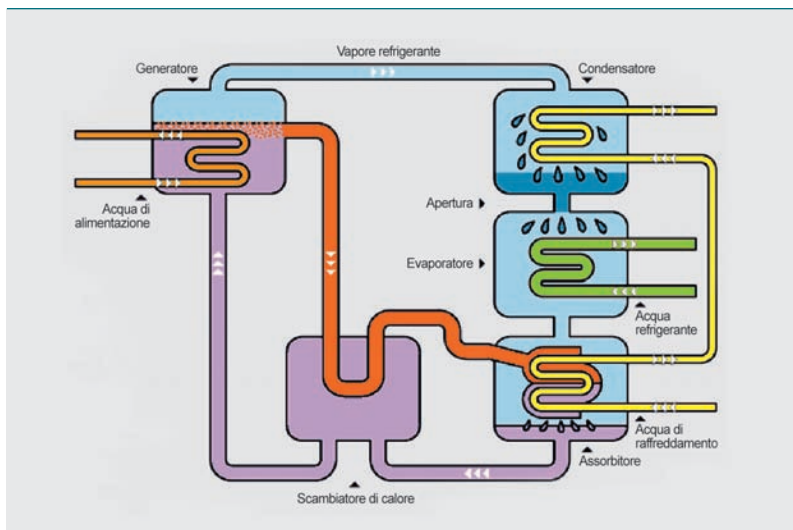


Figura 8.13
Tipica installazione
per condizionamento
ambientale, Yazaki



Figura 8.14
Impianto solare a
concentrazione per
Solar Cooling

ponderanza netta dei sistemi a singolo effetto ad $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ per l'impiego con pannelli solari a bassa temperatura.

Quelle a doppio effetto e quelle ad $\text{H}_2\text{O-NH}_3$ richiedono invece pannelli più costosi del tipo a concentrazione con o senza sistemi mobili ad inseguimento solare. Le macchine ad $\text{H}_2\text{O-NH}_3$, pur con i limiti di efficienza propri della tecnologia, vengono tuttavia prese in considerazione perchè permettono di evitare l'uso delle ingombranti torri evaporative e per la possibilità di usare i pannelli anche per il riscaldamento invernale ad alta efficienza.

Allo stato attuale, a causa dell'alto costo di investimento iniziale, l'utilizzo del *solar cooling* è solitamente limitato a casi di impianti dimostrativi.

In un futuro non troppo lontano, con l'aumentare del costo dell'energia da combustibile fossile e al crescere dell'attenzione al contenimento dell'effetto serra, è ipotizzabile che questo tipo di applicazioni possano invece prendere piede nell'uso comune.

Per le loro caratteristiche e necessità i gruppi frigo ad assorbimento hanno delle peculiarità che li contraddistinguono e li possono far preferire ai sistemi elettrici tradizionali, sebbene presentino COP net-

tamente inferiori e comportino investimenti maggiori. Volendo riassumere le peculiarità di questa tecnologia, tali macchine ad assorbimento presentano:

- ridottissimi consumi di energia elettrica, infatti l'energia primaria utilizzata è il gas; l'energia elettrica viene impiegata esclusivamente per il funzionamento delle apparecchiature ausiliarie di controllo, di circolazione dei fluidi di lavoro e per lo smaltimento del calore, quindi non è richiesta una cabina di trasformazione elettrica;
- la possibilità di essere utilizzati in accoppiamento con cogeneratori (trigenerazione), il che consente una produzione durante tutto il periodo dell'anno di energia elettrica e non solo nei mesi di utilizzo del riscaldamento, permettendo tempi di rientro più veloci per gli investimenti sui cogeneratori;
- la possibilità di avere un unico impianto semplificato per il raffrescamento ed il riscaldamento nel caso di macchinari adeguatamente attrezzati; un'apparecchiatura unica è in grado di provvedere sia al raffrescamento estivo, sia al riscaldamento invernale degli ambienti e sostituisce nell'impianto, oltre all'unità frigorifera, anche la caldaia e le relative opere idrauliche; non necessitano di conseguenza la centrale termica e le opere di insonorizzazione e di antivibrazione richieste dai gruppi a compressione; l'impianto risulta così più semplice e compatto e, in molti casi, meno costoso;
- il minor rendimento estivo rispetto ad un gruppo frigo elettrico è compensato dal fatto che usa il gas come fonte di alimentazione invece che energia elettrica;
- la possibilità di essere installati all'aperto; infatti le apparecchiature

sono studiate per essere installate all'aperto anche in località con atmosfere particolarmente aggressive, come quelle marina o industriale; gli spazi, prima destinati ad accogliere la centrale termica, non sono più necessari, è comunque possibile un'installazione dei gruppi al coperto, semplicemente tenendo conto della vigente normativa in materia di generatori termici; nella trasformazione dei vecchi impianti a gasolio la scelta delle caldaie-refrigeratori ad assorbimento risulta particolarmente vantaggiosa poiché libera gli spazi tecnici;

- una facilità nell'installazione; infatti i gruppi ad assorbimento sono estremamente compatti, la loro concezione modulare facilita le operazioni di trasporto e di installazione e tutte le unità, precaricate della soluzione di bromuro di litio, sono collaudate in fabbrica; le operazioni di primo avviamento, risultano quindi molto semplici e veloci ed evitano eventuali dispersioni nell'ambiente della soluzione contenuta;
- elevata affidabilità; infatti tale affidabilità, notoriamente riconosciuta, è riconducibile al limitato numero di parti meccaniche in movimento; la stessa semplicità di concezione di tali apparecchiature costituisce di per sé garanzia di affidabilità, come attestato dalla ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigeration & Air-Conditioning Engineers*);
- silenziosità; infatti i gruppi, perfettamente insonorizzati, sono estremamente silenziosi e privi di vibrazioni; sono ideali da installare anche nei centri cittadini su lastrici solari, terrazzi, sottotetti, giardini e cortili di costruzioni desti-

nate ad attività commerciali, industriali e del terziario;

- ridotta applicazione di operazioni manutentive; infatti il limitato numero di parti meccaniche in movimento riduce i componenti soggetti ad usura e, quindi, a controllo e sostituzione;
- limitato impatto ambientale; infatti i gruppi ad assorbimento non impiegano i CFC e gli HCFC, estremamente dannosi per l'ambiente ed ora messi al bando; il tipo di combustibile utilizzato, il gas, limita inoltre le emissioni di combustione nocive;
- la possibilità di avere un controllo remoto; quindi la possibilità di azionarli tramite comandi manuali o automatici, anche a distanza, da unità di controllo e di regolazione;
- la possibilità di controllo a step; infatti la modularità di questi impianti permette di collegare più unità in batteria, facendo funzionare le macchine in parallelo, sommando le potenze erogate, e permettendo quindi la parzializzazione del funzionamento, a seconda del carico termico effettivamente richiesto, mantenendo alte le prestazioni e l'efficienza anche a regimi ridotti senza perdite di rendimento.

La potenza minima in commercio di questi impianti è di 17 kW frigoriferi e 33 kW termici (H_2O-NH_3), adatti quindi ad essere usati nel settore residenziale per un'abitazione di almeno 220 m², mentre, data la possibilità di collegare i moduli in batteria, non c'è un limite massimo se non dovuto allo spazio fisico di ingombro dei macchinari. Comunque in commercio ci sono anche macchine singole ($H_2O-LiBr$) che raggiungono potenze di alcuni MW frigoriferi.

A tall, cylindrical stone tower, likely a watchtower or part of a fortification, constructed from large, weathered stone blocks. The tower features several levels of windows: small, narrow vertical slits near the top; a larger, rectangular window with a dark grille on the right side; and a series of smaller, rectangular windows arranged in a grid-like pattern on the lower levels. The tower is set against a clear blue sky. In the foreground, there are green bushes and a low stone wall. A semi-transparent white horizontal band is overlaid across the middle of the tower, containing the text "Capitolo Nove".

Capitolo **Nove**

Cogenerazione e generazione distribuita

[9.1] Introduzione

Quando alla fine del diciannovesimo secolo cominciarono ad essere realizzati i primi generatori e le prime reti elettriche si contrapponevano i seguenti approcci antitetici: generazione centralizzata o distribuita; produzione di corrente alternata o continua. In entrambi i casi, la scelta presentava pro e contro importanti. Lo sviluppo della produzione energetica testimonia la scelta per le due prime soluzioni. La prima influenzata anche dagli aspetti autorizzativi, la seconda da considerazioni tecniche (facilità di produzione e, soprattutto, di trasformazione di tensione). Nel seguito la soluzione centralizzata ha avuto vita facile, favorita dalle logiche monopoliste, che hanno consentito l'elettrificazione estesa dei paesi industrializzati, e dai vantaggiosi prezzi dei combustibili fossili. La generazione distribuita si è dimostrata idonea ad essere applicata, quando le regole lo hanno consentito. È il caso in Italia della Legge 308/82 ed in seguito della Legge 10/91 e dei collegati programmi di incentivazione, che hanno portato alla realizzazione di impianti di cogenerazione nei comparti più favorevoli: cartario, chimico, produzione di laterizi e, nell'ambito civile, l'ospedaliero. Oggi i decreti per il recepimento della direttiva sui servizi energetici della diret-

tiva sulla promozione della cogenerazione, nonché alcuni disposti dei decreti 192/05 e 311/06 in materia di teleriscaldamento, danno nuovo impulso all'applicazione di tecnologie di generazione distribuita. Fra i benefici indotti dalla produzione decentrata si possono annoverare, per le fonti convenzionali:

- l'aumento dell'efficienza di utilizzo delle fonti primarie e i conseguenti vantaggi ambientali (rendimenti medi complessivi, in presenza di utilizzo del calore, del 70-90%);
- la riduzione dei flussi elettrici sulle reti di trasporto e distribuzione (le perdite di rete si aggirano intorno al 7% nel nostro Paese, di cui un 5% circa attribuibili alla distribuzione);
- una semplificazione relativamente all'ottenimento delle autorizzazioni ed agli aspetti legati all'accettazione locale;
- una maggiore sicurezza relativamente al rischio di attentati;
- il miglioramento dell'affidabilità della fornitura in termini di continuità e power quality;
- l'aumento della stabilità per le reti congestionate.

Le ultime due ipotesi presuppongono una sinergia fra gli impianti e le reti di distribuzione, che passi attraverso l'utilizzo di idonee protezioni e interconnessioni e che preveda una progettazione delle reti ad hoc.

A tali vantaggi l'uso delle fonti rinnovabili aggiunge:

- la riduzione della dipendenza dall'estero (occorre però considerare la provenienza sia del combustibile, nel caso delle biomasse, sia delle tecnologie impiegate);
- la diminuzione delle emissioni climalterranti o dannose per la salute (da valutare possibilmente in un'ottica di analisi sul ciclo di vita);
- una ricaduta in termini di immagine per le aziende e gli enti che vi facciano ricorso.

Esistono tuttavia alcune controindicazioni nel caso della generazione distribuita da fonti fossili:

- i costi di installazione e gestione superiori rispetto alla soluzione convenzionale;
- la forte dipendenza dal gas naturale;
- le emissioni in genere maggiori, a parità di combustibile e salvo il caso della cogenerazione, più difficili da controllare e localizzate nelle aree di consumo;
- l'introduzione di vincoli sulla domanda di calore ed elettricità delle utenze;
- la rumorosità di alcune soluzioni.

È bene ricordare che con il termine di generazione distribuita si fa riferimento a unità di generazione elettrica e, sempre più di frequente, in assetto cogenerativo aventi taglie di potenza che vanno da qualche decina di kW fino ad alcune decine di MW e sono ubicate nei pressi dell'utilizzo finale. Questa tipologia di impianti, qualora avessero una significativa distribuzione sul territorio, sono in grado di integrare sensibilmente la difficile situazione e l'assetto del sistema italiano di produzione di energia elettrica.

Oltre alla generazione distribuita, tecnologia descritta alla fine del capitolo, sono principalmente trattati i diversi modi di

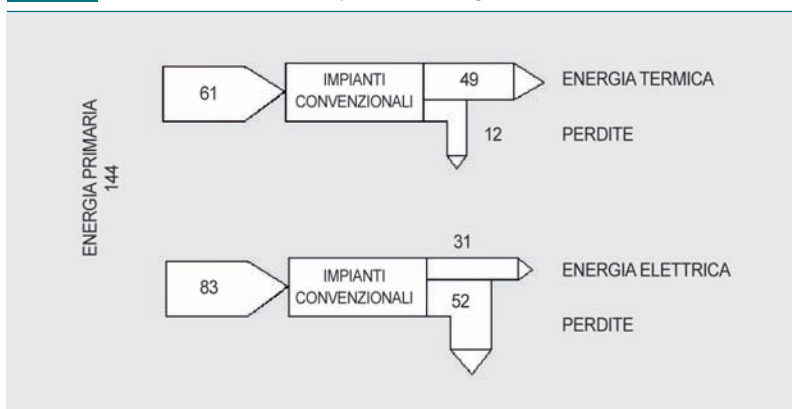
generazione combinata, strettamente legati alla decentralizzazione della generazione energetica. In particolare:

- la cogenerazione, che consiste nella produzione combinata di calore e di energia elettrica, consente una migliore utilizzazione dell'energia primaria e rendimenti complessivi più alti rispetto alla generazione separata di energia elettrica e calore.
- la microcogenerazione individua gli impianti cogenerativi di piccola e piccolissima taglia che non superano potenze dell'ordine di poche decine di kW.
- la trigenerazione è la produzione combinata di energia elettrica e calore che a sua volta viene utilizzata per fornire caldo e freddo. La produzione combinata di energia termica e frigorifera realizza un migliore utilizzo degli impianti cogenerativi nel corso dei vari mesi dell'anno.

[9.2] La cogenerazione

[9.2.1] Definizione

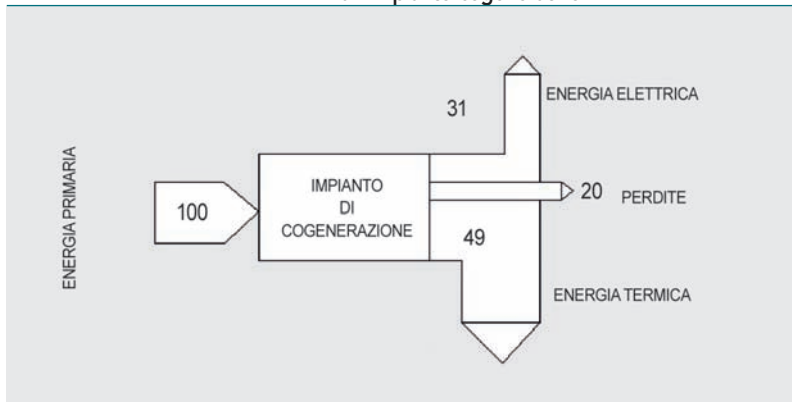
La cogenerazione è essenzialmente la generazione combinata di energia termica e di energia elettrica. Le due energie vengono prodotte contemporaneamente con un unico impianto: per questo motivo, rispetto alla produzione separata, si hanno consistenti valori di risparmio energetico e di abbattimento delle emissioni di anidride carbonica in atmosfera e quindi si favorisce la diminuzione del cosiddetto effetto serra. Le figure 9.1 e 9.2 mostrano il confronto fra produzione separata di energia termica ed elettrica e produzione delle stesse in assetto cogenerativo a parità di prodotti finali ottenuti; la diversa

Fig. 9.1 Produzione separata di energia termica ed elettrica

quantità di combustibile iniziale da immettere evidenzia la migliore efficienza dell'impianto cogenerativo.

Come si può notare dalle figure 9.1 e 9.2, per avere le stesse quantità di energia termica e di energia elettrica, un impianto di tipo cogenerativo necessita di circa il 40% in meno di energia primaria rispetto ad un impianto di produzione di tipo separato. L'efficienza generale della cogenerazione è incrementata, inoltre, da una sensibile riduzione delle emissioni di anidride carbonica (CO₂).

A tali miglioramenti ha contribuito anche

Fig. 9.2 Ripartizione produzione energia termica, elettrica e perdite in un impianto cogenerativo

lo sviluppo tecnologico che si è avuto nella costruzione dei componenti principali, fatto che ha consentito di incrementare notevolmente l'efficienza complessiva degli impianti, di ridurre i costi e di abbattere la quantità di emissioni di agenti inquinanti. Anche la realizzazione di nuove generazioni di turbine e di motori, dalle caratteristiche sempre più spinte e dall'utilizzo di nuovi materiali, ha permesso il raggiungimento di questi obiettivi. Schematicamente un sistema di produzione cogenerativo è rappresentato da un motore primo, un generatore, non presente solo nel caso vengano utilizzate celle a combustibile, un sistema di recupero termico e interconnessioni elettriche configuranti un unico sistema integrato. L'energia termica, ottenuta dal sistema di recupero termico, può essere usata direttamente, o indirettamente, per produrre ulteriore energia "termica" come verrà meglio dettagliato nel seguito.

[9.2.2]

Utilità della cogenerazione

Da un punto di vista puramente termodinamico, la cogenerazione rappresenta senz'altro un sistema più efficiente di utilizzo dell'energia contenuta nel combustibile utilizzato. Infatti, in termini di rendimento, ovvero di quanta energia viene realmente utilizzata rispetto all'energia fornita, si ha che:

- in una centrale termoelettrica si raggiunge al massimo un 55-60% (cicli combinati), ma in centrali ancora di vecchia generazione si è al 35-38%;
- in un impianto di cogenerazione si possono raggiungere anche rendimenti del 90% (tipicamente 70-85%), dove la parte elettrica raggiunge al massimo il 30%-35% e il resto è il rendimento termico.

Con l'utilizzo delle tecnologie del freddo, che sfruttano, mediante macchine ad assorbimento, una sorgente calda per raffreddare un fluido, tipicamente una soluzione in acqua di bromuro di litio, la cogenerazione migliora ulteriormente le sue possibilità di applicazione in quanto utilizza il fluido caldo che in ogni caso verrebbe disperso nell'ambiente nei periodi estivi, a condizione però che la produzione di energia elettrica sia effettuata per tutto l'anno.

Bisogna tenere presente che l'utilizzo del calore necessita di un sistema di distribuzione e se le distanze tra la centrale cogenerativa e il punto di utilizzo del calore sono troppo elevate, i costi di distribuzione e le perdite di calore risultano eccessivi: diventa di fondamentale importanza, quindi, conoscere l'effettivo utilizzo delle energie prodotte ai fini di un più corretto e conveniente dimensionamento dell'impianto stesso.

Per questi motivi, il corretto dimensionamento di un impianto di cogenerazione richiede una puntigliosa determinazione di diversi parametri quali: ore di utilizzo annue, variazioni dei carichi termici ed elettrici, costi di acquisto e di gestione. Tutto ciò al fine di determinare, caso per caso, le condizioni tecnico-economiche più adatte.

Fino a non molti anni fa, nella configurazione del sistema elettrico italiano, la fase di generazione era attuata principalmente con centrali di elevata potenza (diversi MW_e), spesso distanti dai centri abitati, per cui non aveva nessun senso parlare di recupero di calore.

Con la nascita di produttori-distributori a livello locale si è iniziato a diffondere l'utilizzo del calore mediante la realizzazione di sistemi di teleriscaldamento. Il teleriscaldamento richiede, tuttavia, notevoli

lavori infrastrutturali e necessita dell'allacciamento di un ampio numero di utenze. In generale, entrambi gli aspetti possono presentare difficoltà. Un ulteriore aspetto critico si ha nel periodo estivo quando il teleriscaldamento è inefficace, a meno che tra le utenze non si abbia necessità di energia frigorifera in quantità tali da giustificare la realizzazione di macchine ad assorbimento.

[9.2.3]

Tipologie impiantistiche per la cogenerazione

Gli impianti di cogenerazione prevedono l'utilizzo dei seguenti motori primi:

- motori endotermici,
- turbine a gas (figura 9.3),
- turbine a vapore (figura 9.4),
- celle a combustibile,
- cicli combinati (figura 9.5).

Ognuno di essi presenta caratteristiche tali da renderlo adatto a particolari classi di potenza e dove si abbia necessità di un determinato rapporto fra la potenza elettrica e quella termica generate.

Nelle tabelle 9.1 e 9.2 vengono mostrati i campi di applicazione e il confronto fra le varie tipologie. Si noti che, nel caso dei motori a combustione interna, i valori del rendimento sono riferiti al recupero di tutto il calore disponibile; nel caso in cui si sfruttino solo i gas di scarico il rendimento complessivo cala del 15-30%. Il continuo sviluppo tecnico sta portando progressivamente verso un incremento dei rendimenti elettrici ed una maggiore flessibilità di utilizzo degli impianti.

I motori a combustione interna sono adatti nei casi in cui si ha necessità di un limitato investimento iniziale e di un buon rapporto fra la potenza elettrica e quella termica generate. Tuttavia presentano alti costi di manutenzione e la necessità di

Tabella 9.1
Campi di applicazione
delle tipologie impiantistiche
per la cogenerazione

Potenza elettrica	Tecnologia impiegata
$P_e < 1$ MW	Motori a combustione interna, celle a combustibile, turbogas
1 MW $< P_e < 10$ MW	Motori a combustione interna, turbogas, turbovapore
$P_e > 10$ MW	Turbogas, turbovapore, cicli combinati

Tabella 9.2
Confronto per tipologia
impiantistica

	Motori a combustione interna	Turbina a gas	Turbina a vapore	Celle a combustibile	Cicli combinati
Rendimento complessivo (%)	70-85	75-90	70-85	70-85	60-85
Rendimento elettrico (%)	25-50	10-30	20-38	40-60	35-55
Rendimento termico (%)	30-45	60-75	35-50	35-45	10-45
Indice elettrico-termico	0,2-0,5	0,1-0,2	0,2-0,8	0,2-0,8	0,8-10,0
Investimento (€/kW _{installato})	700-900	2000-3000	500-1300	3000-4000	600-1400
Costo manutenzione (€/kW _{installato})	1,0-1,6	0,3-0,5	0,6-0,8	n.d.	0,4-0,6
Combustibili	metano, gasolio	tutti	metano, gasolio	idrogeno, metanolo, metano	metano gasolio

effettuare la manutenzione straordinaria più frequentemente degli altri sistemi. Inoltre forniscono energia termica a due temperature distinte, di solito in due circuiti separati, legate al recupero dei gas di scarico (400-450 °C) e di acqua di raffreddamento ed olio di lubrificazione (sotto i 100 °C). Pertanto va valutata caso

per caso la possibilità di recuperare tutto il calore disponibile e di raggiungere quindi la piena efficienza della cogenerazione. I motori endotermici presentano comunque il vantaggio di essere adatti a carichi variabili e sopportano meglio delle turbine arresti e partenze.

Le turbine a gas al di sotto del MW_e di potenza, generalmente indicate come microturbine, si sono rivelate sempre più competitive con i motori endotermici per le piccole taglie, grazie ai minori oneri di manutenzione ed alle emissioni di NO_x inferiori. Presentano rendimenti elettrici limitati, inferiori al 30%, e relativamente costanti al variare del carico, grazie al funzionamento a giri variabili. I costi ancora elevati e l'affidabilità ancora non verificata per tutte le marche rappresentano attualmente i maggiori ostacoli per questa tecnologia. Nelle taglie medie e grandi le turbine a gas sono una tecnologia affermata da tempo. Esse offrono la pos-

Fig. 9.3 Impianto di cogenerazione con turbina a gas

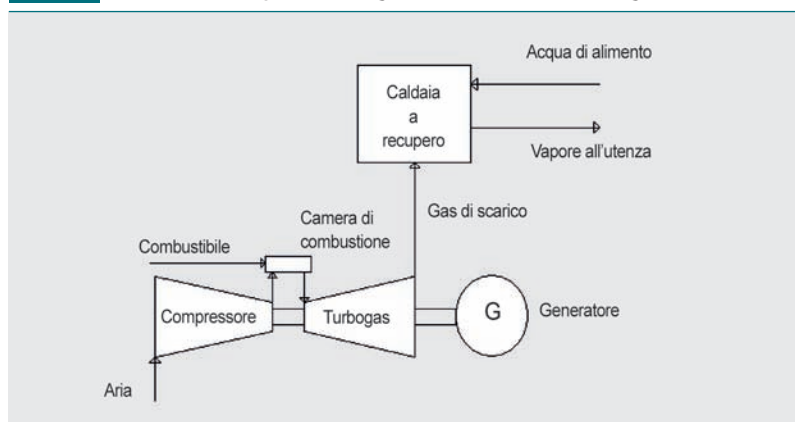
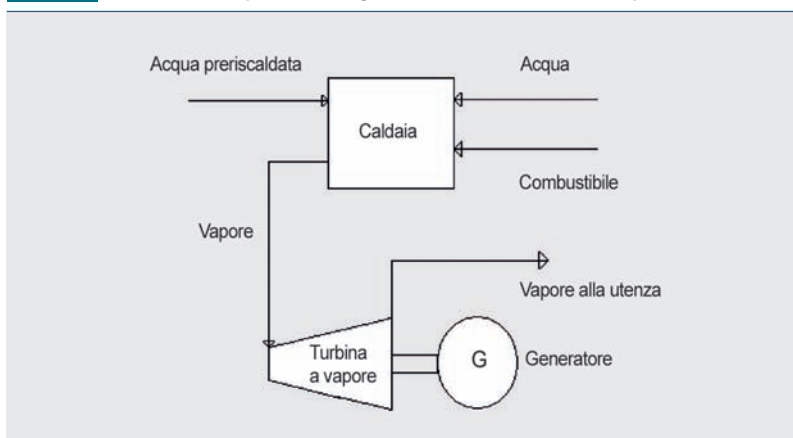


Fig. 9.4 Impianto di cogenerazione con turbina a vapore

sibilità di recuperare calore ad alta temperatura dai gas di scarico (450 °C), fatto particolarmente importante per alcuni processi industriali caratterizzati da una domanda costante di vapore o energia termica a media temperatura. Le turbine a gas, infine, per le loro caratteristiche di funzionamento non sono adatte ad una marcia di tipo intermittente.

Le turbine a vapore sono adatte solo a

taglie medie e grandi e hanno subito la forte concorrenza delle turbine a gas, rispetto alle quali presentano un rapporto fra la potenza elettrica e quella termica generata sfavorevole in un mercato che privilegia sempre più gli usi elettrici rispetto a quelli termici.

Queste turbine sono caratterizzate da elevati investimenti iniziali e da una maggiore complessità impiantistica e gestionale per la presenza del generatore di vapore e del suo circuito. Rappresentano comunque una valida soluzione qualora si dovessero impiegare combustibili diversi dal gas naturale o gasolio. Per impianti cogenerativi si utilizzano prevalentemente a turbine a vapore a contropressione rispetto a quelle a condensazione a causa della loro maggiore flessibilità pur in presenza di un minore rendimento elettrico.

Le celle a combustibile sono ancora in fase prototipale o dimostrativa, salvo il caso di quelle ad acido fosforico che non risultano però competitive in quanto ai costi. Si possono distinguere quattro tipi fondamentali di cella adattabili alla cogenerazione:

- ad elettrolita polimerico (PEFC),
- ad acido fosforico (PAFC),
- a carbonati fusi (MCFC),
- ad ossidi solidi (SOFC).

Tali tipologie di cella sono in ordine crescente di temperatura. Si passa dai 70-100 °C delle PEFC agli 800-1.000 °C delle SOFC. Le prime si sono rivelate particolarmente adatte alle applicazioni nel settore automobilistico ancor prima di valutarne il loro impiego in quello della generazione statica. Sono adatte a piccole taglie (al di sotto del megawatt) e presentano tempi di avviamento rapidi, al contrario delle celle ad alta temperatura (MCFC e SOFC), rispetto alle quali sono però sensibili al monossido di carbonio e

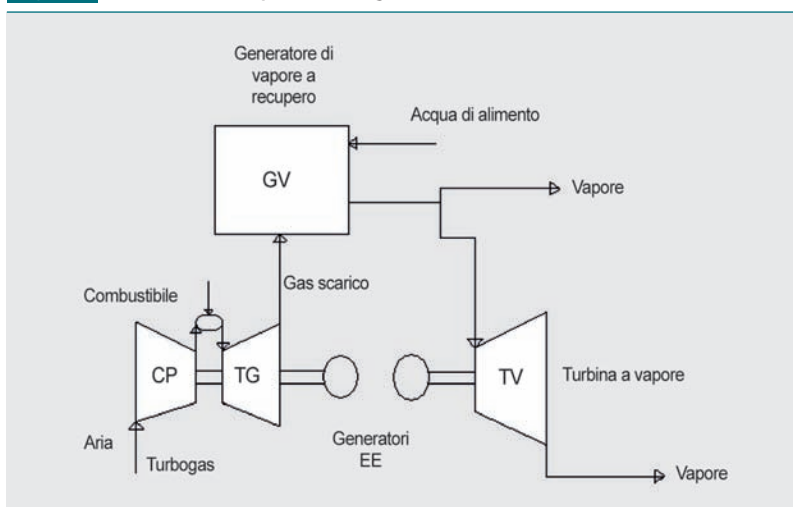
Fig. 9.5 Impianto di cogenerazione a ciclo combinato

Figura 9.6
Impianto cogenerativo
da 800 kW_e



richiedono l'uso di un reformer. La temperatura di funzionamento limita inoltre il recupero termico. Il grande vantaggio delle celle a combustibile risiede nell'essere dispositivi statici, offrendo così un'affidabilità maggiore ed oneri di manutenzione minori rispetto alle altre soluzioni. Esse presentano inoltre un rendimento elettrico molto elevato, silenziosità ed assenza di vibrazioni. I problemi fondamentali da superare sono i costi di produzione, ancora troppo elevati, e alcuni problemi di resistenza alla corrosione e/o agli stress termici per le celle ad alta temperatura.

I *cicli combinati* sono costituiti dall'unione di una o più turbine a gas o, in un prossimo futuro, anche di celle a combustibile ad alta temperatura, con una turbina a vapore a contropressione per mezzo di un generatore di vapore a recupero. Il vantaggio essenziale è rappresentato dall'elevato rendimento elettrico. Si tratta di una soluzione adatta prevalentemente alle grandi taglie, che giustificano la maggior complessità impiantistica, e ad un funzionamento continuo, anche se si è sempre più orientati a cercare di rendere il funzionamento di tali impianti il più flessibile possibile per rispondere alle future richieste dei mercati liberalizzati.

[9.2.4]

Applicazioni: il teleriscaldamento

Per teleriscaldamento s'intende un sistema che produce calore in un sito lontano da quello di utilizzazione e lo trasmette attraverso un'apposita rete di trasporto e di distribuzione. Si parla di riscaldamento urbano quando l'utenza dell'impianto di teleriscaldamento riguarda una città o parte di essa, qualunque sia la sua estensione. Il riscaldamento urbano può essere garantito da una centrale di riscaldamento, cioè da un'installazione che produce esclusivamente calore, ma sempre più spesso è combinata con una produzione congiunta di energia elettrica e calore, in tal caso si parla di cogenerazione urbana.

Il Piano energetico nazionale del 1988 attribuisce grande importanza agli impianti di cogenerazione urbana, prevedendo il raggiungimento di un risparmio annuo massimo di 1 Mtep/a a seguito della loro realizzazione.

La valutazione della convenienza di realizzare impianti di riscaldamento urbano deve essere effettuata con grande attenzione, poiché i costi sono in genere molto elevati e i tempi di ritorno dell'investimento tipicamente medi o lunghi. Situazioni

che contribuiscono a determinare l'opportunità di realizzare un sistema di riscaldamento urbano, sono:

- un'elevata concentrazione di edifici ad alta densità abitativa,
- la vicinanza della centrale di produzione ai centri di utilizzazione del calore,
- caratteristiche di clima rigido e stagione di riscaldamento lunga (elevato valore dei gradi-giorno),
- possibilità e motivazione della società che gestisce il teleriscaldamento a produrre energia elettrica o in alternativa disponibilità di risorse termiche a basso costo di utilizzazione (reflui termici, sorgenti geotermiche, biomasse, ecc.),
- facilità di installare la rete di distribuzione del calore (la situazione ideale consiste nell'intervenire in fase di realizzazione delle opere di urbanizzazione),
- assenza di metanizzazione delle utenze potenzialmente allacciabili.

L'installazione delle reti di distribuzione in zone edificate ed abitate comporta naturalmente notevole disagio per i cittadini. Una volta realizzato l'impianto urbano di solito è conveniente l'allacciamento degli edifici dotati di impianti centralizzati alla rete di riscaldamento, sia per questioni tariffarie sia per motivi di affidabilità del servizio.

Una rete può offrire, oltre al riscaldamento invernale, il raffrescamento estivo, evitando localmente la diffusione "selvaggia" dei condizionatori, causa delle interruzioni elettriche del giugno 2003.

La possibilità di utilizzare differenti fonti energetiche garantisce maggiore sicurezza di approvvigionamento e possibilità di scegliere in ogni momento la più conveniente.

I piccoli Comuni, privi di risorse geotermiche o di biomasse locali, si affidano di solito al gas naturale, le Municipalità più

grosse invece possono scegliere tra una rete molto estesa, che permette di utilizzare più fonti energetiche (come avviene nel caso di Brescia, la cui rete è alimentata da impianti che possono utilizzare rifiuti, olio combustibile, carbone e gas naturale) o più reti separate, che hanno il vantaggio di richiedere minori investimenti e rischi (si possono costruire dove c'è una congrua domanda) e di ridurre i problemi di posa delle tubazioni, ma costringono a legarsi al solo gas naturale.

Alla fine del 2005 erano teleriscaldate 57 città con una potenza elettrica installata in cogenerazione di 1.363 MW_e, una potenza termica immessa in rete di 3.035 MW_t, una volumetria totale riscaldata di circa 156 Mm³ attraverso 87 reti aventi una lunghezza complessiva di 1.667 km. Di questa volumetria, quasi la metà è installata in Lombardia, e solo il 2,5% degli impianti sono stati realizzati a sud dell'Emilia Romagna.

Gli Enti titolari dei sistemi sono n. 4 Enti Locali e n. 53 SpA/Srl. La tecnologia più utilizzata è la turbina a vapore ed il ciclo combinato, esistono tuttavia a sistemi con turbina a gas e motore alternativo, Diesel oppure a gas.

Nell'anno 2005 le centrali al servizio delle reti di teleriscaldamento in esercizio in Italia hanno prodotto 5.331 GWh elettrici e 6.262 GWh termici. L'energia utile, vale a dire al netto delle perdite di rete ed autoconsumi di centrale, ammonta rispettivamente a 5.035 GWh elettrici e a 5.500 GWh termici, corrispondente al 94% e al 88% dell'energia prodotta.

L'energia termica prodotta in cogenerazione costituisce il 57% dell'energia totale immessa in rete. L'energia di integrazione prodotta per mezzo di caldaie semplici costituisce il 26%, mentre il restante 17% è costituito da fonti rinnovabili.

Complessivamente, quindi, ben il 74% dell'energia termica immessa nelle reti di teleriscaldamento è prodotta tramite tecnologia a basso impatto ambientale. Nel 2005, i sistemi di riscaldamento urbano operanti in Italia hanno conseguito un risparmio di energia primaria di circa 474.000 tep, corrispondente a circa il 28% dell'energia consumata dai "sistemi convenzionali sostituiti" (caldaie di edificio e sistema elettrico nazionale). Il bilancio emissivo degli impianti di teleriscaldamento in esercizio nell'anno 2005 evidenzia minori emissioni di CO₂, pari a -1.846.000 t, rispetto ai "sistemi convenzionali sostituiti".

Per quanto attiene il teleraffrescamento, questo avviene in due modi:

- mediante distribuzione di acqua refrigerata prodotta presso la centrale del gestore della rete,
- mediante produzione periferica di acqua refrigerata per mezzo di gruppi frigo-assorbitori alimentati dalle reti di teleriscaldamento.

In Italia la potenza installata per questa tecnologia è ancora molto bassa e la tecnologia prevalente è quella che prevede il trasporto di calore presso l'utente e la produzione locale di acqua refrigerata mediante gruppi frigoriferi ad assorbimento, alimentati sia ad acqua surriscaldata che ad acqua calda, mentre solo in due casi è a vapore.

Il primo passo per valutare la possibilità di costruire un impianto di cogenerazione e teleriscaldamento è di individuare il bacino di utenza, verificando l'andamento giornaliero, settimanale e annuale, e le attuali condizioni economiche di fornitura energetica.

Si deve cercare, aggregando più utenze, di appiattare il profilo della curva della domanda soprattutto per la parte termi-

ca; per l'energia elettrica prodotta, la possibilità di cederla ad altre utenze o a grossisti attraverso la rete, concede maggiore libertà.

Si cercheranno utenze termiche non troppo distanti tra loro, con profili il più possibile complementari (uffici e teatri, scuole e impianti sportivi, ecc.) o con grossi carichi di base per tutto l'anno, come ospedali, alberghi, case di cura e ipermercati. L'utenza domestica è interessante per l'IVA al 10% sul servizio calore, ma per conmetterla occorre partire da quartieri di nuova urbanizzazione oppure si devono mettere in conto campagne informative con i fisiologici tempi di risposta. Sono interessanti tutte le utenze nelle quali si possa ravvisare l'uso domestico: caserme, scuole, asili, case di riposo eccetera.

Altre potenziali utenze termiche possono essere: attività del terziario, industrie non energy intensive (altrimenti avrebbero maggior convenienza a cogenerare in proprio) e depuratori per l'essiccamento dei fanghi, verificando le condizioni economiche di fornitura dei combustibili o del servizio calore.

Gli impianti sportivi, i centri di assistenza per anziani ed invalidi, ecc. hanno un costo del calore più basso rispetto alle utenze del terziario, per cui, nonostante il carico elevato sia abbastanza costante, possono rivelarsi poco convenienti.

L'Allegato I del D. Lgs. 192/2005, infine, prescrive che per le nuove costruzioni e le ristrutturazioni di edifici pubblici e privati, con superficie utile maggiore di 1.000 m², è obbligatoria la predisposizione delle opere per favorire il collegamento a reti di teleriscaldamento, nel caso di presenza di tratte di rete ad una distanza inferiore a 1.000 m ovvero in presenza di progetti approvati nell'ambito di opportuni strumenti pianificatori.

[9.3] La microgenerazione

[9.3.1] Definizione

La microgenerazione risulta essere una delle soluzioni applicabili per conseguire il risparmio energetico così come stabilito dal Protocollo di Kyoto del 1997 e con quanto prefissato in sede di Unione Europea.

Infatti, il risparmio energetico, inteso come recupero di efficienza negli usi finali, nonché attraverso la messa a punto di sistemi di produzione di energia caratterizzati da un indice di efficienza ottimale ed a basso impatto ambientale, è diventato l'obiettivo principale da perseguire per i maggiori paesi industrializzati.

Per microgenerazione si intende quella parte degli impianti di cogenerazione che forniscono potenze elettriche nominali inferiori al MWe. In realtà non è possibile stabilire un'unica definizione del termine per cui spesso si definiscono come microgenerativi gli impianti al di sotto del 200-300 kWe, così come è avvenuto nei Paesi ove maggiormente hanno trovato diffusione gli impianti di piccola taglia. A rigore di logica la microgenerazione è in grado di soddisfare un fabbisogno energetico locale; per tale motivo con gli impianti di piccola taglia non è prioritario produrre energia elettrica, ma piuttosto calore. In ogni caso nulla vieta di seguire i carichi elettrici e accumulare l'eventuale calore in eccesso, anche se parlare di accumulo diventa molto costoso.

La convenienza economica si ha se si copre un carico base con intero autoconsumo di calore ed energia elettrica; l'eventuale maggiore richiesta di calore può essere prodotto con caldaie, che funzionano anche da supporto se l'impianto

deve subire manutenzione, mentre l'allacciamento alla rete elettrica garantisce la copertura dei carichi elettrici aggiuntivi.

Il dimensionamento di un impianto con diverse unità di microgenerazione consente di accendere e spegnere un'unità quando ce n'è bisogno; non sempre, però, questo è conveniente: i costi di acquisto di un impianto di microgenerazione si ripagano su tempi ragionevolmente contenuti, 4-5 anni, con un utilizzo minimo di almeno 3.000-4.000 ore l'anno. La differenza tra teleriscaldamento e microgenerazione diffusa a livello locale, consiste nel diverso modo di utilizzo dell'energia prodotta dai due sistemi: mentre nel teleriscaldamento l'energia elettrica viene immessa direttamente nella rete elettrica ed il calore viene trasportato con le reti di distribuzione presso le utenze cittadine, nella microgenerazione, invece, il calore viene prodotto ed utilizzato direttamente presso l'utenza che ha installato la centrale e che allo stesso tempo consuma anche tutta l'energia elettrica autoprodotta.

Produrre insieme calore e elettricità con la microgenerazione, direttamente presso l'utenza, in estrema sintesi comporta i seguenti grandi vantaggi:

- risparmiare energia primaria, nell'ordine del 35-40%, diminuendo i costi energetici. Il risparmio energetico, in un paese come l'Italia, grande importatore di energia, è la prima fonte strategica di approvvigionamento;
- salvaguardare l'ambiente, emettendo in atmosfera una notevole quantità di anidride carbonica in meno;
- mancanza di perdite di distribuzione del calore dato che viene utilizzato in loco;
- mancanza di perdite di distribuzione nell'energia elettrica che viene inviata direttamente nelle linee a Bassa Tensione;

- limitazione delle cadute di tensione sulle linee finali di utenza;
 - nessuna necessità di costruire grandi locali appositi;
 - limitazione della posa di linee elettriche interrato o tralicci, a parità di risultati.
- Infine, ma non ultimo, la diffusione di questi impianti ad alto contenuto tecnologico, potrebbe contribuire alla nascita di tutta una serie di aziende dedicate alla costruzione – manutenzione – gestione caratterizzate dall'impiego di figure lavorative ad elevata professionalità.

[9.3.2]

Le tecnologie

Negli ultimi tempi nuove tecnologie e nuove macchine di piccola taglia, già ampiamente testate e collaudate, permettono di realizzare una microcogenerazione diffusa nel territorio, per rispondere alle esigenze di calore e di elettricità per varie tipologie di utenti finali.

Per quanto concerne i filoni più interessanti messi a punto dei sistemi di cogenerazione per impianti di piccola e piccolissima taglia le macchine più adatte installate presso l'utenza finale, si sono dimostrate le seguenti:

- motori endotermici per gruppi di piccola taglia,
- microturbine,
- celle a combustibile (fuel cell).

I sistemi di microcogenerazione si classi-

ficano sostanzialmente nei seguenti tipi fondamentali:

- motori alternativi, a ciclo Otto e Diesel, se a combustione interna, da cui viene recuperato il calore del circuito di raffreddamento del motore e dell'olio a bassa temperatura, da 50 a 90 °C, e quello dei gas di scarico ad alta temperatura circa 400-500 °C; sta trovando applicazione anche il motore Stirling, a combustione esterna, soprattutto per le piccole e piccolissime potenze;
- turbine a gas, i cui gas di scarico in gran volume e ad alta temperatura producono il calore richiesto in una caldaia a recupero, oppure possono essere utilizzati per altre applicazioni.

Solitamente i combustibili utilizzati nella microcogenerazione sono idrocarburi liquidi o gassosi. L'impiego di idrocarburi gassosi come il metano è attualmente preferito per diverse ragioni, tra le quali il moderato costo e il minor impatto ambientale.

Per quanto riguarda il motore Stirling la sua alimentazione può essere costituita da una differente varietà di combustibili e dalle stesse fonti energetiche rinnovabili. Bisogna considerare, infine, anche la possibilità di utilizzo di biogas; oltre ai grandi impianti per il recupero dello stesso dalle discariche, oggi esiste la possibilità di avere sistemi di piccola/ media taglia utilizzabili da utenti privati e consorzi che

Tabella 9.3
Caratteristiche di alcune
microturbine in commercio

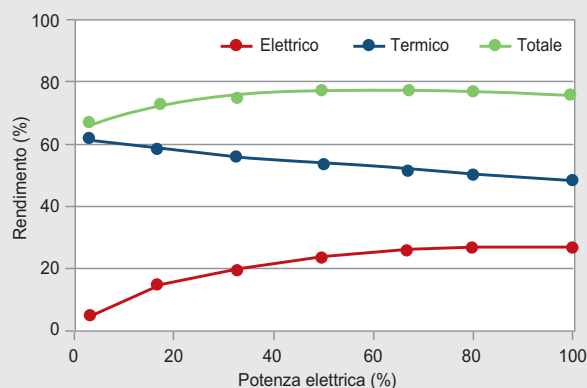
Potenza elettrica kW _e	Potenza termica kW _t	Consumo metano m ³ /h	Rendimento elettrico %	Rendimento termico %	Rendimento totale %
30	62	13	26	49	75
60	127	25	25	53	78
80	154	30	28	54	82
100	167	36	30	48	78

Figura 9.7
Disegno 3D di una
microturbina Capstone
da 30 kW



Fig. 9.8

Variazione dei rendimenti in funzione della potenza elettrica della microturbina Capstone 30



dispongono di rifiuti organici dai quali è possibile ricavare biogas.

I costruttori propongono un'ampia gamma di potenze di microturbine a gas fra i 30 e i 100 kW elettrici. Nella tabella 9.3 sono riportate le caratteristiche salienti di alcuni modelli.

[9.3.3]

Applicazioni

La microcogenerazione risulta particolarmente idonea ad essere utilizzata nei seguenti settori di applicazione:

- abitazioni domestiche e più in generale in complessi abitativi,

- centri commerciali,
- industrie,
- ospedali,
- hotel,
- piscine,
- scuole e collegi,
- edifici pubblici,
- serre.

Tale tecnologia di produzione energetica ha la caratteristica di essere molto semplice da installare, di non avere necessità di manutenzioni particolarmente spinte e soprattutto di avere grande flessibilità di utilizzo in quanto tali impianti sono modulabili, adeguandoli quindi alle necessità che via via si presentano all'utilizzatore.

Una particolare attenzione circa l'utilizzazione di questa tecnologia andrebbe posta nel settore edilizio non solo di tipo abitativo, ma comprendente anche quegli edifici e/o locali destinati ad uffici e attività commerciali e artigianali.

L'applicazione di sistemi di microcogenerazione può rappresentare un forte segmento futuro di mercato anche in previsione di dover attuare forme di risparmio energetico.

Il compito degli operatori nei prossimi anni, per favorire lo sviluppo di tale tecnologia, dovrà essere duplice:

- sviluppare ed affinare le tecnologie ad oggi disponibili;
- investire in maniera considerevole nella comunicazione di massa, per portare a conoscenza degli utenti finali i numerosi vantaggi collegati all'adozione di un sistema di produzione nuovo dell'energia, il più possibile diffuso, sino a coincidere con la domanda stessa di consumo localizzata.

Le condizioni per lo sviluppo esteso della piccola cogenerazione dovrebbero partire dalla analisi preventiva di fattibilità fin dalla fase di progettazione delle nuove unità abi-

tative o sviluppo di nuovi quartieri. L'adozione di un sistema decentrato consente di avere positive ripercussioni sulle linee di distribuzione in termini di riduzione delle perdite dovute alla distanza, della ripartizione più efficace dei carichi e del minore utilizzo di cabine di trasformazione in quanto sarà azzerato, o notevolmente ridotta la necessità del trasporto e la successiva distribuzione dell'energia con gli evidenti vantaggi correlati.

[9.4] La trigenerazione

[9.4.1]

Definizione

Numerose attività industriali e quasi tutto il settore terziario, ma non solo, hanno la necessità di dover utilizzare quantità non trascurabili di energia frigorifera, di processo e/o per la climatizzazione, cui normalmente si fa fronte utilizzando macchine frigorifere tradizionali alimentate con energia elettrica.

Le macchine frigorifere con alimentazione diversa da quella elettrica sono i chiller ad assorbimento, che hanno un vastissimo campo di applicazione e che funzionano sia con alimentazione a fiamma diretta che con l'utilizzo di altre sorgenti di calore disponibile consentendo, nei confronti dei gruppi frigoriferi con alimentazione elettrica, non trascurabili vantaggi economici.

Gli esempi che seguono evidenziano alcune delle sorgenti di calore utilizzabili.

Calore reso disponibile da processi industriali

Una notevole quantità di energia termica si rende disponibile in numerosi processi industriali, come ad esempio nell'industria

alimentare, in quella della ceramica, in quella chimica etc. e d'altra parte le stesse fabbriche richiedono per altre utilizzazioni di processo, oltre che per climatizzare gli ambienti, la necessità di disporre di energia frigorifera. La soluzione più ovvia, ma anche economicamente vantaggiosa dato che il calore è già disponibile e che altrimenti se non utilizzato verrebbe dissipato, è la utilizzazione di chiller ad assorbimento, alimentati ad acqua calda, surriscaldata o vapore, per potere disporre a costo energetico praticamente nullo di acqua raffreddata.

Teleriscaldamento e raffreddamento

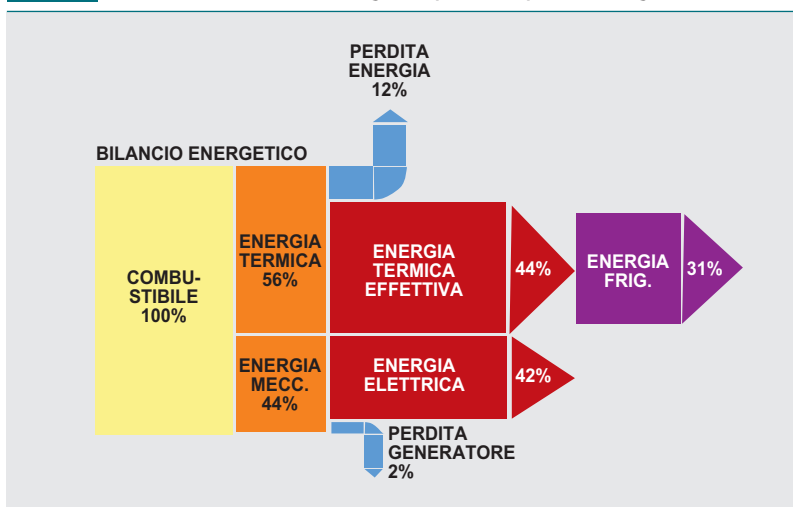
Molte città utilizzano il teleriscaldamento come forma di approvvigionamento di calore sia per uso residenziale che nel terziario. Lo stesso sistema può essere utilizzato per la alimentazione di chiller ad assorbimento consentendo anche la climatizzazione estiva, con un uso ottimizzato delle risorse energetiche ed un migliore ammortamento degli impianti destinati così ad essere utilizzati nell'arco di tutto l'anno.

Raffreddamento solare

È questa una applicazione fortemente innovativa, attraverso la quale il rispetto dell'ambiente diviene totale ed assoluto, e reso possibile dall'utilizzo dell'acqua calda a circa 90 °C proveniente dai pannelli solari o da vapore prodotto con piccoli impianti solari a concentrazione che costituiscono l'alimentazione delle macchine ad assorbimento.

La necessità di attuare forme di risparmio energetico, ma anche di evitare possibili sovraccarichi della rete in periodi estivi particolarmente caldi, ha spinto verso la ricerca di proposte alternative ai normali chil-

Fig. 9.9 Schema di bilancio energetico per un impianto di trigenerazione



ler elettrici per la produzione di freddo e una delle soluzioni più interessanti individuate è stata quella di utilizzare parte del calore prodotto con la cogenerazione per produrre anche l'energia frigorifera. Questa tecnologia permette quindi di realizzare un impianto che genera le tre diverse forme di energia, da cui il nome trigene-

nerazione, delle quali si ha immediata disponibilità e precisamente:

- energia elettrica,
- energia termica,
- energia frigorifera.

[9.4.2]

La tecnologia

I refrigeratori ad assorbimento impiegano come fluido di processo una soluzione di acqua e bromuro di litio o ammoniaca. La caratteristica tipica dei processi di refrigerazione, di sfruttare cioè il calore latente di alcuni fluidi nelle loro fasi di cambiamento di stato al fine di sottrarre calore da una sorgente fredda e trasferirlo in una a più elevata temperatura, nei sistemi ad assorbimento si realizza lasciando evaporare e condensare ciclicamente il fluido refrigerante, tipicamente acqua, contenuto in una soluzione con il fluido solvente, bromuro di litio, dal quale viene assorbito.

La soluzione acqua/bromuro di litio, ad esempio, viene riscaldata nel generatore alimentato da acqua calda o vapore o da gas esausti di combustione; qui l'acqua contenuta nella soluzione evapora ed il vapore viene immesso nel condensatore dove ritorna liquido mediante lo scambio termico con l'acqua di raffreddamento proveniente da una torre evaporativa o da una fonte a perdere. Il liquido ottenuto composto soltanto da acqua (refrigerante) viene immesso nell'evaporatore nel quale evapora a spese del calore sottratto all'acqua che si vuole refrigerare. Il vapore passa quindi nell'assorbitore dove viene riassorbito dal bromuro di litio per riformare la soluzione iniziale da immettere nel generatore. I principali componenti di un assorbitore sono:

- il generatore;
- il condensatore;
- l'evaporatore;

Fig. 9.10 Schema di funzionamento di un chiller ad assorbimento

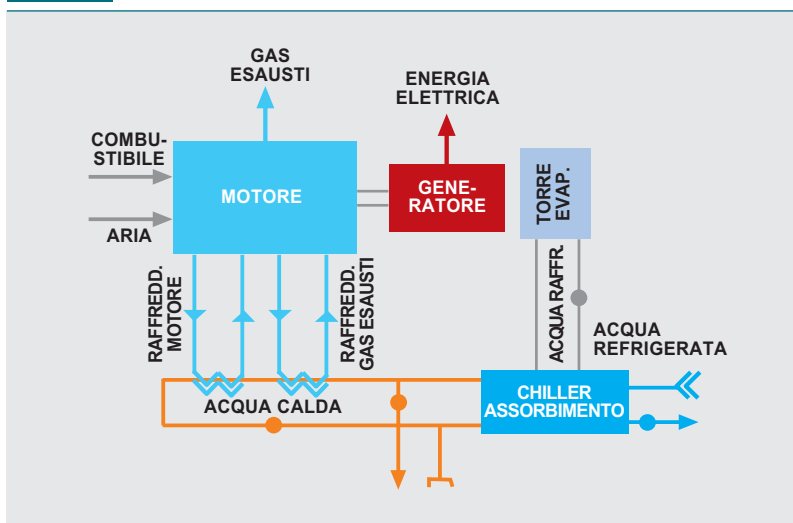


Figura 9.11
Impianto solare a
concentrazione

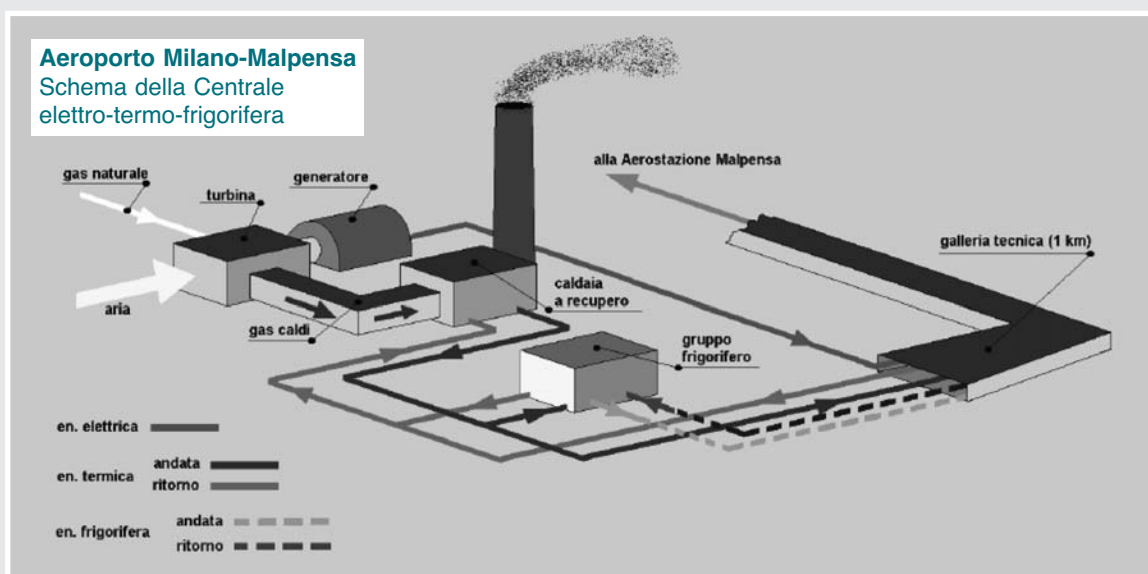


■ l'assorbitore.
Si tratta, inoltre, di una macchina di tipo statico non avendo organi in movimento all'infuori della pompa per il refrigerante e della pompa per la soluzione. L'assorbitore ed il generatore sostituiscono il compressore elettrico presente nei

normali gruppi frigoriferi a compressione di vapore. L'apporto energetico dell'elettricità richiesto nelle macchine con compressore è sostituito, nel ciclo ad assorbimento, da energia termica con temperatura a partire da 85 °C. In un sistema di trigenerazione il rendi-

Fig. 9.12

Schema dell'impianto trigenerativo dell'Aeroporto Malpensa di Milano



mento globale aumenta enormemente ottenendo risparmi energetici anche nell'ordine del 60%, si pensi, ad esempio, ad un ipermercato dove coesistono, nello stesso momento, rilevanti e costanti esigenze di energia elettrica, energia frigorifera per il condizionamento ed energia termica per il riscaldamento. Le migliori tecnologie di trigenerazione, collaudate, hanno dimostrato elevati rendimenti globali (86%, di cui 42% energia elettrica, 42% energia termica o 31% frigorifera).

È oggi possibile installare anche sistemi di trigenerazione che utilizzino esclusivamente fonti energetiche rinnovabili come ad esempio l'energia solare che permette di ottenere fluidi a temperature di circa 300 °C se l'impianto solare è a concentrazione o comunque fluidi a temperature più basse ma pur sempre utilizzabili in impianto.

[9.4.3]

Applicazioni

Le applicazioni più significative della trigenerazione si hanno in tutti quei settori dove si presenta la necessità di poter disporre contemporaneamente di energia elettrica e di energia termica e/o frigorifera da impiegare nei processi produttivi o per climatizzare ambienti sia in inverno che in estate.

Per tali caratteristiche questa tipologia di impianti si rivela particolarmente adatta ad essere impiegata nei complessi ospedalieri e negli aeroporti che si assicurano, inoltre, una continuità di fornitura di energia ponendoli al riparo di possibili black out.

[9.5]

La generazione distribuita

La generazione distribuita (GD), è un sistema di produzione di energia elettrica, con

o senza cogenerazione, realizzata da unità o gruppi di unità di piccola taglia, che in genere non superano le potenze di 10 MW di picco, situate nei pressi dell'utenza finale. Il sistema può essere isolato oppure collegato alla rete di distribuzione in modo da soddisfare la domanda anche di altri utenti vicini all'installazione. In questo caso il sistema è in grado di partecipare alle configurazioni energetiche locali, ad esempio contribuendo all'offerta energetica del distributore locale.

Una unità di generazione distribuita può avere sostanzialmente tre tipi di configurazioni, se rapportata alla rete di distribuzione, e precisamente:

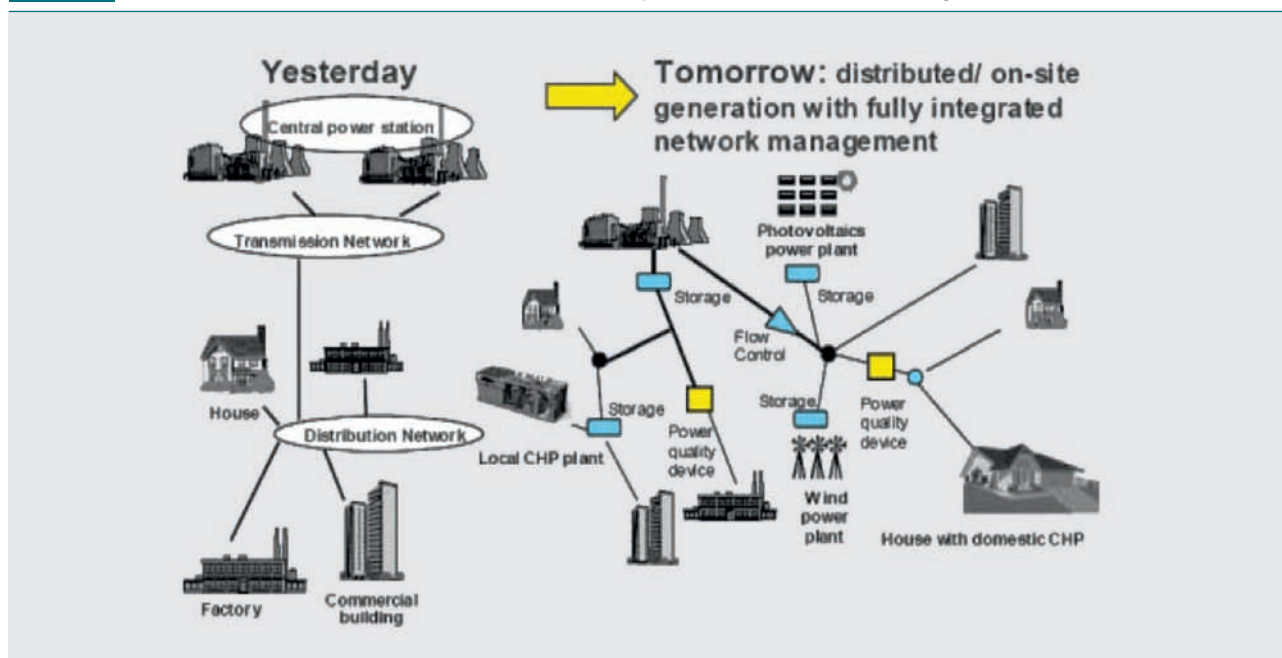
- totalmente scollegata dalla rete in modo da soddisfare esclusivamente le richieste energetiche dell'utilizzatore finale (configurazione ad isola);
- connessa alla rete di distribuzione ed all'utilizzatore, ma senza possibilità di immettere corrente verso la rete, utilizzando però la stessa solo per supplire alle carenze di generazione dell'unità (backup service);
- infine totalmente integrata nella rete di distribuzione e quindi in grado non solo di fare fronte alle esigenze del consumatore locale ma anche di contribuire alle funzioni proprie della rete e del distributore di energia elettrica locale.

Per quanto riguarda le tecnologie di produzione ne fanno parte i sistemi di generazione e cogenerazione elettrica di cui si è sinteticamente riferito nei punti precedenti e molti dispositivi a fonte rinnovabile che sono in grado di soddisfare una domanda locale di energia.

Sinteticamente tra le fonti rinnovabili utilizzabili sono compresi gli impianti mini idroelettrici, il solare termico e fotovoltaico, le caldaie a biomassa; mentre per la generazione e cogenerazione tradiziona-

Fig. 9.13

Confronto fra la situazione attuale ed un possibile scenario futuro con la generazione distribuita



le sono dispositivi per la generazione distribuita le micro e le mini turbine e tutti i tipi di celle a combustibile, i motori Stirling e le pompe di calore.

Le tendenze attuali mostrano che:

- l'energia elettrica continuerà la sua espansione in qualità di vettore energetico flessibile e fruibile;
- i bisogni crescenti di energia dovranno prevedere lo sfruttamento sempre più marcato delle fonti rinnovabili aumentando notevolmente il numero e la distribuzione spaziale delle centrali di generazione, ma anche per poter differenziare le varie fonti al fine di meglio assorbire le variazioni dei costi dei combustibili fossili;
- la comparsa sul mercato di nuove tecnologie di produzione dell'energia elettrica, insieme alla completa liberalizzazione della sua distribuzione saranno da stimolo per quegli utenti che vorran-

no autoprodurre l'energia di cui hanno bisogno.

Il possibile e sempre più probabile diffondersi della generazione distribuita, anche con le tipologie impiantistiche evidenziate nei punti precedenti, quindi non solo finalizzate alla produzione di energia elettrica, contribuirà in maniera sostanziale ad un profondo mutamento della situazione cui siamo da tempo abituati e riassumibile nelle fasi generazione – trasporto – distribuzione-utilizzazione.

Nella parte che segue vengono sinteticamente riportate le caratteristiche delle varie tecnologie che è possibile utilizzare per realizzare impianti di produzione di energia.

Motori a combustione interna

Tecnologia ormai matura. Una vasta gamma di costruttori propone i propri modelli in un intervallo di potenza molto

ampio, da 3 kW fino a 20 MW per i motori Diesel, da 5 kW fino a 5 MW per i motori a gas. I rendimenti elettrici possono raggiungere, per le taglie di potenza più elevate, tipicamente sopra 1 MW, anche il 40%; i motori di piccola taglia hanno efficienze intorno al 25%. Con questi motori è possibile produrre elettricità e calore con efficienze che sfiorano il 90%. Sono dunque particolarmente adatti per le applicazioni che prevedono la cogenerazione anche se l'energia termica recuperata è di qualità non troppo elevata dato che solo il calore recuperato dai gas di scarico è ad alta temperatura.

Turbine a gas

Tecnologia anch'essa matura. Il numero di costruttori è però inferiore a quello dei motori alternativi, in quanto i costi per produrre un turbogas, soprattutto quelli di taglia più grossa, sono difficili da sostenere. Il mercato delle turbine a gas si rivolge ad utenze di taglia più elevata, comprese tra le centinaia di kW e le centinaia di MW: sono in commercio, per impianti di generazione distribuita, turbine fino a 30 MW di potenza. Attualmente le turbine raggiungono efficienze tra il 30% e il 40%, o maggiori nei sistemi con recupero di calore. Efficienze termiche complessive dell'80% sono piuttosto comuni.

In alcuni casi si possono raggiungere efficienze del 90%. La turbina a gas presenta dunque una spiccata propensione al recupero di calore, considerando inoltre che il calore recuperato da un turbogas è calore di alta qualità, disponibile a temperature oltre i 500 °C.

Microturbine

La diffusione delle microturbine risulta ancora relativamente bassa. I prezzi di

queste macchine sono ancora poco competitivi, circa 1.000 €/kW. Le microturbine occupano attualmente la fascia di potenza elettrica compresa tra decine e poche centinaia di kW; le realizzazioni con rigeneratore presentano rendimenti nell'intervallo tra 26% e 33%, quelle senza non vanno oltre il 20%. Le applicazioni in configurazione di cogenerazione risultano quelle che attualmente presentano prospettive di maggior penetrazione delle microturbine nel mercato della generazione distribuita.

Celle a combustibile

Attualmente sono disponibili quattro tecnologie impiegabili nella generazione distribuita che si differenziano per il tipo di elettrolita e per le prestazioni:

- le celle ad acido fosforico (PAFC) sono in fase di commercializzazione;
- le celle a membrana a scambio di protoni (PEMFC) sono prossime alla commercializzazione;
- le celle a carbonati fusi (MCFC) e le celle a ossido solido (SOFC) sono in fase dimostrativa e di test;

Le celle a combustibile hanno un'efficienza che va dal 30-40% per le PAFC e le PEMFC al 50-60% per le MCFC e le SOFC. Recuperando il calore prodotto, le celle a combustibile possono raggiungere un'efficienza superiore all'80%. I costi d'impianto di queste tecnologie sono attualmente troppo elevati, non meno di 5.000 €/kW; per questo motivo sono ancora poco competitive in ambito di generazione distribuita, oltre al fatto che l'affidabilità e la durata di queste macchine è ancora da dimostrare.

Generatori fotovoltaici

Esistono in commercio due differenti tecnologie: quella a cristalli di silicio e quel-

la a film sottile. La prima consente di raggiungere efficienze intorno al 19% o 15% a seconda che si tratti di silicio mono-cristallino o poli-cristallino. La seconda tecnologia ha rendimenti più bassi (inferiori al 9%), ma ha il vantaggio di comportare un consumo di silicio assai limitato, che in un futuro potrebbe risultare una scelta vincente per ridurre i costi di produzione dei moduli.

Turbine eoliche

La turbina eolica più diffusa è quella ad asse orizzontale. Turbine di questo tipo possono raggiungere potenza elettrica nominale fino a 3.600 kW. La taglia di potenza attualmente più richiesta dal mercato è più o meno intorno al MW. Il rendimento di una macchina da 1 MW supera il 30%. Il rotore può essere costituito da una, due o tre pale.



Edito dall'ENEA

Unità Comunicazione

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - Roma

www.enea.it

Edizione del volume a cura di Antonino Dattola

Finito di stampare nel mese di Ottobre 2008
da Fabiano Group Srl – Canelli (AT).